DOI: 10.3901/JME.2018.03.216

强化感应加热辅助磨削 Inconel718 的 残余应力主动调控*

李 峰¹ 李学崑² 融亦鸣³

(1. 太原理工大学机械工程学院 太原 030024;

2. 清华大学机械工程系 北京 100084;

3. 南方科技大学机械与能源工程系 深圳 518055)

摘要: 镍基高温合金 Inconel718 具有良好的高温强度和高耐蚀性能, 广泛应用于制造航空工业特别是燃气涡轮发动机的高温构件。然而最终的成形磨削工艺常常在零件表面形成较大的残余拉应力, 这对其疲劳强度和寿命等服役性能极为不利。研究和开发了一种基于磨削区的热温度梯度调节原理的复合磨削工艺, 以主动调节 Inconel718 零件表面残余应力分布。在磨削工艺中利用控制良好的感应加热装置将热源嵌入到工件亚表层, 通过对所需的温度梯度分布的主动控制实现对残余应力的调节。结果表明, 通过合理调节感应加热和磨削工艺参数, 可以获得较小的表面残余拉应力甚至压应力分布。本研究能够减少当前生产中为获得表面残余压应力而额外采取的喷丸等后续工艺, 实现磨削残余应力的在线主动控制, 且该技术也可以扩展推广应用到其他材料以及其他加工工艺中, 如切削、铣削等。

关键词: 镍基高温合金; 磨削残余应力; 感应加热; 聚能器(MPB-MFC); 主动控制

中图分类号: TG580; TG162

Active Control of the Residual stress in Inconel718 Grinding Assisted by the Strengthen Induction Heating

LI Feng¹ LI Xuekun² RONG Yiming³

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

3. Department of Mechanical Energy Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055)

Abstract: Nickel-based superalloy Inconel 718 possesses high strength and corrosion resistance, which is widely applied in aviation industry, especially the high temperature components of gas turbine engines. However, the final forming grinding process often forms a large residual tensile stress on the surface of the parts, which is detrimental to the fatigue strength and life of the parts. A combined grinding process based on the principle of the thermal gradient adjustment in grinding zone is studied, which could adjust the residual stress distribution on the surface of Inconel718 parts actively. In the combined grinding process, the heat source is embedded into the sub-surface of the workpiece by induction heating equipments well controlled, which can adjust the residual stress by the active control of the temperature gradient. The results show that the smaller surface residual tensile stress and even compressive stress distribution can be obtained by reasonably adjusting the parameters of the induction heating and grinding process. This study can reduce the extra shot peening process during the current production in order to obtain the compressive residual stress on the surface, and realize the on-line active control of the grinding residual stress. Furthermore, the combined grinding technology can be extended to the other materials and machining processes, such as cutting, milling, etc.

Key words: nickel-based superalloy; grinding residual stress; induction heating; metal powder bonded magnetic flux concentrator (MPB-MFC); active control

* 国家自然科学基金(U1430116)、太原理工大学校基金(2016QN08)和太原理工大学引进人才(tyut-rc201554a)资助项目。20170301 收到初稿, 20171012 收到修改稿

0 前言

镍基高温合金 Inconel718 具有良好的高温强度和耐腐蚀性能, 广泛应用于航空制造业^[1]。Inconel718 合金零件所占的重量比在 CF6 发动机中占 34%, CY2000 发动机中占 56%, PW4000 发动机中占 57%^[2]。Inconel718 主要应用于燃气涡轮发动机的涡轮盘及压气机 4~9 级叶片, 工作温度为 550~650 °C^[2]。Inconel718 叶片的最终加工工艺通常为磨削, 而磨削往往会在表面形成较大的残余拉应力, 因此会大幅降低零件的工作服役性能, 尤其是疲劳强度和寿命^[3-4]。根据国内外一般的零件抗疲劳性能要求, 零件最终磨削残余应力在一定深度范围内应具有较小的值(-100 MPa~100 MPa), 且表面最好是压应力^[5-6]。

国内外研究学者近几十年来针对磨削过程进行了较深入的研究, 包括磨削过程及残余应力的有限元仿真和试验分析。陈仁海等^[7]和胡忠辉等^[8]团队的研究成果均表明磨削残余应力是机械作用、热作用和相变综合作用的结果。王西彬等^[9-10]、田欣利等^[11-14]对陶瓷材料磨削进行了系统深入的研究。陶瓷材料属于硬脆性材料, 虽然其磨削性能与高温合金不同, 但是仍有借鉴意义。研究结果表明磨削力产生残余压应力, 而磨削温度是引起表面残余拉应力的最主要因素。康仁科和任敬心团队^[15-18]、李晓天等^[19]对高温合金及超高硬度材料的磨削研究发现, 残余拉应力与磨削力影响不十分明显, 主要与热作用表面烧伤有关。国外学者^[20-23]的研究也认为, 磨削表面残余应力是由磨削力、热作用和相变综合作用形成, 并且磨削区的高温以及高温梯度是形成残余拉应力的主要因素。

