

磨削工件表面含湿空气射流冲击的换热

张靖周 谭晓茗 刘波 朱兴丹

(南京航空航天大学能源与动力学院,南京,210016)

摘要:针对磨削工件表面的射流冲击对流换热过程,一方面,通过数值研究,揭示旋转表面诱导的气旋和射流冲击的耦合流动换热特征;另一方面,通过实验研究,定量分析含湿空气射流冲击的强化换热效果。研究表明,当盘缘在射流冲击喷嘴附近的切向速度与射流冲击方向协调时,旋转盘诱导的气旋运动和射流冲击的耦合作用有利于改善磨削弧区的对流换热,随着转盘旋转速度的增加,其强化对流换热的效果更显著;采用含湿空气作为冲击射流可以显著提高加热壁面的冷却效果。

关键词:冲击射流;气旋效应;对流换热;含湿空气

中图分类号:TK124;TG580.14

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)05-0741-06

Heat Transfer on Grinding Workpiece Surface Subjected to Mist/Air Impinging Jet

Zhang Jingzhou, Tan Xiaoming, Liu Bo, Zhu Xingdan

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Investigation is carried out to illustrate some of the flow and heat transfer characteristics that occur when a single-air jet or mist/air jet impinges on a flat plate with a rotating disk mounted above the surface, the representative of the workpiece in a grinding process. The first objective aims to assess the detailed flow and heat transfer features in the vicinity of a rotating grinding wheel with jet impingement directed at grinding zone by numerical investigation. The second objective aims to assess the quantitative evaluation for heat transfer enhancement on a grinding workpiece surface subjected to the mist/air jet impingement by experimental investigation. The results show that the coupled action of swirl air entrainment and jet impingement is benefit for convective heat transfer enhancement near grinding region when the jet impinging direction is consistent with the rotating direction of rotating disk, especially at higher rotating speed. Furthermore, the increasing of water droplet in mist cooling can enhance the cooling effect significantly.

Key words: jet impinging; swirl effect; convective heat transfer; mist/air

磨削过程中磨削弧区局部热流过高是制约高速磨削加工技术发展的一个重要因素,传统的冷却方式是利用磨削液疏导磨削弧区的热量,一旦磨削热流密度超过临界值,磨削弧区将呈现膜态沸腾,磨削液就会因汽膜的阻隔而无法再与工件表面接

触,从而导致工件表面急剧升温,并很快发生烧伤;同时磨削液的大量使用也会给环境带来较为严重的污染^[1-3]。随着绿色制造理念的贯彻,基于射流冲击强化传热机理的低温冷风射流冷却、高压水射流冷却和喷雾冷却等高效传热模式得到了广泛关

注^[4-8]。

射流冲击是一种极其有效的强化局部传热或传质的方法。由于射流在冲击靶面驻点区的流动边界层薄,表面传热系数比常规的对流换热要高出几倍甚至一个量级。国内外针对射流冲击冷却的机理、对流换热特性开展了大量的研究工作^[9-16],研究内容涉及自由射流、浸没射流、受限射流和两相射流等诸多方面,但对于磨削工件表面的含湿空气射流冲击冷却而言,由于高速旋转的砂轮诱导的表面气旋效应以及微细液滴的相变作用,冲击射流的流动结构及其在工件表面的对流换热特性无疑具有独特的现象。对此,本文主要开展两个基础问题的研究,一方面,通过数值研究,揭示旋转表面诱导的气旋卷吸和射流冲击耦合作用下的加热表面换热特征;另一方面,通过实验研究,定量分析含湿空气射流冲击的强化换热效果。

1 旋转盘气旋卷吸和射流冲击耦合作用的流动换热特征

1.1 计算过程简介

图1为模拟砂轮磨削过程表面冲击射流对流换热的简化物理模型。整个计算域由加热平板、旋转圆盘、冲击射流和环境空间组成。加热平板长 $a=500$ mm,宽 $b=200$ mm,厚 $h=2$ mm,平板底面设定为恒热流加热;圆盘直径 $D=200$ mm,厚度 $s=50$ mm,中央平面位于加热表面在宽度方向上的对称垂直平面上。为便于在计算中对静止加热表面和

