

基于Comsol的磁场辅助磨料水射流流场分布数值模拟*

侯荣国,王 涛,吕 哲,田业冰

(山东理工大学机械工程学院,淄博 255000)

[摘要] 借助 Comsol 软件数值模拟螺线管线圈的磁场强度分布和聚焦管内流场的分布状态,分析螺线管线圈磁场强度的分布规律及辅助磁场对磨料水射流的作用机理,获得使磨料水射流达到最佳聚焦效果的磁场强度。结果表明当励磁电流 $I=2.2\text{A}$ 时,磨料射流束在喷嘴出口处获得最佳聚焦效果。观察比较施加磁场辅助前后喷嘴外部流场的分布状态,并利用振动及动态信号采集分析系统测量射流实际冲击力。测量试验表明,施加磁场辅助后,磨料水射流的有效直径变小,聚焦效果显著增强,原有的薄水雾层消失,射流冲击力随电流强度的增大而增大。

关键词: 磨料水射流; 磁场辅助; 流场分布; Comsol; 螺线管线圈

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.18.043



侯荣国

副教授,硕士生导师,主要从事先进制造技术、工业机器人技术、机电控制技术的研究。主持或参与国家级课题 2 项、省部级课题 3 项、企业课题 3 项,获省部级教学奖励 2 项。发表学术论文 30 余篇,其中 SCI (EI) 收录 21 篇,授权发明专利 5 项。

工程陶瓷具有极高的硬度,良好的耐磨性、耐腐蚀性及耐高温等特点,被广泛应用于航空零部件的制造^[1-3]。目前应用于航空领域的陶瓷零件可分为两种:结构零件(如涡轮叶盘、机头罩、导弹喷管等)和功能零件(如卫星的天线罩和天线窗等)^[4-5]。传统加工陶瓷零件的方法,如金刚石磨削,不仅会产生刀具磨损,而且在加工过程中会产生大量的磨削热和较大的冲击力,使零件表面产生热损伤区、微裂纹和局部应力集中等,影响被加工工件的使用性能^[6]。此外,对于复杂型面的陶瓷零件,传统机械加工方法周期长、成本高且定位不准确。磨料水射流技术是一种新型冷态加工技术,与传统机械加工相比,其柔性高、定位精准、加工力小且无热效应,优势明显^[7-8]。因此,该技术被广泛应用于工程陶瓷等硬脆材料零件制造过程。磁场辅助磨料水

射流技术是磨料水射流技术的延伸和发展,该技术通过在喷嘴外围施加局部轴向磁场,消除射流的初始扰动效应,降低射流发散效果^[9],且磨料为磁性磨料,可进一步发挥磁场的作用,增强磁流变液表观黏度,提高射流聚焦效果。

本文将辅助磁场引入到磨料水射流加工中,优化设计磁场发生装置产生高能磁场,以便优化磨料分布和提高磨料动能。借助 Comsol 软件数值模拟聚焦管内流场的分布状态,分析辅助磁场对磨料水射流的作用机理,并利用振动及动态信号采集分析系统测量磨料射流的实际冲击力。

磁场辅助螺线管线圈模型的建立

1 单线圈模型

根据毕奥-萨伐尔定律^[10],距

* 基金项目: 国家自然科学基金(51402574)。

电流源 $I ds$ 任意点处的磁感应强度为:

$$dB = \frac{\mu_0 I ds \times r}{4\pi r^2} \quad (1)$$

式中, μ_0 为真空中的磁导率(H/m); I 为电流强度(A); ds 为电流源的线源矢量; r 为电流源到任意点的矢量半径(m)。

建立单线圈模型如图1所示。建立以圆心 O 为坐标原点, 半径为 R 的直径坐标系, M 为坐标系内任一点。线圈电流为 I , φ 为 OP 与 $O'P$ 之间的夹角, γ 为 OP 与 y 轴之间的夹角, θ 为矢径 r 与 ds 之间的夹角, α 为矢径 r 与其在 yoZ 平面上投影之间的夹角。

