DOI: 10.3901/JME.2019.01.189

面向航空发动机的镍基合金磨削技术研究进展*

丁文锋 苗 情 李本凯 徐九华
(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要: 磨削加工是制造航空发动机镍基合金零件的重要方法。为进一步提高镍基合金磨削加工的材料去除效率、提升工件表面质量,国内外学者开展了诸多基础理论与工艺探索工作。在概述镍基合金材料磨削加工技术发展过程的基础上,全面总结了国内外学者在镍基合金材料磨削去除机理、磨削工艺特性、磨削加工新方法等方面的主要研究成果,并对镍基合金磨削加工技术的难点与发展趋势进行了展望。

关键词: 镍基合金; 磨削加工; 材料去除机理; 砂轮

中图分类号: TG4

Review on Grinding Technology of Nickel-based Superalloys Used for Aero-engine

DING Wenfeng MIAO Qing LI Benkai XU Jiuhua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: Grinding plays the critical role in manufacturing the aero-engine components composed of nickel-based superalloys. In order to further improve the material removal rate and workpiece quality, a large number of researches on grinding technology of nickel-based superalloys are conducted in terms of the fundamental theory and process expending. In this review article, the basic principle and development process of grinding are firstly introduced briefly. Then, the technologies are reviewed detailed concerning the material removal mechanism, the grinding characteristics, and the novel application type of grinding for nickel-based superalloys. Finally, the development trends during grinding of nickel-based superalloys are proposed as well as the difficulties in grinding of such materials.

Key words: nickel-based superalloy; grinding; material removal mechanism; grinding wheel

0 前言

镍基合金自问世以来,凭借优异的抗热疲劳性能、高温强度、耐腐蚀性、抗冲击性、以及抗蠕变性能,可在复杂环境下长期服役,尤其在高温氧化和燃气腐蚀的恶劣环境中综合性能表现突出^[1-3],已被广泛应用于航空发动机中温度最高、应力最复杂或者说工况条件最恶劣的位置^[4-5](图 1),例如燃烧室与涡轮部分,甚至包括压气机后几级高压叶片。在现代航空发动机中,镍基合金材料的用量已占发动机总重量的 40%~60%。

图 1 镍基合金在航空发动机中的应用^[6]

需要指出的是,随着航空发动机推重比要求的不断提高,零件形状越来越复杂,组织结构完整性要求越来越高,航空发动机用镍基合金材料的承温能力要求也逐步提高,因此近年对镍基合金的研究越来越深入(图 2)^[8]。具有较好物理力学性能的变形镍基合金,成为了早期航空发动机涡轮叶片的重要

* 国家自然科学基金(51775275)、江苏省研究生培养创新工程(KYCX17_0245)和南京航空航天大学博士论文创新与创优基金(BCXJ17-04)资助项目。20180222 收到初稿,20180609 收到修改稿

材料。随后,变形镍基合金逐步被铸造镍基合金取代,这是由于铸造镍基合金成形较易,并且成形工艺过程允许添加多种合金化元素以提升材料性能,这样通过合金强化和工艺强化获得的铸造镍基合金的综合性能相比于变形镍基合金获得大幅提升;不仅如此,使用铸造技术可将涡轮叶片做成空心结构,有利于复杂结构件制造。然而,普通铸造镍基合金仍存在一定缺陷,如等轴晶铸造镍基合金由于含有垂直于主应力方向的横向晶界,在高温复杂应力作用下,容易产生高温蠕变和热疲劳破坏的问题。另外,定向凝固镍基合金承温能力相对而言仍然有限。为了消除镍基合金对空洞和裂纹敏感的横向晶界,并提高叶片工作寿命,在定向凝固技术进一步发展的基础上,通过添加稀土元素寻求合金的最佳性能,具有更大优势的单晶合金材料应运而生(图3)^[9]。

图2 我国主要镍基合金的研制和发展趋势^[6]

图3 铸造镍基合金主要性能对比^[7]

镍基合金,尤其是铸造镍基合金中诸多的强化项,显著提高了材料的高温持久强度,使得镍基合金的抗剪切能力和抗磨蚀能力大幅提升。但是,镍基合金的物理力学性能优势也给该种材料的机械加工带来了不利影响,致使镍基合金成为了一种典型的高强韧性难加工材料^[10]。原因在于,镍基合金较高的屈服强度,导致去除材料时需消耗较多的能量^[11];导热系数较低,使得材料去除过程中产生的热量容易聚集,造成被加工零件形成局部高温,引起工件表层高的温

度梯度和应力,再加之材料加工硬化倾向严重,大量的热聚集甚至造成工件表面出现烧伤或龟裂现象,加工表面完整性通常难以保证^[12]。此外,高温合金中Ti、Al等亲氧元素极易氧化,高温时易与刀具材料发生化学反应,使得刀具发生严重的黏附、堵塞;合金中含有的很多由金属间化合物、碳化物和硼化物等强化相构成的硬质点又加剧刀具磨损,这些因素均缩短了刀具寿命,降低了加工表面质量^[13]。

因此,与其他难加工材料机械加工类似^[14-21],航空发动机制造企业在加工镍基合金时,往往采用比较保守的标准来修正刀具的传统失效判据,以至于很多刀具的服役寿命相比于常规刀具磨损失效阈值大幅降低,以此保证某些关键零部件合格的表面质量不受磨损刀具加工影响^[14]。有鉴于此,近年来,国内外航空发动机制造领域的研究学者和工程技术人员致力于开发各种结合了机械能去除、光热能去除、超声能、化学能去除等工艺方法,以此实现镍基合金零件的高效精密加工。

航空发动机涡轮叶片一般包括叶型、榫齿、缘板等^[22]。以镍基合金涡轮叶片(图4)加工为例,目前主要有特种加工方法和机械加工方法^[22]。其中,特种加工方法包括电解加工(Electrochemical machining)^[23-24]、电火花加工(Electrical discharge machining)^[25]、增材制造(Additive manufacturing)^[26-27]等,机械加工方法包括拉削、铣削和磨削加工等。特种加工方法大多应用于叶片的整体加工,机械加工方法在叶片榫齿成形加工中应用较多。表1总结了面向航空发动机镍基合金叶片的不同特种加工方法与机械加工方法的工艺特点。其中,磨削加工叶片榫齿时,首先通过用与叶片榫齿剖面形状相同的金刚石成形滚轮,将砂轮修整成榫齿轮廓的形状,再用成形砂轮磨削加工出榫齿。相比于其他加工方法,这种方法具有加工精度高、工件表面质量好的优点。不仅如此,文献[12,28]还指出,与成形铣削相比,缓进深切磨削加工镍基合金叶片枞树型榫齿可节约工时40%;与先电解加工再进行精磨的加工方法相比,可减少工时70%、降低成本50%。一般而言,针对航空涡轮发动机特殊工况条件,通常要求镍基合金零件必须具有高的加工精度、好的表面质量和高的抗疲劳性能等,如图5所示。尽管在过去几十年用于制造航空涡轮发动机零件的特种加工技术取得了快速发展,并逐渐获得认可,但磨削仍然在航空发动机镍基合金关键零部件的加工制造中占据着相当重要的位置。这主要是由零件严格的尺寸公差($<10\ \mu\text{m}$)、低表面粗糙度($R_a < 0.5\ \mu\text{m}$)要求和高表面质量完整性所决定的^[35]。因此,磨削目前仍被认为是实现航空发

动机镍基合金零部件高性能加工的重要方法。

本文在概述磨削加工技术的基本原理和发展基础上，全面综述近年来面向航空发动机的镍基合金材料磨削技术研究进展，着重总结镍基合金材料磨削去除机理、磨削工艺特性、磨削加工新形式等几方面的研究成果，并对镍基合金磨削加工技术的难点及其发展趋势进行展望。

图 4 航空发动机不同叶片及叶盘组合^[15]

图 5 加工质量特性对航空发动机零件服役性能的影响^[36]

表 1 航空发动机镍基合金涡轮叶片的主要加工方法及其工艺特点

加工方法	加工效率	加工精度	加工表面质量	其他特点	参考文献
<div> 电极 夹具 工件 电解加工</div>	高	$\pm 50\text{ }\mu\text{m}$	$R_a \leq 1.6\text{ }\mu\text{m}$ ，无变质层	电极几乎无磨损，对环境有影响	[22-24,29]
<div> 电极丝 电火花加工</div>	中	$\pm 5\text{ }\mu\text{m}$	$0.2\text{ }\mu\text{m} \leq R_a \leq 3.2\text{ }\mu\text{m}$ ，易产生变质层、微裂纹	电极易损耗，对环境有影响	[25,30]
<div> 10 mm 增材制造</div>	低	$\pm 350\text{ }\mu\text{m}$	$3.2\text{ }\mu\text{m} \leq R_a \leq 12.5\text{ }\mu\text{m}$ ，易出现变形	加工尺寸有限，工件固定较困难	[27,31]
<div> 拉削</div>	中	$\leq 10\text{ }\mu\text{m}$	$0.8\text{ }\mu\text{m} \leq R_a \leq 1.6\text{ }\mu\text{m}$ ，表面易产生鳞刺	刀具磨损快	[32,33]
<div> 铣削</div>	低	$\leq 10\text{ }\mu\text{m}$	$0.4\text{ }\mu\text{m} \leq R_a \leq 3.2\text{ }\mu\text{m}$	刀具磨损快，加工效率较低	[12, 24,34]
<div> 磨削</div>	中	$\leq 5\text{ }\mu\text{m}$	$R_a \leq 0.6\text{ }\mu\text{m}$ ，形成残余压应力	普通磨料易磨损	[5,35,36]

1 磨削加工技术发展

如图 6 所示,磨削的实质是依靠砂轮工作面上无数微小磨粒切削刃的协同作用实现材料去除目的^[37]。磨削弧区内,由于砂轮高速旋转时单颗磨粒与工件的接触深度处于不断变化之中,导致磨粒与被加工材料之间的相互作用机制发生变化,因此可将磨屑形成过程分为三个阶段:划擦、耕犁和切削,磨屑尺寸通常较为微小^[12]。由于磨削加工的这些特点,磨削技术出现以来常常被用于材料加工的最后工序,用于保证工件的表面质量和加工精度^[38-43]。与车削、铣削、钻削等其他加工工艺相比^[44-50],传统磨削加工表面通常具有低表面粗糙度、高加工精度等优点,但同时也存在加工效率低、单位体积材料去除能耗高等缺点^[10,12]。

图 6 磨削加工材料去除过程示意图^[12]

为了克服传统磨削加工效率低的缺点,众多学者尝试从提高砂轮的磨粒平均单颗磨粒切厚经典思想(式(1))中寻找提高磨削加工效率的方法^[12],同时期望获得低磨削比能。

$$\bar{a}_g = \sqrt{\frac{1}{N_d C} \cdot \frac{v_w}{v_s} \cdot \left(\frac{a_p}{d_s}\right)^{1/2}} \quad (1)$$

式中, $\bar{a}_g$ 为平均单颗磨粒切厚, N_d 为砂轮动态有效磨刃数, C 是常数, d_s 、 a_p 、 v_w 、 v_s 分别表示砂轮直径、磨削深度、工件进给速度和磨削速度。

受益于碳化硅和氧化铝等普通磨料性能的提升^[51],特别是立方氮化硼(CBN)、金刚石等超硬磨料工具(图 7)的研制^[52-53],高速与超高速磨削、高效深切磨削、快速点磨削等加工工艺获得了迅猛发展(图 8)^[51-55]。与之相适应的磨削加工装备和高性能磨削工具也如雨后春笋般被开发出来^[10,56-58]。例如,德国 Guhring Automation 公司开发了当时世界上首台高效深切磨床,功率为 60 kW,磨削速度可达 209 m/s;美国 Edgetek Machine 公司推出了超高速磨床(磨削速度可达 203 m/s);日本丰田工机开发了超高速外圆磨床,允许使用磨削速度达 200 m/s,可用于高效高精度柔性加工;日本三菱重工推出了 CNC

超高速磨床,可达到 200 m/s 的磨削速度;国内,湖南大学研制了磨削速度为 314 m/s 的数控超高速平面磨床。与此同时,德国亚琛工业大学、美国马萨诸塞州立大学、日本 Noritake 公司等也开发出可用于高效磨削加工的砂轮。国内南京航空航天大学开发了具有高效磨削能力的热管砂轮^[59],和采用复合材料 CFRP 制造的圆周转速可达 300 m/s 的超高速磨削砂轮^[60]。

图 7 磨削工具的发展^[52]

图 8 磨削工艺的开发^[58]

由于超硬磨料砂轮的研制和应用、高速/大功率/精密机床及数控技术开发、新型冷却技术和砂轮修整技术的发展、高速/超高速磨削和高效深切磨削技术的应用、磨削自动化和智能化等技术的发展,奠定了磨削加工在机械制造领域的基础地位。如此以来,现阶段的磨削加工技术几乎可以不受镍基合金材料物理力学性能的影响而实现高效去除的目的。

表 2 和表 3 分别显示了常用磨削工艺可以达到的材料去除率与表面粗糙度。随着航空航天、化工、核能、精密仪器制造等领域对高性能材料的应用需求越来越广泛和迫切,先进装备与磨削工具制造技术的提升和先进磨削工艺的开发也促进了磨削加工在人工晶体^[61]、单晶硅^[62]、玻璃^[63]、先进陶瓷^[64]、铁氧体^[65]等硬脆材料或复合材料^[66],镍基合金^[67]、钛合金^[68]及金属间化合物^[69-70]等强韧性材料加工方面的大规模应用。可以说,磨削也是实现这些难加工材料高品质加工的可靠方法。