旋转盘轮缘表面进行设定,圆盘与加热表面之间设置为一个极小的间隙(0.02 mm)以将两者分离。射流喷嘴管径 $d_j=5$ mm,射流出口位置固定,位于圆盘中央平面,相对于加热表面中心的坐标为(65 mm, 10 mm),射流冲击角度为 20° ,射流介质为空气;计算域选取相对较大的自由空间。

本文的物理模型与真实的磨削过程的主要近似在于:(1)圆盘与加热表面之间未形成紧密接触而存在极小的间隙,由于磨削弧区砂轮与工件之间的接触压力较大,射流难以从两者之间穿透,但这一近似对于砂轮磨削深度很小的情形所带来的工件表面对流换热特征的影响较小^[17]; (2)加热平板是静止的,由于磨削过程中工件的移动速度很小,这一近似对工件表面对流换热特征的影响可以忽略。

边界条件设置如下:

(1)加热表面底部给定恒热流边界,热流密度为 $1\ 000$ W/m²。

(2)加热工件导热系数设为 16 W/(m·K),圆盘的导热系数设定为 0.1 W/(m·K),圆盘盘缘面和侧面为流-热耦合边界。

(3)射流喷嘴空气进口边界条件设为速度进口,温度为环境温度。

(4)固体壁面采用无滑移边界条件;流体域边界设为环境压力和温度(101 325 Pa, 300 K)。

由于圆盘是旋转的,加热表面是静止的,因此在计算域中同时存在静止、可动区域,利用Fluent软件中的多重参考坐标系(Multiple reference frame)进行相应的设定^[17]。考虑在圆盘旋转条件下,流场中有可能存在着较强的剪切作用,故在本文的数值模拟中采用了RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,并在近壁区采用非平衡壁面函数法。采用结构化网格对计算域进行网格划分,贴近加热表面和转盘表面边界内的网格进行加密处理,经过网格数值试验,本文计算网格总数约为300万。数值离散采用二阶精度的迎风格式,收敛的标准是判断各物理量的相对残差小于 10^{-5} 。

1.2 流动特征分析

图2为无射流冲击、旋转盘转速 $2\ 500$ r/min(顺时针)时转盘表面的气旋流场和位于转盘中心 $Y-Z$ 平面上的流线图。当圆盘旋转时,由于转盘的高速旋转对周围流体产生扰动,尤其是盘面上的流体,受到离心力作用而产生切向和径向的流动,在转盘表面形成强烈的气旋流动结构;同时由于流体存在径向向外的流动,为保证流动的连续性,周围