由图1可得电流源的线源矢量和矢量半径的单位矢量分别为:

$$ds = ds(-\sin\gamma e_j + \cos\gamma e_k) \quad (2)$$

$$e_r = \csc\alpha e_j - \cos\alpha \cos(\gamma + \varphi) e_j - \cos\alpha \sin(\gamma + \varphi) e_k \quad (3)$$

将式(2)和(3)代入式(1), 积分并简化得单线圈近轴线处任意点的磁感应强度为:

$$B_x = \frac{\mu_0 I R^2 \times r}{4(R^2 + y^2 + r_0^2)^{3/2}} \left(2 - \frac{3y^2}{R^2 + y^2 + r_0^2} \right) \quad (4)$$

建立单层密匝线圈模型如图2所示。其中单层密匝线圈的长度为 $2L$, 半径为 R , 单位长度上的线圈匝数为 n , $(x-l)$ 对应式(4)中的 r_0 。

对式(4)从 $-L$ 到 L 积分, 可得

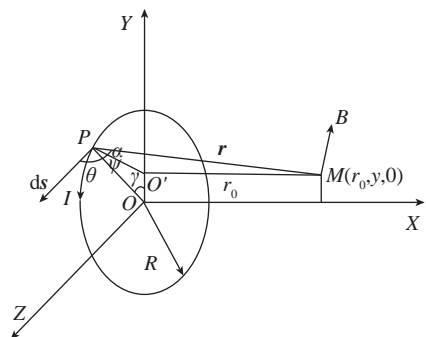


图1 单层线圈模型

Fig.1 Model of single layer coil

单层密匝线圈近轴线处任意点的磁感应强度为:

$$B_x = \frac{\mu_0 n I R^2}{4} \left[\frac{2}{R^2 + y^2} (A - B) - \frac{3y^2}{(R^2 + y^2)^2} \left(A - B + \frac{1}{3} B^3 - \frac{1}{3} A^3 \right) \right] \quad (5)$$

式中:

$$A = \frac{x + L}{\sqrt{R^2 + y^2 + (x + L)^2}} \quad (6)$$

$$B = \frac{x - L}{\sqrt{R^2 + y^2 + (x - L)^2}} \quad (7)$$

2 多层密匝线圈模型

建立多层密匝线圈模型如图3所示。其中多层密匝线圈的内半径为 R_1 , 外半径为 R_2 , 长度为 $2L$, 线圈匝数为 N , I 为电流强度, j 为连续电流分布时的电流密度, $j dR$ 对应式(5)中的 nI 。

对式(5)从 R_1 到 R_2 积分, 可得多层密匝线圈近轴线处任意点沿轴的磁感应强度为:

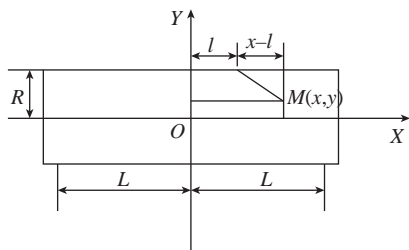


图2 单层密匝线圈模型

Fig.2 Model of single layer dense turn coil

$$B_x = \frac{\mu_0 j}{2} \left[(x + L) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + y^2 + (x + L)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + y^2 + (x + L)^2}} - (x - L) \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + y^2 + (x - L)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + y^2 + (x - L)^2}} \right] \quad (8)$$

