DOI: 10.3901/JME.2019.13.212

流道结构对加压内冷却开槽砂轮磨削性能的影响*

彭锐涛^{1,2} 刘开发^{1,2} 黄晓芳^{1,2} 降皓鉴^{1,2} 张 珊³

(1. 湘潭大学机械工程学院 湘潭 411105;

2. 湘潭大学复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心 湘潭 411105;

3. 中国航发湖南南方航空工业有限公司 株洲 412002)

摘要: 针对镍基高温合金磨削时磨削区因砂轮气障效应引起的过热问题, 提出采用加压式内冷却磨削方法, 鉴于砂轮内流道结构影响磨削液的流动特性和砂轮的磨削性能, 同时考虑流道加工工艺和砂轮旋转时离心力的影响, 设计直线型和弧线型两种内流道结构。利用计算流体动力学方法分析了流道结构对磨削区流场的影响, 表明弧线型流道结构下磨削区的流体速度和分布均匀性更高。制备了具有弧线型和直线型内流道的两种加压内冷却开槽砂轮, 在相同的磨削参数下进行了镍基高温合金磨削对比试验, 分析砂轮线速度和磨削液压力对磨削温度、表面粗糙度和表面形貌的影响规律。结果表明: 相比直线型流道, 弧线型流道的冷却润滑效果更好, 随砂轮线速度和磨削液压力的增大其换热效率提升更显著, 得到的磨削温度和工件表面粗糙度值分别降低了 16.8% 和 17.6%, 并获得了更规则的加工表面形貌。

关键词: 流道结构; 加压内冷却; 开槽砂轮; 磨削性能; 高温合金

中图分类号: TG580

Effect of Flow Channel Structure on Performance of Pressurized Internal-cooling Slotted Grinding Wheels

PENG Ruitao^{1,2} LIU Kaifa^{1,2} HUANG Xiaofang^{1,2} JIANG Haojian^{1,2} ZHANG Shan³

(1. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105;

2. Engineering Research Center of Complex Track Processing Technology & Equipment, Ministry of Education, Xiangtan University, Xiangtan 411105;

2. AECC Hunan South Astronautics Industry Co., LTD, Zhuzhou 412002)

Abstract: Aiming at the overheating problem caused by the gas barrier effect of the grinding wheel in the grinding of nickel-base superalloys, a pressurized internal cooling grinding method is proposed. In view of the influence of the flow channel structure on the flow characteristics of the grinding fluid and the performance of the grinding wheel, and considering the processing technology of the flow channel and the centrifugal force caused by the rotation of the grinding wheel, two types of straight and curved internal channel structures are designed. The computational fluid dynamics method is used to analyze the influence of the channel structure on the flow field in the grinding zone. Results show that the fluid velocity and distribution uniformity of the grinding zone under the curved flow channel structure are higher. Two pressurized internal cooling slotted grinding wheels with curved and straight internal flow channels are prepared. The grinding comparison tests of nickel-base superalloy are carried out under the same grinding parameters, and the effects of grinding wheel speed and fluid pressure on the grinding temperature, surface roughness and morphology are analyzed. Results indicate that compared with the straight flow channel, better cooling and lubrication effects are obtained by the curved flow channel, and the heat exchange efficiency is more remarkable as the grinding speed and the fluid pressure increase. Grinding temperature and surface roughness of the workpiece are reduced by 16.8% and 17.6%, respectively, and a more regular surface morphology is obtained.

Key words: flow channel structure; pressurized internal cooling; slotted grinding wheel; grinding performance; superalloy

* 国家自然科学基金(51475404)、湖南省自然科学基金(2018JJ4082)、湖南省教育厅重点(18A077)和湖南省普通高校青年骨干教师培养经费(20151053008gg)资助项目。20180801 收到初稿, 20181216 收到修改稿

0 前言

作为一种应用最广、最有效的精密加工方法,磨削在航空高温合金构件精加工工序中发挥着越来越重要的作用。但磨削过程中比磨削能高,输入的较高能量大部分转化为磨削热并聚集在磨削弧区,导致磨削区温度急剧上升,若不能及时散热,将在工件表面产生热裂纹、热变形等热损伤,严重影响工件的加工表面质量。传统上采用外部浇注式冷却方法进行换热,但砂轮高速旋转时在其周围产生气障层,磨削液难以有效渗透磨削区,这极大地限制了磨削液的利用率。因此,有效的冷却方式是砂轮获得良好磨削性能和加工表面质量的重要保障。