针对磨削区表面的过高温度的问题, 目前所使用的大多数方法都是通过采用较小的磨削用量、采用冷却介质等来降低磨削区温度^[24-27]。这种做法会降低生产效率, 且冷却介质如果不能有效降低温度, 零件表面仍然不能保证 100%的残余压应力分布, 仍需要进行后续喷丸等工艺处理。而对工件磨削表面的喷丸处理通常会破坏工件表面, 引起工件变形, 增加零件加工时间以及成本, 极大地影响生产效率^[28-29]。

本文从降低磨削温度梯度这一想法出发, 提出一种基于强化感应加热工艺辅助磨削的复合工艺, 并在前期研究了感应加热工艺的建模和工艺参数对加热温度的影响^[30-32]。图 1 是磨削温度梯度的改善原理示意图, 通过植入一个外加的热源温度曲线, 实际磨削过程的温度梯度曲线将改变为如图所示的

新工艺温度曲线。磨削温度梯度的降低将实现最终残余应力分布的改善。图 2 是强化感应加热辅助磨削调控残余应力的复合工艺系统图, 通过强化感应加热工艺和表面冷却装置, 将会在磨削工艺前植入一个图 1 中的外加热源。

图 1 磨削温度梯度改善原理示意图

图 2 强化感应加热辅助磨削调控残余应力复合工艺系统图

本文将深入研究这种复合工艺的控制, 建立电磁-热耦合的强化感应加热有限元数值仿真模型以及磨削残余应力有限元计算模型, 研究影响最终磨削残余应力分布的主要工艺参数。通过搭建强化感应试验平台以及复合工艺系统集成试验装置, 来验证工艺系统有限元数值模型的有效性以及这种调控残余应力工艺的可行性。最后, 将通过调控复合工艺的主要参数实现磨削表面残余压应力分布。

本研究中的强化感应加热复合磨削工艺从降低磨削区温度梯度原理出发, 具有一定的创新性。能够减少当前生产中为获得表面残余压应力而额外采取的喷丸等后续工艺, 实现磨削残余应力的在线主动控制, 且该技术也可以扩展推广应用到其他材料以及其他加工工艺中, 如切削、铣削等。

1 可行性分析

为了验证本文提出的强化感应加热辅助磨削复合工艺的可行性, 首先建立了植入内热源和磨削热的简化有限元数值模型, 并进行了仿真分析。图 3 是复合工艺的过程温度场分布情况, 可以看出, 强

化感应加热工艺在工件表层以下一定深度内引入热源,从而改变了磨削过程中的温度场分布形态。图 4a 和 4b 分别是普通磨削工艺及复合磨削工艺下的工件亚表层截面内的最终残余应力分布,植入的内热源使工件表面的残余拉应力转变为了压应力,且工件表面一定深度以内均为残余压应力的分布。

图 3 复合工艺过程中的工件内部温度场分布

(a) 普通磨削工艺的残余应力

(b) 复合工艺的残余应力

图 4 普通磨削工艺及复合磨削工艺下的工件亚表层 (<5 mm) 内的残余应力有限元仿真结果

因此,初步有限元仿真可行性研究表明,强化感应加热辅助磨削复合工艺能够有效改善加工零件表层残余应力分布,进而提高零件的抗疲劳特性。然而,最终残余应力分布的有效调控与强化感应加热工艺参数以及磨削工艺参数的合理匹配有关,需要建立复合工艺下的有限元集成数值分析模型,并进行残余应力的精确调控研究。

2 数值建模

2.1 电磁-热-应力数学模型

强化感应加热过程是电-磁-热场的耦合作用过

程,如图 5 所示。磁导率 μ 是电-磁场转换计算中的主要影响参数;比热容 c 和热传导率 λ 是影响电磁-热场分析中的重要参数。而这些材料特性参数均是非线性的,与磁通量密度 B 和温度 T 有关。

图 5 电-磁-热场计算流程图

电-磁场域由麦克斯韦方程组控制^[33],考虑材料连续方程后的计算控制方程如式(1)和(2)。 A 和 φ 为方便计算而引入的中间量,其与电-磁场的主要场量关系如式(3)和(4)

$$\nabla^2 A - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu J \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{q}{\varepsilon} \quad (2)$$

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

$$E = -\nabla \varphi - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (4)$$

式中, J 为传导电流密度,由电输入参数的电流强度 I 和频率 f 决定; A 为磁矢量势; μ 为电导率; φ 为电标量势; q 为电荷密度; ε 为相对电介质; t 为时间。

热场计算域的温度控制方程如式(5)^[33]

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = Q_v = \sigma E^2 \quad (5)$$

