

磨粒射流加工研究现状与进展

张成光^{1,2}, 王毅¹, 张勇², 张飞虎²

¹河南工业职业技术学院; ²哈尔滨工业大学

摘要: 综述了不同磨粒射流加工技术国内外研究现状,重点阐述了磨料水射流加工、磁射流加工以及纳米颗粒胶体射流加工的研究进展,展望了其前景,提出了今后的重点研究方向。

关键词: 磨料水射流加工;磁射流加工;纳米颗粒胶体射流加工

中图分类号: TG580.6;TH137

文献标志码: A

Research Situation and Progress of Abrasive Jet Machining

Zhang Chengguang, Wang Yi, Zhang Yong, Zhang Feihu

Abstract: The domestic and foreign research situation of several Abrasive Jet Machining (AJM) technologies was summarized. The research progress of abrasive water jet machining, magnetorheological jet machining and nanoparticles colloid jet machining technology were expatiated, and its prospect and key research direction were putt forward.

Keywords: abrasive water jet machining; magnetorheological jet machining; nanoparticles colloid jet machining

1 引言

磨粒射流加工(Abrasive Jet Machining, AJM)利用高速运动的磨粒对工件表面碰撞产生冲蚀磨损,使磨粒的机械能转化为材料的结合能,进而去除材料。该方法具有无工具磨损、无热变形、无热影响、反作用力小、加工柔性高、加工精度高等优点,可实现计算机控制磨粒射流加工,可对难加工材料、复杂三维型面、光滑表面等进行加工,已广泛用于陶瓷、玻璃、石英、复合材料等材料的加工^[1]。

2 磨料水射流加工研究现状与进展

由于水射流加工的效率和能量利用率较低,需要高压压力,一定程度上限制了其应用。为了提高射流的冲击效果,形成了脉冲射流加工、空化射流加工和磨料水射流加工等高效射流加工。尤其是磨料水射流加工,显著提高了切割、加工、破碎能力,使水射流在较低压力下也能切割、加工、破碎较硬的材料,得以更广泛地应用^[2]。

磨料水射流加工可分为磨料水射流加工和浆体射流加工,都是在高速运动的液流中加入固体磨料(微粒),利用射流束中高速运动的磨粒与工件表面发生冲蚀磨损进而去除材料。磨料水射流加工又可根据水与磨料的混合方式不同,分为后混合

式磨料水射流加工(引射式磨料水射流加工)和前混合式磨料水射流加工。浆体射流加工是在前混合式磨料水射流加工基础上发展起来的,利用了磨料混合均匀、磨料加速充分、能量利用率高的优点,同时减少或避免磨粒在传输过程中的沉淀与堵塞;主要区别是浆体射流加工先将磨料与水及添加剂混合配制成悬浮液的浆料溶液,一般采用粒度较小的磨粒。

磨料水射流加工属于单点冷态加工工艺,加工中没有热应力和热变形产生,不改变工件的物理、化学性能,适合于加工热敏、压敏材料、特殊合金材料和复合材料,最初主要应用于材料的切割加工。随着加工精度、加工质量的提高和技术的改进,加工领域逐渐扩大,尤其是浆体射流加工已应用于复杂表面、型面的抛光等^[3]。

1979年, M. Hashish^[4,5]为了增加水射流加工的切割能量,发明了在水射流中加入磨料的加工方法,该加工方法几乎能够切割任何材料。M. Hashish对磨料水射流加工机理也进行了深入研究,在Finnie塑性剪切磨损去除模型基础上,提出了著名的Hashish去除模型,考虑了磨粒形状的影响,磨粒去除取决于磨粒的速度、冲击角度、形状以及加工材料的塑性流变应力,该模型更适用于磨料水射流加工。澳大利亚新南威尔士大学J. Wang^[6]对磨料水射流加工技术进行了深入研究,并基于能量守恒定律得出了加工聚合物复合材料的切割深度模型。

E. lemma等^[7]采用喷嘴摆动技术加工低碳钢和铝时对表面粗糙度的影响进行了试验研究,采用喷

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2011CB013200);国家自然科学基金(51275116);航空科学基金(2012EE77010);黑龙江省博士后启动基金(LBH-Q11090)
收稿日期: 2015年12月