近年来,射流冲击、液氮低温冷却、热管冷却和纳米流体微量润滑等方法^[1-4]得到了广泛应用,获得了良好的磨削效果。然而,这些冷却方法难以有效保证磨削液的换热效率,且可能需要复杂的专用设备或特制的磨削液,大大提高了加工成本。有鉴于此,国内外学者对内冷却方法进行了大量研究。KRZYSZTOF 等^[5]设计了一种基于离心式供液系统的内冷却砂轮并进行了磨削试验,结果表明该砂轮显著提高了磨削液的利用率,并在一定程度上降低了磨削能和工件表面粗糙度。LI 等^[6]对一种自吸式内冷却杯形砂轮进行磨削高温合金的试验研究,表明在相同条件下,相比外部冷却法,该内冷却方法的磨削比提高了3倍,同时磨削力下降了20%。

内冷却方法能有效避免气障效应,但若仅依赖砂轮旋转产生的离心力,仍难以有效控制磨削液的冷却效果。因此采用一种加压内冷却方法,通过加压系统调控磨削液的注入压力,结合砂轮高速旋转产生的离心力,来有效控制磨削液喷射至磨削区的速度。除了磨削液压力和离心力的作用,内冷却方式对磨削液的换热效果也有显著影响,一些学者对更有效的内冷却方式进行了探索。OEZKAYA 等^[7]探究了钻削过程中内流道直径对刀具磨损和钻孔质量的影响,结果表明,增大流道直径获得的更大流量不能有效减少刀具磨损和提高钻孔质量,而增加磨削液压力是更有效的方法。FANG 等^[8]研究了车削时车刀内部盲流道和通流道结构对磨削液换热性能和刀具磨损的影响规律,发现通流道能有效强化换热并延长刀具寿命,而盲流道则受限于切深大小,其有效性只能在小切深条件下得到体现。另外,流道出口位置对刀具加工性能也有一定影响。FALLENSTEIN 等^[9]分析了麻花钻内流道出口位置对楔形区内的平均温度的影响,发现流道出口位置

距前刀面越近,则磨削液在楔形区内的换热效率越高。除了钻削和车削,内冷却方式对砂轮磨削和换热性能也有显著影响。AURICH 等^[10]基于离心泵原理设计了一种具有变截面曲线形流道的盘形内冷却砂轮,研究发现该曲线形流道能显著减小流体压力损失,从而获得更高的流体出口压力。JAROSLAW 等^[11]提出一种分区离心供液系统,通过分区装置间接改变流道结构,从而更高效地将磨削液直接喷射至磨削区。SHI 等^[12]利用离心雾化原理设计了一种能实现喷雾冷却效果的具有微槽流道结构的砂轮并进行了磨削试验,发现该流道仅需消耗5.4%的输出流量便能降低高达200℃的磨削温度。本课题组^[13-15]提出了一种加压内冷却新方法,设计了一种加压内冷却开槽砂轮,对其开展了内冷却和外冷却磨削对比研究,验证了该方法对磨削区的强化换热效果。

然而,目前大多数关于内冷却砂轮的研究未考虑流道结构对砂轮磨削性能和加工质量的影响。本文总结前人研究,参考轴流泵的流道结构,设计并研制了具有直线型和弧线型流道结构的两种加压内冷却开槽砂轮。在同一磨削参数下,对两种流道结构的砂轮进行了磨削区流场对比仿真和镍基高温合金的磨削对比试验研究。

1 加压内冷却砂轮工作原理

根据流体力学原理,内冷却砂轮流道设计时应使内部流动摩擦尽可能小,以获得较高的出口速度^[10],同时尽可能减小流体与工件碰撞引起的砂轮和工件的振动。图1为常见内冷却砂轮的流道形式,通常分为直线型和曲线型,其中曲线型又分为弧线型和螺线型等。考虑到流道的加工工艺和砂轮离心力的影响,分别设计了具有直线型和弧线型流道的加压内冷却开槽砂轮。

图1 常见内冷却砂轮流道形式

式(1)为管道水力半径 R 的计算公式,其中 A 和 χ 分别为液流的有效面积和湿周,由流体力学原理可知^[16],圆截面的水力半径最大,通流能力最好,因此选择圆形作为砂轮内流道截面。

$$R = \frac{A}{\lambda} \quad (1)$$

如图 2 所示,两种砂轮的基体都为碗型结构,内流道分别为直线型和弧线型结构。加压后的磨削液注入封闭型腔,经内部流道直接喷射至磨削区,从而有效避免了气障效应。磨削过程中,通过液压系统中的节流阀来调控注入的磨削液压力,从而有效调控喷射至磨削区的磨削液的流速。