式中, c 为材料比热容; λ 为热传导系数; ρ 为材料密度; Q_v 为电磁场涡流形成的热场密度。

假设被加工零件是各向同性的均匀性分布材料,则式(6)~(10)是残余应力场的数学控制方程。一般情况下应变的产生是机械、热和相变三者综合作用的结果,但 Inconel718 常温基体组织为 γ 奥氏体,在磨削过程中不会产生由奥氏体向马氏体的相变。因此,不考虑相变作用后,复合工艺下磨削时的总应变增量 $d\varepsilon_{ij}$ 由三部分组成,分别为弹性应变增量 $d\varepsilon_{ij}^e$ 、热应变增量 $d\varepsilon_{ij}^h$ 和塑性应变增量 $d\varepsilon_{ij}^p$ ^[34-35],如式(7)~(9)所示。应力计算增量方程如式(10)

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^h + d\varepsilon_{ij}^p \quad (6)$$

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{E} \left[(1+\nu) d\sigma_{ij} - \delta_{ij} \nu d\sigma_{kk} \right] \quad (7)$$

$$d\varepsilon_{ij}^{th} = \sum_{k=1}^6 \gamma_k \int_0^T \alpha_k(T) dT \quad (8)$$

$$d\varepsilon_e^p = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p} \quad (9)$$

$$d\sigma_{ij} = \mathbf{D} (d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^{th} + d\varepsilon_{ij}^p) \quad (10)$$

其中, 塑性应变增量的计算考虑了 Von-Mises 屈服准则和流动法则。\$E\$ 为材料弹性模量; \$\mathbf{D}\$ 为应力应变关系矩阵, 与材料参数相关; \$\nu\$ 为泊松比; \$\alpha\$ 为热膨胀系数。

2.2 强化感应加热有限元模型

图 6a 是基于新型聚能器 MPB-MFC 的强化感应加热器结构, 因为感应加热工艺要与平面磨床相匹配, 所以平面感应线圈的机构设计如图所示。为了降低加热损耗, 线圈由紫铜制作, 且内部循环通入冷却水, 确保线圈在工艺系统运行过程中始终接近常温。MPB-MFC 能够有效聚集感应线圈产生的空间磁力线, 使感应加热的能量几乎全部集中于被加热工件的表面(图 6b), 加热效率较高^[30-32,36-37]。

强化感应加热工艺的平面分析系统如图 7 所示, 感应加热电源为感应线圈提供输入的具有一定强度 \$I\$ 和频率 \$f\$ 的电流, 由于电磁感应现象, 工件内部由于涡流发热, 结合表面冷却 HTC, 最终移动工件内部可产生加热工件的内热源。图 8 是基于电磁热分析软件 Flux2D 建立的可移动强化感应加热

系统有限元模型, 该模型可以计算电-磁-热耦合场, 获取加热工件的温度场分布。全计算域内共 20 718 个二阶的面单元, 51 985 个求解节点。其中, 压缩空气区域是动态移动仿真网格, 采用了收敛性较好的结构化网格。线圈和工件亚表面是计算过程温度和电磁场量有较大变化梯度的区域, 因此需要优化划分, 网格采用 0.1 mm 的结构化网格, 且 1 mm 内有至少 10 层网格, 保证了结果的收敛性及计算准确性。其余部分的网格采用了三角形网格。

图 6 强化感应加热器及 MPB-MFC

图 7 强化感应加热工艺 2-D 系统图

图 8 强化感应加热工艺系统的可移动有限元计算模型

使用振动样品磁强计 LAKESHORE-730T 来测量不同温度下磁极化率 \$M\$ 和 \$H\$ 的关系, 并拟合 \$B\$-\$H\$ 关系, 回归模型如式(11)和(12)^[38]

$$B(H) = \mu_0 H + J_s \frac{H_a + 1 - \sqrt{(H_a + 1)^2 - 4H_a(1-a)}}{2(1-a)} \quad (11)$$

$$H_a = \mu_0 H \frac{\mu_r - 1}{J_s} \quad (12)$$

本研究采用适用于中高频感应加热的一种新型聚能器 MPB-MFC(Ferrotron 559H), 其磁导率曲线如图 9 所示。

图 9 聚能器 Ferrotron 559H 的 μ - H 曲线

2.3 磨削热应力有限元模型

图 10 是基于 Abaqus 软件建立的强化感应加热辅助磨削复合工艺的 2-D 有限元残余应力仿真计算模型。有限元模型中工件网格采用感应加热一样的结构化网格, 共 6 400 个二阶计算单元。如图所示, 面 1 被磨削夹具固定, 面 3 和面 4 定义为工件与周围空气进行热量交换的热传递边界条件, 而强化感应加热植入的内热源以一定形态施加到工件内部(图 8 有限元计算的内热源结果)。磨削热源作为工件残余应力计算的外加载荷施加到工件表面(面 2), 取 $L=200$ mm, 待工件温度最终恢复到室温状态时的应力状态视为其最终的残余应力场分布。国内外学者近二十年来对磨削热模型进行了大量数值仿真研究和试验验证, 公认为三角形的磨削热模型更能真实反应实际磨削过程中热场的演变^[23]。本文建立的磨削三角形热源模型如图 11 所示^[23], 其中, Q_w 是磨削区传入工件的热流量, L_c 是磨削区长度。三角形磨削热源分布的函数为式(13), 其中 L_c 取 2 mm。