$$j = \frac{NI}{2(R_2 - R_1)L} \quad (9)$$

螺线管线圈磁场强度分布数值模拟

图4是螺线管线圈三维分析模型。

螺线管线圈的三维参数如表1所示, 边界条件参数如表2所示。

1 螺线管线圈磁场强度分布的模拟结果与分析

图5、6和7分别是励磁电流 $I=2.0A$ 、 $2.2A$ 和 $2.4A$ 时, 磁场强度的分布图。

可知, 线圈内全部磁场沿线圈轴线呈轴对称分布, 主要分布规律为中心区域磁场强度较大, 分布相对均匀且趋于定值, 靠近两端面时, 由于“端

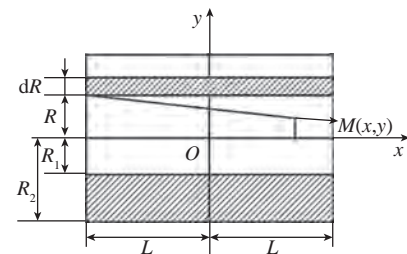


图3 多层密匝线圈模型

Fig.3 Model of multilayer dense turn coil

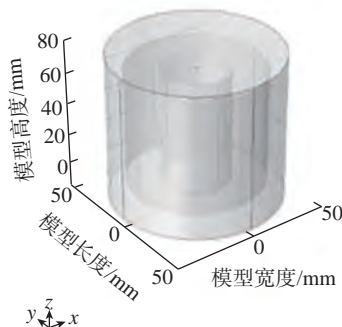


图4 螺线管线圈三维分析模型

Fig.4 Analysis model of multilayer dense turn coil

面效应” 磁场强度迅速减小; 螺线管线圈径向磁场强度的变化范围较小; 当螺线管长度和线圈匝数为定值时, 磁场强度与励磁电流成正比例关系, 即励磁电流越大, 磁场强度越强, 当励磁电流 $I=2.0\text{A}$ 、 2.2A 和 2.4A 时, 对应的最大磁感应强度 B 分别为 0.0263T 、 0.0288T 和 0.0317T , 最大磁场强度 H 分别为 21.04kA/m 、

23.04kA/m 和 25.36kA/m 。

2 聚焦管内磨料射流束流场分布数值模拟

求解设置: 入口边界条件为压力入口, 出口边界条件选择压力出口; 水射流参数如表 3 所示, 氧化铝磁性磨料参数如表 4 所示^[11]。

图 8、9 和 10 分别是励磁电流 $I=2.0\text{A}$ 、 2.2A 和 2.4A 时, 磨料射流束

在聚焦管内的流场分布图(重力方向为 z 轴正方向)。

可知, 当励磁电流 I 由 2.0A 增加至 2.2A 时, 磨料射流束在喷嘴出口处的直径逐渐变小, 聚焦效果逐渐增强; 但励磁电流 I 由 2.2A 增加至 2.4A 时, 磨料射流束在喷嘴出口处发生提前发散现象, 射流束直径逐渐变大。由此可知, 当励磁电流