图 2 加压内冷却砂轮工作原理图

如图 3 所示,磨削液流经内部流道流至 A 点时,由外部加压引起的在 A 点的速度为 v_1 ,由砂轮高速

旋转引起的在 A 点的速度为 v_2 ,其与磨削液出口速度 v_y 的大小和方向关系见式(2)和式(3),其中 α 为 v_2 与 v_y 方向的夹角, β 为 v_2 与 v_1 方向的夹角。

$$v_y = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2\cos\beta} \quad (2)$$

$$\tan\alpha = \frac{v_2\sin\beta}{v_1 + v_2\cos\beta} \quad (3)$$

图 3 两种流道结构简图

在相同砂轮线速度下,两种流道结构下的 v_2 相同,而在弧线型流道中,同一磨削液入口压力下,由于离心力作用,将流体甩至壁面造成的压力损失减小,引起 v_1 增大,则磨削液的出口速度 v_y 明显大于直线型流道。且 v_y 方向与工件表面的夹角 α 更小,对工件及砂轮等造成的冲击更小,利于系统的稳定。同时 α 角越小,单位时间内磨削液进入磨削区的流量越大,换热量也就越多,磨削温度下降得越快。因此,对比直线型流道,弧线型流道结构下的 v_y 更大,对磨削区换热效率更高,同时对工件的冲击力更小,更有利于磨削系统的稳定。

2 加压内冷却开槽砂轮流道结构设计

2.1 砂轮整体结构设计

本文采用了一种用于强化磨削区换热的加压内冷却方法,设计了具有直线型和弧线型流道的两种内冷却开槽砂轮。砂轮由上基体、下基体和盖板构成,见图 4。基体开有中心孔与主轴装夹,主轴和基体上分别开有环形槽用于安装密封圈,用密封圈分别将盖板与基体,盖板与主轴密封后在砂轮内部形成型腔用于存储磨削液。两种砂轮上下基体均布

有直线型和弧线型冷却液通道, 经螺栓装配后形成封闭的柱状流道。磨削前磨削液通过加压装置从盖板上的注入孔注入型腔, 经内流道喷射至磨削区。

图 4 砂轮整体结构示意图

在砂轮端面钎焊有均匀等距分布的磨料块, 其有利于提高磨削液在磨削区的渗透效率^[17]。流道的喷射口位于磨料块的中间位置以便对工件及时冷却, 如图 5a 所示。由于在磨削过程中, 每一个分布在砂轮基体的底部并有效参与磨削的磨粒的磨削速度、深度, 和排列方式对磨削力、磨削温度和工件

图 5 开槽砂轮表面形貌

表面质量有着重要影响。因此, 本文在合理选择磨粒尺寸的前提下, 基于磨粒的排布角 δ 和间距 ΔX 、 ΔZ 设计了规则有序的磨粒排布, 图 5b 显示了单个磨料块上的磨粒有序排布示意图。

2.2 直线型流道结构设计

根据移动热源模型, 断续磨削时砂轮开槽数为 $N \in [16, 32]$ 时较合理^[18], 考虑到砂轮的制备工艺, 确定开槽数和流道数为 18。为使磨削液受到的离心力作用更显著, 以获得较大的磨削液出口速度, 选取流道的倾斜角度为 60° 。

为分析砂轮内部流体的流动特性, 从而优化流道结构, 利用 ANSYS Workbench 得到的具有直线型流道的砂轮内部流体域的几何和网格模型以及边界条件如图 6 所示, 然后导入 FLUENT 中对流道出口速度分布进行数值模拟。为保证进入磨削区的磨削液的连续性, 以达到良好的冷却效果, 流道直径必须大于最小稳定流量下的直径; 此外, 直径过大会减弱磨削液的喷射作用, 同时不利于砂轮结构强度。考虑到实际加工时刀具的尺寸, 选取流道直径为 $1 \sim 3 \text{ mm}$, 砂轮线速度和流体入口压力分别设为 16 m/s 和 0.45 MPa 。

