

基于 FLUENT 的大螺旋角沟槽砂轮磨削弧区气流场特性研究

刘世博¹, 陈晓林², 徐超², 李玉帅², 江京亮^{1,2,*}

(1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525; 2. 青特集团有限公司, 青岛 266109)

摘要: 磨削加工过程中, 磨削弧区气流运动特性是影响磨削液有效注入的重要因素。针对普通砂轮磨削弧区换热效率低下, 极易产生局部高温和磨削烧伤等问题, 以大螺旋角沟槽砂轮(螺旋角 $\beta > 85^\circ$)为研究对象, 在 FLUENT 中创建了磨削弧区三维气流场数值分析模型, 研究了螺旋角度、沟槽宽度及深度对气流场特性的影响。结果表明, 砂轮表面螺旋沟槽宽度、深度以及螺旋角度越大, 磨削区气流场压强越低, 对磨削弧区气流场强度的削弱能力越强。并且, 螺旋沟槽对磨削液有着良好的导通作用, 磨削液更容易进入磨削弧区, 在磨削弧区内部形成通畅的“换热通道流场”, 从而显著提升磨削区的换热能力, 有效降低磨削过程磨削温度。

关键词: 磨削; 大螺旋角沟槽砂轮; 气流场; FLUENT

中图分类号: TH162 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2024)04-0131-08

Research on the airflow field characteristics of grinding wheel with large spiral angle groove in grinding arc zone based on FLUENT

LIU Shibo¹, CHEN Xiaolin², XU Chao², LI Yushuai², JIANG Jingliang^{1,2,*}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. Qingte Group Co. Ltd., Qingdao 266109, China)

Abstract: In grinding process, the airflow movement characteristics of the grinding arc zone is an important factor affecting the effective injection of grinding fluid. Due to the low heat transfer efficiency in the grinding arc zone of the ordinary grinding wheel, the problems such as high local temperature and grinding burn are easy to occur. Taking the big spiral angle grooved grinding wheel (spiral angle $\beta > 85^\circ$) as the research object, this study uses the software FLUENT to carry out numerical simulation of the three-dimensional airflow field in the grinding arc zone. The effects of spiral angle, groove width and groove depth on the airflow characteristics are analyzed. The results show that the larger the width, depth and spiral angle of the spiral groove on the grinding wheel surface are, the lower the pressure of the grinding arc zone is, and the stronger the weakening ability of the grinding arc zone intensity is. In addition, the spiral groove has a good conduction effect on the grinding fluid, which is easier to enter the grinding arc zone and form a smooth “heat exchange channel flow field” inside the grinding arc zone, thus significantly improving the heat exchange ability of the

收稿日期: 2023-02-26

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2022ME192)

作者简介: 刘世博(1996—), 男, 山东聊城人。硕士, 研究方向为精密磨削加工。E-mail: 18354261637@163.com。

* 通信作者: 江京亮(1982—), 男, 山东青岛人。博士, 副教授, 主要从事摩擦学与磨粒加工方面的研究。

E-mail: cba1981@126.com。

grinding arc zone and effectively reducing the grinding temperature during the grinding process.

Key words: grinding; grinding wheel with large spiral angle groove; airflow field; FLUENT

磨削加工时,磨削液是磨削弧区散热的重要手段,而砂轮周围气流运动特性又是磨削液冲破气流屏障进入磨削弧区进行冷却和润滑绕不开的话题^[1-2]。李长河教授团队^[3-5]以孔隙率为关键参数,建立了气障层流场模型,研究发现,砂轮转速越高,与工件之间的间隙越小,磨削区气流场的压力也越大,对磨削液进入磨削弧区的阻碍作用越强。丁文锋教授团队^[6]通过实验研究了不同磨削速度和磨削液速度下磨削弧区流场的冷却能力,结果表明,随着磨削速度的增加,需要更高的磨削液速度来打破气流层的冷却屏障。江湘颜等^[7]针对磨削液的有效利用率问题进行了有限元仿真,研究发现,气障层流场对磨削液供给有一定的阻碍作用,并指出合理利用气障层流场的分布规律可以提高有效磨削液流量。诸多学者针对传统普通砂轮磨削弧区气流场特性开展了仿真及实验研究,揭示了磨削工艺参数对磨削弧区气流场特性的影响规律,但对如何削弱气流场强度,从而提高磨削液有效利用率,以及如何通过改变砂轮结构参数从而大幅提升磨削弧区换热性能研究相对较少。

