

磨料水射流加工陶瓷的研究进展

刘谦, 孟凡卓, 田欣利, 唐修检

装甲兵工程学院

摘要: 综述了磨料水射流切割、钻削、铣削、车削陶瓷材料的研究进展, 简要论述了磨料水射流加工原理, 展望了应用前景, 提出了今后的重点研究方向, 对磨料水射流加工陶瓷材料研究有一定的参考性。

关键词: 磨料水射流; 陶瓷; 研究进展

中图分类号: TG73; TH16

文献标志码: A

Research Progress of Machining Ceramics by Abrasive Water Jet

Liu Qian, Meng Fanzhuo, Tian Xinli, Tang Xiujian

Abstract: This article reviews the abrasive water jet machining on cutting, drilling and milling, briefly discussing the abrasive water jet machining principle and the research direction of abrasive water jet machining on ceramic materials, which has a certain reference to the study of abrasive water jet machining ceramics.

Keywords: water jet; ceramics; research progress

1 引言

陶瓷材料(碳化硅 SiC、氮化硅 Si₃N₄、氧化铝 Al₂O₃、氧化锆 ZrO₂ 等)因其高硬度、高强度、耐腐蚀、耐高温等优良性能, 广泛应用于机械、化工、军事、航空航天、原子能、空间技术及制造等领域。然而, 由于其硬度高、脆性大、低断裂韧性等特点, 其加工难度远大于其他材料, 传统机械加工过程中极易产生细小裂痕和应力集中, 从而降低工件的疲劳强度, 影响工件性能和使用寿命^[1]。此外, 采用传统方法加工陶瓷效率低、刀具磨损大、经济效益低, 也限制了其应用。

20 世纪 80 年代初, 纯水射流技术发展日益完善, 磨料水射流(Abrasive Water Jet, AWJ)是以其为基础发展起来的一种新型特种加工技术^[2]。与传统机械加工方法相比, 具有无刀具磨损、无热变形、加工柔性高、精度高、成本低等特点。在陶瓷加工领域表现出了巨大的潜力和广阔的应用前景。

2 磨料水射流加工陶瓷理论研究

磨料水射流机床主要由增压系统、高压水路、磨料供给系统、喷射系统、运动及其控制系统、工作台和收集器^[3]等模块组成。其中, 增压器为核心部件, 经过增压器增压后的高速纯水射流为载体, 混入磨料颗粒(一般为天然石榴石)形成高速混合射流, 此时的高速磨料水射流相当于液体砂轮, 具有很高

的冲蚀功能, 可对陶瓷材料进行切割、磨削等加工。材料的破碎剥落主要由下列几种作用引起: 气蚀破坏作用、高压混合射流冲击作用、高压混合射流动压力作用、高压混合射流脉冲负荷引起的疲劳破坏作用以及水楔作用等^[4]。此外, 还受射流结构、加工参数、加工材料的性质等方面影响。由于材料去除机理的复杂性, 目前尚未形成统一理论, 主要从磨料水射流动能和陶瓷材料体积能进行分析研究。

2.1 磨料水射流动能分析

磨料水射流在经过增压器增压后, 其速度可达音速的 2-3 倍, 因而磨粒具有很高的动能, 其动能可表示为^[5]

$$E_a = \frac{1}{2} K_1 W_a V_c^2 \quad (1)$$

式中, K_1 为流量系数; W_a 为磨料供给量; V_c 为磨料的速度。

磨料混入前, 纯水射流的速度 V_w 为

$$V_w = \sqrt{\frac{2gp}{\rho_w}} \quad (2)$$

假设混合射流中, 磨粒和水射流速度相同, 则混合射流的速度 V_c 为

$$V_c = \frac{V_w}{1 + \frac{W_a}{\rho_w Q}} \quad (3)$$

式中, ρ_w 为水的密度; Q 为磨料水射流流量。将式(2)、式(3)代入式(1)后整理可得

$$E_a = \frac{K_1 \frac{W_a}{\rho_w} p}{\left(1 + \frac{W_a}{\rho_w Q}\right)^2} \quad (4)$$