嘴摆动技术可使表面质量提高 30%, 对较厚的材料可采用切割速度大的喷嘴摆动技术, 切割低碳钢时, 摆动角度应大一些, 而摆动频率小一些, 切割铝时, 大摆动角度可提高加工质量。哈尔滨工业大学课题组^[8]研制出了新型后混合式磨料水射流加工装置, 由供压系统、喷射系统、搅拌与输送系统组成, 并进行了浆体溶液输入量测试和磨料混合效果测试, 试验表明其效果好、磨料混合均匀、能实现磨料浓度的任意调节和精确控制。

国内在磨料水射流加工技术方面也取得了许多成果。山东大学黄传真教授^[9]团队在磨料水射流加工方面进行了深入研究。卢新郁等^[10]以石榴石为磨料、以大理石为工件在高压磨料水射流数控切割机床上进行了试验, 研究了工艺参数对大理石加工的影响, 高压磨料水射流加工的速度快、效率高, 工件加工质量好, 不影响物理化学性能, 达到理想效果。刘增文等^[11]研制出了磨料水射流六轴机器人加工系统, 并用石榴石作为磨粒在该加工系统上对花岗石分别进行了高压纯水射流加工和磨料水射流加工试验, 结果表明, 高压纯水射流只有射流束的中心部位的才对花岗石材料有去除作用, 磨料水射流加工去除材料是在成穴力、剪切应力和水楔的共同作用下以脆性和塑性断裂方式实现去除。

浆体射流抛光技术已实现商业化, Zeeko 公司^[13]推出六轴水射流抛光设备 FJP600, 该加工设备加工自由曲面的面型精度 $P-V$ 值可达 60nm, 表面粗糙度 R_q 可达 1nm^[12]。LightMachinery 公司推出的水射流抛光机床 FJP-1150F 可加工最大尺寸为 150mm × 150mm 的工件, 面形精度可达 3nm, 表面粗糙度 R_q 可达 1nm。

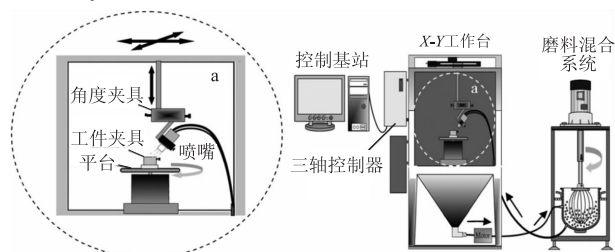


图1 浆体射流抛光试验系统示意图

台湾学者 F. C. Tsai 等^[15]研制了浆体射流抛光系统(见图1), 并进行了试验研究, SKD61 模具钢在最佳工艺参数条件下表面粗糙度 R_a 值由 1.03 μm 下降到 0.13 μm 、 R_{max} 值由 7.74 μm 下降到 0.90 μm , 表面粗糙度提高了近 87%^[14]。西华大学雷玉勇教授利用内径为 127 μm 的喷嘴和直径为 25 μm 的碳化硅磨粒实现了三维曲面的加工。中科院施春燕

等^[16]对浆体射流抛光技术进行了研究并建立了浆体射流抛光材料去除模型。

3 磁射流加工研究现状与进展

磁射流加工是将磁流变加工与磨料射流加工相结合的复合加工方法, 通过施加外磁场使磁流变液产生磁流变效应, 增大磁流变液的表观粘度, 进而增加射流束表面的稳定性, 在较长距离范围内射流束的束径保持基本不变(见图2), 形成准直的硬化射流束, 实现可控的方式加工和修形^[17]。

