

喷油嘴微喷孔挤压研磨液及其试验研究^{*}

黄颖¹, 张向军¹, 李勇¹, 李晓民²

(1. 清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084; 2. 山东菏泽华星油泵油嘴有限公司, 山东 菏泽 274000)

摘要: 挤压研磨工艺已经成为高端柴油机喷油嘴微喷孔加工的最终表面成形的关键工序。根据磨料流加工的原理采用油水乳液液的方式, 配制了具有良好分散性能和切削性能的研磨剂, 其磨料颗粒为棕刚玉, 粒度范围 $0.4 \sim 50 \mu\text{m}$, 搭建了喷油嘴微喷孔挤压研磨的试验台, 测量其流量因数的变化, 对喷油嘴微喷孔挤压研磨工艺中的时间、压力因素进行了试验研究。随加工时间增加, 研磨效果趋于饱和, 随加工压力增加, 对设备磨损加剧, 试验结果表明, 加工时间 5 min, 加工压力 10 MPa 为最佳工艺参数。挤压研磨过程中, 造成了喷油嘴微喷孔孔径的扩大, 但是不超过 2%。

关键词: 喷油嘴微喷孔; 挤压研磨; 研磨剂; 工艺参数; 流量因数

中图分类号: TK426

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)05-0068-05

Extrude Honing Abrasive Slurry and Its Honing Experiments for Fuel Jet Nozzle

HUANG Ying¹, ZHANG Xiang-jun¹, LI Yong¹, LI Xiao-min²

(1. The State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084; 2. Shandong Heze Huaxing Fuel Injection Equipment Co., Ltd, Heze Shandong 274000)

Abstract: The abrasive flow machining has become a key process for the advanced diesel engines to finish the final surface of fuel injector nozzle. Abrasive slurry was compounded by the method of oil-water emulsion. According to the principles of abrasive flow machining, a kind of abrasive slurry with good performance in suspension and cutting was explored and compounded, whose abrasive particles are brown alumina, and particle size range is $0.4 \sim 50 \mu\text{m}$. In addition, a test-bed was built for extruding honing the fuel injector nozzle. Then, the variations of the flow coefficient were measured and a series of the process parameters involved in the extruding honing technology for the fuel injector nozzle were studied experimentally. The injector nozzles were extruding honed under different times and pressures. With the increase of processing time, the effect was gradually saturated. With the increase of pressure, the wear of the device was serious. Testing results indicated that 5 min and 10 MPa are the best process parameters. The fuel injector nozzles were reamed in the process but didn't exceed 2%.

Key words: fuel injector nozzle; extrude honing; abrasive slurry; process parameter; flow coefficient

0 引言

挤压研磨 (Abrasive Flow Machining) 技术^[1-2]是最近十几年在国外兴起的微孔加工技术, 对于去除零件边缘上的各种加工方法形成的毛刺和对孔壁的抛光有显著效果, 可以消除喷油嘴压力室与喷孔处的毛刺, 扩大其相贯线处的圆角, 降低喷孔表面的粗糙度, 提高喷油嘴的流量因数, 获得良好的雾化效果^[3]。目前的喷油嘴微喷孔加工技术中, 对于孔式喷油嘴的加工多为先

使用电火花加工打孔, 之后使用挤压研磨技术进行研磨抛光, 而挤压研磨的工艺参数以及研磨料的研制也成为技术发展的焦点之一。

挤压研磨技术是以磨料介质 (掺有磨粒的一种可流动的混合物) 在压力下流过工件, 使需加工的表面达到精密加工的要求。加工时, 工件被夹持在夹具中, 把流动的介质导向工件所需磨掉的部位, 而其它部分不受影响。挤压研磨的工艺效果与加工时间、研磨压力、研磨剂流速、研磨剂浓度、研磨颗粒粒度等密切相关^[4]。

为研究研磨时间、研磨压力、研磨剂浓度以及研磨剂磨料粒径和载体对挤压研磨效果的影响, 文中设计了一套挤压研磨设备, 配制了具有

收稿日期: 2011-05-09; 修回日期: 2011-08-17

基金项目: * 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2007AA04Z346)