图 10 复合磨削工艺的 2-D 有限元残余应力仿真计算模型

图 11 三角形磨削热源模型

Inconel718 的电阻率、比热容、热传导率、热膨胀系数、弹性模量和泊松比与温度的函数模型, 是热场和应力场有限元计算的重要材料参数^[1,2], 通过离散分析后导入图 10 的残余应力仿真模型进行计算。

采用 Johnson-Cook 模型来表征 Inconel718 合金的应力应变本构关系, 数学模型如式(14)所示。该模型综合考虑了热场和塑性应变过程中, 真实应变、应变率以及温度等三个主要因素对流动应力的影响。表 1 是通过 Hopkinson 压杆试验(SHPB 试验)测量并拟合后的 Inconel718 合金 Johnson-Cook 模型系数^[39]。

表 1 基于 SHPB 试验的 Johnson-Cook 本构模型系数

系数	A	B	n	C	m	温度 $T_{melt}/^{\circ}\text{C}$	温度 $T_{ref}/^{\circ}\text{C}$
数值	450	1 700	0.65	0.017	1.3	1320	20

$$q(x) = \begin{cases} 0 & x \leq -L_c/2 \\ \frac{2Q_w}{L_c} \times \frac{\frac{L_c}{2} + x}{\frac{L_c}{2} - a} & -\frac{L_c}{2} \leq x \leq -a \\ \frac{2Q_w}{L_c} \times \frac{\frac{L_c}{2} - x}{\frac{L_c}{2} + a} & -a \leq x \leq \frac{L_c}{2} \\ 0 & x \geq L_c/2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) =$$

$$\left(A + B\varepsilon^n \right) \left[1 + C \ln \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right] \quad (14)$$

式中, σ 为应力; ε 为真实应变; A 、 B 、 n 均为应变强化系数; C 为应变率强化系数; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; ε_0 为参考应变; T 为实时温度; T_{melt} 为材料溶化温度, T_{ref} 为室温。

3 复合工艺试验系统

图 12 是强化感应加热辅助磨削复合工艺试验系统, 主要包括强化感应加热装置、表面冷却水装置和磨削系统三部分。其中, 强化感应加热装置由感应加热电源、变频调压装置、感应线圈、聚能器 MPB-MFC 组成, 通过变频调压, 可以实现频率 10 kHz~50 kHz 可调、电流强度 0~1 200 A 可控的线圈电流供给。表面冷却装置可以提供一定压强的冷却水或者液氮喷射, 对在感应加热后磨削前的工件表面进行同步冷却。

图 12 复合磨削工艺试验平台

图 13 是强化感应加热工件表面及亚表层温度采集系统原理图, 工件表面温度由红外热成像仪 NEC R300W2-NNU 测定, 工件亚表层内的温度梯度通过半自然热电偶来测量, 具体的排丝布置方法如图 13b 所示。

(a) 温度测量系统原理

(b) 热电偶布置-排丝法

图 13 工件温度测量系统

4 仿真结果与分析

4.1 强化感应加热温度场分布

图 14 是表面施加 0.5 MPa 条件下, 强化感应加热有限元仿真某一瞬间的工件温度场分布, 温度分布趋势符合预期设想。如果表面继续施加较大的冷却系数 HTC (液氮冷却), 则在图示的温度场基础上会形成外冷内热的分布形态。为了验证本文所建立的强化感应加热工艺的有限元数值仿真模型的有效性, 进行了两组移动状态下强化感应加热的温度验证试验, 试验参数见表 2。

图 14 强化感应加热仿真温度场分布

表 2 强化感应加热试验控制参数

试验	I/A	f/kHz	d/mm	$v/(mm/s)$	冷却条件
1	700	46.5	1	5	0.5 MPa 气冷
2	500	34	2	5	0.5 MPa 气冷

图 15 为试验条件 1($I=700 A, f=46.5 kHz$)时, 工件纵截面内表面以下 1 mm 和 5 mm 处的预埋热电偶所测得的温度曲线与仿真结果对比; 图 16 为试验参数为 2($I=500 A, f=34 kHz$)时, 工件表面 1 mm 和 3 mm 处的温度试验数据与有限元仿真对比结果。结果表明, 有限元仿真温度结果与试验具有相同的趋势, 且跟随误差也较小, 平均误差均小于 15%。

图 15 温度变化历程对比($I=700 A, f=46.5 kHz$) 图 16 温度变化历程对比($I=500 A, f=34 kHz$)