表 2 常用磨削工艺可达到的材料去除率^[10]

项目	普通往复磨削	缓进深切磨削	高速磨削	高效深切磨削
磨削深度 a_p	小	大	小	大
/mm	0.001~0.05	0.1~30	0.003~0.05	0.1~30
工件进给速度 v_w	高	低	高	高
/(m/min)	1~15	0.05~0.5	1~15	0.5~10
磨削速度 v_s	低	低	高	高
/(m/s)	15~40	15~40	60~200	60~200
材料去除率 Q_w	低	低	中	高
/(mm ³ /(mm·s))	0.05~2	1~10	≤60	50~2000

表 3 常用磨削工艺可获得的表面粗糙度^[12]

磨削方法	普通磨削	精密磨削	超精密磨削	镜面磨削
表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	0.16~1.25	0.04~0.16	0.01~0.04	≤0.01

2 镍基合金材料磨削加工去除机理

2.1 镍基合金磨削去除机理研究主要方法

研究镍基合金材料的磨削去除机理对深刻认识磨削去除过程, 解决镍基合金的磨削加工难题, 以及获得满足设计要求的加工表面质量具有重要意义。可以认为, 镍基合金零件磨削加工的所有工艺特性都是伴随材料去除过程而产生的。如前所述, 磨削加工的材料去除过程包括划擦、耕犁和切削三个阶段^[10,12]。划擦主要发生在磨粒与工件接触的初期阶段, 作用区域较小, 在工件表面只发生弹性形变。然而, 随着切深加大, 材料变形进入到弹性和塑性区域, 此时仍然没有发生材料去除现象, 这个阶段称为耕犁。当剪切应力持续增加, 超过材料的断裂极限导致材料从基体材料表面撕裂下来形成切屑, 这个过程称为切削。划擦显然不利于材料去除, 耕犁对能量消耗较大, 也不利于提升工件表面质量和磨削效率。因此, 国内外学者在努力获取材料去除过程中更多有效信息的基础上, 理清材料磨削去除过程及其发生划擦-耕犁-切削转变的影响因素, 期望能从最终加工工艺上控制材料发生划擦和耕犁的时间, 使磨粒尽快进入切削阶段, 从而提高材料去除效率。目前, 用于研究镍基合金材料磨削加工去除机理的方法主要有以下四种。

(1) 单颗磨粒磨削试验方法。

这种方法最明显的优势是将复杂的砂轮磨削简化为单颗磨粒磨削过程。因而研究材料磨削去除机理, 所采用的手段多集中在单颗磨粒磨削实验, 这也是从微观尺度理解材料去除过程行之有效的方法之一^[71-73]。通常, 采用的单颗磨粒为金刚石、CBN、刚玉(Al_2O_3)等。磨削过程中, 磨粒形貌、几何尺寸、

磨削刃状态等因素对划擦效果的影响较大。此外, 磨削用量对材料去除机理的影响也较为显著, 甚至导致材料去除方式发生转变, 因此亦有学者分别对普通速度与高速磨削条件下的镍基合金材料去除机理进行了探索。单颗磨粒磨削镍基合金已有研究重点集中在磨痕形貌、磨屑形成过程及其表现形态、磨削力、隆起比等材料去除过程信息。

图 9 显示了常用的单颗磨粒磨削镍基合金试验方法。其中, 图 9a 为等切厚磨削, 固定于砂轮表面上的单颗磨粒磨削预先加工好的弧形工件, 这样就保证了形成的磨屑等切厚; 图 9b 为三角形切厚磨削, 通过放置在工件底部的垫片使工件表面倾斜一定角度, 这样可使磨粒磨削过程中的切厚缓慢变化, 进而获得不同厚度的磨屑; 图 9c 为连续变切厚磨削, 通过两次预留角度的干涉磨削, 保留了材料被磨削去除的过程特征, 从而获得不同切厚的楔形状磨屑。表 4 总结了镍基合金的常用单颗磨粒磨削试验方法的优缺点。

图 9 镍基合金的常用单颗磨粒磨削试验方法

(2) 磨削表面形貌分析方法。

磨削表面形貌是砂轮工作面上成千上万颗磨粒协同作用于工件后的综合结果反映。大量磨粒共同划擦、耕犁和切削工件, 且过程中伴随有复杂的力-热耦合作用, 最终在工件表面留下作用痕迹(图 10)。

表 4 常用单颗磨粒磨削试验方法优缺点

试验方法	优点	缺点	参考文献
等切厚磨削	设计简单, 切厚恒定	切厚不可变, 无法观测磨削成屑过程, 未考虑磨粒动态磨损	[74]
三角形切厚磨削	可改变磨粒切厚	磨屑厚度变化快慢不易控制, 无法观测磨削成屑过程, 未考虑磨粒动态磨损	[75-77]
连续变切厚磨削	保留完整磨削过程痕迹, 可连续改变磨粒切厚	未考虑磨粒动态磨损	[78]

因此, 材料磨削去除过程的很多信息蕴含在加工表面形貌及其特征中。不仅如此, 通过对比不同磨削条件下的镍基合金材料加工表面形貌, 有助于深刻理解镍基合金在不同磨削条件下的去除机理。这也是认识材料磨削去除过程最简单和最直观的方式。

图 10 Inconel718 镍基合金磨削表面形貌^[79]

(3) 工件毛刺及磨屑形态观测方法。

毛刺是磨削加工过程中未完全去除的残留工件材料, 而通过磨粒微切削作用后脱离工件基体的材料称为磨屑, 如图 11 所示。毛刺的一些特征信息可用于反映砂轮与工件材料相互作用时的性能, 如磨屑的形成与材料受到剪切应力时所能承受的强度有关, 临界成屑的切厚往往用于反映能够产生切削作用的最小切入量。在镍基合金磨削过程中, 临界成

图 11 Inconel718 镍基合金磨削形成的毛刺与磨屑形貌

屑切厚、磨屑的形态与尺寸通常取决于磨削用量和磨粒切削刃状况。因此, 通过观测镍基合金磨削过程中形成的毛刺与磨屑, 可进一步获取磨粒与工件作用过程中的信息, 有助于揭示材料在不同磨削条件下的成屑机理。

(4) 有限元仿真分析方法。

由于切磨削加工时材料去除过程是在瞬间完成, 而且伴随有复杂的能量转换, 通过肉眼甚至仪器很难观测到真实情况^[82-85]。借助于有限元仿真分析技术, 现阶段可以有效反映单颗磨粒磨削时工件材料变形的具体过程(图 12)。该方法的成功运用可以帮助研究人员更好地获取并理解镍基合金材料磨削去除过程中磨屑的形成过程(如材料被划擦、耕犁及切削去除)以及表现特征(如锯齿状磨屑、成屑频率)等有效信息, 而且也可获得磨粒形貌(如磨粒初始形貌、磨损形貌等)对材料去除行为的影响规律。但受限于计算机性能、参与磨削的磨料数目繁多以及砂轮磨削过程的复杂性, 目前有关整个砂轮磨削镍基合金过程材料去除行为的有限元仿真研究鲜见报道。

图 12 Inconel718 镍基合金磨削加工有限元仿真^[86]

2.2 镍基合金磨削去除机理研究主要结果

(1) 镍基合金材料磨削去除过程。

在镍基合金材料磨削去除过程中, 存在三个典型的阶段, 即划擦、耕犁和切削, 如图 13 所示。滑擦阶段, 磨粒与工件初始接触, 磨粒切削刃导致工

图 13 完整的 Inconel718 镍基合金磨削过程痕迹^[87]

件表面条纹痕迹细小,且间距不均匀;耕犁阶段,由于磨粒切削深度增加,工件表面隆起条纹明显,但高度较低,材料堆积磨粒两侧形成连续且间距均匀的条纹痕迹;成屑阶段,磨粒侵入工件深度进一步加大,一部分材料被磨粒推挤并在磨粒两侧形成较高的隆起高度,另一部分材料在磨粒底部与工件接触挤压形成光滑区域,导致磨粒前方部分材料远离工件基体形成磨屑,条纹痕迹不连续。

当有多颗磨粒共同作用于镍基合金材料表面时,由于磨粒前后运动轨迹重合,很难观察到完整的磨削去除过程。但镍基合金材料磨削表面还是呈现出一定特征,如图10所示,均可见材料划擦、撕裂、挤压隆起、切削等特点,砂轮磨削镍基合金工件表面也是划擦、耕犁和切削磨削三阶段的集中反映。

(2) 磨削用量对材料成屑去除的影响。

磨削速度被认为是引起材料加工特性转变以及由此引起材料成屑机制改变的重要原因之一^[87]。针对镍基合金材料,磨削速度对材料磨屑形成过程作用显著,不仅影响材料磨削去除三阶段的表现形式,也对临界成屑切厚、磨屑表现形态具有重要影响。磨削过程中,通过观察不同磨削速度下镍基合金材料在磨削力、磨削痕迹特征、临界成屑厚度等方面的变化,可以确定材料磨削成屑机制发生转变的拐点,而引起该变化的原因通常被认为是材料应变率强化与热软化两效应主导地位的相互转换。如图14所示,磨削速度 $v_s=100$ m/s 时, Inconel718 镍基合金的磨削成屑机制出现拐点。当磨削速度 $v_s<100$ m/s 时,材料的应变率效应显著,热软化效应次之;当磨削速度 $v_s>100$ m/s 时,材料应变率与热软化影响程度发生转换,此时热软化效应处于支配地位。在这样的转变过程中, Inconel718 镍基合金材料的成屑难易程度也发生改变,磨屑形态随之发生变化。也就是,普通速度磨削条件下材料变形速率较低,此时材料发生划擦和耕犁的比例较大,降低了材料成屑的效率^[88],所以临界成屑厚度较大;高磨削速度条件下材料剪切频率可达 70 MHz,片层状磨屑明显,有助于材料塑性变形发生集中剪切滑移形成磨屑^[81],但由于存在热软化效应,临界成屑厚度也较大。从磨屑形成条件的角度来说,镍基合金材料的热导率较低,且在高温下仍表现为高强度和高硬度,因此当磨粒高速冲击工件材料时,极高的应变率导致材料在极短的时间内发生塑性变形并产生大量的热,这些热量不能有效传出而大量积聚在磨粒与工件交界处的剪切滑移区,此时镍基合金材料以绝热剪切形式成屑(图14c)。该过程已被大量仿真和磨削

试验所证实。

图14 磨削速度对 Inconel718 镍基合金材料成屑机制的影响

磨削深度(也称切深)是另外一个影响材料成屑过程的因素^[89-92]。隆起比是磨粒磨削过程中材料隆起体积与切削体积之比(图15),它在一定程度上可以用来反映材料磨削过程的去除信息。在磨削 Inconel718 镍基合金过程中,增大磨削深度可有效降低磨痕隆起比,使得材料主要以切削形式去除,这也是提高材料去除效率的有效途径。

(3) 磨粒形貌对材料成屑去除的影响。

尽管磨粒原始形貌可具有较规则的形状,但是在磨削加工过程中,磨粒不可避免地产生磨损,导致磨粒形貌发生演变,这种变化受磨削用量条件(如单颗磨粒切厚、磨削速度等)的直接影响,成为材料磨削去除机理研究困难的主要原因之一^[93]。镍基合金磨削过程中,由于材料的高强韧特性导致磨粒磨损严重,因而磨粒去除材料的行为和能力时刻处于变化之中。CHEN 等^[92]指出,磨粒可能由单刃变为多刃,由锋利变为次锋利,随后变为磨钝状态。在磨削过程中,同一颗磨粒上也可能出现锋利区域和钝化区域,因此即使在同一颗磨粒上,材料微观去除行为不同的情况也有可能发生。研究表明^[77],采用单颗磨粒磨削 Inconel718 镍基合金的临界成屑切

图 15 磨削深度对 Inconel718 镍基合金材料成屑去除的影响^[90]

厚值为 $0.3 \mu\text{m}$, 磨削过程中磨粒形貌的变化可能是导致该结论与图 14a 中结果不一致的主要原因之一。如图 16 所示, DAI 等^[77]将磨粒磨削镍基合金过程中的磨损根据磨粒所处姿态具体分为前刀面月牙洼磨损、后刀面磨损、大量微破碎和大块破碎四种情况, 磨粒磨损所处状态主要取决于磨粒切削刃划擦、耕犁和切削各阶段持续的时间。当磨削过程主要集中在滑擦和耕犁阶段时, 由微破碎形成的新生微刃有助于提升材料去除效率; 当磨粒处于切削阶段时, 由式(2)可知^[77], 磨损导致的磨粒前刀面负前角增大将增加磨削力比, 恶化磨粒去除材料的能力。

$$\varepsilon = \frac{1}{\mu} - \frac{\mu^2 + 1}{\mu(1 + \mu \tan \beta)} \quad (2)$$

式中, ε 为磨削力比; μ 为摩擦因数; β 为磨粒负前角。

图 16 单颗磨粒磨削 Inconel718 镍基合金的磨粒磨损形貌^[77]

3 镍基合金磨削加工工艺特性

围绕航空发动机镍基合金材料的磨削加工特性, 国内外学者的研究工作主要可分为以下两类:

① 开发先进的磨削装备与工具、工艺, 以及采用各

种途径提升砂轮的磨削能力、提高镍基合金材料去除率和表面完整性水平; ② 研究各种因素对镍基合金材料磨削加工工艺特性的影响规律。如图 17 所示, 研究中涉及到的影响镍基合金材料磨削加工工艺特性的因素包括: 材料特性、冷却特性、机床特性、砂轮参数、修整参数和磨削参数等。

图 17 影响镍基合金材料磨削加工工艺特性的鱼骨图

3.1 磨削力与磨削温度

磨削力和磨削温度是衡量材料磨削加工性的主要过程参量。镍基合金磨削过程中, 磨削力与磨削温度的增减变化趋势基本一致。

如图 18 所示, 砂轮修整后的初始阶段, 磨削力缓慢增大; 达到一定值之后, 磨削力增大幅度稍微

图 18 Inconel718 镍基合金磨削力随磨削次数的变化^[94]

变大;随后磨削力陡增,磨削情况急剧恶化。前期磨削力相对稳定是由于砂轮处于锋利阶段,而磨削一段时间后,砂轮表面出现磨损现象并逐渐加重,因而磨削力出现骤然上升现象。磨削温度的变化趋势与磨削力相同,且上升趋势更明显。

镍基合金作为典型的高强韧难加工材料,磨削力与磨削温度高是普遍存在的现象,其原因主要可归结为以下三方面。

(1) 镍基合金的高强韧特性。

一般情况下,镍基合金中含有大量Cr、Co、W、Ti、Mo、Al等元素,近年来开发的镍基单晶合金中还加入了稀土元素Re、Ru等。这些元素在合金中主要起不同的强化作用,包括第二相强化、固溶强化、晶界强化等。这些高激活能高熔点金属元素能够大幅提升合金的热稳定性和热强性,在金属中形成化合物,如TiC、Cr₇C₃、NbC等具有立方点阵结构的碳化物及金属间化合物,这也有利于提高镍基合金的强度与抗磨能力^[12]。与此同时,一些微量元素如La、B等也起到改善合金塑性和韧性的作用^[9]。伴随着材料物理力学性能的提升,镍基合金机械加工难度也不断增加,镍基合金中的强化项越多,给磨削加工带来的难度就越大。另外,镍基合金整体表现出来的性能,如低热导率、高断裂韧性等也会导致材料在磨削去除过程中产生大量磨削热,且热量多集中在工件表层,极易引发高的磨削温度。

(2) 砂轮粘附严重。

碳化硅砂轮被认为不适合用于磨削镍基合金,这主要是由于碳化硅磨粒与合金中的某些元素如Ni、Cr等在高温环境下易发生化学反应,从而导致砂轮快速磨损和工件表面质量下降^[10,95]。目前常用于镍基合金磨削加工的砂轮主要是刚玉砂轮和CBN超硬磨料砂轮。然而无论砂轮种类如何变化,磨削镍基合金的一个最大特点就是砂轮磨粒顶部伴随有严重的材料粘附现象。XU等^[96]在对K417镍基合金磨削时,指出砂轮粘附主要原因是由于镍基合金高温强度高、塑性变形大、热导率低,进而导致磨削弧区内热量短时大量聚集,工件表面发生局部软化甚至熔融,粘附在磨粒上的金属屑固结在磨粒周围。OSTERLE等^[97]在磨削IN738LC镍基合金时亦观察到类似的结果。与此同时,粘附的工件材料与未加工表面接触,摩擦因数增大,因而磨削力变大^[95]。发生粘附的砂轮如果得不到及时修整,会使磨削力和温度急剧上升,加剧恶化砂轮磨削性能和工件表面质量。

(3) 冷却液进入磨削弧区困难。

磨削加工中,冷却液无法进入磨削弧区进行有

效换热一直是一个难题。首先,砂轮的高速旋转易在周围产生气障作用,阻碍冷却液进入磨削弧区^[98-99]。对于进入到磨削弧区的冷却液而言,当磨削热流密度逐渐增大时,具有较好换热效果的核沸腾转变为换热效果差的膜沸腾,阻挡冷却液进一步工作^[98-101]。这种现象在镍基合金缓进深切成形磨削加工中更为常见,比如航空发动机镍基合金叶片榫齿结构通常由多种弧形曲面构成,而成形砂轮各形状点的速度差异导致磨削弧区压力不同,不同弧面和弧区压力使得冷却液进入磨削弧区变得异常困难,同时使得即使能进入磨削弧区的冷却液,其换热效果也变得非常不均衡。

基于以上原因,在实际磨削加工镍基合金时,同时采用多种方法来减小砂轮磨削过程中的磨削力和磨削温度,比如提高磨削速度、降低工件进给速度、减小磨削深度、增大冷却液流量和压力等。相对于工件进给速度,磨削深度和磨削速度对磨削力和磨削温度的影响更明显^[102-103]。当采用普通磨料砂轮磨削镍基合金、磨削速度大于30 m/s时易在砂轮磨粒顶部形成剧烈粘附现象,严重恶化砂轮磨削性能和工件表面完整性,缩短砂轮使用寿命,因此在针对镍基合金选择磨削用量参数时,通常的观点是认为以不超过磨削速度30 m/s为宜^[10]。而在相同磨削条件下,得益于超硬磨料良好的导热性能和更强大的切削能力,CBN超硬磨料砂轮通常可以获得比普通磨料砂轮更低的磨削力和磨削温度。

另外,磨削力和磨削温度建模是对磨削过程变化进行描述、监控、预测的重要手段^[104-106]。目前针对镍基合金材料常用的磨削力与磨削温度模型主要有三种:一是经验模型,主要采用经验公式对磨削工艺进行优化,从而获得最佳磨削用量组合。该类模型是建立在大量试验数据基础之上,比较费时费力,准确度取决于所采集的数据量大小。二是理论模型,它是依据磨削过程中材料去除机理进行综合推导获得数学解析式,该模型建立成本较低,能对磨削结果和规律进行定性分析,但由于模型是建立在各种试验假设条件的基础上,因而准确度比较受限制;三是有限元模型,通过数值模拟方法对磨削力和磨削温度等磨削过程变量进行研究,该方法可以将复杂的磨削过程简单可视化,但有限元模型常常需要多次修正才能收敛拟合,且对当前试验结果依赖性较强。对于镍基合金磨削力与磨削温度建模,在不同使用场合,常常将以上三种模型结合起来开展研究,这对指导镍基合金磨削工艺实践和揭示材料磨削去除机理具有推动作用。

3.2 磨削表面完整性

一般来说,磨削表面完整性包括表面形貌(如表面缺陷、表面纹理、表面粗糙度^[107])、表层组织(如亚表面结构、变质层)和机械性能(如残余应力、显微硬度)^[108-113]等。优异的表面完整性对工件发挥抗摩擦、耐磨损、润滑、抗疲劳等工作性能具有重要作用^[114-115]。

(1) 加工表面形貌。

镍基合金磨削过程中,产生的高温会使工件表层热软化效应突出,材料沿磨粒两侧流出并被切除,工件表层因此形成新的微小磨削表面。这些微小表面构成了宏观磨削表面的基本形貌^[114],因此磨削表面纹理大同小异,基本是平行、整齐、致密的磨粒切削和划擦痕迹,但磨削表面形貌缺陷表现种类较为繁多^[94,96-97,102,116-122],见表 5。

表 5 镍基合金磨削表面形貌的主要表现形式

表面微观形貌	表面缺陷特征	镍基合金材料类型	参考文献
磨粒切削痕迹明显,伴随划擦沟痕、材料重叠现象	Inconel718	[117]
材料严重撕裂、划擦和隆起	K417	[119]
材料脱落引起的坑洞	Inconel718	[117]
磨屑移位、涂覆	Inconel718	[116]
微裂纹、材料涂覆、沟痕	Inconel718	[122]

常见的有划擦沟痕、材料隆起和撕裂、材料脱落坑洞、磨屑涂覆、微裂纹等。这些表面缺陷通常可以采用光学显微镜^[97]、扫描电镜^[119,122-123]等检测工具进行表征。工业上也常用缺陷的长度和深度来定量描述这些缺陷的几何特征,并依据这些几何特

征制定标准来避免缺陷对零件机械性能的不良影响^[4]。

表面粗糙度是用于定量表征磨削表面形貌高度信息的主要物理量。在镍基合金磨削过程中,磨削表面粗糙度的影响因素比较多,如砂轮磨损、砂轮修整、冷却、磨削用量、磨削温度、磨削力、机床特性等^[124-125]。其中,磨削温度始终在工件表面粗糙度影响因素中占据重要地位。随着磨削温度升高,工件表面质量通常会急剧恶化,表面粗糙度值也快速增大(图 19)。降低镍基合金磨削表面粗糙度的办法也有很多,而优选砂轮特性和磨削参数是常用的途径,可有效降低镍基合金工件表面产生缺陷的概率和工件表面粗糙度,从而提高磨削表面质量。具体来讲,采用细粒度的砂轮有助于获得较低的表面粗糙度,增加切削深度和工件进给速度将增大镍基合金磨削表面粗糙度,而增大磨削速度则有利于降低加工表面粗糙度^[126]。BHADURI 等^[127]在镍基合金磨削加工研究中获得了相同的结论。而 LIU 等^[128]进一步指出,对普通磨料砂轮而言,受限安全转速和磨削性能,当磨削速度增加到一定程度时,表面粗糙度反而降低;相同磨削参数条件下,普通速度磨削镍基合金,与 CBN 超硬磨料砂轮相比,普通磨料砂轮磨削反而能获得更优的表面形貌和较低的表面粗糙度,这说明 CBN 砂轮由于磨粒高锋利度而不适合在普通速度条件下磨削加工镍基合金^[118,128]。

图 19 磨削温度对表面粗糙度的影响^[123]

特别指出的是,在砂轮磨削镍基合金过程中,即使有时工件表面发生轻微烧伤,表面粗糙度也可能维持在较低水平(如 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$)^[122]。但是,工件表面形貌却受到了较大影响。磨削烧伤时常导致工件表面磨屑涂覆沉积,甚至形成微裂纹,加工表面也会产生一些新的化合物,如 Ni_2O_3 、 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、 TiO_2 等^[123]。因而表面粗糙度往往和其他指标共同使用来评价磨削表面质量。磨削表面完整性事实上是由一些独立的研究对象紧密联系在一起,比如残余

应力、金相组织变化、机械性能等，所有因素叠加形成最终的工件表面^[129-130]。

磨削表面形貌建模是镍基合金磨削加工研究的重要内容。由于砂轮表面磨粒众多，磨削表面形貌复杂多变，因而现有的磨削表面形貌建模工作主要是以试验和理论相结合的方法，实现对砂轮局部表面形貌演变规律的研究^[131-132]。镍基合金磨削过程中，在特定条件下，通过建立砂轮地貌信息(如有效磨粒数、磨粒出露高度等)、磨削过程变量(如单颗磨粒切厚、磨削力、磨削比能、磨削温度等)和磨粒运动轨迹之间的关系，研究砂轮地貌演变过程，进而建立数学模型控制磨削过程，实现对磨削加工表面及其粗糙度的预测。DING 等^[133]对 CBN 砂轮磨削镍基合金的加工表面形貌成功建模表明了这种方法的有效性(图 20)。

图 20 磨削表面形貌预测^[133]

(2) 加工表层组织变化。

镍基合金磨削加工过程中，工件表面承受着复杂又高强度的机械载荷和热载荷，这会导致工件表层组织结构和物相发生变化，同时引起材料塑性变形。由于应变时效的存在，工件表层材料可能变硬；而表层组织再结晶可能导致材料变软，增强延展性。对于长时间工作在高应力和高温度环境下的镍基合金而言，这些变化可能损害其低周疲劳寿命^[78-79]。观察和检测镍基合金磨削表层/亚表层微结构变化常使用的设备主要有光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪、透射电镜等^[121-123,134-135]。

镍基合金磨削过程中常见的加工表层组织变化主要有晶格滑移歪曲、晶格畸变、晶格破坏、微裂纹、“白层”等，见表 6。其中，磨削“白层”一直是很多科学工作者重点研究的对象^[97,108-109,122]。主流观点认为，“白层”拥有比基体材料更加细化的结构，通常距离磨削表面 5~20 μm ，而且这种组织结构表现出比基体材料更加硬脆的力学性能，因而会促使裂纹的产生和扩展^[12,134]，降低材料的疲劳强度。对于镍基合金磨削“白层”的产生机制目前还没有定论，总体而言，它是在众多因素综合作用下形成的，比如塑性变形、高的温度梯度、热软化、机械作用、相变以及微结构变化等。这些因素的作用效果主要取决于采用的磨削工艺条件^[108]。

由于磨削属于冷变形加工工艺，难免会对工件表面造成影响。因此，合理选择磨削工艺参数可以降低磨削加工对镍基合金工件表层组织的影响程度。ZENG 等^[122]研究表明，采用小的磨削深度加工 Inconel718 镍基合金，可以减弱沿磨削方向出现的晶格扭曲变形，有效避免晶格破坏，从而降低变形层深度；OSTERLE 等^[97]也指出，采用连续修整方法提高砂轮锋利度，抑制磨削温度过快上升，可有效减小甚至避免生成较厚的磨削“白层”。