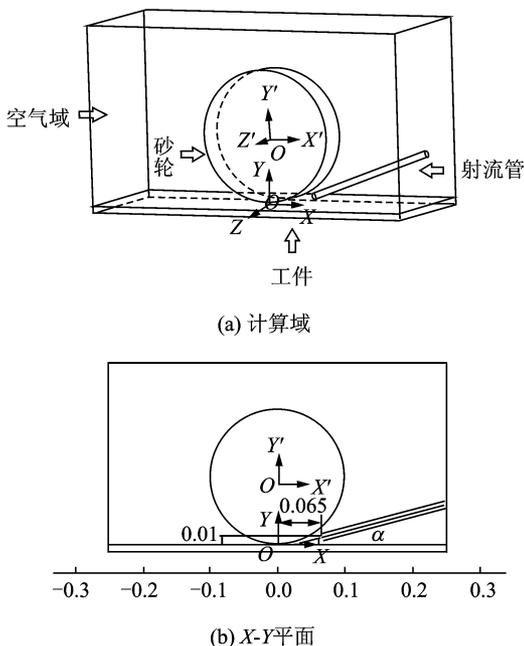


图1 计算模型示意图

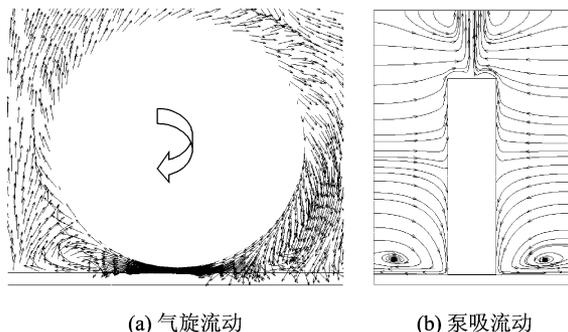
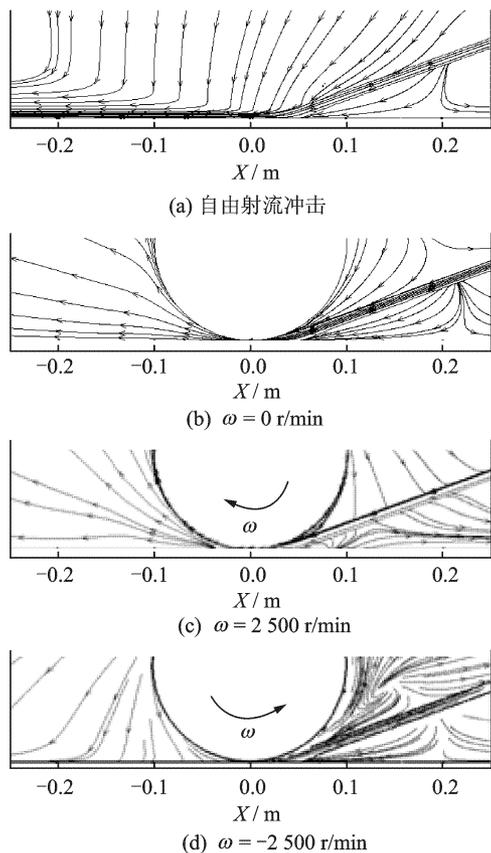


图2 旋转诱导的流动结构

流体被泵吸进入转盘中心。在转盘右侧(正 X 方向),当旋转诱导的气旋流动撞击加热壁面时便对壁面形成类似于射流的“冲击”作用;在转盘左侧(负 X 方向),盘缘背侧形成一个气旋流动的负压区域;同时在转盘 Z 向,被泵吸进入转盘中心的流体沿径向流动碰撞静止壁面后形成横向流动。

图3为射流冲击速度 30 m/s 时,在圆盘静止和转动情况下, X - Y 平面的局部速度流线图,反映出旋转诱导的气旋流动和射流流动的相互作用。从图中可以看出,对于倾斜的自由射流冲击,射流气体冲击至加热表面后形成冲击驻点,并形成壁面射流,同时在射流的引射作用下,射流管附近的空气

图3 X - Y 平面的局部流线图($Z=0\text{ mm}$)

受到卷吸而向壁面流动。当转盘静止时,静止圆盘对射流气体冲击至加热表面后所形成的壁面射流而言起到绕流的作用,气流绕流静止盘后在盘缘后方形形成扩展流动而在转盘背部形成低压区,诱导壁面射流流线自贴壁处抬升。当圆盘转动时,转盘表面诱导的气旋运动与冲击射流形成相互作用。当圆盘顺时针旋转时,在射流冲击喷嘴附近的盘缘切向速度与射流冲击速度同向,转盘左侧的贴壁流动在旋转表面诱导的气旋作用下而呈抬升的趋势,同时气旋也增强了左侧近壁气流流动的速度;在转盘右侧(正 X 方向),旋转诱导的气旋运动对冲击射流的流动形成一定的加速作用,同时气旋也阻隔了射流管附近的射流喷射抽吸气流,导致较为明显的沿壁面右侧的气流流动。当圆盘逆时针旋转时,在射流冲击喷嘴附近的盘缘切向速度与射流冲击速度反向,在转盘右侧(正 X 方向),转盘盘缘附件的气旋流动对射流冲击壁面的速度产生弱化;在转盘左侧(负 X 方向),旋转诱导的气旋流动对加热壁面形成特定的冲击,阻隔了射流冲击壁面后形成的壁面流动,将迫使其沿加热表面横向流动。