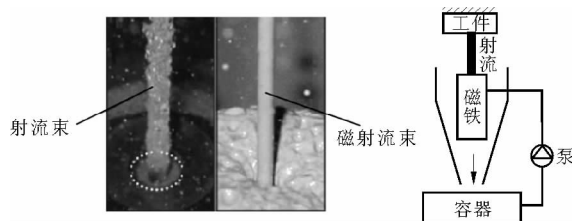


图2 普通射流束与磁射流束稳定性对比及磁射流抛光原理示意图

美国 QED 公司的 Kordonski 等^[18]发明了磁射流加工技术, 并于 1999 年、2003 年分别申请了磁射流加工技术和改进的磁射流加工装置的专利。该公司用磁射流加工方法抛光了一个熔石英玻璃材料的半球形头罩的凹表面, 面型误差的 $P-V$ 值由 408nm 降到了加工后的 42.5nm, 面型精度误差提高了近 10 倍; 表面粗糙度的 RMS 值也由 50.3nm 降到了加工后的 6.1nm, 提高了近 9 倍^[19]。

国内主要是国防科大和中科院在从事磁射流加工技术的研究, 国防科技大学李圣怡教授团队对磁射流加工技术进行了全面研究。磁流变液在局部轴向磁场作用下形成的纵向链状纤维结构能抑制外在因素初始动力扰动对射流结构的破坏, 从而可产生长距离稳定、汇聚的射流束^[20]。张学成等利用计算流体动力学(CFD)方法分析了磁射流加工中磁流变液在射流加工区域的径向流场的分布特征, 仿真表明, 材料的去除是由射流加工中磁流变液在加工区域的径向剪切力所引起的, 且材料去除的三维分布情况也可通过 CFD 准确预测^[21]。戴一帆教授^[22]采用计算机控制光学表面成形技术进行了磁射流抛光的加工试验, 结果表明, 该加工技术的射流束的集束性好并且对加工距离也不敏感, 有利于实现复杂形面的确定性的射流加工。

施春燕等^[23]研究了基于磁流体动力学对磁射流抛光过程的紊动冲击射流进行数值模拟, 仿真表明, 磁射流加工具有以下优点: (1) 由于磁射流加工的射流扩散小, 提高了射流的稳定性, 喷射距离比普

通射流加工的喷射距离调整得更长;(2)由于磁射流的溅射小,剪切去除效相对较好;(3)磁射流加工在工件壁上射流的紊动强度低,加工精度高。

4 纳米颗粒胶体射流加工研究现状与进展

纳米颗粒胶体射流加工是将纳米颗粒射流加工技术与化学吸附作用相结合的一种复合加工方法,通过高速运动的纳米颗粒对工件表面产生碰撞,把纳米颗粒的能量传递给工件表面的原子,使其获得足够的能量与纳米颗粒发生化学吸附而滞留在工件表面,同时又在高速流动的胶体溶液的冲击作用下迫使发生反应的纳米颗粒与工件表面原子一起离开工件表面,实现表面材料的原子级去除(见图3)^[24]。由于工件表面凸起部分的原子能态高、原子活跃,容易与纳米颗粒率先发生化学吸附反应而被优先去除,使工件表面在纳米颗粒射流作用下逐渐趋于达到光滑超光滑表面。

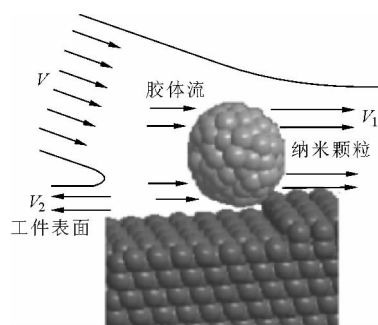


图3 纳米颗粒胶体射流加工原理图

宋孝宗等^[25]将纳米颗粒胶体射流加工技术与计算机控制技术结合,实现了针对小曲率半径非球面曲面元件和自由曲面元件的计算机控制的纳米颗粒胶体射流加工,实现了可控的微/纳米材料去除,其最大去除量达到了900nm,表面粗糙度达到了 $R_a 0.460\text{nm}$,是一种确定性超光滑表面的加工方法。

张玲花等^[26]在纳米颗粒胶体射流加工基础上提出了纳米颗粒胶体液流动压空化射流加工技术,研制出了相应的加工装置(见图4),该加工方法的空化作用将对纳米颗粒胶体射流加工产生化学作用和机械作用,提高了纳米颗粒胶体射流加工的去除率和加工速度。王星等以单晶硅作为工件材料分别进行了纳米颗粒胶体液流动压空化射流加工和纳米颗粒胶体射流加工的对比试验,与纳米颗粒胶体射流加工相比,纳米颗粒胶体液流动压空化射流加工效率高,工件表面质量提高,表面粗糙度值 R_a 达到 0.758nm ^[27]。