表1 螺线管线圈三维模型
Table 1 3D model of dense turn coil

	内径 R_1/mm	外径 R_2/mm	高度 h/mm	线圈匝数 N
螺线管线圈	20	40	70	2000
外部空气域	40	50	90	—

表2 流场模拟边界条件参数
Table 2 Boundary parameters of flow field

线圈材料	励磁电流 I/A	初始压力 P/MPa	入射面 d/mm
非固体	2.0、2.2、2.4	20	5

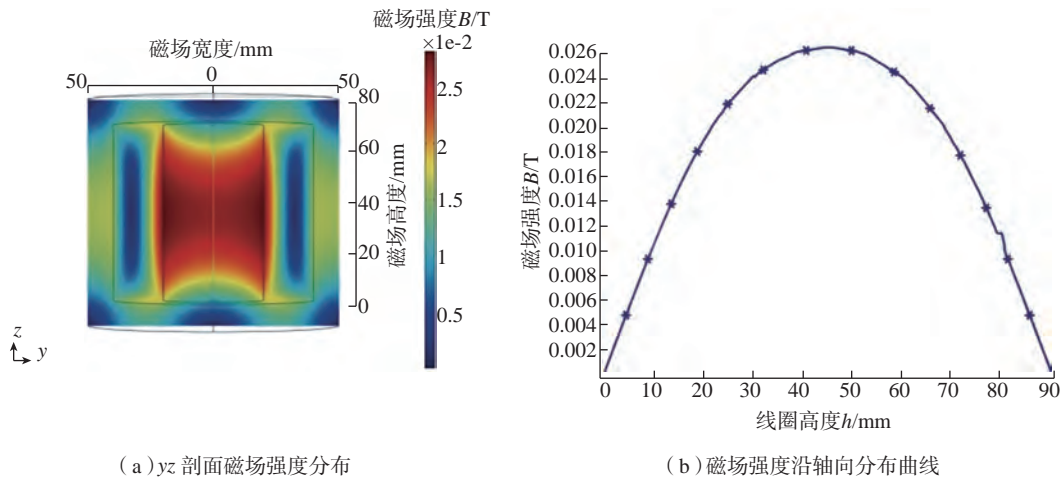


图5 励磁电流 $I=2.0\text{A}$ 时的磁场强度分布

Fig.5 Distribution of magnetic field intensity with the current of 2.0A

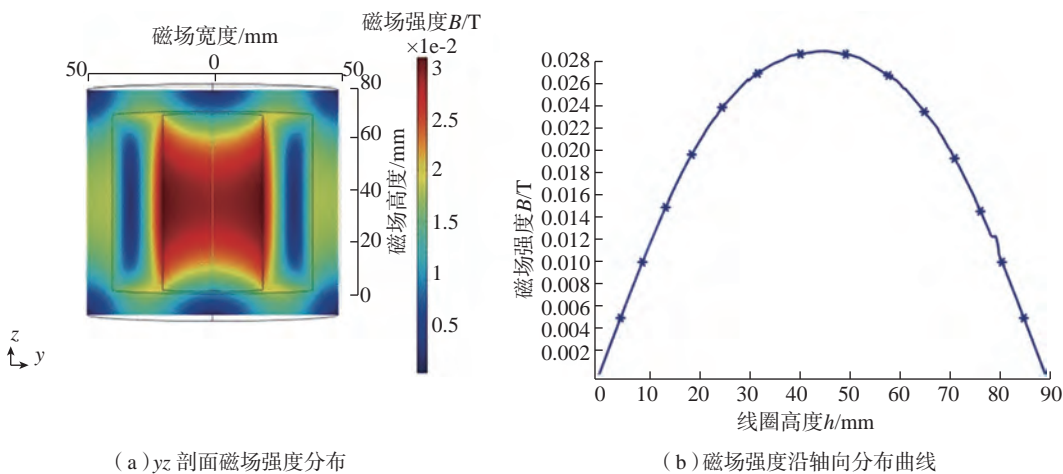


图6 励磁电流 $I=2.2\text{A}$ 时的磁场强度分布

Fig.6 Distribution of magnetic field intensity with the current of 2.2A

表3 水射流参数

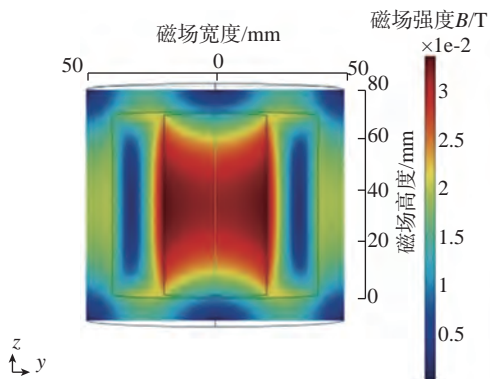
Table 3 Parameters of water jet

流体材料	初始压力 P/MPa	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
Water liquid	20	1000

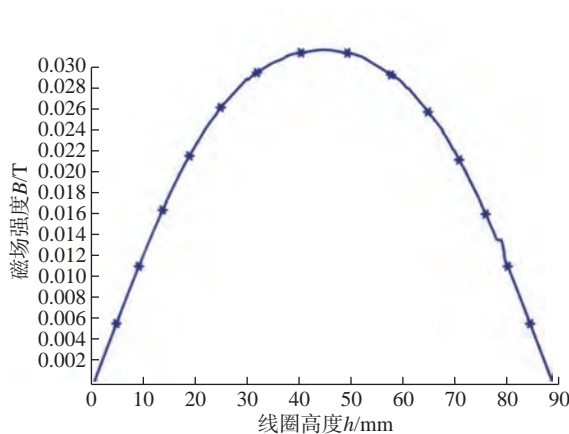
表4 氧化铝磁性磨料参数

Table 4 Parameters of alumina magnetic abrasive

密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	磨料粒径 d/mm	动力黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	介电常数 $\epsilon/(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$
3965	0.05	1×10^{-5}	5.7