图 6 具有直线型流道的砂轮内部流体域模型

由图 7 中不同直径下直线型流道出口速度分布

图 7 直线型流道出口速度分布云图

云图可知, 直线型流道的出口高速区随着流道直径的增大逐渐向流道壁面偏移, 且面积有一定的波动。由图 8 中出口面积加权平均速度和均匀性系数曲线可知, 随直径增大流道出口速度值呈下降趋势但变化不大, 当流道直径取 1.5 mm 和 2 mm 时磨削液出口流速较大, 且 2 mm 时均匀性系数最大。因此, 确定流道直径为 2 mm, 此时出口流体平均速度较大且分布更均匀。

(a) 流道出口平均速度

(b) 流道出口速度均匀性系数

图 8 直线型流道出口速度及均匀性系数

2.3 弧线型流道结构设计

进行流道曲线设计时在保证具有良好冷却效果的前提下应尽可能减小磨削液冲击工件时引起的砂轮与工件的振动, 从而提高系统的稳定性, 因此, 建立弧线型流道模型, 如图 9 所示。如图 9a 所示, 过流道的入口和出口分别作同心圆, 两圆之间划分若干同心圆, 从内到外以每个圆的切线 1 与下一圆的交点为基点, 然后以光滑曲线连接这些基点, 则曲线 2 满足上述要求。流道曲线上任意一点处砂轮旋转方向与磨削液喷射方向所形成的夹角始终不变, 此时磨削液能以较小的流道压力损失喷射到磨削区, 实现良好的换热, 同时流道出口与工件表面接触角减小, 降低了磨削液对流道壁面和工件的冲击。

建立切开线的极坐标方程

$$r = r(\theta) \quad (4)$$

由图 9b 可知, 砂轮及其磨削液在 B 点的速度

分别为 v_s 和 v_y , 两者夹角为 α , 则有

$$\tan(90^\circ - \alpha) = r(\theta)/r'(\theta) \quad (5)$$

(a) 流道原理示意图

(b) 流道曲线图

图 9 弧线型流道模型

经微分推导可得

$$r(\theta) = \exp(\tan \alpha \times \theta) \quad (6)$$

显然流道的曲线方程取决于 α , α 过小, 将限制流道的数目, 增大加工难度; α 过大, 会限制 v_s 的大小。为了降低流道的加工难度, 在一定砂轮线速度范围内, 使用同一 α 角。考虑提高流道的加工工艺性和降低流道内的流体摩擦^[10], 确定弧线型流道的切角范围: $25^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 。

同样得到具有弧线型流道的砂轮内部流体域的几何和网格模型, 如图 10 所示, 然后导入 FLUENT 中进行数值分析。基于以上分析, 选取流道直径为 1~3 mm, 流道的切角为 $25^\circ \sim 45^\circ$, 砂轮线速度和流体入口压力分别设为 16 m/s 和 0.45 MPa。

得到的不同切角下的流道出口速度分布云图如图 11 所示, 可以看出, 不同切角下出口最大速度都集中在中心区域, 受到流道内壁面的摩擦作用, 出

图 10 具有弧线型流道的砂轮内部流体域模型

口处速度呈现中心向壁面梯度递减的趋势。由图 12 可知, 随切角增大, 流体出口平均速度先增加后缓慢降低, 在 $\alpha=35^\circ$ 时达到最大, 且此时均匀性系数最大, 出口面流体分布最为均匀。其原因是切角增

图 11 不同切角下的弧线型流道出口速度分布云图

(a) 流道出口速度

(b) 流道出口速度均匀性系数

图 12 不同切角下的弧线型流道出口速度及均匀性系数

大引起流道曲率半径增大, 流体对壁面产生的压力和摩擦等阻力减小, 使出口速度增大; 而当切角大于 35° 后, 在型腔与流道过渡处流体局部阻力反而上升, 因此出口速度开始缓慢减小。

由图 13 流道出口速度分布云图可知, 相较于直线型流道, 弧线型流道出口平均速度更高, 且高速区始终位于中心区域, 随直径的变化其分布更均匀且波动更小。由图 14 可知, 当流道直径取 2 mm 时磨削液出口流速最大, 且均匀性系数最大, 说明此时流体出口平均速度最大且分布更均匀。