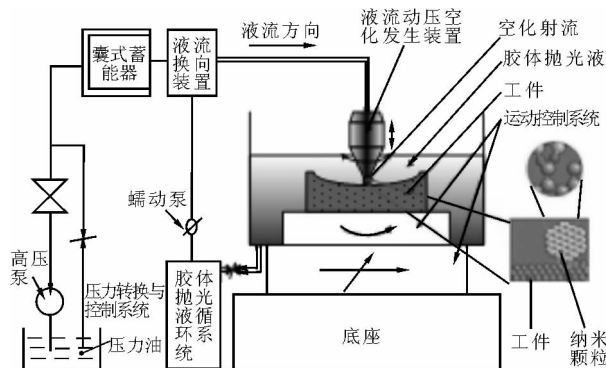


图4 纳米颗粒胶体液流动压空化射流抛光加工原理图

5 结语

国内外许多专家都致力于研究与开发新型的磨粒射流加工技术,如纳米颗粒胶体射流加工技术、磁射流加工技术,但在实际应用中还需进一步完善,研制出适应企业生产需要的自动化、智能化的加工制造设备。同时,也应进一步加强磨粒射流加工技术与其它加工技术的组合探讨,提高加工质量和效率,使之更广泛地用于陶瓷、玻璃、石英、复合材料等材料的加工。

参考文献

- [1] 冯衍霞,黄传真,Jun Wang,等.磨料水射流加工技术的研究现状[J].机械工程师,2005(6):17-19.
- [2] 刘忠伟.高压水射流技术综述[J].湖南冶金职业技术学院学报,2005,5(3):330-333.
- [3] 刘小健,俞涛.磨料浆体射流技术及其切割性能试验研究[J].机械工程学报,2006,42(4):157-160.
- [4] M Hashish, D E Steele, D H Bothell. Cutting with waterjets[J]. Jetting Technology, 1996:59-71.
- [5] Mohamed Hashish. Performance of high-pressure abrasive suspension jet system[J]. American Society of Mechanical Engineers, 2002, 67: 199-207.
- [6] J Wang, T Kuriyagawa, C Z Huang. An experimental study to enhance the cutting performance in abrasive waterjet machining[J]. Machining Science and Technology, 2003, 7(2):191-207.
- [7] 张成光,张勇,张飞虎,等.新型后混合式磨料水射流系统的研制[J].机械工程学报,2015,51(5):205-212.
- [8] E Lemma, L Chen, E Siores, et al. Optimising the AWJ cutting process of ductile materials using nozzle oscillation technique[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42: 781-789.
- [9] H T Zhu, C Z Huang, J Wang, et al. Experimental study on abrasive waterjet polishing for hard-brittle materials[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,