从增强磨削弧区换热性能,降低工件表面热损伤的角度考虑,具有较大螺旋角($\beta > 85^\circ$)的沟槽砂轮具备独特优势。其优势在于磨削弧区具有“分工明确”的接触区和换热区,磨削加工过程中输入的能量在磨粒-工件接触区转化为热量,换热区则具有更强的磨削液运输能力,从而有效增强磨削弧区的换热性能。因此,本文以大螺旋角沟槽砂轮为研究对象,在Creo中创建参数驱动的精确砂轮模型,并利用FLUENT进行流场仿真分析,研究了磨削弧区气流场速度及压强分布规律,揭示了大螺旋角沟槽砂轮结构参数(螺旋角度、沟槽宽度和深度)对磨削弧区气流场特性的影响机制,进一步研究了磨削弧区气液两相流场及对流换热特性。

1 大螺旋角沟槽砂轮磨削弧区气流场模型

1.1 参数驱动的大螺旋角沟槽砂轮几何模型的建立

大螺旋角沟槽砂轮关键结构参数主要包括螺旋角度、螺旋沟槽宽度和深度。本文利用Creo软件创建了上述结构参数驱动的精确三维砂轮模型,详细数值见表1。

1) 首先由砂轮直径和宽度建立普通砂轮实体,然后在砂轮表面建立参数控制的螺旋线:

$$\begin{cases} r = D/2 \\ \theta = n \times (t \times 360) \\ z = P \times (n \times t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为螺旋线头数; P 为螺距。

螺旋升角 α 可根据式(2)求得

$$\tan\alpha = \frac{P}{2\pi r} \quad (2)$$

故砂轮表面螺旋线角度为

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (3)$$

2) 在砂轮表面建立螺旋线以后,以螺旋线为导向通过“扫描”命令便可生成矩形截面沟槽。最终生成的用于FLUENT流场仿真的大螺旋角沟槽砂轮模型如图1所示。

1.2 多重参考系(MRF)法分析

对传统普通砂轮磨削气流场的仿真研究,普遍认为磨削弧区气流场速度、压强等性质具有不因时间推移而改变的特点^[8-10]。而大螺旋角沟槽砂轮高速旋转过程中,其周围气流运动是瞬态变化的,故应对砂轮旋转至不同位置时的气流场分布状态进行瞬态分析。

表1 砂轮关键结构参数

名称	数值
砂轮直径 D/mm	120
砂轮宽度 L/mm	30
螺旋角度 $\beta/(\circ)$	86, 36, 88, 18, 88, 78
沟槽宽度 b/mm	1, 2, 3
沟槽深度 d/mm	1, 2, 3, 4, 5, 6

多重参考系 (Multiple Reference Frame, MRF) 法是一种在旋转坐标系下的定常计算模型^[11]。在流体域中划分出一个圆柱体子区域即动区域,使其能将砂轮完全包络,其余区域则为静区域。然后对动区域施加与砂轮圆周速度、转向完全一致的旋转坐标系,把大螺旋角沟槽砂轮的旋转转化为坐标系的旋转,解决了不规则几何旋转时会改变计算区域形状的问题。

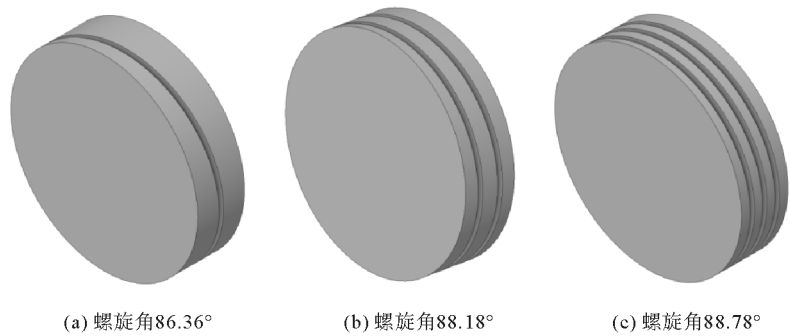


图 1 大螺旋角沟槽砂轮模型

采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型计算流场。该模型用于计算强旋流或带有弯曲壁面的流动时,更接近实际流动状态。湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 是 2 个基本未知量,与之相对应的输运方程^[11]为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k (\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}^* \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

其中, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, $C_\mu = 0.0845$; $\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.39$; $C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$, $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon}$, $E_{ij} =$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); G_k = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}; \eta_0 = 4.377, \beta = 0.0112, C_{1\epsilon} = 1.42, C_{2\epsilon} = 1.68。$$