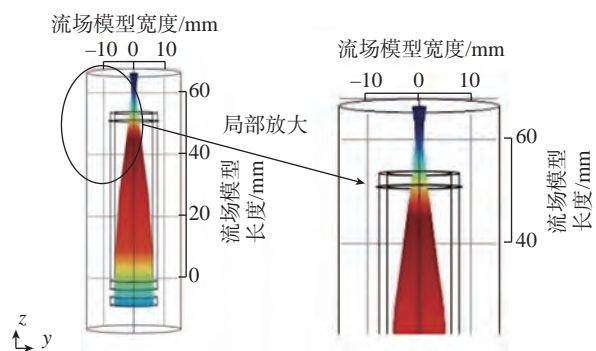
(a) yz 剖面磁场强度分布



(b) 磁场强度沿轴向分布曲线

图7 励磁电流 $I=2.4\text{A}$ 时的磁场强度分布

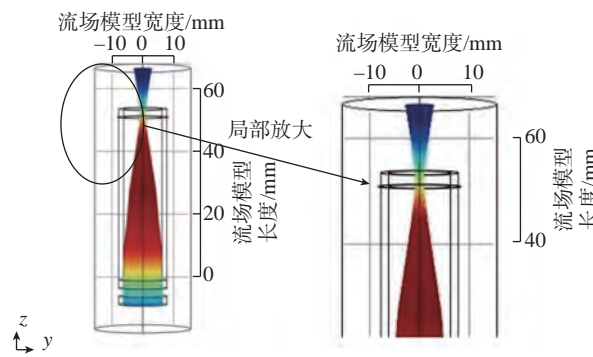
Fig.7 Distribution of magnetic field intensity with the current of 2.4A



(a) 磨料射流束聚焦状态 (b) 喷嘴出口局部放大

图8 励磁电流 $I=2.0\text{A}$ 时的射流束聚焦状态

Fig.8 Focusing effect of water jet with the current of 2.0A



(a) 磨料射流束聚焦状态 (b) 喷嘴出口局部放大

图9 励磁电流 $I=2.2\text{A}$ 时的射流束聚焦状态

Fig.9 Focusing effect of water jet with the current of 2.2A

$I=2.2\text{A}$ 时,磨料射流束刚好在喷嘴出口处获得最佳聚焦效果;当励磁电流 $I=2.0\text{A}$ 时,磁场强度相对较弱,不足以使磨料射流束的聚焦效果达到最佳状态;当励磁电流 $I=2.4\text{A}$ 时,磨料射流束在喷嘴出口之前达到最佳聚焦效果,但由于磁场分布的“端面效应”,喷嘴出口端面处磁场强度较

弱,磁场的聚焦作用下降,磨料射流束发生提前发散。

3 喷嘴外磨料水射流流场分布试验验证

图 11 为喷嘴外磁场辅助磨料射流束观察试验示意图,试验的参数设置如表 5 所示。本试验利用摄像机观察磨料水射流经喷嘴射出后的流

场分布状态,对比施加磁场辅助前后磨料射流束的直径变化和发散效果,进一步分析辅助磁场对流场分布状态的作用规律。

图 12 (a) 和(b) 分别是未施加磁场和施加磁场条件下喷嘴外部磨料水射流流场分布状态的测量结果。比较图 12 (a) 和(b) 可知,未

施加磁场辅助时,射流运动状态不稳定,原有的连续射流表面破碎严重,发散现象明显,射流核心段的外部被稀薄的水雾层包裹;随着励磁电流的增大,磨料水射流的直径变小,聚焦效果增强,说明辅助磁场的加入降低了磨料水射流的发散效果,获得了集束性好、准直性高的射流束。

4 磁场辅助磨料水射流冲击力测量试验

图 13 为磁场辅助磨料水射流冲击力测量装置。

该测量系统的工作原理为:磨料水射流冲击力传感器,传感器将冲击力参数传输至 AZ804-B 信号调理仪,调理仪对冲击力信号进行滤波和放大处理,并将处理后的冲击力信号输送至 AZ308 信号采集箱,采集箱通过 USB 通讯数据线与计算机连接,并通过 AdCras 软件控制信号采集箱和计算机,实现冲击力信号的采集与分析。