作者简介: 黄颖 (1987—), 男 (汉), 四川资阳市人, 硕士生。

良好分散性能和切削性能的研磨剂,并使用该套设备进行试验研究,进一步确定喷油嘴微喷孔挤压研磨的最佳工艺参数。

1 试验设计

1.1 研磨剂配制

研磨剂主要由磨料颗粒、基础液和添加剂构成。基础液和添加剂作为研磨颗粒的良好载体,要使得磨料颗粒可以均匀分布,要具有足够的粘弹性^[5],应使研磨剂紧贴孔壁高速流动,使磨料充分发挥其切削作用。

磨料颗粒种类的选择应综合考虑被加工材料的孔径、孔深、硬度和经济性,试验中采用棕刚玉^[6]作为磨料颗粒,其主要成分为 Al_2O_3 。为了提高挤压研磨的加工效果,应该扩大磨料颗粒的粒径范围,使得磨料对孔壁表面的各种粗糙峰均有明显的去除作用。试验中采用了多种粒径的棕刚玉颗粒混合而成,采用激光粒度分析仪进行测量,磨料颗粒的粒径分布如图 1 所示。由图 1 可见,磨料颗粒主要集中分布在 $0.4\sim 50\ \mu\text{m}$,分布较为均匀,平均粒度为 $18.62\ \mu\text{m}$ 。

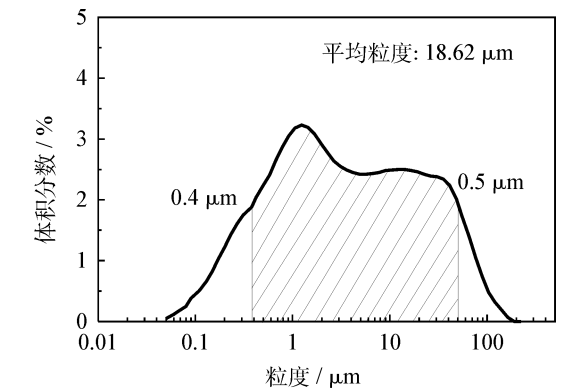


图 1 磨料颗粒的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of abrasive

磨料颗粒在研磨剂中容易团聚和沉淀,严重影响挤压研磨的加工效果。由于磨料颗粒的粒度较大,在微米尺度,不能形成稳定的胶体溶液,而且普通的表面改性也很难维持其稳定^[7],所以配制过程中采用油水乳浊液的方式使其保持稳定的分散性能。

研磨剂的配方如表 1 所示,其配制过程为:在去离子水中加入聚丙烯酸钠^[8](分散剂)和碳酸氢钠(调节 PH 值到 8.0 使溶液呈弱碱性),搅拌待其溶解;称取棕刚玉粉置于去离子水中,

用磁力搅拌机搅拌 5 min 后,向悬浮液中依次加入矿物油和司班 80(乳化剂),再用磁力搅拌机搅拌 20 min。

表 1 配方比例表(质量分数/%)
Table 1 Proportion in prescription(w/%)

组成	去离子水	聚丙烯酸钠	碳酸氢钠	46 号矿物油	司班 80
质量分数	63	0.5	7	21	8.5

配制结果显示:油水乳浊液分散性能良好,放置 10 天后依然未发现明显沉降,能保持研磨颗粒的悬浮性。

研磨剂的流变特性应具有明显的剪切稀化效果^[9]。喷油嘴局部结构如图 2 所示,因为喷油嘴的喷孔直径只有 100 多微米,主流道面积比喷孔高出几个数量级,所以在主流道中时,剪切速率很低,应使研磨剂粘度大,有助于减小对流道中其它部件(包括泵,流量计,压力表,阀门等装置)的磨损;当研磨剂流经喷孔时,剪切速率大幅提高,使得研磨剂粘度下降,磨料颗粒的作用被完全释放,有助于完成研磨动作,倒出圆角以及改善喷孔内壁的表面粗糙度。