式中: G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; E_{ij} 为反映主流的时均应变率; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 和 C_μ 均为经验常数; μ 为动力黏性系数; μ_t 为湍动黏度; u_i 和 u_j 为速度分量的时均值。

1.3 仿真参数设置及网格划分

在普通砂轮磨削弧区气流场特性研究中,砂轮和工件间的最小间隙是模拟仿真的重点。其数值一般根据砂轮类型、砂轮气孔率以及磨粒大小等确定,常用的最小间隙从 0.01~1 mm 不等^[12]。而大螺旋角沟槽砂轮沟槽深度远大于最小间隙^[13-14],且 MRF 法需要把流体域切分为动、静 2 个区域,若将最小间隙值设置的太小,将会大大增加网格数量及计算量。为了突出研究螺旋沟槽对楔形区气流场的影响,综合考虑计算成本与计算精度,将最小间隙固定为 1 mm。磨削弧区气流场仿真参数设置如表 2 所示。

名称	数值
工件尺寸/mm	180×90
流体域尺寸/mm	180×90×150
砂轮圆周速度/(m·s ⁻¹)	60
空气动力黏度/(Pa·s)	1.789×10 ⁻⁵
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.225

如图 2 所示,砂轮旋转中心位于坐标原点,砂轮下方表面为工件表面,长方体区域表示空气流体域。本文所有砂轮旋转方向均为图中所示的顺时针方向。对图 2 所示的三维几何模型采用四面体网格进行网格划分,并且选择捕获曲率和邻近度选项,对最小间隙及螺旋沟槽进行局部细化和加密处理,如图 3 所示。

2 磨削弧区气流场压强特性研究

2.1 螺旋角度对磨削弧区压强分布的影响

由章节 1.2 分析可知,采用 MRF 方法可以得到大螺旋角沟槽砂轮旋转至特定位置时的瞬时流场。固定螺旋沟槽宽度为 3 mm,深度为 4 mm,分别对螺旋角度 86.36、88.18 和 88.78°的螺旋沟槽砂轮旋转至相对于模型初始位置 120、240 和 360°(即初始位置)位置时进行仿真,查看工件表面压强分布云图,如表 3 所示。