1.3 表面对流换热特征

图4为射流冲击速度 30 m/s 时,在圆盘静止和转动情况下,加热平面的温度分布图。对于自由射流冲击,由于射流冲击角度倾斜,在冲击驻点左侧的加热表面形成的壁面射流起到较好的冷却效果,同时射流冲击加热壁面后沿表面流动时,既存在向下游的流动,也存在沿横向的流动,从而形成中央温度低、横向侧边温度高的等温线分布。当加热表面上存在静止圆盘时,射流冲击驻点区的对流换热能力降低,同时气流绕流静止盘后在盘缘后方形形成低压区,诱导圆盘后方壁面射流流线自贴壁处抬升,因此壁面射流对左侧中央区域的加热壁面冷却效果降低;另外,静止圆盘的存在还会引导冲击射流形成的壁面射流沿加热表面横向流动,削弱了壁面射流沿负 X 方向的流动能力。当圆盘转动时,无论圆盘是顺时针旋转,还是逆时针旋转,转盘旋转表面诱导的气旋流动与射流冲击的耦合作用均使得加热表面的对流换热能力相对圆盘静止时得到增强,但与自由射流情形相比则较为复杂。当圆盘顺时针旋转时,冲击驻点附近区域的温度有较为明显的降低,相对自由射流的驻点区范围向横向拉伸,在转盘左侧($0, -0.14$)区间,旋转诱导的气旋和射流冲击的耦合作用具有较为明显的体现,这是由于气旋增强了左侧近壁气流流动速度的缘故,而在该区间之外,旋转表面诱导的气旋作用导致近壁

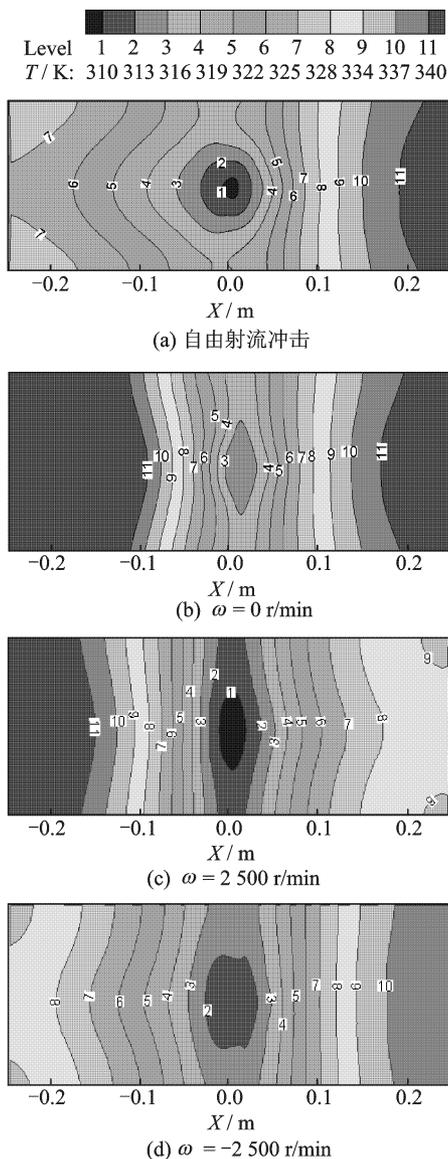


图4 加热表面的温度分布

气流抬升, 对流换热能力大大降低; 在转盘右侧, 旋转诱导的气旋对加热壁面形成特定的“冲击”, 对流换热能力有显著的增强, 温度等值线呈现中央温度低、横向侧边温度高的分布。当圆盘逆时针旋转时, 转盘左侧旋转诱导的气旋和射流冲击的耦合作用相对于圆盘静止时体现了强化换热的效果, 但相对于顺时针旋转情形, 驻点附近的对流换热能力有一定程度的降低。由上述分析可以得出, 当转盘盘缘在射流冲击喷嘴附近的切向速度与射流冲击速度同向时, 转盘诱导的气旋运动和射流冲击的耦合作用有利于改善冲击驻点区域的对流换热效果。