表 6 镍基合金磨削加工常见的表层组织变化

磨削表层组织变化 微观形貌	磨削表层 组织变化 形貌特征	变形层 深度	镍基合金 材料类型	参考 文献
表层晶格 产生滑移、 畸变和歪 曲，晶粒被 拉长	5-10 μm	Inconel718	[122]
磨削表层 产生白层， 晶格发生 轻微滑移、 歪曲	5 μm 左右	Inconel718	[136]
磨削表层 产生纳米 结构白层， 并且出现 内部微裂 纹	30-40 μm	IN738LC	[97]

(3) 物理力学性能。

镍基合金磨削表面物理力学性能主要指显微硬度和表面残余应力。磨削过程中，镍基合金材料需承受高温和高压，并由此导致了在工件表面产生相比于基体材料具有更高硬度的硬化层，即加工硬化现象^[12]。在成形磨削中，为了获得所需要的型面，往往在同一位置进行数次加工，由此导致的高应变自然会加剧材料硬化倾向。然而，由于磨削条件不同，并不是所有加工表面都会出现加工硬化现象，加工软化现象也时有发生，而这主要取决于磨削表面的应变强化效应和材料热软化效应的相互转变^[87]。这些现象可以通过检测显微硬度在磨削表面深度方向的变化来做定量分析，当测量点在远离加工表面位置时，显微硬度值将逐渐达到基体材料的硬度水平。

镍基合金材料的硬度本身并不高，但磨削加工却极易引发加工硬化现象，而磨削力和磨削温度显著影响其表面加工硬化水平，这一方面与镍基合金的难加工材料特性有关，也与选取的磨削用量导致产生剧烈的金属塑性变形密切相关。通常情况下，

可以通过强化冷却效果、减少磨削深度、提高磨削速度、降低工件进给速度实现降低磨削力和磨削温度,进而减少磨削加工对工件表面金属塑性变形的影响程度^[137-138]。与此同时,不同种类砂轮对磨削表面加工影响层的形成和表现特征也有重要影响。当采用普通磨料(如刚玉砂轮)磨削镍基合金时,会出现较为显著的热软化现象,即在距离磨削表面一定距离内,显微硬度值明显低于基体材料硬度,软化率接近 10%,影响深度在 50~100 μm (图 21a);当采用超硬磨料(如 CBN 砂轮)磨削镍基合金时,会出现较为显著的加工硬化现象,硬化率 14%~40%,影响深度为 10~120 μm (图 21b~21d)。不同种类砂轮磨削镍基合金时加工硬化现象出现差异的原因主要在于:① 普通磨料硬度低、切削能力弱,砂轮表面易粘附金属层,摩擦力增大,因而磨削温度高、磨削力大;超硬磨料硬度高、切削能力强,砂轮表面不易粘附,因而可获得较低的磨削温度和磨削力。② 不同磨料热传导系数差异大(如 CBN 为 240~1 300 W/(m·K), Al_2O_3 约为 35 W/(m·K)),导致磨削热传导能力不同^[128,141]。

图 21 不同磨料砂轮磨削镍基合金加工表面的显微硬度变化

有分析指出, Inconel 718 镍基合金磨削表层软化的根本原因是在磨削过程中热的作用下,主要强化相 γ'' 密度降低,强化效果减弱^[142],然而这一表述还没有出现更多的研究结果。目前对于镍基合金磨削表层/亚表层显微硬度发生变化的原因,多是从磨削条件引发过程变量变化方面对其进行定性描述,而对工件材料表面微纳结构和物相变化影响因素的考虑却很少涉及。

另一方面,磨削加工诱发的残余应力也是镍

基合金工件表面质量研究重点关注的内容。认识残余应力的形成过程,并有效控制残余应力对提高工件的尺寸稳定性、抗腐蚀性和抗疲劳性尤为重要^[108,143-145]。通常,高应变变速率和大量聚集的磨削热被认为是导致磨削表面产生残余应力的重要因素^[114]。具体来说,磨削加工诱发的塑性变形常常导致形成残余压应力;而磨削热经常致使加工表面产生拉应力,并且应力大小与磨削表面温度梯度成正相关关系。镍基合金加工表面最终形成的残余应力大小与来源于磨削加工中的热塑性变形耦合作用结果相关^[113,146-147]。一般情况下,残余拉应力有损工件的疲劳强度,而残余压应力有助提升材料的抗疲劳性能。目前常用于磨削表面残余应力测量的方法有电解腐蚀逐层测量变形法^[12]、钻孔应力测量法^[148]、X 射线应力法^[144]等,其中 X 射线应力法是最主要的残余应力无损测量方法^[149]。

镍基合金磨削加工表面残余应力的试验研究相对较多。由于镍基合金导热性能差、加工硬化趋势强,所以磨削温度比一般钢铁材料要高,这是形成镍基合金残余拉应力的主要原因^[144]。如果合理地选择和磨削参数、砂轮表面形貌、砂轮参数、冷却条件等^[150-152],尽量使磨削热的影响减至最小,就可降低残余拉应力及由此产生的变形,并提高工件的疲劳强度。

OSTERLE 等^[147]开展了 IN738LC 镍基合金磨削加工诱发残余应力的系统研究,结果如图 22 所示。研究发现:① 提高磨削深度对增大残余应力影响层厚度作用明显,而增大工件进给速度和磨削速度,虽然增加了磨削热,但热源沿着工件表面移动的速度加快,即降低了热应力的影响,因而应力影响厚度较小^[10];② 采用连续修整方法能持续保证砂轮

图 22 磨削条件对 IN738LC 镍基合金残余应力的影响规律^[147]

锋利,改善砂轮表面形貌,相比于间断修整方法能显著降低残余应力;③ 相同磨削条件下,由于磨料磨损特性不同,刚玉砂轮可获得残余拉应力表面,CBN 砂轮可获得残余压应力表面;④ 合理选择冷却液能降低磨削温度,增强工件与砂轮之间的润滑性,减小残余拉应力。

由于残余应力影响因素的复杂性,现阶段对镍基合金磨削加工表面残余应力的理论研究主要集中在仿真方面,而仿真研究也只是分析磨削温度对加工表面残余应力分布的影响(图 23),对于镍基合金塑性变形、金相组织等因素对残余应力大小和分布的影响规律尚缺乏深入探索。

图 23 残余应力仿真^[153]

(4) 磨削烧伤。

烧伤是由于磨削弧区内瞬时高温导致工件材料组织发生变化,并在工件表面形成氧化变色的现象。由于航空发动机镍基合金零件使用场合的特殊性,生产中出现磨削烧伤意味着工件会出现质量事故,必须报废,所以磨削烧伤一直是镍基合金磨削加工中极力避免出现的情形。磨削烧伤几乎影响到加工表面完整性的全部评价指标。目前常用的判别手段主要是针对发生磨削烧伤时工件表面/亚表面表现出来的一些特征进行检测,如图 24 所示,例如表面形貌与颜色^[116]、金相组织^[139]、显微硬度^[140]、噪声检测^[154]等,也可以通过测量磨削过程变量进行鉴定,例如磨削力和力比、磨削温度突然增大等现象^[119]。

图 24 Inconel 718 镍基合金磨削过程的典型烧伤特征^[116]

磨削烧伤难以定量表征,导致对磨削表面/亚表面损伤的定量研究主要集中于对一个或者多个烧伤行为进行分析,这也是磨削烧伤判别方法的主要依据。XU 等^[119]指出,为了获得更高的材料去除效率,

可首先采用较大的材料去除率,而不用考虑磨削烧伤,然后再用小磨削用量磨除工件塑性变形层,达到降低工件表面粗糙度的目的。然而在现有技术条件下,磨削烧伤并不可控,现有的检测分析手段也不能全面衡量磨削烧伤对工件材料的影响情况,同时考虑到使用场合对航空发动机镍基合金零件高品质加工要求的严苛性,该方法并不适用于镍基合金磨削。需要指出的是,磨削温度始终在引发磨削烧伤因素中扮演着关键角色^[155]。因此,为了抑制磨削烧伤发生,通常会设法控制磨削温度。工艺参数对磨削烧伤发生的影响与对磨削力和温度的影响趋势一致,即砂轮磨削速度越高、工件进给速度越小、磨削深度越小,工件发生磨削烧伤的概率越小。

实际生产中,航空发动机零件制造企业为了尽量避免磨削烧伤,保证合格的零件表面质量,通常会选用保守的工艺参数对镍基合金进行磨削加工,最后一道工序也经常采用光磨进行精密加工,但这样会导致加工效率低下。通过建立磨削烧伤的理论模型,准确预测前一道工序产生的表面/亚表面损伤的大小,对于后续精密加工工序中工艺参数的合理制定和提高加工效率具有重要意义。通常认为,磨削烧伤本质是在高温作用下材料表层微观组织发生了不可逆变化,因而存在一个临界热流密度值或者临界磨削温度值^[12]。如公式(3)所示^[98],当该临界值不高于已知磨削用量条件下的相应值时,可以预测工件表面不会发生磨削烧伤。另外,也可建立磨削比能、磨削温度、磨削用量之间的关系,如公式(4)所示^[156],可以获得不同磨削用量条件下是否发生磨削烧伤的分界线(图 25)。这些有益尝试对精准预测磨削烧伤具有积极作用。

$$q_t = \frac{P_c}{A_s} = \frac{P_c}{l_c \cdot l} = \frac{P_c}{\sqrt{a_p d_s} \cdot l} \quad (3)$$

式中, q_t 表示热流密度; P_c 是功率; A_s 为磨削面积; l_c 、 l 表示磨削弧长和工件长度。

$$e_c = \frac{\theta_{ms} k}{A \alpha^{0.5}} d_s^{0.25} v_w^{-0.5} a_p^{-0.75} \quad (4)$$

式中, e_c 表示磨削比能; θ_{ms} 表示温升; k 是热传导系数; α 是热扩散系数; A 为常数。

3.3 砂轮磨损

砂轮磨损严重、使用寿命短是镍基合金磨削加工的重要现象^[157-158]。在砂轮磨损研究中,用以表征砂轮磨损程度或者砂轮磨钝的判据指标,主要包括磨耗磨损面积、磨削力、砂轮径向磨损量、工件表面形貌、磨粒脱落和破碎、声发射信息、磨削功率^[154,159-165]等。如图 26 所示,砂轮磨削镍基合金的

图25 磨削是否烧伤的分界线预测^[156]

磨损形式主要有三种：磨粒磨耗磨损、破碎磨损和粘附堵塞。不同磨料和结合剂种类以及镍基合金材料类型对砂轮磨损形式也有直接影响。主要表现如下几点。

(1) 选用刚玉磨料砂轮磨削镍基合金，以砂轮发生粘附堵塞磨损为主，且砂轮磨损较快；选用CBN砂轮磨削镍基合金，以砂轮发生磨粒磨耗、破碎和粘附磨损为主。

(2) 对于变形镍基合金(如 Inconel718^[162,166]等)、等轴晶镍基合金(如 K424^[139]、K417^[96]等)，定向凝固镍基合金(如 DZ4^[121]、DZ125^[140]等)，磨削过程中砂轮易发生粘附磨损；对于单晶镍基合金(DD98^[167-168]等)，磨削过程中砂轮易发生堵塞和磨粒脱落磨损。

图26 砂轮磨削镍基合金材料的主要磨损形式

以上表现主要归因于镍基合金材料在合金强化和工艺强化方面的制备途径不同，由此导致材料在高温硬度、弹性模量、加工硬化倾向等方面具有较大差异。因此，镍基合金表现出不同的磨削加工性，砂轮磨削时也会产生不同的磨损特征。影响砂轮使用寿命的因素有磨削工艺参数、磨粒种类与结合剂强度、修整工艺、冷却特性等。研究表明，工件进给速度和磨削深度越小，粘结剂强度越高，冷却越充分，砂轮使用寿命越长。

3.4 材料去除率

高材料去除率一直是镍基合金磨削加工追求的重要目标。如图7所示，材料去除率由工件进给速度和磨削深度决定，然而材料去除率的提升受磨削加工表面完整性限制。由以上分析可知，镍基合金磨削过程中通常表现为高的磨削力和磨削温度、磨削表面质量不稳定等特征。研究表明，即使在良好的修整效果和充分的冷却条件下，采用缓进深切磨削工艺，刚玉磨料砂轮磨削镍基合金材料去除率也只是在 $0.5 \sim 5.0 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ ^[128,141]之间徘徊；采用高效磨削工艺，CBN砂轮对镍基合金材料磨削去除率可达 $20 \sim 100 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ ^[98,136]。相对而言，采用CBN砂轮磨削加工镍基合金具有明显的工艺优势。这说明，通过优化工艺参数可以达到提高材料去除率的目的。同时，磨削速度虽然不能直接提高材料去除率，但可在不增大磨削力、砂轮磨损和表面粗糙度的情况下，提升加工精度水平，因而提高了进一步增大材料去除率的潜力。所以，在镍基合金磨削加工中，当砂轮强度满足使用要求时，尽量提高磨削速度有利于获得更高的材料去除率。