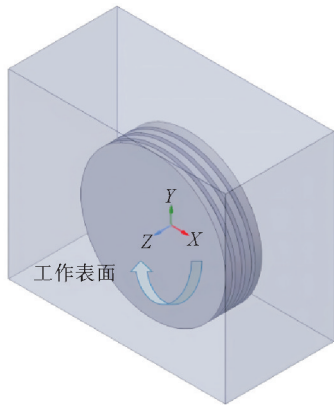


图 2 磨削弧区气流场三维几何模型

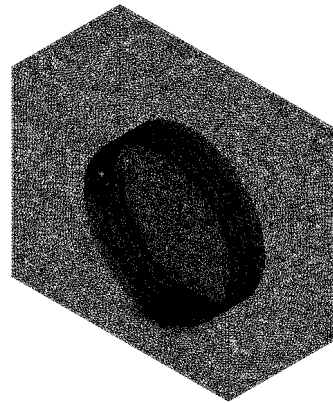
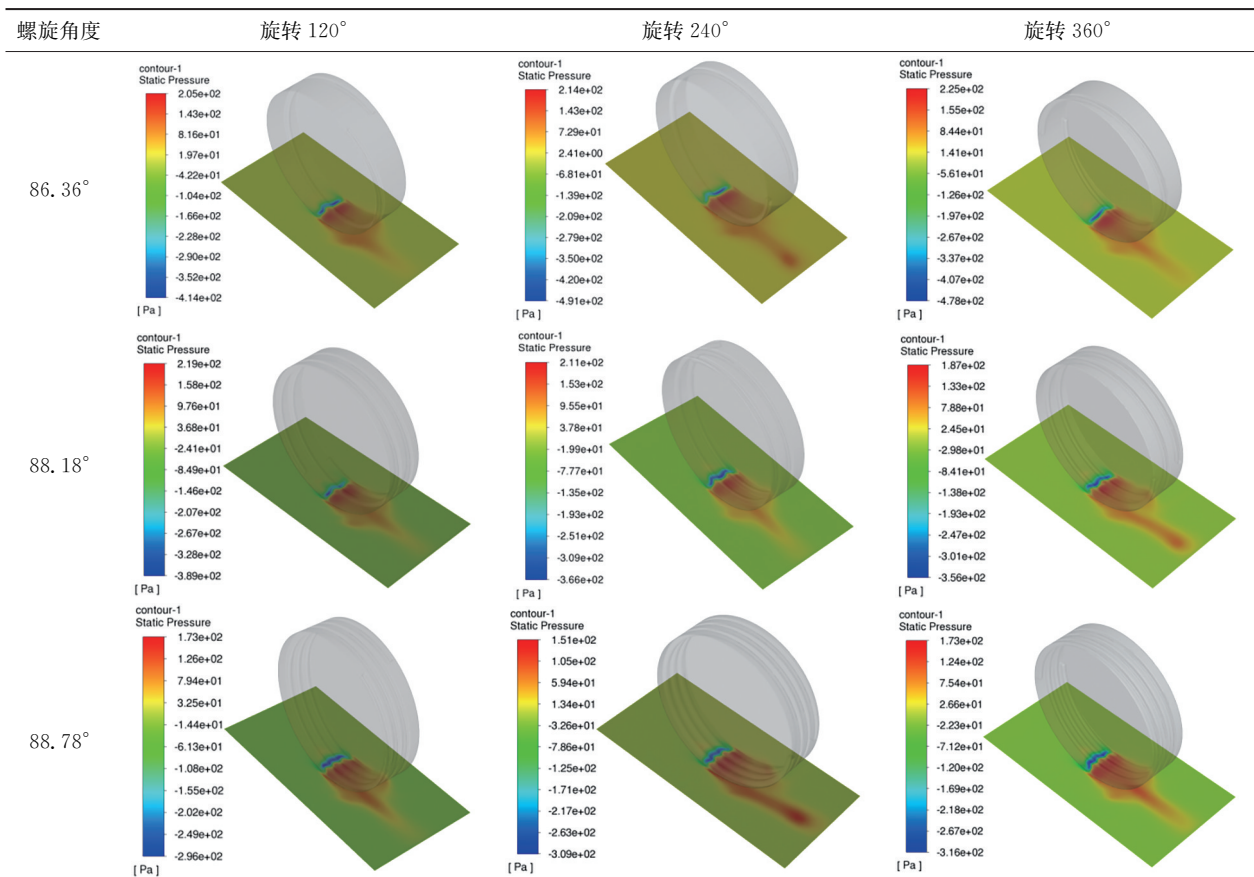


图 3 网格划分

表 3 大螺旋角沟槽砂轮磨削工件表面压强分布云图



作为对比,得到了相同圆周速度下普通砂轮磨削弧区工件表面压强分布云图,如图 4 所示。

由表 3 和图 4 可以看出,大螺旋角沟槽砂轮与普通砂轮的磨削弧区气流场压强分布云图具有一定的相似之处,楔形区入口处均为正压区,出口处均为负压区;在最小间隙附近压强变化最为明显,在远离最小间隙位置压强逐渐趋于大气压强;越靠近最小间隙,正负压强绝对值越大,正负压强峰值存在于最小间隙附近。但两者也有多处不同,大螺旋角沟槽砂轮气流场正负压强峰值的绝对值小于普通砂轮。并且,螺旋角度越大,正负压强峰值的绝对值越小。显然,气流场压强越低越有利于磨削液冲破气流屏障进入磨削弧区进行冷却和润滑。若单从气流场角度考虑,可以得出如下结论:螺旋角度越大,气流对磨削液的阻碍作用越小,沟槽的导通能力越强,磨削弧区的换热性能越好。但螺旋角度的增大还意味着单位时间内螺旋沟槽砂轮表面与工件表面的接触面积减小,这会导致磨削工件表面粗糙度上升,故在实际磨削时应综合考虑螺旋沟槽砂轮接触面积和磨削液冷却润滑对磨削加工质量带来的影响。

2.2 沟槽尺寸对磨削弧区压强分布的影响

大螺旋角沟槽砂轮磨削弧区气流场是瞬态变化的,其原因是螺旋沟槽随着砂轮旋转不断地变换位置。经过章节 2.1 的分析,已经明确了螺旋角度与气流场压强的关系。因此,为了降低模型的复杂性,暂不考虑换热通道的横移运动,此时螺旋沟槽砂轮将退变为环形沟槽砂轮,其磨削气流场速度及压强特性不随时间推移而变化。本节采用单环形沟槽砂轮来分析沟槽深度和宽度变化对磨削气流场压强特性的影响,如图 5 所示。