由式(4)可以看出当系统压力 P 和磨料水射流流量 Q 一定时,磨粒动能是磨料供给量 W_a 的函数。

2.2 陶瓷材料体积能分析

陶瓷体积能为 E_c 可表示为^[5]

$$E_c = A\varepsilon\Delta V = \frac{Ay^2}{E}h_c V_0 d_0 \quad (5)$$

式中, A 为常数; ε 为陶瓷材料单位体积能; ΔV 为去除体积; y 为陶瓷材料负荷强度; E 为陶瓷材料弹性模量; h_c 为切割深度; V_0 为喷嘴横向移动速度; d_0 为喷嘴直径。

磨料颗粒冲击陶瓷材料表面时,陶瓷表面处于压缩状态,内部处于拉伸状态。当 $E_a > E_c$ 时,陶瓷表面产生微裂纹,材料去除形式为微裂纹去除。随着表面微裂纹的产生,磨料水充满微裂纹,磨料颗粒会对微裂纹产生微切削作用,裂纹的尖端处拉应力集中^[6],同时由于水楔作用,裂纹不断扩展,材料以块状、片状不断剥落,材料的主要去除形式为在水楔作用下基于裂纹扩展的裂纹破碎去除。

3 磨料水射流加工陶瓷研究现状与进展

3.1 磨料水射流切割陶瓷技术研究

切割加工是磨料水射流最常见的加工方式。试验证明,磨料水射流可对陶瓷进行切割加工。如何设定切割参数、获得较高的切割效率和较好的切割表面质量,是磨料水射流切割加工最核心的问题。

P. Gudimetla 等^[7]通过试验得出磨料水射流是加工陶瓷材料的有效方法。当混合射流能量达到一定数值,磨料射流在一定冲击角度下可进行切割加工,切割表面粗糙度受喷嘴进给速度、磨料流量等因素影响。F. L. Chen 等^[8,9]在加工中使用摆动喷嘴,使切割表面粗糙度提高了 200% 以上,可见摆动喷嘴在改善加工质量上有很大的潜力,目前国内对摆动喷嘴的研究相对较少。

国内关于磨料水射流切割陶瓷研究取得了很多成果。赵永赞、尤明庆等^[10,11]通过试验得出当压力 280MPa、靶距 4mm、喷嘴横移速度 10mm/min 时得到的切割表面质量较理想。试验过程中还发现磨粒硬度越大,得到的切槽越深。磨料为石榴石时,80 目粒度的磨料比其它粒度切割效率更高,故有一最佳粒度磨料使切割效率最高。Wang J. 等^[12-14]采用量纲分析法建立了磨料水射流切割氧化铝陶瓷切深经验模型,并通过试验验证了模型的有效性,可有效预测切割深度。冯衍霞等^[15]研究了水压力和喷嘴横移速度对切割质量的影响,试验结果表明表面粗

糙度随水压力的增大而减小;随喷嘴横移速度的增大而增大。其切面可分为光滑区、波纹区、破碎区,当改变加工参数时,对光滑区粗糙度影响较大。提出靶距为 3mm 和 4mm 时可得到较理想的表面粗糙度,且磨料粒度越小,表面质量越高。

张凤莲^[16,17]通过试验研究了不同参数对切割氧化铝陶瓷效率的影响,绘制了磨料流量一切深、压力一切深、靶距一切深函数曲线。结果表明,获得较高的加工效率可设定较大的压力、较小的靶距和喷嘴横移速度、选用中等粒度的磨料。赵文英等^[18]研究了磨料射流对喷嘴的磨损情况,绘制了磨损前后的能谱图。分析了喷嘴磨损原因主要是部分氧化和冲蚀,且磨损程度与水压成正比关系。

磨料水射流在陶瓷切割加工方面的研究和运用比较成熟,研究者们通过大量的试验,不断优化提高加工效率和加工质量的切割参数。但对于加工过程中出现的“崩边”问题还未能得到有效解决,后续研究将主要针对这一问题进一步提高切割质量。