需要指出的是，尽管镍基合金磨削过程中，刚玉砂轮存在很多问题，比如粘附严重、材料去除率低、磨削力和磨削温度高、受限于砂轮强度仅应用在普通速度磨削、砂轮磨损快导致型面保持性差，需要频繁修整等，但实际生产中，刚玉砂轮仍然是用于加工航空发动机镍基合金叶片榫齿/榫槽的最重要成形磨削工具，主要原因在于：①新开发的刚玉砂轮在磨粒锋利度、强度、磨削刃锋利保持能力等方面均得到提升^[169]；②刚玉砂轮成形修整较易；③刚玉砂轮成本较低。虽然CBN磨料凭借优异的物理力学特性，在镍基合金等难加工金属材料磨削中展示了良好的加工性能，但其价格相对高昂、特别是成形修整困难导致型面精度难以保证也是事实。因此，综合考量加工成本、加工性能、加工复杂程度等各因素，现阶段镍基合金加工中采用较低的材料去除率是不得已的选择，国内几大航空发动机制造公司普遍采用大气孔刚玉砂轮成形磨削加工镍基合金零件就说明了这一点。因此，在保证工件质量前提下，如何提高镍基合金磨削加工的材料去除率是值得深入研究的一个方向。

4 解决镍基合金磨削加工难题的新方法

磨削加工装备、磨削工具和磨削工艺是完成磨削加工的三个必备要素。针对镍基合金的应用场合和磨削加工性，目前面临的瓶颈问题主要集中在磨

削工具和磨削工艺两方面。大量研究和工程应用表明, 缓进深切磨削工艺非常适合航空发动机镍基合金零件复杂曲面的成形加工。然而, 镍基合金磨削过程中表现出来的严重砂轮堵塞、高磨削力/磨削温度、磨削烧伤、表面质量不稳定等问题一直是亟待突破的技术性难题。针对这些难题, 学术界和工程界开展了众多富有创新性的研究工作。

4.1 复合磨削工艺

超声振动辅助磨削^[117,127,161,170-172]、电解磨削^[31,173-175]等复合磨削工艺因其独特加工优势逐渐成为镍基合金加工领域的研究热点(图 27)。超声振动辅助磨削主要是依靠在磨削工具或者工件上施加一定频率的振动载荷, 实现材料去除的一种加工工艺。运用超声振动辅助磨削加工镍基合金的特点如下: ① 可有效降低磨削力和提高材料去除率; ② 减轻砂轮表面的工件材料粘附; ③ 针对 CBN 超硬磨料砂轮, 可减少 CBN 磨粒破碎数, 提高有效磨刃数量, 降低表面粗糙度, 延长砂轮使用寿命^[161]; 针对 Al_2O_3 普通磨料砂轮, 扩展了砂轮表面裂纹和孔隙, 增大了磨粒和结合剂破碎程度, 造成表面粗糙度增大, 砂轮使用寿命缩短^[127]。因此, 选择合适的磨削条件对充分发挥超声振动辅助磨削镍基合金加工工艺优越性具有重要意义。

图 27 常见复合磨削工艺加工示意图

为进一步提高镍基合金材料去除率和获得好的磨削表面质量, 电解磨削作为一种复合加工工艺也得到研究和开发。由于依靠电解和磨削加工共同实现材料去除, 其兼具电解加工高材料去除率和机械磨削高表面质量两种工艺优点。研究表明, 电解磨削镍基合金具有如下特点: ① 可获得高材料去除率和低应力加工表面; ② 磨削力和磨削温度低, 砂轮损耗小, 能有效减轻砂轮堵塞和磨损, 大幅延长砂

轮寿命; ③ 需要添置特殊装备用于电解液和砂轮共同工作。虽然电解磨削设备前期投入较大, 但是电解磨削对大余量难加工材料高效率磨削去除仍具有实用价值。其他复合加工工艺如电火花辅助磨削加工^[176](图 27c)等, 可使磨削力大幅度降低, 也是实现镍基合金高效磨削的有效途径。鉴于复合磨削加工优异而独特的工艺能力, 这些加工方式值得更深入的研究, 并推广到航空发动机镍基合金零件的加工中。

4.2 磨削弧区强化换热

磨削温度高一直是引起镍基合金磨削加工质量问题的主要原因, 通过改善磨削弧区换热效果, 提升冷却液传导热量的能力, 可有效降低磨削温度, 亦可减少镍基合金材料在砂轮表面的粘附以及砂轮与工件之间的摩擦力^[177-179]。众多学者围绕这一目标开展了大量卓有成效的研究工作, 主要包括改善喷嘴结构^[180]、喷嘴位置^[181]、冷却液流量^[182]、微量润滑(MQL)^[183,184]、开槽砂轮冷却^[185]、砂轮径向内冷却^[186]、高压空冷^[187]、低温冷却^[188]等。这些技术共同点是以向磨削弧区注入更多冷却液或者降低磨削弧区外部温度为主要手段。

值得一提的是, 热管技术通过对自身内部工作液体的相变实现对磨削弧区的强化换热, 来改变磨削热进入砂轮、工件、磨屑之间的比例, 是实现镍基合金难加工材料绿色高效磨削加工的一个有益探索^[189-191]。热管砂轮是针对镍基合金、钛合金等难加工材料提出的一项新型砂轮制造技术。在与无热管砂轮进行传热性能和 Inconel718 镍基合金磨削对比试验中发现, 热管砂轮换热能力突出, 并且显著降低了磨削温度, 有效缓解了磨削表面的加工硬化, 在防止工件表面烧伤, 保证加工质量方面取得了良好效果, 如图 28 所示。然而, 文献[59,190-192]亦指出, 相比于无热管砂轮, 磨削 Inconel718 镍基合金初始阶段, 砂轮磨削性能优异(比如低磨削温度、低磨削力、低磨削比能等), 当磨削进行一段距离之后, 砂轮表面因出现堵塞、磨屑粘附现象, 磨削能力迅速下降; 同时, 由于热管砂轮制作工艺仍十分复杂, 准备工作时间较长, 因此如何简化砂轮制造过程, 提高砂轮制作效率, 并在磨削过程中始终保持稳定换热能力是需要解决的难题。

4.3 超硬磨料工具

更加锋利、耐磨的磨料是制作先进磨削工具的前提^[193]。实现镍基合金的高材料去除率和高表面质量加工最终还是要依靠超硬磨料工具。然而, 修整困难一直是多层 CBN 超硬磨料砂轮在航空发动机镍基合金零件成形磨削加工中推广受限的主要原

图28 热管砂轮制作准备工作及性能^[191]

因;单层CBN砂轮由于可以方便制作成多种形状且无需修整,因而使用相对广泛,但却面临着使用寿命有限的问题^[192]。

目前围绕这两方面难题,众多学者开展了大量研究工作。一方面从磨料层气孔率着手,通过控制气孔率大小来提升磨料层的修整能力^[194-196]。研究表明,高气孔率CBN砂轮磨削Inconel 718镍基合金时,凭借较少动态磨粒数和充足的容屑空间可以减少砂轮粘附现象,进而降低砂轮负荷。但是,高气孔率达到一定程度时,容易导致磨粒聚集,有效磨刃数减少,磨刃空间距离增大;结合剂连接强度也因而减弱,影响砂轮使用寿命,对于重负荷磨削条件下易出现砂轮崩刃现象的陶瓷结合剂CBN砂轮更是受其不利影响^[194]。为此,如果采用具有一定形状的空心材料作为造孔剂^[197-198]、并使磨粒把持强度得到提升的钎焊工艺,则可能使得金属结合剂超硬磨料砂轮修整能力得到提高,优异磨削能力也可得到发挥。如图29所示,通过添加 Al_2O_3 陶瓷空心球颗粒造孔材料可以实现磨粒和孔隙的有序排布。相比于未添加造孔剂的磨料层,在不削弱其抗弯强度的前提下,砂轮修整能力和磨削性能均得到提高。目前常用的造孔剂主要有 Al_2O_3 ^[199-200]、尿素^[201]、蔗糖^[202]等。研究表明^[199-200],多孔金属结合剂CBN砂轮在磨削Inconel718镍基合金试验中,砂轮磨损主要以磨粒磨耗磨损为主,伴随磨粒破碎和粘附粘附现象,在相同材料去除率下,磨削力、磨削温度与陶瓷CBN砂轮相当,可见采用造孔剂制作的多层CBN砂轮,改善了砂轮-工件接触条件,但进一步提高材料去除率后,砂轮磨削性能急剧下降。

并且,实际制作和磨削过程中,磨料层空心球容易坍塌、移位,使得预先排列整齐的造孔颗粒不能如设想的一样形成规则的孔隙,并且由于磨削过程中砂轮与工件摩擦剧烈,使得工件材料或者结合剂很快填充于形成的孔隙中,导致砂轮出现钝化。此外,由于多孔结构降低了金属结合剂砂轮工作层的局部强度,导致重负荷高效深切磨削过程中砂轮可能发生塌边现象。因此,如何有效提升多层CBN砂轮,特别是金属结合剂CBN砂轮的修整能力仍然是研究人员面临的技术难题。

图29 孔隙和磨粒均有序排布的多层钎焊CBN砂轮^[199]

另一方面,对于单层CBN砂轮而言(图30),从提高磨粒把持强度和出露高度方面提升磨粒使用寿命,和从控制单颗磨粒切厚方面提升砂轮整体磨削性能是一项值得研究的内容。以往研究已经证实,钎焊工艺相比电镀工艺具有显著优势,可以获得更高的磨粒出露高度、更强的磨粒保持强度、更大的磨屑容纳空间以及容易实现磨粒有序排布^[203-207],尤其在难加工材料磨削加工中显示出更大的磨削潜力。比如,DING等^[139]采用单层钎焊CBN砂轮对K424铸造镍基合金进行直槽磨削,获得了低磨削比能和较好的表面完整性;田霖^[81]采用单层钎焊CBN砂轮在对Inconel718镍基合金进行高速磨削过程中,相比于无序排布的电镀CBN砂轮,实现了降低磨削力和磨削温度的目的。

图30 磨粒有序排布的单层钎焊CBN砂轮

依据相关文献[12, 58]可知, 切屑平均截面积等于砂轮单位宽度切屑截面积的总和与砂轮单位宽度有效动态磨粒数之比。由此, 磨粒有序排布砂轮的平均单颗磨粒切厚可表达为

$$\begin{cases} \bar{a}_g = \frac{L}{l_c} \left(\frac{v_w}{v_s} a_p \right) \\ l_s = \sqrt{a_p d_s} \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{a}_g = L \left(\frac{v_w}{v_s} \right) \sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \quad (6)$$

式中, L 为动态有效磨粒间距。由式(5)和(6)可知, 动态有效磨粒间距可依据成形面实际磨削深度进行动态调整(砂轮直径和磨削速比保持不变), 这样就有助于获得一致的成形面单颗磨粒切厚。另外, 砂轮圆周单位长度上的动态有效磨粒数 N_d 与磨削深度 a_p 的关系可以表示为

$$N_d = \frac{1}{L} = \frac{1}{\bar{a}_g} \left(\frac{v_w}{v_s} \right) \sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 当单颗磨粒切厚保持一致且磨削速比保持不变时, 随着加工型面实际磨削深度增大, 动态有效磨料间距将会减小, 这表明在单位弧长上的有效磨料数增多。在这样的条件下, 成形砂轮的同步磨损更有利于实现, 砂轮轮廓精度也可获得提高。由以上分析可知, 在充分考虑镍基合金材料性能的基础上, 如何实现砂轮单颗磨粒切厚和动态有效磨粒数的控制, 是通过控制磨削工艺来实现高品质成形磨削加工航空发动机镍基合金零件目标的关键举措。

4.4 磨削表层微纳结构

了解磨削加工对材料表层微纳结构变化甚至改性的影响机制, 对优化磨削工艺进而获得高质量加工表面具有重要作用[211-212]。因此, 借助于现代理化分析设备研究镍基合金材料磨削表层的微纳结构和物相变化逐渐成为一个新兴的研究热点。

目前, 对镍基合金磨削加工表层微纳结构变化的研究, 已经取得了一定的成果。比如 LU 等[134]在《Science》期刊中报导, 磨削过程诱发镍基合金材料表层产生二维纳米尺度的片层状结构(图 31), 其厚度约为 20 nm, 高温下非常稳定且显微硬度高达 6.4 GPa, 这超越了已知的任何镍基合金材料硬度。磨削过程作用于工件, 诱使材料表面发生高应变速率和大的应变梯度, 进而使得材料表层产生取向不同且具有超细结构的晶粒, 这些可能是致使镍基合金材料磨削表层出现超硬和超稳定片层状结构的主要原因。磨削表层具有的这种优异的物理力学

性能, 将大幅度提高磨削表面的抗磨损和抗疲劳性能。LIU 等[213]对磨削加工诱发镍基合金材料表层产生纳米片状层结构的机制进行了研究, 他们指出, 超细结构晶粒中具有被抑制的位错恢复动力, 但高应变速率和高应变梯度反而增强了这种位错的累积, 因此可以说, 纳米片层状结构是由位错滑移主导, 由纳米尺度的形变孪晶作为补充。

图 31 镍基合金磨削表层纳米结构及物理性能[134]

由以上分析可以看出, 虽然目前对镍基合金材料磨削表层的微纳结构进行了分析, 但主要集中在对一些现象进行解释, 对引发微纳结构发生变化进而促使材料表层物理力学性能发生改变的深层次原因缺乏理论性和系统性的研究, 还没有形成用于指导实际生产的研究成果。但是, 对于期望通过磨削加工手段改变磨削表面物理力学性能, 获得更加优异的镍基合金磨削表面质量, 这是一个值得深入研究的方向。

5 展望

随着高性能航空发动机推重比要求的不断提高, 对镍基合金材料及零件的磨削加工技术要求也不断上升。为了快速获得高品质的镍基合金零件, 需要不断提高磨削效率和磨削质量。在现有磨削工具和工艺仍难以完全满足加工要求的现状下, 进一步挖掘高效精密磨削的基础理论、并积极发展复合磨削加工技术、磨削弧区强化换热技术、新型磨粒工具技术以及磨削改性技术, 对于实现镍基合金材料及零件的先进磨削制造具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] EZUGWU E O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aero-space superalloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45: 1353-1367.
- [2] POLLOCK T M, TIN S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22: 361-374.