4.2 残余应力场分布

图 17 是普通磨削时, 磨削深度 $a_p=100 \mu m$ 和 $a_p=50 \mu m$ 时工件的残余应力分布对比图。磨削残余应力主要集中在表面很薄的一层(2 mm 之内), 且分布形态与温度梯度分布一致, 与多数国内外学者研究结果相符。 $a_p=100 \mu m$, 表面最大拉应力 $\sigma_{surf} \approx 350 MPa$, 拉应力作用层深度 $\delta \approx 2 mm$; $a_p=50 \mu m$, $\sigma_{surf} \approx 80 MPa$,

图 17 不同 a_p 沿工件深度方向的温度和残余应力分布对比

$\delta \approx 0.5$ mm。可见,普通磨削在表面形成较大的残余拉应力。

图18和图19分别为在强化感应加热辅助磨削的复合工艺中,磨削深度 $a_p=50$ μm 时工件的过程温度场分布以及最终的内部残余应力分布结果。图20是工件纵截面内沿深度方向,普通磨削和复合工艺两种情况下的温度和残余应力对比结果。可以看出,感应加热工艺的存在,改变了磨削过程中磨削区温度梯度的分布(图18和图20a),使工件表面最终形成了残余压应力分布(图19和图20b),且压应力的作用深度约1 mm。工件表面的残余应力从图17中的80 MPa减少到图20b中的-30 MPa,降幅约150%。同时也能看出,强化感应加热引入的内部热源会在工件内部形成一个残余拉应力的波峰(2 mm处),且波峰深度与内热源深度有关。

图18 强化感应加热辅助磨削的工件温度场($a_p=50$ μm)

图19 强化感应加热辅助磨削的工件残余应力($a_p=50$ μm)

(a) 温度

(b) 磨削后砂轮进给方向(X)的残余应力

图20 普通磨削和复合工艺下的温度和残余应力分布对比

可见,强化感应加热工艺引入的内热源是改变

残余应力的关键因素,为了进一步研究其对残余应力分布的影响,本文进行了三个因素的单因素仿真试验分析,结果分别如图21~23所示。图21内热源强度(感应加热功率)影响结果看出, Q_i 增大1 000 W/mm^2 ,表面残余应力值降低60 MPa。图22热源植入深度从2 mm变化到3 mm,表面残余应力降低50 MPa;而从3 mm变化到4 mm,降低约25 MPa。这一结果与前面分析的磨削温度结果其实相一致,磨削温度梯度主要分布在表面区域,所以植入热源的深度越深,对磨削温度梯度的改善作用其实越弱。图23移动速度影响可以看出,速度越大,强化感应加热植入的热源作用越微弱,当速度为20 mm/s时,残余应力分布形态与普通磨削相似,未得到有效改善,强化感应加热几乎未来得及发挥作用。

图21 内热源功率对工件残余应力分布的影响

图22 内热源深度对工件残余应力分布的影响

图23 移动速度对工件残余应力分布的影响

综上,通过有限元数值仿真的单因素分析以及考虑实操可行性,主要选定的复合工艺调控参

数为感应线圈电流强度 I 、电流频率 f 、工件速度 v 以及表面冷却系数 HTC 。

5 表面残余应力调控分析

在实际感应加热工业应用中,中高频在表面加热工艺中应用较广。考虑到表面冷却系数 HTC 的复杂性,通过仿真结合试验的方法,确定出一定压力下的液氮冷却能够达到 $HTC=10\,000\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$,且能够帮助强化感应加热工艺实现工件外冷内热的温度分布形态。综合考虑上述实际因素,本文首先固定 f 和 HTC 进行分析,图 24 则是 $f=37.5\text{ kHz}$ 和 $HTC=10\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 时,通过建立并求解残余应力响应曲面控制模型得到的零应力临界电流强度曲线。临界曲线的上部区域为残余应力区,下部区域为拉应力区。可以看出,随着磨削深度增加,获得零应力值需要输入的电流强度越大。磨削深度一定,移动速度的增加,需要更高的线圈电流强度输入,才能获得理想的表面残余压应力。从第 4.2 节的单因素分析可知,速度太高导致感应加热作用不明显,所以本文仅做了最大速度 $v=20\text{ mm/s}$ 的分析。图 24 的临界曲线能够为后续的残余应力试验参数的调控匹配提供参考依据。

图 24 表面残余应力临界曲线

通过图 12 所建立的复合磨削工艺试验平台,进行了一系列磨削残余应力调控试验。磨削表面残余应力通过 XRD 高温合金测量设备 Xstress3000 进行多次测量取平均值;沿磨削表面以下深度方向的残余应力则通过线切割切块、抛光打磨后再进行 XRD 测量。图 25 是 $f=37.5\text{ kHz}$, $v=5\text{ mm/s}$ 时,普通磨削和复合磨削工艺下的工件表面残余应力随磨削深度 a_p 的试验数据对比结果。可以看出,强化感应加热工艺的存在,比无感应加热的普通磨削下所获得的表面残余应力都要低,且表面残余应力与磨削参数 a_p 呈递增关系。感应电流 I 增大 400 A,表面残余应力约降低 80 MPa。 $a_p=10\text{ μm}$ 时, $I=800\text{ A}$ 和 $I=1\,200$