图 13 不同直径下的弧线型流道出口速度分布云图

(a) 流道出口平均速度

(b) 流道出口速度均匀性系数

图 14 不同直径下的弧线型流道出口速度及均匀性系数

综上, 最终确定直线型和弧线型流道的直径 $d=2\text{ mm}$, 弧线型流道的切角 $\alpha=35^\circ$ 。

3 流道结构对磨削区流场的影响分析

3.1 仿真模型的建立

磨削区磨削液分布直接决定了砂轮磨削时磨削液的换热效率,为研究磨削过程中砂轮流道结构对磨削区磨削液分布的影响,利用计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法进行了分析。首先利用 SolidWorks 建模生成磨削区流体域几何模型,接着导入 ANSYS Meshing 进行网格划分,采用多面体网格以保证网格质量,并对流道和磨粒区域的网格进行了局部细化,设置的边界条件以及得到的几何和网格模型如图 15 所示,最后利用 FLUENT 进行流场仿真。为提高计算效率,本文对模型进行了适当简化,由于流场模型的对称性,仅取整体的 1/18 模型进行分析,其两侧面设为周期性对称边界。另外由于磨粒数量巨大且形状各异,对磨粒尺寸进行了一定比例的放大,同时以圆柱代替磨粒以简化磨粒形状。考虑实际钎焊得到的磨粒尺寸和间距,对磨粒横向间距 ΔX 和纵向间距 ΔZ 分别作了与磨粒尺寸同等比例的放大,以接近实际磨粒分布并反映实际磨削区的流场分布。对不同砂轮线速度和磨削液入口压力条件下的磨削区流场进行了分析,具体仿真方案如表 1 所示。

图 15 磨削区流体域几何和网格模型

表 1 仿真方案

参数	内容	流道结构
湍流模型	$k-\epsilon$	
磨削液密度/(kg/m^3)	1×10^3	
磨削液黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	1×10^{-3}	
磨削液压力 P/MPa	0.3、0.45、0.6、0.75、0.9	
砂轮线速度 $v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	8、16、24、32	直线型 弧线型
磨粒直径/mm	1	
磨粒横向间距 $\Delta X/\text{mm}$	4.0	
磨粒纵向间距 $\Delta Z/\text{mm}$	1.2	
磨粒排布角 $\delta/^\circ$	45	

3.2 仿真结果分析

具有直线型和弧线型流道的两种砂轮在不同磨削条件下磨削区流线分布如图 16 所示。随砂轮线速度和冷却液压力的增大,两种砂轮磨削区的流线密度都相应增大,这来源于砂轮增强的离心力作用。如图 16a 所示,直线型流道下的磨粒区 I 明显存在部分流体空位区,意味着在此区域容易造成磨屑粘结或工件表面烧伤,且整体流线分布不均匀。在相同条件下,弧线型流道下磨粒区域流线分布更均匀,基本全部填充。由图 17 的磨削区局部 II 的流线图可以明显地看出,具有直线型流道的砂轮磨削区流体流动混乱无规律,磨粒间的流线大量交叉,而具有弧线型流道的砂轮磨削区流体有规律地沿磨粒间流动,且基本无交叉出现,其流动更均匀。

图 16 不同磨削条件下的磨削区流线图

图 17 砂轮磨削区局部 II 的流线图

由图 18 可知在相同转速和磨削液压力下,弧线型流道砂轮磨削区的最大流速明显高于直线型流道砂轮,且磨削参数的增大对其影响更显著。这是由

于砂轮线速度的提高, 离心力作用增强, 而弧线型流道切角的存在使得磨削液出口径向速度增大, 因而其磨削区流速受离心力作用更明显。在同一入口压力下, 弧线型流道因能减小流体对其和工件的冲击, 流体动能损失较小, 因此获得更大的流速, 此时流体与磨粒、工件面之间的对流换热能力增强, 有利于提高磨削加工性能。

(a) 砂轮线速度的影响

(b) 磨削液压力的影响

图 18 磨削区最大流速随磨削条件变化曲线

图 18a 表明砂轮线速度增大使得磨削液受的离心力增大, 因而磨削区最大流速显著提高。由图 18b 可知, 随磨削液压力的增大, 单位时间内进入磨削区的流量增大, 流体的速度呈线性增加的趋势, 表明提高磨削液压力有利于提高磨削区换热效率, 带走更多加工过程产生的热量, 从而达到降温效果。