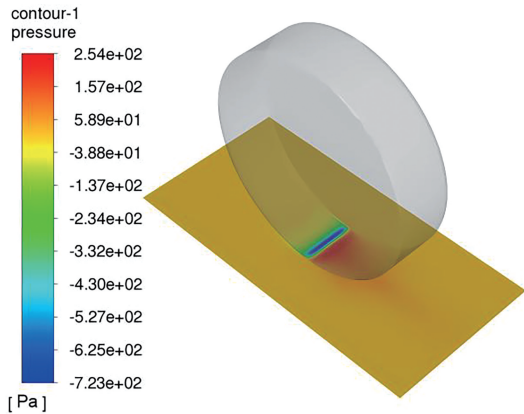


图 4 普通砂轮磨削工件表面压强分布云图

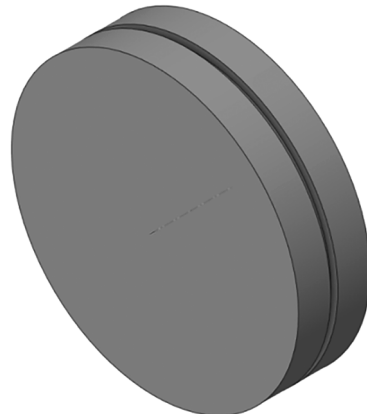


图 5 单环形沟槽砂轮模型

首先研究沟槽宽度对压强分布的影响,如图 6(a)所示。可以看出,随着沟槽宽度的增大,压强最大值逐渐减小,压强最小值的绝对值也逐渐减小。这是因为,沟槽宽度越大,其可导通的空气越多,减小了楔形区入口处空气堆积,表现为正压强峰值减小;楔形区入口处的空气更容易通过沟槽到达楔形区出口,楔形区出口处空气得到及时补充,表现为负压强峰值绝对值减小。因此,沟槽宽度越大,磨削楔形区正负压强峰值的绝对值均越小,而更小的压强有利于磨削液冲破砂轮周围气流屏障抵达磨削弧区,从而进行有效地冷却和润滑。

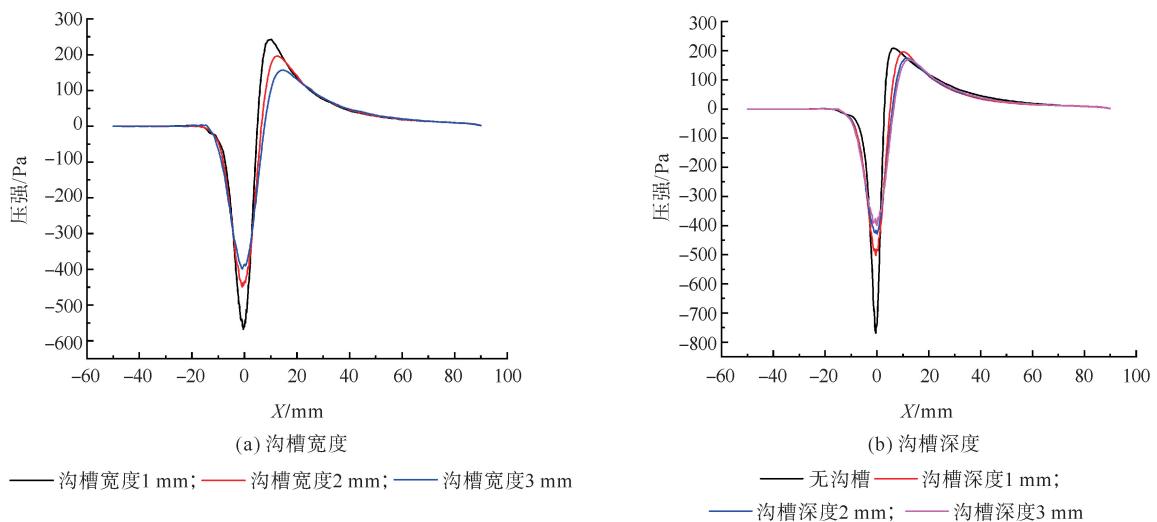


图 6 沟槽尺寸对压强分布的影响

由图 6(b)可以看出,相对于无沟槽的普通砂轮,砂轮表面沟槽的存在大大降低了楔形区气流场正负压强峰值,且沟槽深度越大,楔形区气流场正负压强峰值的绝对值越小。进一步分析图 6(b)还可以发现,随着沟槽深度由 1 mm 增加至 3 mm,楔形区气流场正负压强峰值变化幅度逐渐变小。可以预见,即使继续增大沟槽深度,对磨削楔形区气流场强度的影响并不大。为了验证这一猜想,在前文基础上进一步增大沟槽深度至 6 mm,并将最大正负压强的绝对值归纳如图 7 所示。