A 均可获得表面残余压应力,与图 24 中的有限元仿真调控结果相同。

图 25 I 和 a_p 对磨削表面残余应力的影响

图 26 是 $f=37.5\text{ kHz}$, $I=800\text{ A}$ 时,复合磨削工艺 $v=10\text{ mm/s}$ 和 $v=5\text{ mm/s}$ 下的工件表面残余应力随磨削深度 a_p 的试验数据结果。可以看出,工件进给速度 v 与工件表面残余应力呈正比,速度越高,获得的表面残余应力越大。这一结果与前面有限元仿真分析的速度太高将会降低强化感应加热工艺的辅助效果有关。 $a_p=10\text{ μm}$ 时, $v=10\text{ mm/s}$ 和 $v=5\text{ mm/s}$ 均可获得表面残余压应力。

图 26 v 对磨削表面残余应力的影响

图 27 和图 28 分别是 $f=37.5\text{ kHz}$, $v=5\text{ mm/s}$, $I=800\text{ A}$ 时,复合磨削工艺 $a_p=10\text{ μm}$ 和 $a_p=20\text{ μm}$ 下的工件纵截面内沿深度方向的残余应力试验数据结果。可以看出, $a_p=10\text{ μm}$ 和 $a_p=20\text{ μm}$ 时,沿磨削

图 27 $a_p=10\text{ μm}$ 时的磨削深度方向的残余应力分布

深度方向的残余应力分布趋势相同。不同的是,在其他强化感应加热工艺参数和磨削为 $f=37.5$ kHz, $v=5$ mm/s, $I=800$ A 时, $a_p=10$ μm 的磨削深度能够获得表面约 -40 MPa 的残余压应力;而 $a_p=20$ μm 参数下获得约 25 MPa 的残余拉应力。

图 28 $a_p=20$ μm 时的磨削深度方向的残余应力分布

基于速度 v 的增高会降低残余应力的改善效果,并且为了获得更多磨削深度范围内的表面残余压应力分布,本文继续进行了感应电流 I 的试验和有限元仿真调控,如图 29 所示。由于强化感应加热电源的试验条件所限,最大试验线圈感应电流为 1 200 A,在 $I=1200$ A 试验条件下, $a_p \leq 30$ μm 的磨削参数范围,均可获得表面残余压应力。在 $I=1900$ A 时,有限元仿真结果表明, $a_p \leq 40$ μm 均可获得表面残余压应力。所得结果与图 24 的有限元调控结果相同,再次验证了调控方法的合理性。

图 29 常用磨削深度范围内磨削表面理想残余压应力调控

6 结论

(1) 复合工艺的主要影响参数为感应加热电流强度 I 、电流频率 f 、表面冷却 HTC 和进给速度 v 。通过有限元数值计算,建立并求解残余应力 RSM 控制模型得到临界电流强度曲线,该曲线能够为试验调控参数的匹配提供参考。

(2) 选用实际工业中常用的 f , 采用有限元仿真和试验标定后的液氮表面冷却 HTC, 进行了感应电流 I 和速度 v 对最终残余应力的试验调控分析。

$f=37.5$ kHz, $v=5$ mm/s, $a_p=10$ μm 时, $I=800$ A 和 $I=1200$ A 均可获得表面残余压应力; $f=37.5$ kHz, $I=800$ A, $a_p=10$ μm 时, $v=10$ mm/s 和 $v=5$ mm/s 均可获得表面残余压应力。

(3) 采用线切割切块、抛光打磨后 XRD 测量的方法获得沿磨削表面以下深度方向的残余应力分布。这种分析截面内残余应力分布的方法虽然引入操作误差,但是仍然能够反映出残余应力分布的趋势,且趋势与有限元分析结果及国内外其他学者成果的趋势相同。 $f=37.5$ kHz, $v=5$ mm/s, $I=800$ A 时, $a_p=10$ μm , 表面残余压应力约 -40 MPa; $a_p=20$ μm 表面残余应力为拉应力,约 25 MPa。

(4) 为了获取更多常用磨削深度范围内的表面残余压应力分布,继续进行了感应电流 I 的试验和有限元仿真调控。 $I=1200$ A 试验条件下, $a_p \leq 30$ μm 的磨削参数范围,均可获得表面残余压应力。 $I=1900$ A 有限元仿真结果表明, $a_p \leq 40$ μm 均可获得表面残余压应力,该结果为更大 a_p 范围内磨削表面残余压应力的调控提供了方向。