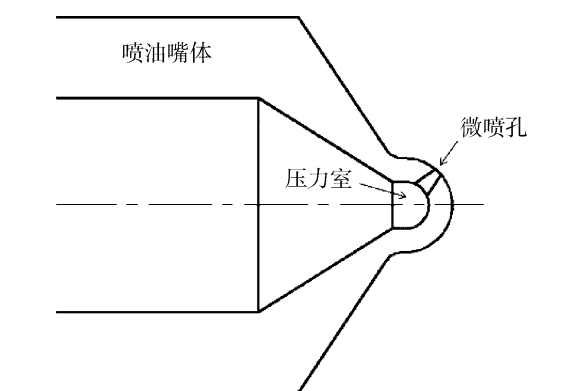


图 2 喷油嘴局部结构

Fig. 2 Partial structure of the injector nozzle

使用 RV-20 锥板式流变仪,测量配制的研磨剂所具有的流变性能如图 3 所示,可见当剪切率提高时,其表现出良好的剪切稀化效应。

1.2 试验设备设计

挤压研磨工艺分为往返式和单向循环式两种加工方式。电火花加工的柴油机喷油嘴微喷孔是便于雾化的锥孔,内大外小,喷孔具有方向性,故只能采用单向循环式。

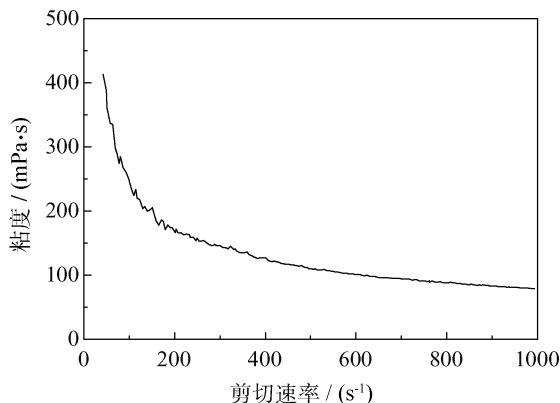


图3 研磨剂的流变特性曲线

Fig. 3 The rheology properties of abrasive slurry

液压动力部分使用高压隔膜泵提供动力,研磨剂在高速流动中具有很强的磨削性能,普通泵极易磨坏,只能使用此类驱动部件和研磨剂不直接接触的特殊泵。试验中使用北方华瑞自动化科技有限公司生产的涡轮传感器(量程 0.04~0.25 m³/h)和上海济东仪表厂生产的压力表(量程 25 MPa)分别测量管道中的流量和压力,并采集信号形成反馈,用以控制液压泵的输出口以及加工的起停,其工作原理如图 4 所示。

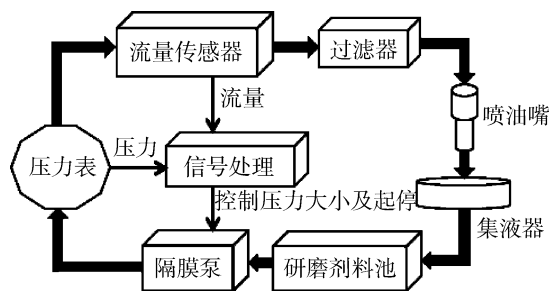


图4 挤压研磨系统工作原理图

Fig. 4 Schematic of the extruding honing system

1.3 加工工艺评价

挤压研磨加工的效果可以用喷油嘴的雾化效果、排放指标、各喷孔的流量离散度以及喷孔倒圆角的形貌等方面作出评价。但是这些指标在加工过程中都难以在线获得,实际加工中通常测量其流量因数^[10]来作为评价指标。流量因数是实际流量与理论流量之比,如公式(1)所示。

$$\mu = \frac{Q_s}{Q_t} = \frac{Q_s}{A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}} \quad (1)$$

其中, μ 是流量因数, Q_s 是实际流量, Q_t 是理

论流量 (L/min)。A 是喷孔几何流通面积 (mm²), ρ 是液体密度 (kg/m³), Δp 是喷孔入口处与出口处的压力差 (MPa)。

2 试验结果与分析

2.1 加工时间对研磨效果的影响

由于磨粒浓度过高会导致磨粒在通过喷油嘴微喷孔时发生困难,故试验中仅采用 0.5% 的低浓度研磨剂,以 5 MPa 为加工压力,研究比较加工时间分别为 1 min、3 min、5 min、7 min、9 min 的挤压研磨效果。

每个喷油嘴有 5 个微喷孔,试验前分别测量各工件的孔径大小及流量,并根据公式(1)计算其流量因数,试验后再分别测量各工件的孔径大小及流量,再次计算其流量因数,得到流量因数的增加率(如图 5),试验前后孔径大小及流量如表 2 所示。