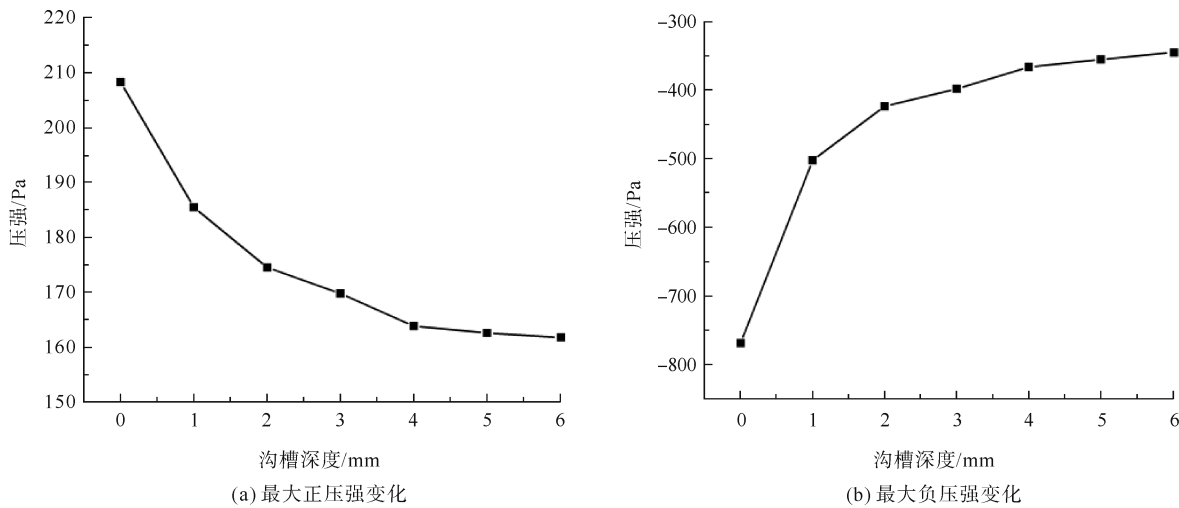


图 7 沟槽深度对正负压强峰值的影响

从图 7 中可以看出,沟槽深度增大至 4 mm 后,再继续增大沟槽深度,气流场压强峰值的变化幅度较前者有明显减小。这说明,增大沟槽深度有助于降低气流场压强,但随着沟槽深度的增加,楔形区气流场正负压强峰值逐渐趋于一个稳定值,这从侧面说明了单纯增加沟槽深度,对磨削弧区换热性能的提升是有限的。

3 磨削弧区气流场速度特性研究

3.1 螺旋沟槽对磨削弧区气流速度的影响

不同螺旋角度的大螺旋角沟槽砂轮旋转至不同位置时磨削弧区气流场速度分布矢量如表 4 所示。仿真参数设置同章节 2.1。

表 4 大螺旋角沟槽砂轮磨削弧区气流场速度分布矢量

螺旋角度	旋转 120°	旋转 240°	旋转 360°
86.36°			
88.18°			
88.78°			

作为对比,得到了相同圆周速度下普通砂轮磨削弧区气流速度分布矢量,如图 8 所示。

由表 4 和图 8 可以看出,大螺旋角沟槽砂轮与普通砂轮磨削弧区气流速度最大值均出现在最小间隙附近。但大螺旋角沟槽砂轮气流速度低于普通砂轮,并且,螺旋角度越大,磨削弧区气流速度越低。这是因为,砂轮表面螺旋沟槽相当于间接增大了砂轮与工件之间的最小间隙,螺旋角度越大,最小间隙则越大。而砂轮近壁面的气流速度约等于砂轮圆周速度,最小间隙增大后,工件表面空气受到高速旋转砂轮的影响就会变小,表现为气流速度降低。同时,砂轮与工件之间的最小间隙增大,单位时间可导通的空气总量增大,即磨削楔形区入口至出口之间的气流量增大,这同样有利于增加磨削液的有效流量,从而提升磨削弧区换热性能。