- [3] M'SAOUBI R, AXINTE D, SOO S L, et al. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2015, 64: 557-580.
- [4] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China aeronautical materials handbook[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [5] 黄乾尧, 李汉康. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
HUANG Qian Yao, LI Hankang. The superalloys[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- [6] 王建明, 杨舒宇. 镍基铸造高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
WANG Jianming, YANG Shuyu. Nickel-based casting superalloys[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
- [7] 陶春虎, 张兵, 张卫方, 等. 定向凝固高温合金的再结晶[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
TAO Chunhu, ZHANG Bing, ZHANG Weifang, et al. Recrystallization of directionally solidified superalloy[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014.
- [8] REED R C. The superalloys: Fundamentals and applications[M]. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [9] 孙晓峰, 金涛, 周亦胄, 等. 镍基单晶高温合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(12): 1-9.
SUN Xiaofeng, JIN Tao, ZHOU Yizhou, et al. Research progress of nickel-base single crystal superalloys[J]. *Materials China*, 2012, 31(12): 1-9.
- [10] 任敬心, 康仁科, 王西彬. 难加工材料磨削技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
REN Jingxin, KANG Renke, WANG Xibin. Grinding technology of difficult-to-machine materials[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011.
- [11] 徐西鹏, 徐鸿钧, 李迎, 等. K417 航空叶片材料缓进深磨烧伤特征及烧伤程度判别[J]. 航空学报, 1993, 14(12): 614-620.
XU Xipeng, XU Hongjun, LI Ying, et al. Evaluation and characteristics of workpiece burn during creep feed grinding of superalloy K417 for vanes used in aeronautical industry[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1993, 14(12): 614-620.
- [12] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
REN Jingxin, HUA Ding'an. Principle of grinding[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011.
- [13] 李峰. 镍基高温合金高效磨削砂轮磨损的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
LI Feng. Wear of grinding wheels in high efficiency grinding of nickel based superalloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [14] SUTOWSKI P, SWIECIK R. The estimation of machining results and efficiency of the abrasive electro-discharge grinding process of Ti6Al4V titanium alloy using the high-frequency acoustic emission and force signals[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94: 1263-1282.
- [15] FEDOROV S, SWE M H, KAPTANOV A, et al. Wear of carbide inserts with complex surface treatment when milling nickel alloy[J]. *Mechanics and Industry*, 2017, 18(7): 710.
- [16] ZHAO Y J, LI H N, ZHU L D, et al. Machined brittle material surface in grinding: Modeling, experimental validation, and image-processing-based surface analysis[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93: 2875-2894.
- [17] LI Z P, ZHANG F H, ZHANG Y, et al. Experimental investigation on the surface and subsurface damages characteristics and formation mechanisms in ultra-precision grinding of SiC[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92: 2677-2688.
- [18] ZHANG Z Y, DU Y F, WANG B, et al. Nanoscale wear layers on silicon wafers induced by mechanical chemical grinding[J]. *Tribology Letters*, 2017, 65: 132-145.
- [19] ZHOU H X, YUAN B Y, LYU J L, et al. A novel approach of deposition for uniform diamond films on circular saw blades[J]. *Plasma Science and Technology*, 2017, 19: UNSP 115502.
- [20] CHEN CCA, GUPTA A. Modeling and analysis of wire motion during rocking mode diamond wire sawing of mono-crystalline alumina oxide wafer[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95: 3453-3463.
- [21] ADIBI H, ESMAEILI H, REZAEI S M. Study on minimum quantity lubrication (MQL) in grinding of carbon fiber-reinforced SiC matrix composites (CMCs)[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95: 3753-3767.
- [22] 徐正扬. 发动机叶片精密电解加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
XU Zhengyang. Key technologies research on precision turbine blade ECM[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [23] 王建业, 林苏文. 叶片电解加工技术的新发展[J]. 航空

- 制造技术, 1998(6): 17-20.
- WANG Jianye, LIN Suwen. New development of blade ECM technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1998(6): 17-20.
- [24] 徐庆. 整体叶盘多通道电解加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- XU Qing. Key Technologies Research on electrochemical machining of blisk multi-tunnels[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [25] KLOCKE F, WELLING D, DIECKMANN J, et al. Developments in Wire-EDM for the manufacturing of fir tree Slots in turbine discs made of Inconel 718[J]. Key Engineering Materials, 2012, 504-506: 1177-1182.
- [26] 陶云亚, 薛伟鹏, 唐洪飞, 等. 激光增材制造技术在涡轮叶片中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29: 44-55.
- TAO Yunya, XUE Weipeng, TANG Hongfei, et al. Application of laser additive manufacturing technology in turbine blade and vane[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2016, 29: 44-55.
- [27] 张小伟. 金属增材制造技术在航空发动机领域的应用[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 10-14.
- ZHANG Xiaowei. Application of metal additive manufacturing in aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 10-14.
- [28] WELLING D. Results of surface integrity and fatigue study of Wire-EDM compared to broaching and grinding for demanding jet engine components made of Inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2014, 13: 339-344.
- [29] KLOCKE F, ZEIS M, KLINK A, et al. Experimental research on the electrochemical machining of modern Titanium- and Nickel-based alloys for aero engine components[J]. Procedia CIRP, 2013, 6: 369-373.
- [30] SOO S L, ANTAR M T, ASPINWALL D K, et al. The effect of wire electrical discharge machining on the fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo aerospace alloy[J]. Procedia CIRP, 2013, 6: 215-219.
- [31] KLOCKE F, KLINK A, VESELOVA D, et al. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63: 703-726.
- [32] 范茂祥. 涡轮叶片榫齿加工技术的发展[J]. 航空制造技术, 1988, 5: 26-29.
- FAN Maoxing. Development of machining methods for turbine blade roots[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1988, 5: 26-29.
- [33] 姜雪梅. 高速拉削工艺的研究与应用[J]. 制造技术与机床, 2003(3): 42-46.
- JIANG Xuemei. Research and application of high-speed broaching process[J]. Technology and Test, 2003(3): 42-46.
- [34] 任军学, 田卫军, 田荣鑫, 等. 开式整体叶盘通道侧铣粗加工技术的研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(10): 1220-1224.
- REN Junxue, TIAN Weijun, TIAN Rongxin, et al. A study of the rough milling technique of blisk tunnel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(10): 1220-1224.
- [35] 丁文锋, 徐九华, 杨长勇, 等. 航空发动机零件高效精密磨削技术的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2014(12): 26-29.
- DING Wenfeng, XU Jiuhua, YANG Changyong, et al. Development and application of high efficiency and precision grinding technology for aeroengine components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(12): 26-29.
- [36] HASHIMOTO F, YAMAGUCHI H, KRAJNÍK P, et al. Abrasive fine-finishing technology[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65: 597-620.
- [37] ZHAO Y J, YAN Y H, SONG K C, et al. Intelligent assessment of subsurface cracks in optical glass generated in mechanical grinding process[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 115: 17-25.
- [38] ZHANG Y Z, FANG C F, HUANG G Q, et al. Modeling and simulation of the distribution of undeformed chip thickness in surface grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 127: 14-27.
- [39] SHARIF ULLAH AMM, CAGGIANO A, KUBO A, et al. Elucidating grinding mechanism by theoretical and experimental investigations[J]. Materials, 2018, 11: 274 19.
- [40] MAO C, LIANG C, ZHANG Y C, et al. Grinding characteristics of cBN-WC-10Co composites[J]. Ceramics International, 2017, 43(18): 16539-16547.
- [41] HUANG G Q, ZHANG M Q, GUO H, et al. The effects of temperature curves on the diamond/Ni-Cr interfacial properties in high-frequency induction brazing[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2017, 8(2): 133-146.
- [42] LIPINSKI D, BALASZ B, RYPINA L. Modelling of surface roughness and grinding forces using artificial neural networks with assessment of the ability to data generation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94: 1335-1347.
- [43] YU T Y, BASTAWROS A F, CHANDRA A. Experimental and modeling characterization of wear and life expectancy of electroplated CBN grinding wheels[J].

- International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 121: 70-80.
- [44] LUO M, LUO H, ZHANG D, et al. Improving tool life in multi-axis milling of Ni-based superalloy with ball-end cutter based on the active cutting edge shift strategy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 105-115.
- [45] YAO C F, TAN L, YANG P, et al. Effects of tool orientation and surface curvature on surface integrity in ball end milling of TC17[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94: 1699-1710.
- [46] KACALAK W, RYPINA L, TANDECKA K. Modelling and analysis of displacement of materials characterized by different properties in the zone of microcutting[J]. Journal of Machine Engineering, 2015, 15(4): 46-58.
- [47] ZHANG Q, ZHANG S, SHI W H. Modeling of surface topography based on relationship between feed per tooth and radial depth of cut in ball-end milling of AISI H13 steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95: 4199-4209.
- [48] LUO M, LUO H, AXINTE D, et al. A wireless instrumented milling cutter system with embedded PVDF sensors[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 110: 556-568.
- [49] BARAHENI M, AMINI S. Feasibility study of delamination in rotary ultrasonic-assisted drilling of glass fiber reinforced plastics[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2018, 37(1): 3-12.
- [50] YAO C F, WU D X, MA L F, et al. Surface integrity evolution and fatigue evaluation after milling mode, shot-peening and polishing mode for TB6 titanium alloy[J]. Applied Surface Science, 2016.11.30, 387: 1257-1264.
- [51] WEBSTER J, TRICARD M. Innovations in abrasive products for precision grinding[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(2): 597-617.
- [52] KOPAC J, KRAJNIK P. High-performance grinding-A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006. 175: 278-284.
- [53] JACKSON M J, DAVIS C J, HITCHINER M P, et al. High-speed grinding with CBN grinding wheels-applications and future technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110: 78-88.
- [54] KLOCKE F, SOO S L, KARPUSCHEWSKI B, et al. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64: 581-604.
- [55] SOO S L, NG E G, DEWES R C, et al. Point grinding of nickel-based superalloys[J]. Industrial Diamond Review 2002, 62(2): 109-116.
- [56] 李长河. 磨削技术的历史、现状和展望[J]. 制造技术与机床, 2012(4): 17-22.
- LI Changhe. History, status and prospect of grinding technology[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2012(4): 17-22.
- [57] 赵恒华, 宋涛, 蔡光起. 磨削加工技术的发展趋势[J]. 制造技术与机床, 2012(1): 55-58.
- ZHAO Henghua, SONG Tao, CAI Guangqi. The development trends of grinding process technology[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2012(1): 55-58.
- [58] 徐九华, 张志伟, 傅玉灿. 镍基高温合金高效成型磨削的研究进展与展望[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 351-360.
- XU Jiuhua, ZHANG Zhiwei, FU Yucan. Review and prospect on high efficiency profile grinding of nickel-based superalloys[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 351-360.
- [59] 赫青山. 热管砂轮高效磨削加工技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- HE Qingshan. Study on high efficiency grinding with heat pipe grinding wheels[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [60] YANG L, FU Y C, XU J H, et al. Structural design of a carbon fiber-reinforced polymer wheel for ultra-high speed grinding[J]. Materials and Design, 2015, 88: 827-836.
- [61] 王强国, 高航, 裴志坚, 等. KDP 晶体超声辅助磨削的亚表面损伤研究[J]. 人工晶体学报, 2010, 39(1): 67-71.
- WANG Qiangguo, GAO Hang, PEI Zhijian, et al. Study on the subsurface damage of KDP crystal ground with ultrasonic vibration assistance[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2010, 39(1): 67-71.
- [62] SUN J L, QIN F, CHEN P, et al. A predictive model of grinding force in silicon wafer self-rotating grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 109: 74-86.
- [63] LI H N, YU T B, ZHU L D, et al. Evaluation of grinding-induced subsurface damage in optical glass BK7[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 785-794.
- [64] DENKENA B, GOTTEWIK L, GROVE T, et al. Temperature and energy partition for grinding of mixed oxide ceramics [J]. Production Engineering, 2017(9): 1-9.
- [65] 田霖, 徐九华, 苏宏华, 等. 金刚石砂轮磨削铁氧体的表面粗糙度与形貌分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009(2): 26-30.