3.2 磨料水射流钻削陶瓷技术研究

与切割加工相比,钻削加工不需要考虑喷嘴进给速度的影响,加工过程相对简单。钻削加工研究的问题主要有两个方面:一是孔壁粗糙度和孔径尺寸的控制;二是由于磨料水射流的发散,加工形成的孔壁会出现一定程度的倾斜。万庆丰等^[19]通过试验得出采用较大的射流压力、较小的喷嘴横移速度、适当的磨料流量可以有效增加钻削深度、提高孔壁质量。但由于射流发散作用,孔壁呈现一定的锥度,且分为光滑钻削区和变形磨损区。当所加工孔为盲孔时,其底部会由于“水垫”产生的阻塞作用,形成袋状结构。陈林^[20]通过分析试验数据,运用数学方法建立了钻削深度和孔壁表面粗糙度预测模型分别为

$$H = 4.609 \times 10^{-4} P^{1.8814} S^{-0.1684} V^{-0.2015} Q_m^{0.1759} \quad (6)$$

$$R_a = 2.008 \times 10^{-8} P^{-3.1430} S^{-0.011} V^{0.016} Q_m^{-0.1438} \quad (7)$$

利用磨料水射流可对已有孔进行扩孔加工,但目前国内尚未见相关研究文献。后续研究可针对扩孔加工工艺研究,进一步拓宽磨料水射流钻削加工的应用。

3.3 磨料水射流铣削陶瓷技术研究

磨料水射流的铣削加工是通过设定合适的靶距、喷嘴进给速度、喷嘴横向进给量、系统压力等参数对陶瓷材料进行去除,通过切槽的横向叠加获得一定面积和深度的铣削面,达到铣削加工的目的。横向进给量对加工质量起着关键作用。“犁沟”是

加工表面常见的材料去除不充分的现象之一,即两条加工痕迹中间存在一道材料凸起,极大影响了铣削后的表面质量。

最初用磨料水射流对陶瓷材料进行铣削试验的是 Hashish M.^[21],他采用较高的靶距和喷嘴移动速度进行了陶瓷铣削试验,证明了磨料水射流可对陶瓷材料进行铣削加工。Zeng J. 等^[22]通过试验探究了磨料水射流铣削多晶陶瓷,射流冲击角度对材料去除的影响,指出 90° 为材料去除的最优角度。通过建立冲蚀速率模型,验证了其试验结果的相关性。冯衍霞等^[23,24]研究了不同的铣削加工参数对铣削体积去除率和铣削深度的影响,通过改变喷嘴横移速度、水压力、横向进给量进行了磨料水射流单次和两次铣削氧化铝陶瓷试验,对铣削面的微观形貌进行了分析,试验结果表明铣削面的结构形貌随参数变化而变化。

利用磨料水射流进行铣削加工的主要难点在于对铣削平面粗糙度的控制,“犁沟”的形成对粗糙度影响很大;另一方面,铣削深度难以进行定量控制。因此,探究不同参数组合使铣削面质量最优和探究相关参数同铣削深度的关系有很大的研究意义。

3.4 磨料水射流车削(磨削)陶瓷技术研究

根据喷嘴相对材料的不同位置,磨料水射流车削加工主要有偏置加工模式(见图 1)和径向加工模式(见图 2)两种加工方式^[25]。径向方式加工可获得较高的材料去除率,但加工表面质量较差;偏置方式加工材料去除率较低,但加工质量较好,能够较好地控制加工深度。

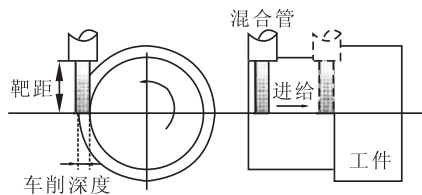


图 1 偏置模式

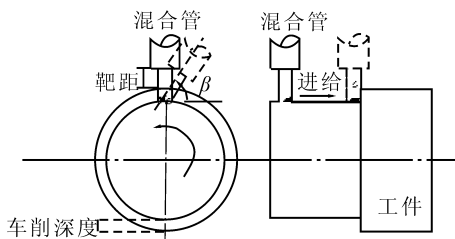


图 2 径向模式

陶欢^[25]进行了磨料水射流磨削陶瓷试验研究,利用 MATLAB 和多元非线性回归分析方法建立了磨削表面粗糙度预测模型:

$$R_a = 317.158P^{-1.0084}V^{0.1301}S^{-0.0102}m^{-0.0650}$$

试验表明,该模型的平均误差约为 5.49%。雷玉勇等^[26]分别对碳化硼和镍基合金进行了外圆磨削试验,结果表明 AWJ 对材料的磨削作用与液体砂轮相似,可以很大程度降低工件的表面粗糙度。他还利用微磨料水射流进行了三维加工研究(见图 3 和图 4)。但实际操作中仍存在很多难题,如工件尺寸的精确控制,由于陶瓷材料的脆性引起的表面裂纹和缺陷等。

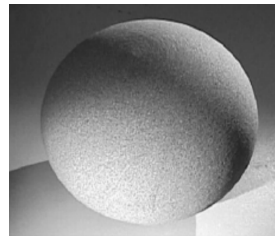


图 3 球体加工(大理石)

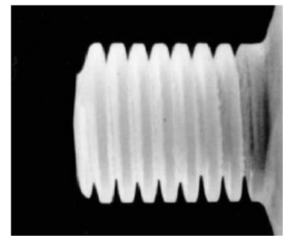


图 4 螺纹车削(玻璃)

武美萍等^[27]在磨料水射流单磨粒冲蚀机理的基础上,采用不同参数进行了车削氧化铝陶瓷试验研究,建立了深度模型,试验表明该模型的预测值与试验值误差在 10% 以内。刘盾^[28]研究了径向车削模式下的切削深度和粗糙度控制,探究了使切削深度最大、粗糙度最小的工艺参数。建立了车削深度模型,试验表明其预测值与试验值误差在 15% 以内。岳中波等^[29-31]设计了磨料水射流车削加工的夹具,采用额定功率 1.25kW,额定转速 1400r/min 的 Y90-4 号异步电机,进行了径向模式下的车削试验。对比研究了不同参数对氧化铝陶瓷和氧化锆陶瓷的材料去除率的影响,优化了加工工艺参数,建立了材料去除率、切深、表面粗糙度响应曲面模型。目前关于磨料水射流车削加工的研究主要采用径向模式,偏置模式因其效率较低等缺点未有较多研究。但其加工质量和对车削量的控制都优于径向模式,因而有很大的研究空间。

4 结语

磨料水射流作为一种特种加工技术,有着传统机械加工方法不具备的优点。其切割加工技术较为成熟,在众多领域得到了广泛应用。但其三维形态(如轴类、孔累零件)的加工理论尚未完善,加工工艺不够成熟,仍处于探讨阶段,特别是表面粗糙度的控制和尺寸的精确加工都限制了其应用。未来将更加偏向于微细磨料水射流的三维加工,着重工件尺寸的精加工和表面质量的控制,从而更广泛地应用于工业领域,具有更高的应用价值。