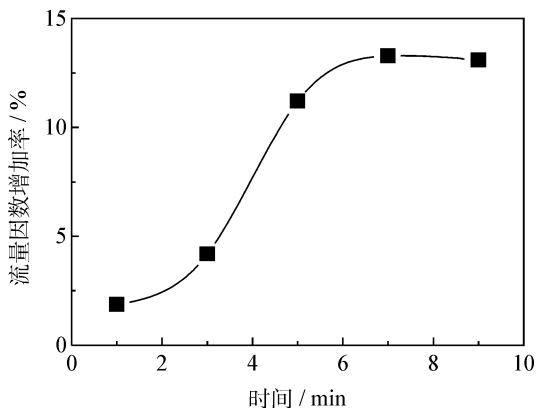


图5 流量因数增加率与研磨时间的关系曲线

Fig. 5 Increase rate of flow coefficient measured as a function of processing time

由图 5 的结果显示,随加工时间的增加,流量因数也在增加,但是增加的上升速度在减缓。基于加工效率的考虑,在 5 min 时,加工效果就已经较好,再延长加工时间其流量因数增加不多,基本接近饱和。

2.2 加工压力对研磨效果的影响

压力为 5 MPa,加工时间为 5 min 时,加工效果已接近饱和,为了区分出不同加工压力下的效果,故略微减少加工时间至 3 min,分别研究加工压力为 2 MPa、4 MPa、6 MPa、8 MPa、10 MPa 时,其研磨效果的变化,其结果如图 6 所示。

表 2 试验前后孔径及流量
Table 2 Aperture and quantity of flow before and after experiments

功工时间	编号	1 孔/ μm	2 孔/ μm	3 孔/ μm	4 孔/ μm	5 孔/ μm	流量(L/min)	流量因数
试验前	1	196	176	177	171	170	0.769	0.666
	2	196	181	195	187	197	0.876	0.658
	3	188	189	185	192	176	0.823	0.653
	4	189	196	192	190	201	0.923	0.677
	5	184	189	173	171	181	0.806	0.686
加工时间	编号	1 孔/ μm	2 孔/ μm	3 孔/ μm	4 孔/ μm	5 孔/ μm	流量(L/min)	流量因数
1 min	1	197	176	179	173	172	0.796	0.679
3 min	2	196	182	198	190	198	0.928	0.686
5 min	3	191	194	186	192	178	0.937	0.727
7 min	4	190	197	193	192	205	1.065	0.767
9 min	5	185	191	179	172	183	0.936	0.776

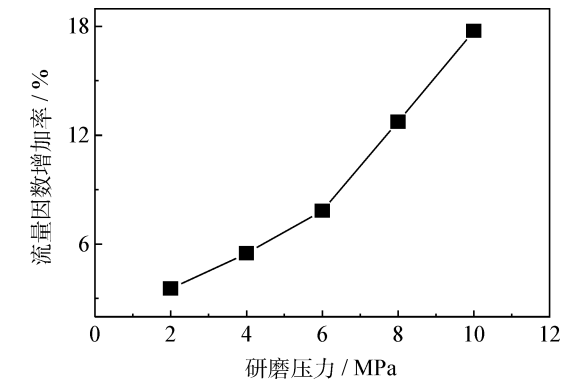


图 6 流量因数增加率与研磨压力的关系曲线
Fig. 6 Increase rate of flow coefficient measured as a function of processing pressure

由图 6 的结果显示,随研磨压力的增加,其流量因数不断增加,且增加率始终保持一个较高的上升速度。同时,与延长加工时间相比,提高加工压力后流量因数的增加率明显突破了低压力下的饱和值,高达 17.7%,流量因数可以实现 0.8 以上的加工要求。在加工中采用 10 MPa 作为研磨压力其效果就已经比较理想。压力如果继续升高,由于磨料颗粒的强烈磨削作用对试验中所用器件的工作寿命有很大考验。在更高的压力下,试验中的测量仪表和阀门等非常容易损坏,故加工压力为 10 MPa,已是一个非常适宜的工艺参数。如果要进一步提高加工效率还需要进一步增强各环节的抗高压磨损能力,进一步提

高加工压力或者增加研磨剂浓度。
测量挤压研磨前后的孔径变化,取喷油嘴 5 个微喷孔的孔径作平均值,如图 7 所示。发现平均孔径增加率在趋势上随压力增高而增加,最高为 1.57%,还不到 2%,表明挤压研磨加工造成的孔径扩大很小。