- TIAN Lin, XU Jiuhua, SU Honghua, et al. Analysis on surface roughness and surface topography of ferrite ground with diamond grinding wheel[J]. *Diamond and Abrasives Engineering*, 2009(2): 26-30.
- [66] ZENG X, LI J H, JI S M, et al. Research on machining characteristics of double-layer elastomer in pneumatic wheel method[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92: 1329-1338
- [67] NADOLNY K, HERMAN D. Effect of vitrified bond microstructure and volume fraction in the grinding wheel on traverse internal cylindrical grinding of Inconel alloy 600[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, 2015, 81: 905-915.
- [68] TEICHER U, GHOSH A, CHATTOPADHYAY A B, et al. On the grindability of titanium alloy by brazed type monolayered superabrasive grinding wheels[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46: 620-622.
- [69] HOOD R, COOPER P, ASPINWALL D K, et al. Creep feed grinding of γ -TiAl using single layer electroplated diamond superabrasive wheels[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015, 11: 36-44.
- [70] SIM K H, ZHANG F H, WANG G F, et al. Experimental comparison of ground surface characteristics for P/M Ti2AlNb-based alloy using CBN and diamond grinding wheels[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94: 1885-1894.
- [71] OHBUCHI Y, MATSUO T. Force and chip formation in single-grit orthogonal cutting with shaped CBN and diamond grains[J]. *CIRP-Manufacturing Technology*, 1991, 40: 327-330.
- [72] FENG B F, CAI G Q. Experimental study on the single-grit grinding Titanium alloy TC4 and superalloy GH4169[J]. *Key Engineering Materials*, 2001, 202-203: 115-120.
- [73] MEI Y M, YU Z H, YANG Z S. Numerical investigation of the evolution of grit fracture and its impact on cutting performance in single grit grinding[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89: 3271-3284.
- [74] ANDERSON D, WARKENTIN A, BAUER R. Experimental and numerical investigations of single abrasive-grain cutting[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51: 898-910.
- [75] OPOZ T T, CHEN X. Experimental investigation of material removal mechanism in single grit grinding[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 63: 32-40.
- [76] SUBHASH G, ZHANG W. Investigation of the overall friction coefficient in single-pass scratch test[J]. *Wear*, 2002, 252: 123-134.
- [77] DAI C W, DING W F, XU J H, et al. Influence of grain wear on material removal behavior during grinding nickel-based superalloy with a single diamond grain[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 113: 49-58.
- [78] 田霖, 傅玉灿, 杨路, 等. 基于速度效应的高温合金高速超高速磨削成屑过程及磨削力研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(9), 169-177.
- TIAN Lin, FU Yucan, YANG Lu, et al. Investigation of the speed effect on critical thickness of chip formation and grinding force in high speed and ultra-high speed grinding of superalloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(9), 169-177.
- [79] YAO C F, JIN Q C, HUANG X C, et al. Research on surface integrity of grinding Inconel718[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65: 1019-1030.
- [80] TAWAKOLI T, AZARHOUSHANG B, RASIFARD A. Wear behavior of a vitrified bond CBN wheel by ultrasonic-assisted creep feed profile grinding of Inconel 718[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 325: 122-127.
- [81] 田霖. 基于磨粒有序排布砂轮的高速磨削基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- TIAN Lin. Fundamental research on the high speed grinding with regular abrasive distribution wheel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [82] FAN Y H, WANG T, HAO Z P, et al. Research of plastic behavior in high-speed cutting Inconel718 based on multi-scale simulation[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94: 3731-3739.
- [83] LI S S, WU Y B, NOMURA M. Effect of grinding wheel ultrasonic vibration on chip formation in surface grinding of Inconel718[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86: 1113-1125.
- [84] QI H, WEN D H, YUAN Q L, et al. Numerical investigation on particle impact erosion in ultrasonic-assisted abrasive slurry jet micro-machining of glasses[J]. *Powder Technology*, 2017, 314: 627-634.
- [85] QI H, WEN D H, LU C D, et al. Numerical and experimental study on ultrasonic vibration-assisted micro-channeling of glasses using an abrasive slurry jet[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 110: 94-107.
- [86] CHEN Z Z, TIAN L, FU Y C, et al. Chip formation of

- nickel-based superalloy in high speed grinding with single diamond grit[J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2012, 5(2): 93-106.
- [87] TIAN L, FU Y C, XU J H, et al. The influence of speed on material removal mechanism in high speed grinding with single grit[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 89: 192-201.
- [88] BRINKSMELER E, GLWERZEW A. Chip formation mechanisms in grinding at low speeds[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2003, 52: 253-258.
- [89] OPOZ T T, CHEN X. Experimental study on single grit grinding of Inconel 718[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2014: 1-14.
- [90] OPOZ T T, CHEN X. Numerical simulation of single grit grinding[C]//*Proceeding of the 16th International Conference on Automation and Computing*, Birmingham, UK, 2010.
- [91] ZAHEDI A, AKBARI J. FEM analysis of single grit chip formation in creep-feed grinding of Inconel 718 superalloy[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 325: 128-133.
- [92] CHEN X, OPOZ T T, OLUWAJOBI A. Analysis of grinding surface creation by single-grit approach[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*, 2017, 139: 121007-1.
- [93] MATSUO T, TOYOURA S, OSHIMA E, et al. Effect of grain shape on cutting force in superabrasive single-grit tests[J]. *CIRP-Manufacturing Technology*, 1989, 38: 323-326.
- [94] TSO P L. Study on the grinding of Inconel 718[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 55: 421-426.
- [95] 苏旭峰. 高温合金缓进磨削烧伤机理实验研究[J]. *中国计量学院学报*, 2009, 20(1): 46-50.
- SU Xufeng. On creeping grinding and crack experiment of superalloys[J]. *Journal of China University of Metrology*, 2009, 20(1): 46-50.
- [96] XU X P, YU Y Q, HUANG H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys[J]. *Wear*, 2003, 255: 1421-1426.
- [97] OSTERLE W, LI P X. Mechanical and thermal response of a nickel-base superalloy upon grinding with high removal rates[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1997, 238: 357-366.
- [98] 张志伟. 镍基高温合金高效深切成型磨削关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- ZHANG Zhiwei. Research on key technology of high efficiency profile grinding of nickel-based superalloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [99] BRINSMEIER E, MEYER D, HUESMANN-CORDES A G, et al. Metalworking fluids mechanisms and performance[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2015, 64: 605-628.
- [100] BRIAN ROWE W. Temperatures in grinding-a review[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*, 2017, 139: 121001-1.
- [101] LI B K, LI C H, ZHANG Y B, et al. Effect of the physical properties of different vegetable oil-based nanofluids on MQLC grinding temperature of Ni-based alloy[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89: 3459-3474.
- [102] 任敬心, 杨茂奎, 李雅卿, 等. 镍基高温合金的磨削特征[J]. *航空学报*, 1997, 18(6): 755-758.
- REN Jingxin, YANG Maokui, LI Yaqing, et al. Grinding characteristic of nickel-based superalloy[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1997, 18(6): 755-758.
- [103] ZENG Q D, LIU G, LIU L, et al. Investigation into grindability of a superalloy and effects of grinding parameters on its surface integrity[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2014, 229(2): 238-250.
- [104] 傅玉灿, 田霖, 徐九华, 等. 磨削过程建模与仿真研究现状[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(7): 197-205.
- FU Yucan, TIAN Lin, XU Jiuhua et al. Development and application on the grinding process modeling and simulation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(7): 197-205.
- [105] PATNAIK D U S, SINGH V, VENKATESWARA R P. A new model for grinding force prediction and analysis[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50: 231-240.
- [106] LI H N, AXINTE D. On a stochastically grain-discretized model for 2D/3D temperature mapping prediction in grinding[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 116: 60-76.
- [107] ABU-MAHFOUZ I, ARISS O E, ESFAKUR R A H M, et al. Surface roughness prediction as a classification problem using support vector machine[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92: 803-815.
- [108] ULUTAN D, OZEL T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51: 250-280.
- [109] ZHANG D, LI C, ZHANG Y, et al. Experimental research

- on the energy ratio coefficient and specific grinding energy in nanoparticle jet MQL grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78: 1275-1288.
- [110] LIU Q, HUANG G Q, XU X P, et al. A study on the surface grinding of 2D C/SiC composites[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93: 1595-1603.
- [111] MUELLER S, WIRTZ C, TRAUTH D, et al. Material removal mechanisms in grinding of two-phase brittle materials[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95: 287-298.
- [112] ZHANG Z Y, SHI Z F, DU Y F, et al. A novel approach of chemical mechanical polishing for a titanium alloy using an environment-friendly slurry[J]. Applied Surface Science, 2018, 427: 409-415.
- [113] LIU Q, HUANG G Q, FANG C F, et al. Experimental investigations on grinding characteristics and removal mechanisms of 2D-Cf/C-SiC composites based on reinforced fiber orientations[J]. Ceramics International, 2017, 43(17): 15266-15274.
- [114] THAKUR A, GANGOPADHYAY S. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based superalloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 100: 25-54.
- [115] QI H, FAN J M, WANG J, et al. Impact erosion by high velocity micro-particles on a quartz crystal[J]. Tribology International, 2015, 82: 200-210.
- [116] SINHA M K, SETTI D, GHOSH S, et al. An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 21: 124-133.
- [117] BHADURI D, SOO S L, NOVovic D, et al. Ultrasonic assisted creep feed grinding of Inconel 718[J]. Procedia CIRP 2013, 6: 615-620.
- [118] YAO C F, JIN Q C, HUANG X C, et al. Research on surface integrity of grinding Inconel 718[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65: 1019-1030.
- [119] XU X P, YU Y Q, XU H J. Effect of grinding temperatures on the surface integrity of a nickel-based superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129: 359-363.
- [120] LI H N, AXINTE D. Textured grinding wheels: A review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 109: 8-35.
- [121] CHEN M, LI X T, SUN F G, et al. Studies on the grinding characteristics of directionally solidified nickel-based superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 116: 165-169.
- [122] ZENG Q D, LIU G, LIU L, et al. Investigation into grindability of a superalloy and effects of grinding parameters on its surface integrity[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2014, 229(2): 238-250.
- [123] XU X P, YU Y Q. XPS and SEM characterization of wheel/workpiece interface in grinding of superalloy[J]. Surface and Interface Analysis, 2002, 33: 343-350.
- [124] BARRETO L O, RUZZI R S. Performance evaluation of the minimum quantity of lubricant technique with auxiliary cleaning of the grinding wheel in cylindrical grinding of N2711 steel[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2017, 139: 121018.
- [125] YANG M, LI C H, ZHANG Y B, et al. Maximum undeformed equivalent chip thickness for ductile-brittle transition of zirconia ceramics under different lubrication conditions[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 122: 55-65.
- [126] 黄春新, 张定华, 姚倡锋, 等. 磨削参数对 GH4169 高温合金磨削表面特征影响研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(2): 210-214.
- HUANG Chunxin, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. A study of influence of grinding parameters on surface characteristics during grinding GH4169 superalloy[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(2): 210-214.
- [127] BHADURI D, SOO S L, ASPINWALL K K, et al. A study on ultrasonic assisted creep feed grinding of nickel based superalloys[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 359-364.
- [128] LIU Q, CHEN X, GINDY N. Assessment of Al_2O_3 and superabrasive wheels in nickel-based alloy grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33: 940-951.
- [129] YANG X, LIU C R. Machining titanium and its alloys[J]. Machining Science and Technology, 1999, 3(1): 107-139.
- [130] CAO D J, TA N, ZHANG L. Unit-cell design for two-dimensional phase-field simulation of microstructure evolution in single-crystal Ni-based superalloys during solidification[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2017, 27(6): 678-686.
- [131] CAO Y L, GUAN J Y, LI B, et al. Modeling and simulation of grinding surface topography considering wheel vibration[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66: 937-945.
- [132] YU H, WANG J, LU Y. Simulation of grinding surface roughness using the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84: 861-871.

- [133] DING W F, DAI C W, YU T Y, et al. Grinding performance of textured monolayer CBN wheels: Undeformed chip thickness nonuniformity modeling and ground surface topography prediction[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 122: 66-80.
- [134] LU X C, ZHANG H W, LU K. Strain-induced ultrahard and ultrastable nanolaminated structure in nickel[J]. *Science*, 2013, 342: 337-340.
- [135] BARRY J, BYRNE J. TEM study on surface white layer in two turned hardened steels[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 325: 356-364.
- [136] 陈珍珍. 多孔复合结合剂立方氮化硼砂轮高效磨削研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- CHEN Zhenzhen. High-efficiency grinding with porous composite-bonded CBN wheels[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [137] NOUIOUA M, YALLESE MA, KHETTABI R, et al. Comparative assessment of cooling conditions, including MQL technology on machining factors in an environmentally friendly approach[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017, 91: 3079-3094.
- [138] DING W F, BARBARA L, ZHU Y J, et al. Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(1): 109-134.
- [139] DING W F, XU J H, CHEN Z Z, et al. Grindability and surface integrity of cast nickel-based superalloy in creep feed grinding with brazed CBN abrasive wheels[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, 23: 501-510.
- [140] ZHAO Z C, FU Y C, XU J H, et al. An investigation on high-efficiency profile grinding of directional solidified nickel-based superalloys DZ125 with electroplated CBN wheel[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83: 1-11.
- [141] SPUR G, NIEWELT W. Creep feed grinding of nickel-based alloys with advanced corundum and with CBN grinding wheels[J]. *Precision Engineering*, 1994: 321-326.
- [142] 杜随更, 姜哲, 张定华, 等. GH4169DA 磨削表面变质层软化机理[J]. *航空学报*, 2014, 35: 1446-1451.
- DU Suigeng, JIANG Zhe, ZHANG Dinghua, et al. Softening mechanism of grinding surface metamorphic layer of GH4169DA[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35: 1446-1451.
- [143] ARRAZOLA P J, KORTABARRIA A, MADARIAGA A, et al. On the machining induced residual stresses in IN718 nickel-based alloy: Experiments and predictions with finite element simulation[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, 41: 87-103.
- [144] DING W F, ZHANG L C, LI Z, et al. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88: 2939-2968.
- [145] MAHDI M, ZHANG L C. Residual stresses in ground components caused by coupled thermal and mechanical plastic deformation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 95: 238-245.
- [146] PENG R L, ZHOU J, JOHANSSON S, et al. Surface integrity and the influence of tool wear in high speed machining of Inconel718[C]//*Proceedings of the 13th International Conference on Fracture*, Beijing, China, June16-21, 2013.
- [147] OSTERLE W, LI P X, NOLZE G. Influence of surface finishing on residual stress depth profiles of a coarse-grained nickel-base superalloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 262: 308-311.
- [148] 付鹏飞, 左从进, 毛智勇, 等. 电子束焊接 GH536 合金残余应力分布小孔法测试[J]. *焊接学报*, 2005, 26(11): 21-23.
- FU Pengfei, ZUO Congjin, MAO Zhiyong, et al. Weld residual stress distribution of GH536 superalloy with EBW measured by Mathar method[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(11): 21-23.
- [149] YANG J, JIANG H, YAO Z H, et al. Limitations of calculating stress relaxation limit by function-fitting of Inconel718 superalloy[J]. *Materials Letters*, 2018, 221: 89-92.
- [150] JIA D Z, LI C H, ZHANG Y B, et al. Specific energy and surface roughness of minimum quantity lubrication grinding Ni-based alloy with mixed vegetable oil-based nanofluids[J]. *Precision Engineering*, 2017, 50: 248-262.
- [151] ZHANG M J, TAN Y, ZHOU F J, et al. Analysis of flow field in cutting zone for spiral orderly distributed fiber tool[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92: 4345-4354.
- [152] ZHANG Y, LI C, JIA D, et al. Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87(1): 930-940.
- [153] WANG P Z, HE Z S, ZHANG Y X, et al. Control of grinding surface residual stress of inconel 718[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 174: 504-511.
- [154] MEI Y M, YU Z H, YANG Z S. Experimental investigation of correlation between attrition wear and features of acoustic emission signals in single-grit grinding[J]. *International Journal of Advanced*