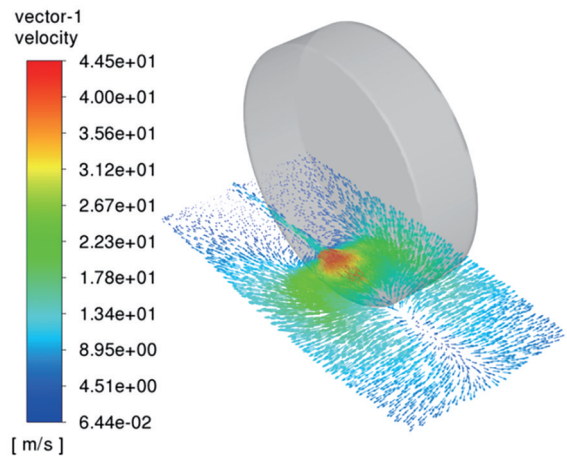


图 8 普通砂轮磨削弧区气流速度分布矢量

3.2 磨削弧区气流场返回流分析

相关研究^[15-19]表明,磨削弧区空气随砂轮运动至楔形区入口后会在此聚集,形成与砂轮旋转方向相反的气流,称之为返回流。因此,探究磨削弧区返回流状态,以便将磨削液喷嘴安置于合适位置,降低返回流对磨削液的阻碍。本节以气流场强度相对最大的、螺旋角度为 86.36°的螺旋沟槽砂轮为例。选取砂轮旋转 360°位置,并在流体域中截取 $Z=5\text{ mm}$ 平面和 $Z=-5\text{ mm}$ 平面,两平面分别位于接触区和换热区,作二维速度矢量,如图 9 所示。

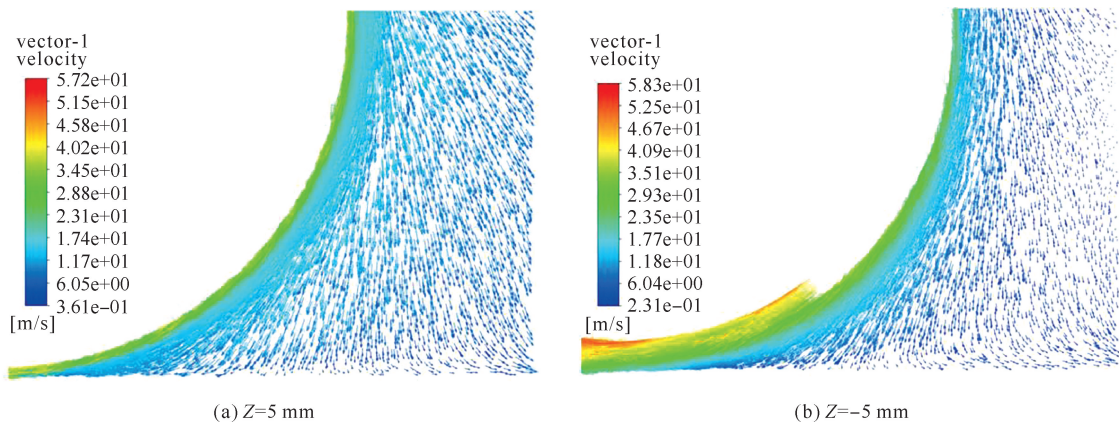


图 9 楔形区入口速度矢量

从图 9 中可以看出,无论在接触区还是换热区,在最小间隙附近 1 个砂轮半径的距离之内,均未产生返回流;在距离最小间隙较远处,出现返回流现象,但强度并不高。因此,只需要将喷嘴置于距最小间隙 1 个砂轮半径之内,便认为可以忽略磨削区空气返回流对磨削液的阻碍作用。为进一步研究磨削区空气流向,作 $Z=0\text{ mm}$ 平面气流运动迹线,如图 10 所示。

由图 10 可以看出,有相当一部分空气在达到磨削弧区最小间隙之前就已经向砂轮宽度方向流动,且流向图中砂轮右侧区域的空气明显更多,即流向与螺旋线旋向一致。这说明螺旋沟槽把磨削

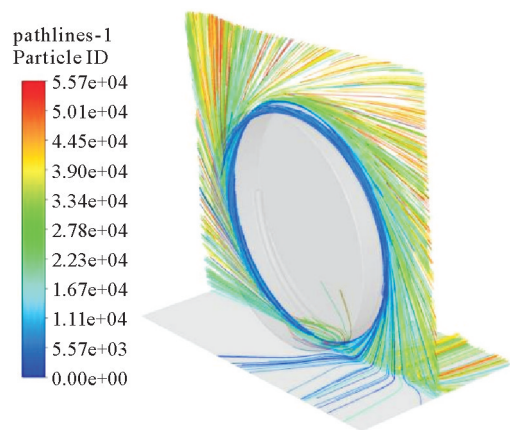


图 10 磨削区气流运动迹线

区空气向砂轮两侧甩出,抑制了返回流现象的出现。此外,根据表4中的工件表面气流速度矢量也可以得出,砂轮两侧的空气流动是磨削区空气流向不可忽视的一部分,同时也是楔形区内没有出现明显返回流的重要原因。