本文的研究结果能够为目前工业中高温合金 Inconel718 的磨削残余应力改善工艺发展提供参考依据。然后由于受到目前感应加热工艺的匹配限制,有必要继续进一步研究强化感应加热工艺的过程参数精确控制方法及其辅助磨削复合工艺的精确调控。此外,磨削前的感应加热和表面冷却会对工件表面精度等产生影响,需要进一步研究该复合磨削工艺对工件表面完整性的影响。

参 考 文 献

- [1] 郭建亭. 高温合金材料与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
GUO Jianting. Materials science and engineering for superalloys[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] 庄景云, 杜金辉, 邓群, 等. 变形高温合金 GH4169[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
ZHUANG Jingyun, DU Jinhui, DENG Qun, et al. Deform superalloy GH4169[M]. Beijing: Metallurgical Industrial Press, 2006.
- [3] 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. Grinding principle[M]. Beijing: Electronic Industrial Press, 2011.
- [4] 米谷茂. 残余应力的产生和对策[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
MI Gumao. Residual stress and its countermeasures[M]. Beijing: Machinery Industrial Press, 1983.
- [5] JAMES M N. Residual stress influences on structural

- reliability[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18: 1909-1920.
- [6] JAMES M N, HUGHES D J, CHEN Z, et al. Residual stresses and fatigue performance[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14: 384-395.
- [7] 陈仁海, 郑焕文, 张春元. 缓进给强力磨削表面残余应力的试验研究[J]. *东北工学院学报*, 1983, 36(3): 88-96.
CHEN Renhai, ZHENG Huanwen, ZHANG Chunyuan. An experimental research on surface residual stress due to creep-feed grinding[J]. *Journal of Northeast Institute of Technology*, 1983, 36(3): 88-96.
- [8] 胡忠辉, 袁哲俊. 磨削残余应力产生机理的研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1989, 6(3): 51-60.
HU Zhonghui, YUAN Zhejun. Research on the forming mechanism of residual stresses produced in grinding[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1989, 6(3): 51-60.
- [9] 王西彬. 结构陶瓷磨削及变质层的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1994.
WANG Xibin. Study on grinding and modification of the structural ceramics[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1994.
- [10] 王西彬, 李相真. 结构陶瓷磨削表面的残余应力[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 1997, 6(102): 18-22.
WANG Xibin, LI Xiangzhen. An investigation on the surface residual stress of structure ceramics after grinding[J]. *Diamond and Abrasives Engineering*, 1997, 6(102): 18-22.
- [11] 田欣利, 徐燕申, 彭泽民, 等. 结构陶瓷磨削表面残余应力的产生机理[J]. *兵工学报*, 1998, 19(4): 361-364.
TIAN Xinli, XU Yanshen, PENG Zemin, et al. Mechanism of formation of surface residual stresses on structural ceramics upon grinding[J]. *Acta Armamentarii*, 1998, 19(4): 361-364.
- [12] 田欣利, 徐燕申, 林彬. 陶瓷磨削表面残余应力的理论模型[J]. *中国机械工程*, 1999, 10(7): 724-726.
TIAN Xinli, XU Yanshen, LIN Bin. Theoretical model of residual stress on ground ceramic surface[J]. *China Mechanical Engineering*, 1999, 10(7): 724-726.
- [13] 田欣利, 于爱兵, 林彬. 陶瓷磨削温度对表面残余应力的影响[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(18): 1600-1601.
TIAN Xinli, YU Aibin, LIN Bin. The effect of the grinding temperature on ceramic surface residual stresses[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(18): 1600-1601.
- [14] 田欣利, 林彬, 于爱兵. 陶瓷磨削表面残余应力对零件强度的影响研究[J]. *机械科学与技术*, 2002, 21(1): 114-115.
TIAN Xinli, LIN Bing, YU Aibing. On the effect of surface residual stresses of ceramic grinding on fracture strength[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2002, 21(1): 114-115.
- [15] 康仁科, 任敬心. 改善钛合金磨削残余应力的有效途径[J]. *航空工艺技术*, 1990, 03: 7-11.
KANG Renke, REN Jingxin. The effective way of reducing the grinding residual stress of Ti-alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1990, 03: 7-11.
- [16] 任敬心, 孟庆国, 陈景蕙. GH33A 高温合金的磨削温度与残余应力[J]. *航空工艺技术*, 1995(1): 3-7.
REN Jingxin, MEN Qingguo, CHEN Jinhui. Grinding temperature and residual stress of grinding superalloy GH33A[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1995(1): 3-7.
- [17] 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 Yaqin, et al. Grinding characteristic of nickel-based superalloy[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1997, 18(6): 755-758.
- [18] 黄新春, 张定华, 姚倡锋, 等. 超高强度钢 AerMet100 磨削烧伤研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(9): 184-190.
HUANG Xinchun, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. Research on the grinding burn of the ultrahigh strength steel AerMet100[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(9): 184-190.
- [19] 李晓天, 陈明, 孙方宏, 等. DZ4 材料的磨削烧伤机理[J]. *航空制造技术*, 2001(6): 22-24.
LI Xiaotian, CHEN Ming, SUN Fanghong, et al. Burn mechanism of superalloy DZ4 workpiece in grinding[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2001(6): 22-24.
- [20] BRINKSMEIER E, AURICH J C, GOVEKAR E, et al. Advances in modeling and simulation of grinding processes[J]. *Annals of the CIPP*, 2006, 2(55): 667-696.
- [21] BALART M J, BOUZINA A, EDWARDS L, et al. The onset of tensile residual stresses in grinding of hardened steels[J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, 367(1-2): 132-142.
- [22] MOFID M, ZHANG L. Applied mechanics in grinding. Part 7: Residual stress induced by the all coupling of mechanical deformation, thermal deformation and phase transformation[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 39: 1285-1298.
- [23] MALKIN S, GUO, C S. Grinding technology[M]. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008.
- [24] 徐西鹏, 黄辉, 徐鸿钧. 断续 CBN 砂轮缓进给磨削 K417 航空叶片材料的研究[J]. *航空学报*, 1997, 18(3): 316-323.
XU Xipeng, HUANG Hui, XU Hongjun. Study on creep feed grinding of superalloy K417 for vanes used in