参考文献

- [1] 葛宰林, 江亲瑜. 现代陶瓷及表面超精密加工[J]. 大连大学学报, 2003, 24(6): 24-28.
- [2] Kovacevic R, Hashish M. State of the art of research and development in abrasive waterjet machining [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 1997, 119(4): 776-785.
- [3] Kulekci M K. Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(12): 1297-1306.
- [4] 赵永赞, 王军, 赵民. 磨料水射流切割陶瓷的机理及实验分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(s1): 741-744.
- [5] 赵永赞, 赵民. 后混合磨料水射流切割陶瓷的特性分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2002(3): 53-56.
- [6] 张凤莲. 磨料水射流切割陶瓷机理及关键技术的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2010.
- [7] Gudimetla P, Wang J, Wong W. Kerf formation analysis in the abrasive waterjet cutting of industrial ceramics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 128(1-3): 123-129.
- [8] Chen F L, Siores E. The effect of cutting jet variation on surface striation formation in abrasive water jet cutting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 135(1): 1-5.
- [9] Lemma E, Chen L, Siores E, et al. Study of cutting fiber-reinforced composites by using abrasive water-jet with cutting head oscillation [J]. Composite Structures, 2002, 57(1-4): 297-303.
- [10] 赵永赞, 赵民. 磨料参数对陶瓷切割能力的影响[J]. 上海电力学院学报, 2005, 21(2): 27-28.
- [11] 尤明庆. 磨料粒径和水射流压力对磨料射流冲蚀能效的影响[J]. 高压水射流, 1989(1): 29-30.
- [12] Wang J, Liu H. Profile cutting on alumina ceramics by abrasive waterjet. part 2: cutting performance models [J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996 (vols 203-210), 2006, 220(5): 715-725.
- [13] Wang J. Predictive depth of jet penetration models for abrasive waterjet cutting of alumina ceramics [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49(3): 306-316.
- [14] Wang J. A new model for predicting the depth of cut in abrasive waterjet contouring of alumina ceramics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2314-2320.
- [15] 冯衍霞, 黄传真, 侯荣国, 等. 磨料水射流切割陶瓷材料的加工表面质量研究[J]. 工具技术, 2007, 41(1): 43-45.
- [16] 张凤莲. 磨料水射流提高加工陶瓷效率试验研究[J]. 大连交通大学学报, 2003, 24(3): 29-32.
- [17] 张凤莲. 陶瓷磨料水射流加工工艺参数对加工质量的影响[J]. 机械制造, 2003, 41(4): 42-44.
- [18] 赵文英, 石维佳, 胡新强. 高压磨料水射流切割陶瓷研究[J]. 机电产品开发与创新, 2007, 20(4): 11-13.
- [19] 万庆丰, 雷玉勇, 陈林, 等. 磨料水射流铣削陶瓷试验研究[J]. 液压气动与密封, 2013, 33(8): 10-13.
- [20] 陈林. 基于磨料水射流的陶瓷铣削实验研究[D]. 成都: 西华大学, 2012.
- [21] Hashish M. An investigation of milling with abrasive-waterjets [J]. Journal of Engineering for Industry, 1989, 111(2): 158-166.
- [22] Zeng J, Kim T J. An erosion model for abrasive waterjet milling of polycrystalline ceramics [J]. Wear, 1996, 199(2): 275-282.
- [23] 冯衍霞, 黄传真, 朱洪涛, 等. 磨料水射流铣削陶瓷材料的表面形状研究[J]. 制造技术与机床, 2007(1): 80-82.
- [24] 冯衍霞. 磨料水射流铣削陶瓷材料加工技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [25] 陶欢. 基于磨料水射流的陶瓷磨削实验研究[D]. 成都: 西华大学, 2015.
- [26] 雷玉勇, 蒋代君, 刘克福, 等. 微磨料水射流三维加工的实验研究[J]. 西华大学学报自然科学版, 2010, 29(2): 7-10.
- [27] 武美萍, 缪小进, 苗新刚, 等. 基于磨料水射流的陶瓷材料车削加工[J]. 机械设计与研究, 2015(6): 87-89.
- [28] 刘盾. 磨粒高速冲击陶瓷的响应和磨料水射流车削工艺参数优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [29] Yue Z B, Huang C Z, Zhu H T, et al. An experimental study on radial-mode abrasive waterjet turning of aluminaceramics [J]. Advanced Materials Research, 2013, 797: 27-32.
- [30] Yue Z B, Huang C, Zhu H, et al. Material removal analysis in the radial-mode abrasive waterjet turning of ceramic materials [J]. International Journal of Abrasive Technology, 2014, 6(4): 298-313.
- [31] 岳中波. 磨料水射流径向模式车削陶瓷材料工艺优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.

第一作者: 刘谦, 副教授, 装甲兵工程学院装备维修与再制造工程系, 100072 北京市

First Author: Liu Qian, Associate Professor, School of Equipment Maintenance and Remanufacturing Engineering, Armoured Engineering Institute, Beijing 100072, China