4 加压内冷却开槽砂轮磨削试验

4.1 试验条件

分别制备了钎焊有相同磨粒排布的具有弧线型和直线型流道的两种加压内冷却开槽砂轮, 开展了磨削镍基高温合金的试验研究。基体材料为 45 钢, 在上基体的下端面均匀地钎焊有单层 CBN 磨粒, 所用钎料为加入 Ti 元素的银基复合材料。为防止盖板与主轴、基体与盖板间产生泄漏, 在基体上加工出环形槽, 并用橡胶圈进行密封, 最后将制备的基体通过联接件进行装配, 得到的具有弧线型和直线型

流道的两种砂轮实体装配图如图 19 和图 20 所示。本文根据 GHOSH 等^[19]的研究结果, 确定磨料粒度为 80#, 粒径尺寸范围为 160~200 μm , 根据 PENG 等^[15]的研究, 确定磨粒排布的角度 δ 为 45°, 横向距离 ΔX 为 1.0 mm, 纵向距离 ΔZ 为 0.2 mm。由超景深显微系统观测到的砂轮表面磨粒排布的表面微观形貌如图 21 所示。将砂轮在机床上分别进行动、静平衡试验, 以保证其安全有效性。

图 19 弧线型流道砂轮装配图

图 20 直线型流道砂轮装配图

图 21 磨粒有序排布微观形貌

在砂轮运转过程中, 由于存在相对运动, 在施加一定压力磨削液的条件下, 砂轮内部的密封和喷射效果对砂轮系统的稳定性和冷却效果都有很大影响, 因此对具有不同流道结构的两种砂轮进行停转和恒速运转时的磨削液喷射测试, 如图 22 所示。图 22a、22b 为砂轮停转时, 两种砂轮内通一定压力磨削液 ($P=0.3 \text{ MPa}$) 下的流体喷射情况, 从流体的喷射线型可知, 相比直线型流道, 弧线型流道下流体与水平面呈一定弧度喷出。两种砂轮以恒速运转 ($v_s=16 \text{ m/s}$) 时的流体喷射情况如图 22c、22d 所示, 可以看出, 经直线型和弧线型流道的磨削液喷射效果良好, 在一定入口压力或砂轮线速度下, 可得到较大的出口速度, 且砂轮能保持稳定运转, 基本无泄漏, 经测试验证其性能已基本达到设计要求。

图 22 砂轮喷射效果测试

磨削试验系统如图 23 所示, 主要包括工作系

(a) 机床整体

(b) 工作系统

(c) 磨削工件实物图

图 23 磨削试验系统

统、液压系统和测温系统, 其中液压系统包括增压和调压系统。在磨削试验过程中, 首先利用液压泵将磨削液通入砂轮内部, 磨削液经型腔从流道喷出, 通过调压系统可以控制磨削液喷出速度。

试验中试件材料为镍基高温合金 GH4169, 其尺寸为: 80 mm×40 mm×10 mm。试验在 NEWAY VM1304H 立式加工中心上进行。磨削过程中采用标准半人工 K 型热电偶丝和云母片组成的测温系统进行磨削温度的检测, 磨削结束后工件表面粗糙度的测量采用 JB-1C 型表面粗糙度测量仪, 工件表面微观形貌采用 KEYENCEVHX-500FE 型超景深三维显微镜进行测量。

4.2 试验方案

采用具有直线型和弧线型流道结构的两种内冷却砂轮进行磨削对比试验, 采用单因素法分析砂轮线速度和磨削液压力对磨削温度、工件表面粗糙度和表面形貌的影响, 具体试验方案见表 2。为降低试验误差, 每组试验均采用新的工件, 试验前均在相同磨削条件下进行了平整处理, 每组方案均测量 3 次数据并最终取平均值。

表 2 试验方案

磨削参数	取值	流道结构
砂轮线速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	8、12、16、20、24	
磨削液压力 P/MPa	0.3、0.45、0.6、0.75	直线型
磨削深度 a_p/mm	0.04	弧线型
工件进给速度 $v_w/(mm \cdot min^{-1})$	120	