- aeronautical industry by utilizing intermittent CBN wheel[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1997, 18(3): 316-323.
- [25] AKOYAMA T I, INASAKI I. Suppression of temperature rise in creep feed grinding[J]. *Proc. 5th ICPE, Tokyo*, 1984: 46.
- [26] PEREZ J, HOYAS S, SKURATOV D L, et al. Heat transfer analysis of intermittent grinding processes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 55(15-16): 4132-4138.
- [27] 孙方宏, 陈明, 徐鸿钧, 等. 磨削弧区采用径向射流冲击强化换热的试验研究[J]. *工具技术*, 1999, 33(10): 3-6.
- SUN Fanghong, CHEN Ming, XU Hongjun, et al. Experiment research on enhancing heat transfer of grinding contact zone by radial jet impinging[J]. *Tool Engineering*, 1999, 33(10): 3-6.
- [28] WANG S P, LI Y J, YAO M, et al. Compressive residual stress introduced by shot peening[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 73: 64-73.
- [29] DALAEI K, KARLSSON B, SVENSSON L E. Stability of shot peening induced residual stresses and their influence on fatigue lifetime[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528: 1008-1015.
- [30] LI F, LI X K, ZHU T X, et al. Numerical simulation of the moving induction heating process with magnetic flux concentrator[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013: 1-9.
- [31] 李峰, 李学崑, 朱天行, 等. 基于响应曲面法的强化感应加热数值仿真[J]. *清华大学学报*, 2013(4): 469-475.
- LI Feng, LI Xuekun, ZHU Tianxing, et al. Numerical simulations of strengthen induction heating with response surface methodology[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2013(4): 469-475.
- [32] LI F, LI X K, ZHU T X, et al. Modeling and simulation of induction heating with magnetic flux concentrator[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 268-270: 983-991.
- [33] RUDNEV V, LOVELESS D, COOK R, et al. Handbook of induction heating [M]. Michigan, USA: CRC Press, 2002.
- [34] DENIS S, SJOSTROM S, SIMON A. Coupled temperature, stress, phase transformation calculation model numerical illustration of the internal stresses evolution during cooling of a eutectoid carbon steel cylinder[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1987, 18: 1203-1212.
- [35] 李维特, 黄保海, 毕仲波. 热应力理论分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- LI Weite, HUANG Baohai, BI Zhongbo. Theoretical analysis and application of thermal stress[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [36] 沈庆通, 张宗杰. 强力感应器与导磁体的发展[J]. *金属热处理*, 2001, 26(8): 47-49.
- SHENG Qingtong, ZHANG Zongjie. Development of power inductor and magnetic flux field concentrators[J]. *Metal Heat Treatment*, 2001, 26(8): 47-49.
- [37] RUFFIN R S, RUFFIN R T, NEMKOV V S, et al. Advanced design of induction processes and work coils for heat treating and assembly in automotive industry [C]// *Proceedings of the 1999 SAE Southern Automotive Manufacturing Conference*. Alabama, USA: SAE, 1999: 1-9.
- [38] FLUX 10 User's guide, volume 2: Physical description [Z]. France: Cedrat Inc., 2009.
- [39] 周俊. 镍基高温合金 GH4169 高速切削相关技术与机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- ZHOU Jun. Research on correlation technique and mechanism of high-speed cutting Ni-based superalloy GH4169[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

作者简介: 李峰(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为感应加热技术、精密磨削加工。

E-mail: lifeng02@tyut.edu.cn

李学崑, 男, 1981 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为精密制造、磨料磨具精密加工。

E-mail: xli@mail.tsinghua.edu.cn

融亦鸣, 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密加工技术、金属材料加工中的建模仿真及优化和制造系统生产规划与工装技术。

E-mail: yrong@mail.tsinghua.edu.cn