- 2009, 49: 569 – 578.
- [10] 卢新郁, 黄传真, 冯衍霞, 等. 磨料水射流在大理石切割中的应用[J]. 山东大学学报, 2007, 37(2): 21 – 24.
- [11] Z W Liu, C Z Huang, H T Zhu, et al. Study on jet formation and modeling for high pressure abrasive water jet[J]. Key Engineering Materials, 2011, 487: 468 – 472.
- [12] Booi S M, Fähnle O W, Braat J J M. Shaping with fluid jet polishing by footprint optimization[J]. Applied Optics, 2004, 43(1): 67 – 69.
- [13] Horiuchi O, Ikeno J, Shibutani H, et al. Nano – abrasion machining of brittle materials and its application to corrective figuring[J]. Precision Engineering, 2007, 31(1): 47 – 54.
- [14] F C Tsai, B H Yan, C Y Kuan, et al. A taguchi and experimental investigation into the optimal processing conditions for the abrasive jet polishing of SKD61 mold steel[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48: 932 – 945.
- [15] 雷玉勇, 蒋代君, 刘克福. 微磨料水射流三维加工的试验研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 7 – 10.
- [16] 施春燕, 袁家虎, 伍凡. 基于 CFD 的射流抛光喷射距离的分析和优化[J]. 光子学报, 2009, 38(9): 2419 – 2422.
- [17] Tricard M, Kordonski W, Shorey A. Magnetorheological jet finishing of conformal, freeform and steep concave optics[J]. Annals of the CIRP, 2006, 55: 309 – 312.
- [18] W Kordonski. Apparatus and method for abrasive jet finishing of deeply concave surfaces using magnetorheological fluid[P]. US Patent 6,561,874, 2003.
- [19] W Kordonski, A Shorey. Magnetorheological (MR) jet finishing technology[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007, 18: 1127 – 1130.
- [20] 张学成, 戴一帆, 李圣怡, 等. 磁射流抛光的射流稳定性分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(8): 964 – 968.
- [21] Zhang Xuecheng, Dai Yifan, Li Shengyi, et al. Optimization of the removal function in magnetorheological jet polishing[C]. SPIE, 2007, 6722: 48 – 54.
- [22] 戴一帆, 张学成, 李圣怡, 等. 确定性磁射流抛光技术[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 171 – 176.
- [23] 施春燕, 伍凡, 袁家虎, 等. 基于 MHD 的磁射流抛光中流场的分析与模拟[J]. 光学技术, 2009, 35(5): 736 – 738.
- [24] Feihu Zhang, Xiaozong Song, Yong Zhang, et al. Figuring of an ultra – smooth surface in nanoparticle colloid jet machining[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(6): 1 – 6.
- [25] 宋孝宗, 张飞虎, 龚翔宇, 等. 计算机控制纳米胶体射流抛光的试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2012, 32(2): 43 – 46.
- [26] 张玲花. 胶体液流动压空化射流抛光流场数值模拟及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [27] Wang Xing, Zhang Yong, Zhang Feihu, et al. Preliminary investigation on nanoparticle colloid hydrodynamic cavitation on jet polishing technology[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2011, 9(6): 483 – 487.
- 第一作者: 张成光, 博士, 讲师, 河南工业职业技术学院机电自动化学院, 473000 河南省南阳市
- First Author: Zhang Chengguang, Doctor, Lecturer, Henan Polytechnic Institute, Nanyang, Henan 473000, China

三部委力促钢铁过剩产能退出

国家发改委、工信部、国资委近日联合召开化解钢铁过剩产能工作部署电视电话会议, 提出要坚持市场倒逼、企业主体、地方组织、中央支持, 突出重点、依法依规的原则, 统筹处理好“禁住”、“退够”、“升级”三个方面主要任务, 全面禁止新增钢铁产能。

会议指出, 要准确把握钢铁行业化解过剩产能的任务要求, 紧紧围绕推动钢铁行业供给侧结构性改革来研究、部署和推动工作; 要通过依法依规退出、引导主动退出等方式切实退出钢铁过剩产能, 推动钢铁行业转型升级; 此外, 要精准发力推动行业企业脱困升级, 通过严把新增产能关、依法依规关停落后产能、引导企业主动退出低效产能和推动行业转型升级。

会议强调, 当前要重点做好六方面工作: 抓紧建立组织领导体系, 有关部门加快建立钢铁行业化解过剩产能实现脱困发展部际联席会议制度, 各有关地方 3 月底前务必完成省级领导小组的组建工作。抓紧制定实施方案, 研究提出产能退出总规模、分企业退出规模及时间表, 报国务院备案。同时, 国家发展改革委、工业和信息化部会同有关部门与省级人民政府、国务院国资委签订责任书, 作为考核任务完成情况的依据; 尽快出台配套政策措施, 抓紧研究制定专项奖补资金使用管理办法, 以及财税、金融、社会保障、国土、环保、质量、安全等 8 个方面的专项政策措施。针对涉及企业职工转岗、安置、再就业等问题, “一企一策”地研究制定应对预案, 坚决确保社会稳定。强化监督检查和考核机制, 将任务年度完成情况向社会公示, 接受社会监督, 健全有效的激励和约束机制, 对未完成的地方和企业要予以问责。