4.3 试验结果与分析

(1) 磨削温度 图 24a、24b 分别为具有两种流道结构的砂轮在不同砂轮线速度和磨削液压力下测得的工件表面最高温度。试验结果表明, 随着砂轮线速度的提高, 单位时间内参与磨削的磨粒数增加, 工件的塑性变形及与磨粒的摩擦加剧, 导致两种砂轮磨削温度都出现明显的升高; 随着磨削液压力的增大, 进入磨削区的磨削液流量增大, 单位时间内的磨削换热增大, 因而磨削温度都呈下降趋势。同时, 在相同磨削条件下, 弧线型流道结构相比直线型流道结构能使内冷却砂轮获得更低的磨削温度。随磨削液压力由 0.3 MPa 升至 0.75 MPa, 磨削温度分别降低了 14.1%、16.8%、18.6%和 17.6%, 平均降低了 16.8%, 这是由于磨削液经弧线型流道的出口方向与工件表面的接触角比直线型流道更小, 磨削时与磨削区的接触面积更大, 单位时间内对流换热热量更大, 且转速越高、磨削液压力越大, 磨削液受离心力作用越显著, 因而弧线型流道砂轮的换热效果越显著, 与前述流场仿真结果相符。

图 24 磨削参数对磨削温度的影响

(2) 表面粗糙度 图 25a、25b 分别为具有两种流道结构的砂轮在不同砂轮线速度和磨削液压力下测得的工件表面粗糙度值。结果表明, 砂轮线速度的提高使得磨削时单颗磨粒未变形切削厚度减小, 工件的表面粗糙度呈明显下降的趋势。随磨削液压力的增大, 对磨屑的冲刷作用越显著, 减少了磨屑与工件的粘结, 因而表面粗糙度减小。随磨削液压力由 0.3 MPa 升至 0.75 MPa, 相比直线型流道结构,

图 25 磨削参数对加工表面粗糙度的影响

具有弧线型流道的砂轮得到的表面粗糙度分别降低了 17.3%、30%、11.2%和 11.9%, 平均降低了 17.6%, 这是因为相比直线型流道, 具有切角的弧线型流道能使磨削液更易进入磨削区, 换热效果更明显, 且磨屑更易从磨削区排出, 磨屑与工件的粘结作用更小, 因而表面粗糙度更小。

(3) 工件表面形貌 在一定磨削参数条件下 ($a_p=0.04$ mm, $v_s=120$ mm/min, 磨削液压力 $P=0.45$, 0.75 MPa, 砂轮线速度 $v_s=16$ m/s), 采用不同流道结构的砂轮磨削 GH4169 获得的工件表面形貌如图 26 所示。由图可知, 当磨削液压力为 0.45 MPa 时, 工件表面磨削纹理与划痕清晰, 但与磨屑的粘结现象较为明显, 出现粘结点和波动等特征。随着磨削液压力增大至 0.75 MPa, 单位时间内换热量增大, 且对磨屑的冲刷作用更明显, 因此加工表面划痕与沟槽更加细密规整。与具有直线型流道的砂轮相比, 具有弧线型流道的砂轮在两种磨削液压力条件下磨削得到的工件表面线条更光滑, 纹理更清晰, 粘结点和波动出现更少。综上, 采用弧线型流道结构和提高磨削液压力有利于获取更优的加工表面形貌。

图 26 磨削后工件表面形貌($\times 500$)

图 27 为具有两种流道结构的砂轮在: $a_p=0.04$ mm, $v_s=16$ m/s, $v_w=120$ mm/min, $P=0.45$ MPa 和 0.6 MPa 条件下测得的工件加工表面三维轮廓。可以看出, 在工件加工表面有明显的加工纹理, 且由波峰和波谷交替构成。具有弧线型流道的砂轮在两种磨削液压力下测得的表面起伏值分别为 5.708 μm 和 5.401 μm , 低于直线型流道下的起伏值 8.284 μm 和 7.329 μm , 且具有弧线型流道的砂轮磨削加工后的表面几何纹理更规则、均匀。因此, 在相同的磨削参数下, 弧线型流道结构有利于获得更优的加工表面轮廓。

图 27 加工表面三维轮廓图($\times 500$)

5 结论

(1) 提出采用加压内冷却磨削方法以避免气障效应, 从而实现磨削区的高效换热。设计了具有直线型和弧线型内流道结构的两种加压内冷却砂轮, 其中弧线型流道能减小流体对砂轮内壁的冲击, 提高磨削液出口速度和磨削系统的稳定性。

(2) 对砂轮整体结构进行了设计, 并通过数值方法得到了一定条件下的流道出口速度分布, 确定了直线型流道的直径为 2 mm, 弧线型流道的直径和切角分别为 2 mm 和 35° 。