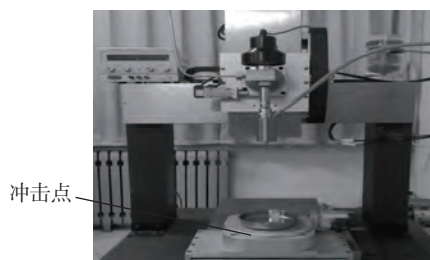
表 6 为 AdCras 软件参数设置,表 7 为冲击力测量试验参数。

图 14 为磨粒水射流冲击力测量结果。可知,未施加磁场辅助时,磨料射流的冲击力均值在 8.16N 上下

表5 射流流场分布验证试验参数

Table 5 Experimental parameters of water jet flow field

射流压力 P/MPa	磨料粒度 $M/\text{目}$	磨料流量 $Q/(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$	励磁电流 I/A
20	240	6	2.2



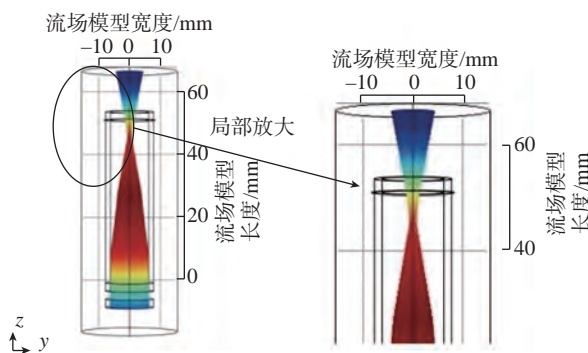
(a) 磁场辅助MAWJ加工机床



(b) 冲击力信号调理装置

图13 磨料水射流冲击力测量装置

Fig.13 Impact force measuring device of abrasive water jet



(a) 磨料射流束聚焦状态 (b) 喷嘴出口局部放大

图10 励磁电流 $I=2.4\text{A}$ 时的射流束聚焦状态

Fig.10 Focusing effect of water jet with the current of 2.4A

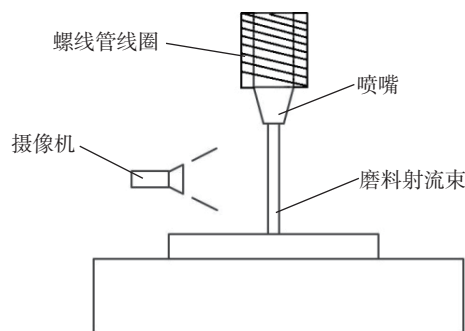
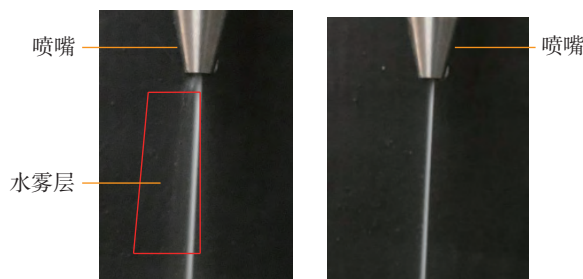