4 结论

本文分析了大螺旋角沟槽砂轮磨削弧区气流场瞬态变化的特殊性,在FLUENT中利用MRF方法进行仿真研究,结果表明:

1) 砂轮表面螺旋沟槽宽度、深度以及螺旋角度越大,磨削区气流场压强越低,对磨削气流场强度的削弱能力越强,越有利于磨削液进入磨削弧区进行冷却和润滑。螺旋沟槽对磨削液有着良好的导通能力,从而大幅提升了磨削弧区的换热性能。

2) 磨削楔形区气流运动会制约磨削液的有效注入,螺旋沟槽间接增大了砂轮与工件之间的最小间隙,使得磨削楔形区入口至出口之间的气流量增大,工件表面气流速度降低。磨削区空气在达到最小间隙之前就已经向砂轮宽度方向流动,有效抑制了楔形区入口处返回流的产生,有助于磨削液冲破砂轮表面气流屏障到达磨削弧区,提高磨削液的有效利用率。

参考文献(References):

- [1] 赵齐亮,王德祥.单颗磨粒磨削的分子动力学模拟[J].青岛理工大学学报,2020,41(6):88-95.
ZHAO Qiliang,WANG Dexiang. Molecular dynamics simulation of single abrasive grain grinding[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2020,41(6):88-95.
- [2] 蔡中伟,孙玉利,徐朋冲,等.绿色磨削加工技术研究进展[J].机械制造与自动化,2022,51(6):1-5.
CAI Zhongwei,SUN Yuli,XU Pengchong,et al. Research progress of green grinding technology[J]. Machine Building & Automation,2022,51(6):1-5.
- [3] ZHANG Yanbin,LI Changhe,ZHANG Qiang,et al. Improvement of useful flow rate of grinding fluid with simulation schemes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,84:2113-2126.
- [4] LI Changhe,ZHANG Xiaowei,ZHANG Qiang,et al. Modeling and simulation of useful fluid flow rate in grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2014,75:1587-1604.
- [5] 李长河,原所先,李虎,等.磨削区内气流场速度和压力分布规律的研究进展[J].金刚石与磨料磨具工程,2004(3):31-34.
LI Changhe,YUAN Suoxian,LI Hu,et al. Researches on distributed regularity of pressure and speed of air flow in grinding zone[J]. Diamond & Abrasives Engineering,2004(3):31-34.
- [6] QIU Bo,YIN Jingfei,DING Wenfeng,et al. Flow field and cooling capacity in workpiece-tool contact zone during ultra-high speed grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2020,111:2349-2359.
- [7] 江湘颜,刘爱强,肖帆.整体硬质合金刀具磨削液流场分析[J].工具技术,2020,54(3):42-45.
JIANG Xiangyan,LIU Aiqiang,XIAO Fan. Flow field analysis of grinding fluid for integral carbide tools[J]. Tool Engineering,2020,54(3):42-45.
- [8] 汪帮富,丁吉凯,殷振,等.磨削区内气流场及压力分布的仿真与实验研究[J].机床与液压,2015,43(15):75-78.
WANG Bangfu,DING Jikai,YIN Zhen,et al. Experimental study and simulation of airflow field and pressure distribution in grinding process zone[J]. Machine Tool & Hydraulics,2015,43(15):75-78.
- [9] 王高位.成形磨削区磨削液射流流场对磨削质量影响研究[D].大连:大连工业大学,2017.
WANG Gaowei. Study on the effect of grinding fluid jet flow field on grinding quality in the form grinding zone[D]. Dalian:Dalian Polytechnic University,2017.
- [10] 叶久贞,季田,张利萍,等.成形磨削过程中气液两相流VOF模拟与分析[J].大连工业大学学报,2017,36(3):218-222.
YE Jiuzhen,JI Tian,ZHANG Liping,et al. VOF simulation analysis of air-liquid two-phase flow in forming grinding[J]. Journal of Dalian Polytechnic University,2017,36(3):218-222.
- [11] 王福军.计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis:Principles and applications of CFD software[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2004.
- [12] 王宇钢,裴少勇,修世超.磨削区气流运动特性仿真与实验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2015,36(1):91-94.
WANG Yugang,PEI Shaoyong,XIU Shichao. Simulation and experimental research on airflow movement characteristics of grinding zone[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2015,36(1):91-94.