2 含湿空气射流冲击的强化换热效果

2.1 实验过程简介

含湿空气射流冲击换热的实验系统如图5所

示, 由高压空气气泵、储水箱、水泵、虹吸雾化喷嘴、电加热器、调频电机和数据采集器等组成。雾化装置的空气通道和水通道是彼此分开的, 空气体积流量 $F_a = 0.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 一定比例的水流与高速气流在内源式虹吸雾化喷嘴内混合从而形成含湿空气射流喷射出来, 对加热表面形成射流冲击。雾化喷嘴的直径 $d = 2 \text{ mm}$, 雾化锥角约为 17° , 雾化水滴的平均粒径约为 $40 \mu\text{m}$ 。水流的控制阀门在雾化喷嘴, 调节阀门可以获取不同体积流量比 (F_w/F_a) 的水/气混合流。加热板为紫铜板, 采用电阻丝加热方式, 通过调节加热器功率可以获得不同热流密度的加热板, 加热表面温度通过布置的热电偶阵列进行数据采集。坐标原点位置为图5中的 O 点。射流入射角为 30° , 喷嘴出口距加热壁面的法向距离为 20 mm , 距离坐标原点 $p = 65 \text{ mm}$ 。转盘直径为 215 mm , 厚度为 50 mm 。转盘与加热板表面的间隙约为 0.5 mm , 顺时针旋转, 旋转速度由调频电机控制。

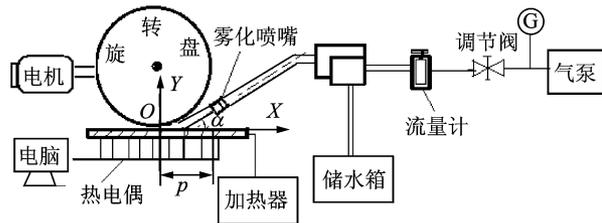


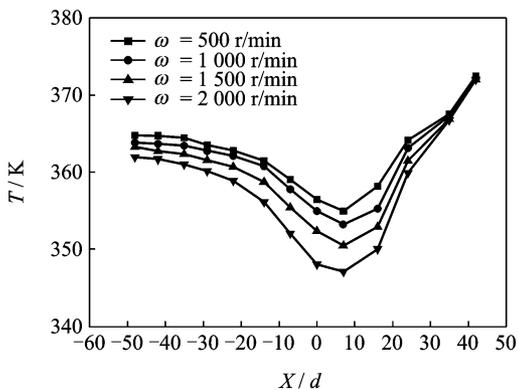
图5 实验系统图

2.2 转速度的影响

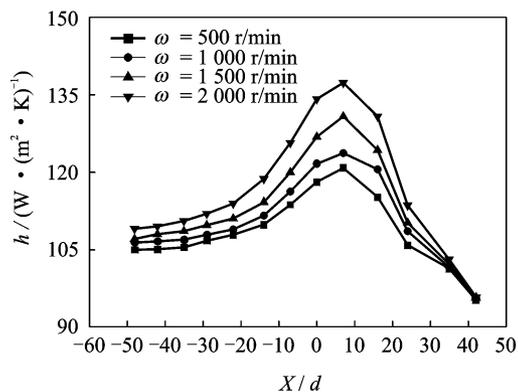
图6为水/气体积流量比 $F_w/F_a = 0.516\%$, 加热板表面热流密度 $q = 7850 \text{ W/m}^2$ 时, 不同转速下加热板表面的温度和对流换热系数分布曲线。随着转盘转速从 $\omega = 500 \text{ r/min}$ 增加到 $\omega = 2000 \text{ r/min}$, 加热板表面温度逐渐降低, 尤其是在冲击驻点区附近, 驻点区的温度下降趋势随着转速增加而加剧, 图中转速从 $\omega = 500 \text{ r/min}$ 提高一倍转速后, 驻点区温度下降 2 K , 而从 $\omega = 1000 \text{ r/min}$ 提高一倍转速以后, 驻点区温度下降了 10 K 。图6(b)中的换热系数分布也充分验证了这一点。随着砂轮旋转速度加快, 其引起的气旋效应越发明显, 可以携带更多的冷却气流通过转盘与加热表面能之间的空隙, 因此对流向下游的冷却能力也越强。同时, 在转盘右侧的对流换热能力改善的幅度要强于转盘左侧, 体现了转盘诱导的气旋运动和射流冲击的耦合作用。