图11 流场分布观察试验示意图

Fig.11 Test chart of flow field distribution



(a) 未施加磁场 (b) 施加磁场

图12 喷嘴外流场分布状态

Fig.12 Distribution of flow field outside the nozzle

表6 AdCras软件设置

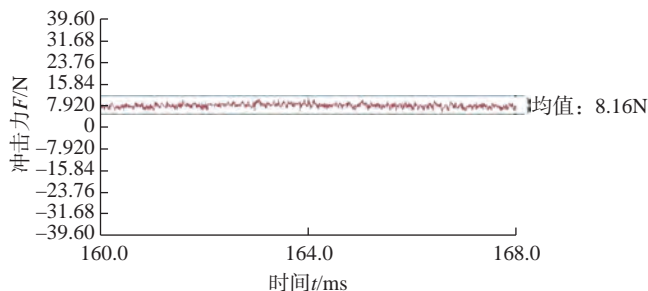
Table 6 AdCras software settings

采集方式	数据块数	采样频率/Hz	控制方式	电压范围/mV
连续采集	8	12800	自由运行	± 5000

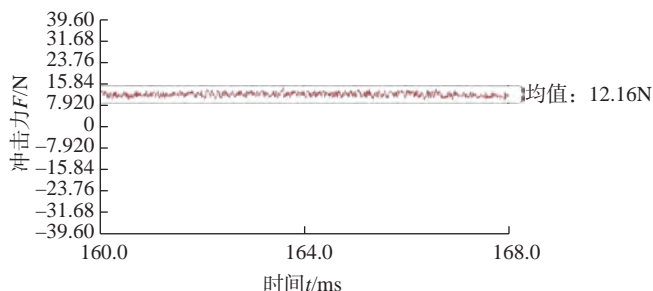
表7 射流冲击力测量试验参数

Table 7 Impact force measuring experimental parameters of abrasive water jet

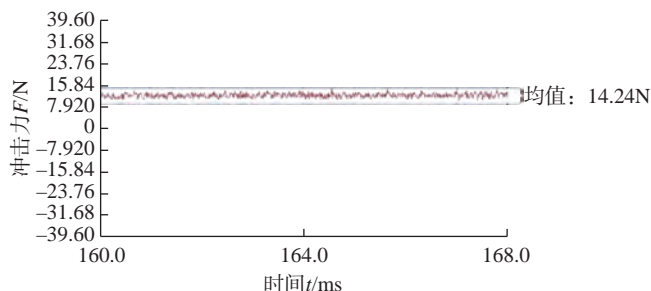
射流压力 P/Pa	靶距 S/m	磨料粒度 M/μm	励磁电流 I/A
20	7	240	1.8/2.0/2.2



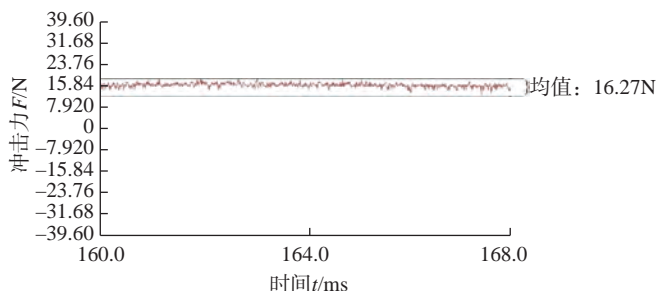
(a) 无磁场辅助($I=0$)



(b) 有磁场辅助($I=1.8A$)



(c) 有磁场辅助($I=2.0A$)



(d) 有磁场辅助($I=2.2A$)

图14 磨料水射流冲击力测量结果

Fig.14 Impact measurement results of abrasive water jet

波动,施加磁场辅助后,当励磁电流 $I=1.8A$ 、 $2.0A$ 和 $2.2A$ 时,对应的射流冲击力均值分别为 $12.16N$ (冲击力均值增幅约为 40%)、 $14.24N$ (冲击力均值增幅约为 75%) 和 $16.27N$ (平均冲击力增幅约为 99%)。由此可知,在射流压力为恒定值 $20MPa$, 电流为 $1.8\sim 2.2A$ 范围的条件下,磁场的引入有效地提高了磨料水射流的冲击力,且冲击力与电流强度呈正相关,即电流强度越大,磁场强度越强,射流冲击力也越大。

结论

借助 Comsol 软件数值模拟了螺

线管线圈的磁场强度分布和聚焦管内流场的分布状态,并利用振动及动态信号采集分析系统测量了磨料水射流的实际冲击力,得出如下结论。

(1) 螺线管线圈内全部磁场沿线圈轴线呈轴对称分布:中心区域磁场强度较大,分布相对均匀且趋于定值,靠近两端面时,由于“端面效应”磁场强度迅速减小;螺线管线圈径向向磁场强度的变化范围较小。

(2) 当励磁电流 $I=2.2A$ 时,磨料射流束刚好在喷嘴出口处获得最佳聚焦效果;当励磁电流 $I=2.0A$ 时,磁场强度相对较弱,磨

料射流束的聚焦效果未达到最佳状态;当励磁电流 $I=2.4A$ 时,磨料射流束在喷嘴出口之前达到最佳聚焦效果。

(3) 施加磁场辅助后,磨料水射流的有效直径变小,聚焦效果增强,原有的水雾层消失,且射流冲击力随电流强度的增大而逐渐增大。

由此可知,辅助磁场的引入提高了磨料水射流的聚焦效果,获得了准直性高、集束性好的射流束,可对复杂型面的陶瓷零件实现精确定位及精密抛光。同时,磨料水射流的冲击动能也显著提高,获得了携带高能量的射流束,为材料的去除提供了充足的动能保障。