- Manufacturing Technology, 2017, 93: 2275-2287.
- [155] WANG R Q, DAI S J, ZHANG H B, et al. The temperature field study on the annular heat source model in large surface grinding by cup wheel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93: 3261-3273.
- [156] BELL A, JIN T, STEPHENSON D J. Burn threshold prediction for high efficiency deep grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51: 433-438.
- [157] NADOLNY K, ROKOSZ K, KAPLONEK W, et al. SEM-EDS-based analysis of the amorphous carbon-treated grinding wheel active surface after reciprocal internal cylindrical grinding of titanium grade 2® alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90: 2293-2308.
- [158] ABDULLAH A, FARHADI A, PAK A. Ultrasonic-assisted dry creep-feed up-grinding of superalloy Inconel738LC[J]. Experimental Mechanics, 2012, 52: 843-853.
- [159] SHI Z, MALKIN S. Wear of Electroplated CBN Grinding Wheels [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2006, 128: 1-9.
- [160] ASPINWALL D K, SOO S L, CURTIS D T, et al. Profiled superabrasive grinding wheels for the machining of a nickel based superalloy[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 335-338.
- [161] LI S S, WU Y B, FUJIMOTO M, et al. Improving the working surface condition of electroplated CBN grinding quill in surface grinding of Inconel 718 by the assistance of ultrasonic vibration[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2016, 138(7): 722-727.
- [162] GIFT F C, MISIOLEK W Z. Fluid performance study for groove grinding a nickel-based superalloy using electroplated cubic boron nitride (CBN) grinding wheels [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2004, 126: 451-458.
- [163] GIFT F C, MISIOLEK W Z, FORCE E. Mechanics of loading for electroplated cubic boron nitride (CBN) wheels during grinding of a nickel-based superalloy in water-based lubricating fluids [J]. Journal of Tribology, 2004, 126(4): 795-801.
- [164] CURTIS D T, SOO S L, ASPINWALL D K, et al. Evaluation of workpiece surface integrity of following point grinding of advanced titanium and nickel based alloys[J]. Procedia CIRP, 2016, 45: 47-50.
- [165] HASUDA Y, HANDA A, KOBORI Y, et al. Grinding of superalloys using metal-bonded CBN wheel[J]. Key Engineering Materials, 2012, 523-524: 143-148.
- [166] ZHAO Z C, FU Y C, XU J H, et al. Behavior and quantitative characterization of CBN wheel wear in high-speed grinding of nickel-based superalloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016: 1-11.
- [167] ZHOU Y G, GONG Y D, ZHU Z X, et al. Modelling and optimisation of surface roughness from microgrinding of nickel-based single crystal superalloy using the response surface methodology and genetic algorithm[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85: 2607-2622.
- [168] ZHOU Y G, GONG Y D, CAI M, et al. Study on surface quality and subsurface recrystallization of nickel-based single-crystal superalloy in micro-grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90: 1749-1768.
- [169] ERANKI J, XIAO G, MALKIN S. Evaluating the performance of “seeded gel” grinding wheels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1992, 32: 609-625.
- [170] DANBATT A Y S, SARHAN A A D, SAYUTI M. et al. Ultrasonic assisted grinding of advanced materials for biomedical and aerospace applications-a review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 6: 1-34.
- [171] 冯平法, 王健健, 张建富, 等. 硬脆材料旋转超声加工技术的研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 3-21.
- FENG Pingfa, WANG Jianjian, ZHANG Jianfu, et al. Research status and future prospects of rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 3-21.
- [172] 张洪丽. 超声振动辅助磨削技术及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- ZHANG Hongli. Study on the technology and mechanism of ultrasonic vibration assisted grinding[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [173] QU N S, ZHANG Q L, FANG X L, et al. Experimental investigation on electrochemical grinding of Inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2015, 35: 16-19.
- [174] LAUWERS B, KLOCKE F, KLINK A, et al. Hybrid processes in manufacturing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(2): 561-583.
- [175] CURTIS D T, SOO S L, ASPINWALL D K, et al. Electrochemical superabrasive machining of a nickel-based aeroengine alloy using mounted grinding points[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1): 173-176.

- [176] 刘志东. 放电诱导可控烧蚀高效加工典型工艺方法[J]. 电加工与模具, 2012(1): 1-6.
- LIU Zhidong. Series typical efficient machining methods of controllable burning by discharge-induced[J]. Electromachining and Mould, 2012(1): 1-6.
- [177] PARTHASARATHY A, MALKIN S. Effect of fluid application conditions on grinding behavior[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224: 225-235.
- [178] IRANI R A, BAUER R J, WARKENTIN A. A review of cutting fluid application in the grinding process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45: 1696-1705.
- [179] PENG R T, HUANG X F, TANG X Z, et al. Performance of a pressurized internal-cooling slotted grinding wheel system[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94: 2239-2254.
- [180] HEINZEL C, ANTUPOV G. Prevention of wheel clogging in creep feed grinding by efficient tool cleaning[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61: 323-326.
- [181] MORGAN M N, JACKSON A R, WU H, et al. Optimisation of fluid application in grinding[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57: 363-366.
- [182] WEBSTER J A, CUI C, MINDEK JR R B. Grinding fluid application system design[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1995, 44: 333-338.
- [183] LI B K, LI C H, ZHANG Y B, et al. Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29: 1084-1095.
- [184] ZHANG Y, LI C, JIA D, et al. Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS_2 /CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 99: 19-33.
- [185] 傅玉灿, 徐鸿钧. 开槽砂轮缓磨时射流冲击强化换热的研究[J]. 航空学报, 2001, 22(3): 222-226.
- FU Yucan, XU Hongjun. Study on enhancing heat transfer with jet impingement in creep feed deep grinding with slotted grinding wheel[J]. Acta Aeronautics et Astronautics Sinica, 2001, 22(3): 222-226.
- [186] 张捷, 张会改, 廖映华, 等. 内冷式砂轮的流道设计及分析[J]. 机械设计与制造, 2010(4): 36-38.
- ZHANG Jie, ZHANG Huigai, LIAO Yinghua, et al. The design and analysis on flow of the cold-wheels[J]. Machinery Design and Manufacture, 2010(4): 36-38.
- [187] MANDAL B, SINGH R, DAS S, et al. Improving grinding performance by controlling air flow around a grinding wheel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51: 670-676.
- [188] LI C H, DING Y C, LU B H, et al. Analytical and experimental investigation of the nickel based superalloy using cryogenic cooling grinding[J]. Advanced Materials Research, 2009, 69-70: 354-358.
- [189] CHEN J J, FU Y C, HE Q S, et al. Environmentally friendly machining with a revolving heat pipe grinding wheel[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 719-727.
- [190] CHEN J J, FU Y C, LI Q L, et al. Investigation on induction brazing of revolving heat pipe grinding wheel[J]. Materials and Design, 2017, 116: 21-30.
- [191] 傅玉灿, 陈佳佳, 赫青山, 等. 基于热管技术的磨削弧区强化换热研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 189-199.
- FU Yucan, CHEN Jiajia, HE Qingshan, et al. Investigation of enhancing heat transfer in the grinding contact zone based on heat pipe[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 189-199.
- [192] DING W F, XU J H, CHEN Z Z, et al. Wear behavior and mechanism of single-layer brazed CBN abrasive wheels during creep-feed grinding cast nickel-based superalloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51: 541-550.
- [193] ZHANG Z Z, YAO P, ZHANG Z Y, et al. A novel technique for dressing metal-bonded diamond grinding wheel with abrasive waterjet and touch truing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93: 3063-3073.
- [194] CAI R, ROWE W B, MORGAN M N. The effect of porosity on the grinding performance of vitrified CBN wheels[J]. Key Engineering Materials, 2003, 238-239: 295-300.
- [195] ZHANG Z G, ZHU Y M, LI Z H. Influence of different pore-forming mechanism on superfinish grinding tools[J]. Advanced Materials Research, 2012, 418-420: 2024-2031.
- [196] ZHAO B, YU T Y, DING W F, et al. Effects of pore structure and distribution on strength of porous Cu-Sn-Ti alumina composites[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(6): 2004-2015.
- [197] KONG L Y, OSTADHASSAN M, LI C X, et al. Pore characterization of 3D-printed gypsum rocks: A comprehensive approach[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53: 5063-5078.
- [198] ZHAO B, GAIN A K, DING W, et al. A review on metallic porous materials: pore formation, mechanical

- properties, and their applications[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(5-8): 2641-2659.
- [199] CHEN Z Z, XU J H, DING W F, et al. Grinding performance evaluation of porous composite-bonded CBN wheels for Inconel 718[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(4): 1022-1029.
- [200] DING W F, XU J H, CHEN Z Z, et al. Fabrication and performance of porous metal-bonded CBN grinding wheels using alumina bubble particles as pore-forming agents[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67: 1309-1315.
- [201] JIANG B, ZHAO N Q, SHI C S, et al. Processing of open cell aluminum foams with tailored porous morphology[J]. Scripta Materialia, 2005, 53: 781-785.
- [202] MAO J B, ZHANG F L, LIAO G C, et al. Effect of granulated sugar as pore former on the microstructure and mechanical properties of the vitrified bond cubic boron nitride grinding wheels[J]. Materials and Design, 2014, 60: 328-333.
- [203] LI Q L, REN H Z, LEI W N, et al. Investigation of temperature on the interfacial microstructure and performance of CBN grinding wheels by high-frequency induction brazing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95: 2111-2118.
- [204] GHOSH A, CHATTOPADHYAY A K. Interfacial reaction and wetting behavior of active Ag-Cu filler alloys on surface of CBN grits and its influence on failure patterns of brazed joints[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2017, 68: 96-103.
- [205] HUANG G Q, ZHANG M Q, GUO H, et al. The effects of temperature curves on the diamond/Ni-Cr interfacial properties in high-frequency induction brazing[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2017, 8(2): 133-146.
- [206] WANG Y, DUAN Z Z, CHEN G, et al. Effects of brazing temperature on microstructure and properties of interface between CBN and Co-based active filler metals[J]. Vacuum, 2017, 145: 30-38.
- [207] SIMHAN D R, MUKHOPADHYAY P, GHOSH A. On segregation of Zr and wettability of active Ag-Cu-Zr alloy on cubic boron nitride surface[J]. Materials Letters, 2017, 207: 183-186.
- [208] DING W F, XU J H, SHEN M, et al. Development and performance of monolayer brazed CBN grinding tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(5-6): 491-495.
- [209] 丁文锋. 镍基高温合金高效磨削用单层钎焊立方氮化硼砂轮的研制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006
- DING Wenfeng. Research and development of monolayer brazed CBN wheels for high efficiency grinding nickel-based superalloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [210] PAL B, CHATTOPADHYAY A K, CHATTOPADHYAY A B. Development and performance evaluation of monolayer brazed CBN grinding wheel on bearing steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48: 935-944.
- [211] LU K. Stabilizing nanostructures in metals using grain and twin boundary architectures[J]. Nature Reviews, 2016, 1: 1-13.
- [212] PEI H Q, WEN Z X, ZHANG Y M, et al. Oxidation behavior and mechanism of a Ni-based single crystal superalloy with single α -Al₂O₃ film at 1000°C[J]. Applied Surface Science, 2017, 411: 124-135.
- [213] LIU X C, ZHANG H W, LU K. Formation of nano-laminated structure in nickel by means of surface mechanical grinding treatment[J]. Acta Materialia, 2015, 96: 24-36.

作者简介: 丁文锋(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事难加工材料高效精密磨削技术与应用研究。
E-mail: dingwf2000@vip.163.com
苗情, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要从事航空发动机镍基合金叶片磨削加工研究。
E-mail: qingmiao@nuaa.edu.cn