2.3 不同水/气体积比的影响

图7为转盘旋转速度 $\omega = 2000 \text{ r/min}$, 加热板

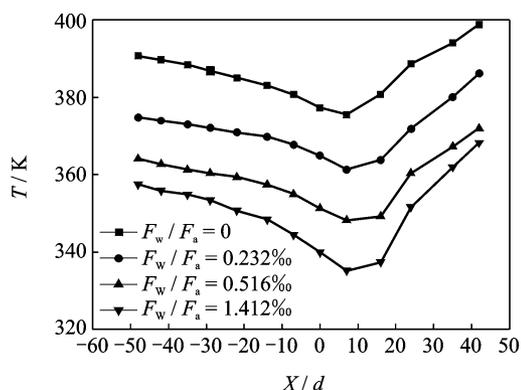


(a) 温度分布

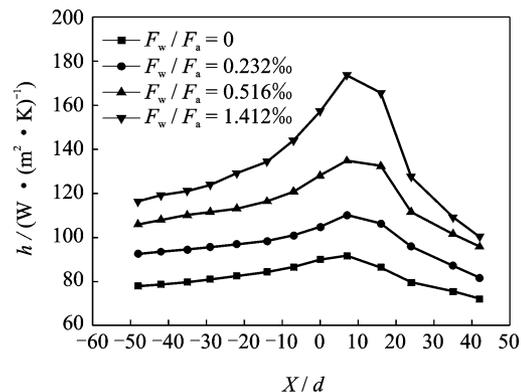


(b) 对流换热系数分布

图6 旋转盘转速对加热壁面换热的影响



(a) 温度分布



(b) 对流换热系数分布

图7 水/气比对加热壁面换热的影响

表面热流密度 $q = 7850 \text{ W/m}^2$ 时,不同水/气体积流量比下射流冲击加热板的表面温度与对流换热系数分布曲线。可以发现,当空气流量一定时,增大进水量可以显著提高冷却效果,尤其是驻点区温度下降非常明显。从图7(b)中驻点区的对流换热系数可以更清楚地看出,以水/气体积流量比为0时的对流换热系数为比较基准,当水/气体积流量比为0.232%时,对流换热系数提高了22%;当水/气体积流量比为0.516%时,对流换热系数提高了50%;当水/气体积流量比增大到1.412%时,对流换热系数提高了87%。因此,当加热板的温度远高于水的汽化点时,应该适当提高空气中水的含量,以提高局部对流换热系数,这是增强冷却效果的有效措施。

3 结 论

(1)与自由射流的流动结构相比,转盘旋转表面诱导的气旋流动对冲击射流附壁后形成的壁面流动产生显著的影响。

(2)当转盘盘缘在射流冲击喷嘴附近的切向速度与射流冲击速度同向时,转盘诱导的气旋运

动和射流冲击的耦合作用有利于改善冲击驻点附近区域的对流换热效果;随着转盘旋转速度的增加,其强化对流换热的效果更为显著。

(3)含湿空气射流中水滴含量的加大可以显著提高冷却效果。以单相空气射流冲击为比较基准,当水/气体积流量比为0.232%时,对流换热系数提高了22%;水/气体积流量比为0.516%时,对流换热系数提高了50%;当水/气体积流量比增大到1.412%时,对流换热系数提高了87%。

参考文献:

- [1] Shimizu J, Zhou L B, Eda H. Simulation and experimental analysis of super high-speed grinding of ductile material [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129: 19-24.
- [2] Mayer J E, Purushothaman G, Gopalakrishnan S. Model of grinding thermal damage for precision gear materials [J]. Annals of the CIRP, 1999, 48(1): 251-254.
- [3] 孙方宏,傅玉灿,徐鸿钧.磨削液的加注方式对冷却效果的影响及其对策 [J]. 机械设计与制造工程, 1998, 27(6): 51-53.