(3) 建立了磨削区流体域 CFD 模型, 对两种流道结构下的砂轮磨削区流场进行了对比分析。结果表明, 砂轮线速度和磨削液压力的增大有利于磨削区流体速度和均匀性的提高, 并且对弧线型流道下的流线分布影响更显著, 而直线型流道的磨粒区域存在部分区域无流线通过且整体分布不均匀, 容易造成磨屑粘结或工件表面烧伤。

(4) 制备了钎焊相同有序磨粒排布的具有直线型和弧线型流道的内冷却开槽砂轮, 在相同的磨削参数下开展了镍基高温合金磨削对比试验。结果表明: 增大砂轮线速度导致磨削温度的升高和表面粗糙度的降低; 随磨削液入口压力的增大, 磨削温度和表面粗糙度降低, 同时加工表面划痕与沟槽更规整, 无深沟犁出现。在相同磨削条件下, 相比具有直线型流道的砂轮, 具有弧线型流道的砂轮获得的磨削温度和表面粗糙度值平均分别降低了 16.8% 和 17.6%。同时工件加工表面更光滑, 纹理更细密, 表面轮廓起伏更小。

参考文献

- [1] UTHAYAKUMAR M, ADAM KHAN M, et al. Machinability of nickel-based superalloy by abrasive water jet machining[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31: 1733-1739.
- [2] MANIMARAN G, KUMAR M P, VENKATASAMY R. Influence of cryogenic cooling on surface grinding of stainless steel 316[J]. Cryogenics, 2014, 59(1): 76-83.
- [3] CHEN J J, FU Y C, et al. Experimental investigation on high-efficiency grinding of Inconel 718 with heat pipe grinding wheel[J]. Machining Science and Technology, 2017, 21(1): 86-102.
- [4] LI B K, LI C H, ZHANG Y B, et al. Heat transfer performance of MQL grinding with different nanofluids for Ni-based alloys using vegetable oil[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 154: 1-11.
- [5] KRZYSZTOF N. Small-dimensional sandwich grinding wheels with a centrifugal coolant provision system for traverse internal cylindrical grinding of steel 100Cr6[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 93: 354-363.
- [6] LI X. Application of self-inhaling internal cooling wheel in vertical surface grinding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(1): 86-91.
- [7] OEZKAYA E, BEER N, BIERMANN D. Experimental studies and CFD simulation of the internal cooling conditions when drilling Inconel 718[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2016, 108: 52-65.
- [8] FANG Z, OBIKAWA T. Turning of Inconel 718 using inserts with cooling channels under high pressure jet coolant assistance[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247: 19-28.
- [9] FALLENSTEIN F, AURICH J C. CFD based investigation on internal cooling of twist drills[J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 293-298.
- [10] AURICH J C, KIRSCH B, HERZENSTIEL P. Hydraulic design of a grinding wheel with an internal cooling lubricant supply[J]. Production Engineering, 2011, 5(2): 119-126.
- [11] SIENIAWSKI J, NADOLNY K. The effect upon grinding fluid demand and workpiece quality when an innovative zonal centrifugal provision method is implemented in the surface grinding of steel CrV12[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113: 960-972.
- [12] SHI C F, LI X, CHEN Z T. Design and experimental study of a micro-groove grinding wheel with spray cooling effect[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(2): 407-412.

- [13] 彭锐涛, 唐恒, 唐新姿, 等. 一种内冷却磨削砂轮: 中国: ZL201410197728.8[P].2014-05-07.
PENG Ruitao, TANG Heng, TANG Xinzi, et al. An internal cooling grinding wheel China: ZL201410197728.8[P]. 2014-05-07.
- [14] 彭锐涛, 张珊, 唐新姿, 等. 加压内冷却砂轮的研制及磨削性能研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 187-194.
PENG Ruitao, ZHANG Shan, TANG Xinzi, et al. Development and grinding performance of a pressurized internal cooling slotted grinding wheel. [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 187-194.
- [15] 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.
- [16] 芬尼莫尔. 流体力学及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
FINNEMORE E J, FRANZINI J B. Fluid mechanics with engineering applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [17] 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.
- [18] MALKIN S, GUO C. Thermal analysis of grinding[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(2): 760-782.
- [19] LI G X, RAHIM M Z B, YI S, et al. Wear mechanism of PCD tools of different grain sizes manufactured by conventionally abrasive grinding and electrical discharge grinding[J]. Materials Today Proceedings, 2017, 4(4): 5248-5258.

作者简介: 彭锐涛(通信作者), 男, 1982 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高效精密加工与传动。
E-mail: pengruitao@xtu.edu.cn