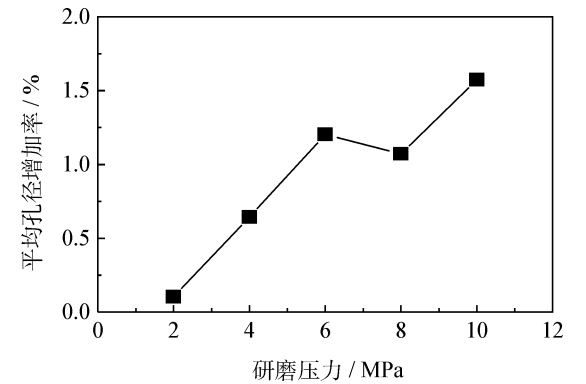


图 7 平均孔径增加率与研磨压力的关系曲线
Fig. 7 Increase rate of average radius measured as a function of processing pressure

3 结 论

- (1) 采用油水乳液方式配制的研磨剂适宜于喷油嘴挤压研磨工艺,且该研磨剂分散性能和切削性能良好。
- (2) 挤压研磨加工在 5 min 时,加工效果将逐渐饱和。

(3) 增加挤压研磨的加工压力能极大加强加工效果,但是增加压力的同时,也增加了相关器件的磨损,10 MPa 是一个非常适宜的加工压力。

(4) 挤压研磨加工中造成了喷油嘴微喷孔的孔径扩大,但是程度非常小,不到 2%。

参考文献

- [1] 黄光明,章成军. 液体挤压研磨技术在喷油嘴喷孔加工中的应用 [J]. 现代车用动力, 2003(1): 23-25.
- [2] 武利生,李元宗. 磨料流加工研究进展 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2005(1): 69-74.
- [3] 房建峰,杜慧勇,刘建新,等. 喷油嘴流量系数对燃油喷雾及柴油机性能的影响 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2004, 25(2): 24-27.
- [4] Jain V K, Adsul S G. Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM) [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1003-1021.
- [5] 曾信智. 粘弹性磨料应用于复杂曲面的精抛技术研究 [D]. 台湾: 台湾国立中央大学, 2006.

- [6] 闫国进. 天然磨料性能特点及应用 [J]. 石材, 2007, (12): 40-42.
- [7] 张清岑,肖奇,刘建平. 超分散剂对超细 SiO_2 分散稳定性的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(2): 225-228.
- [8] 陈启元,王建立,李旺兴,等. 分散剂对氧化铝悬浮液分散稳定性的影响 [J]. 中国粉体技术, 2008(6): 33-37.
- [9] Perry W B. Shaping microhole orifice with abrasive slurry, e. g in fuel injector nozzles-involves calibrating process to find abrasive flow rate that creates target orifice conditions and managing flow rate; Europe, EP1300456-A [P]. 2003-04-09.
- [10] 唐维平,宋伟,喻鸣显,等. 喷油嘴喷孔液体挤压研磨工艺研究 [J]. 现代车用动力, 2003(2): 30-34.

作者地址: 北京市海淀区双清路 30 号 100084
清华大学精密仪器与机械学系
Tel: (010) 6279 4946-815 (张向军)
E-mail: xjzhang@mail. tsinghua. edu. cn

• 学术动态 •

发改委下发《关于深化再制造试点工作的通知》

2011 年 9 月 14 日,发改委下发《关于深化再制造试点工作的通知》。《通知》内容包括:适当扩大汽车零部件再制造产品范围;继续开展发动机、变速器等产品再制造,增加传动轴、机油泵、水泵、助力泵等部件开展再制造;开展拖拉机、联合收割机等农业机械再制造试点;鼓励再制造技术公司为冶金、矿山、化工等行业提供整体解决方案和相关服务,开展专业化再制造服务试点;探索完善可再制造旧件回收和再制造产品销售渠道,开展相关网络建设试点;加强再制造相关专业化国产装备生产和产业化应用。

此外,《通知》还显示:发改委将利用中央预算内投资,对试点单位的重点工程、技术研发、旧件逆向回收体系和资源循环利用项目建设给予必要的资金支持,对纳入国家试点单位的再制造企业,给予包括信用贷款在内的多元化信贷支持,并优先将成熟的再制造技术、工艺、设备和产品纳入国家鼓励的相关名录。

目前,国家发改委已经同国家有关部门组成《再制造产品目录》编制小组,将根据再制造试点情况,把符合新品标准、规模化生产的再制造产品纳入目录,享受相应的优惠政策,并且鼓励政府机关、事业单位优先采用再制造产品。

(摘自 中国机械领航网)