- Sun Fanghong, Fu Yucan, Xu Hongjun. Influences of application ways of grinding fluid on the cooling effects and countermeasures[J]. *Machine Design and Manufacturing*, 1998, 27(6): 51-53.
- [4] 陈德成, 铃木康夫, 酒井克彦. 复合喷雾加工法在切削加工过程中的冷却和润滑效果[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(9): 1035-1038.
- Chen Decheng, Suzuki Y, Sakaik. The effect of cooling and lubrication of oil-water combined mist cutting method in turning operation[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(9): 1035-1035.
- [5] 徐鸿钧, 傅玉灿, 孙方宏, 等. 高效磨削时弧区热作用机理与强化弧区换热的基础研究[J]. *中国科学(编辑)*, 2002, 32(3): 296-307.
- Xu Hongjun, Fu Yucan, Sun Fanghong, et al. Study on the mechanisms of thermal effect and heat transfer enhancement in arc of high-speed grinding[J]. *Science in China (Series E)*, 2002, 32(3): 296-307.
- [6] Nguyen T, Zhang L C. An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003; 140: 224-230.
- [7] Liu J Y, Han R D, Sun Y F. Research on experiments and action mechanism with water vapor as coolant and lubricant in green cutting[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45(6): 687-694.
- [8] An Q L, Fu Y C, Xu J H, et al. The application of cryogenic pneumatic mist jet impinging in high-speed milling of Ti-6Al-4V[J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 315/316: 244-248.
- [9] Li Yongkang, Zhang Jingzhou, Tan Xiaoming. 3-D numerical computation of jet array impingement with initial crossflow[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, 21(2): 128-133.
- [10] 张靖周, 李永康, 谭晓茗, 等. 阵列射流冲击冷却局部对流换热特性的数值计算与实验研究[J]. *航空学报*, 2004, 25(4): 339-342.
- Zhang Jingzhou, Li Yongkang, Tan Xiaoming, et al. Numerical computation and experimental investigation on local convective heat transfer characteristics for jet array impingement[J]. *Acta Aeronautica et Actronautica Sinica*, 2004, 25(4): 339-342.
- [11] 张泽远, 张靖周, 杨卫华. 半封闭通道射流冲击换热特性的实验[J]. *航空动力学报*, 2006, 21(4): 626-630.
- Zhang Zeyuan, Zhang Jingzhou, Yang Weihua. Convective heat transfer of jet impingement inside semi-contained channel[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2006, 21(4): 626-630.
- [12] Graham K M, Ramadhyani S. Experimental and theoretical studies of mist jet impingement cooling[J]. *Journal of Heat Transfer of the ASME*, 1996, 118(1): 343-349.
- [13] Li X, Gaddis J L, Wang T. Mist/steam cooling by a row of impinging jets[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46: 2279-229.
- [14] 芦秋敏, 雷数业. 雾化喷射冷却的机理及模型研究[J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(5): 817-819.
- Lu Qiumin, Lei Shuye. Study on mechanisms and model of heat transfer in spray cooling[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26(5): 817-819.
- [15] 姜澎, 黄洪雁, 冯国泰, 等. 水雾/蒸汽相变冲击冷却的数值模拟[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009, 30(10): 1098-1102.
- Jiang Peng, Huang Hongyan, Feng Guotai, et al. Numerically simulation mist/steam impingement cooling with phase change[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009, 30(10): 1098-1102.
- [16] Lallave J C, Rahman M M, Kumar A. Numerical analysis of heat transfer on a rotating disk surface under confined liquid jet impingement[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007, 28: 720-734.
- [17] Ebbrell S, Woolley N H, Tridimas Y D, et al. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40: 209-223.