参考文献

- [1] 吴甲民, 陈敬炎, 陈安南, 等. 陶瓷零件增材制造技术及在航空航天领域的潜在应用[J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 40-49.
- WU Jiamin, CHEN Jingyan, CHEN Annan, et al. Additive manufacturing of ceramic components and its potential application in aerospace field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 40-49.
- [2] STEYER T E. Shaping the future of ceramics for aerospace applications[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2013, 10(3): 389-394.
- [3] 王飞, 李飞, 刘河洲, 等. 高温合金空心叶片用陶瓷型芯的研究进展[J]. 航空制造技术, 2009, 52(19): 60-64.
- WANG Fei, LI Fei, LIU Hezhou, et al. Review of ceramic core for superalloy hollow blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(19): 60-64.
- [4] 唐见茂. 航空航天材料发展现状及前景[J]. 航天器环境工程, 2013(2): 115-121.
- TANG Jianmao. A review of aerospace materials[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013(2): 115-121.
- [5] 王晶, 成来飞, 刘永胜, 等. 碳化硅陶瓷基复合材料加工技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(15): 50-56.
- WANG Jing, CHENG Laifei, LIU Yongsheng, et al. Research development on processing technology of silicon carbide ceramic matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(15): 50-56.
- [6] 周志雄, 毛聪, 周德旺. 平面磨削温度及其对表面质量影响的实验研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(8): 980-984.
- ZHOU Zhixiong, MAO Cong, ZHOU Dewang. Experimental investigation of grinding temperature and its effects on surface quality in surface grinding[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(8): 980-984.
- [7] LIU Z W, LIU R Y. Study on polishing technology for hard-brittle materials by a micro abrasive water jet[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1027: 52-57.
- [8] 雷玉勇, 蔡黎明, 邴龙健, 等. 微磨料水射流技术及其应用[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2009, 28(4): 1-6.
- LEI Yuyong, CAI Liming, BING Longjian, et al. Micro abrasive water jet technology and its application[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2009, 28(4): 1-6.
- [9] 戴一凡, 张学成, 李圣怡. 确定性磁射流抛光技术[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 171-176.
- DAI Yifan, ZHANG Xuecheng, LI Shengyi. Deterministic magnetorheological jet polishing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 171-176.
- [10] 魏群. 螺线管磁场分布特征[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 68-70.
- WEI Qun. A study on the magnetic field distribution characteristics of coils[J]. Journal of Changchun University of Technology, 2003, 24(3): 68-70.
- [11] 杨欢. 磁场辅助微细磨料水射流抛光陶瓷材料关键技术研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2018.
- YANG Huan. Key technology of magnetic field assisted micro abrasive water jet polishing ceramic materials[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2018.

通讯作者: 侯荣国, E-mail: hourongguo@163.com.

Numerical Simulation of Flow Field Distribution of Abrasive Water Jet Based on Comsol Software

HOU Rongguo, WANG Tao, LÜ Zhe, TIAN Yebing

(College of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

[ABSTRACT] With the help of Comsol software, the distribution of magnetic field intensity and flow field inside and outside the focusing tube was simulated. The distribution law of magnetic field intensity was analyzed as well as the mechanism of magnetic field acting on water jet, and the optimum magnetic field intensity was obtained to achieve the best focusing effect of water jet. The results indicate that the best focusing effect of water jet was obtained with the current of 2.2A. The difference of flow field outside the nozzle was observed and analyzed before and after the magnetic field was applied, the vibration and dynamic signal acquire analysis system (CRAS) was used to measure the actual impact force of water jet. The experiment results show that with the magnetic field applied, the effective diameter of abrasive water jet decreases, the focusing effect increases obviously, the original water mist disappears, and the impact force of abrasive water jet increases with the increase of current intensity.

Keywords: Abrasive water jet; Magnetic field assisted; Flow field distribution; Comsol software; Dense turn coil

(责编 知舟)