

柴油机喷油器结构参数与磨料流加工效果关联的研究

辛 固¹, 郑清平¹, 田 晔¹, 黎 苏¹, 游建民²

(1. 河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300401;

2. 北京亚新科天纬油泵油嘴股份有限公司, 北京 100166)

摘 要: 基于磨蚀模型和多相流离散相模型建立了柴油机喷油器磨料流加工过程的 CFD 计算模型。在验证基础模型的有效性后, 分别针对喷孔直径、喷孔锥角和交点位置三种结构参数进行变参数模拟计算。通过对加工域颗粒流速、湍流强度和磨蚀率的分析, 获得了喷油器主要结构参数对液力研磨加工的影响机理: 喷孔直径和喷雾锥度的变化对喷孔壁面磨蚀量的影响较大, 随着两者的增大, 喷孔壁面的磨蚀量有所增加; 交点位置由上至下的变化对喷孔壁面磨蚀量的影响较小, 但是喷孔入口处磨蚀量有所增加。

关键词: 柴油机; 喷油器; 磨料流加工; 结构参数; 模拟计算

中图分类号: TK423.8⁺4; TK376 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)01-0041-05

Study on the Relationship Between the Structural Parameters of Diesel Injectors and the Effect of Abrasive Flow Machining

Xin Gu¹, Zheng Qingping¹, Tian Ye¹, Li Su¹, You Jianmin²

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401;

2. Beijing ASIMCO Tianwei Co., Ltd., Beijing 100166)

Abstract: Based on the erosion model and the discrete phase model of multiphase flow, the CFD calculation model of the hydraulic grinding process of diesel injector was established. After verifying the effectiveness of the foundation model, the variable parameter simulation calculation was carried out for three structural parameters of the spray hole diameter, the spray cone angle and the intersection point position, respectively. Through the analysis of particle velocity, turbulence intensity and abrasion rate in machining area, the influence mechanism of main structure parameters of injector on hydraulic abrasive machining was obtained. The change of nozzle diameter and spray taper has a great influence on the abrasion amount of the jet hole wall. With the increase of both, the abrasion amount of the jet hole wall surface increases. The change of intersection position has little effect on the abrasion amount of nozzle wall, but the abrasion at the nozzle inlet increases.

Key words: diesel engine; injector; abrasive flow machining; structural parameters; simulation calculation

0 引言

现代柴油机使用喷油泵对柴油进行加压、雾化, 并与空气混合。柴油雾化质量用雾化细度与雾化均匀度来衡量。雾化粒度越小, 燃烧效果越好,

从而可提高柴油机的动力性、经济性和排放性。研究表明: 改善喷孔表面粗糙度, 并使喷孔出口形成圆角; 适当增加喷油压力可以提高雾化质量^[1-2]。

目前, 国内外柴油机喷油器加工方法有多种, 如超声波法、振动法和电火花法等, 但这些方法在

收稿日期: 2018-11-15; 修回日期: 2019-03-20

基金项目: 河北省节能环保与科技治霾专项基金 (18273714D)。

作者简介: 辛固(1994—), 硕士研究生, 主要研究方向为柴油机喷油器, xingu@163.com。

喷孔去毛刺和改善入口圆角方面效果不佳^[3]。近几年,随着磨料流技术的发展,采用磨料流加工方法去除喷孔毛刺成为喷油器加工的新趋势^[4]。黄颖^[5]等人探究了加工时间和加工压力对研磨效果的影响。马会青^[6]等人对小批量、多品种的加工工艺进行了试验研究。李俊焯^[7]等人对磨粒流加工进行了模拟计算,并分析了磨粒流速度、湍流动能及湍流强度等数据。

由于喷油器喷孔加工涉及两相流动和磨蚀现象,加之喷孔形状复杂,尺寸小,因此针对其对研磨加工影响机理的研究存在一定的困难,研究成果较少。本文基于一种喷油器实际结构和实际磨料流加工过程,采用 CFD 三维模拟计算方法,并结合两相流动离散模型和磨蚀模型,对喷油器三种不同结构参数对研磨效果的影响进行研究,探索影响机理,为后续的喷油器设计提供理论指导。

1 加工原理及建模

1.1 喷油器喷孔磨料流加工原理

磨料流加工的原理是:研磨液在一定压力下流过加工表面,磨料起到切削作用,从而达到精密加工要求。流过柴油机喷孔的磨料一般采取单向流动。如图 1 所示,上磨料缸的磨料在压力 P 的作用下,通过中孔进入压力室,经喷孔流出,进入下磨料缸,在压力室与喷孔的交界处形成切削,将交界处及孔壁的毛刺清除掉。

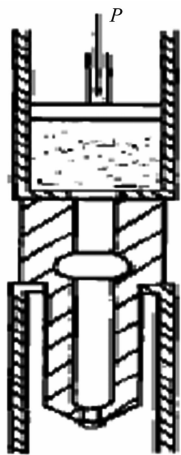


图 1 喷油器喷孔磨料流加工原理

1.2 建模与网格划分

本文研究的基础喷油器共有 7 个喷孔,喷孔直径为 0.16 mm。首先采用 hypermesh 对喷油器模型进行网格划分。为了提高模拟精度,每个喷孔增加出口腔体;采用四面体网格,网格数量为 200 万。喷油器 CFD 计算模型如图 2 所示。

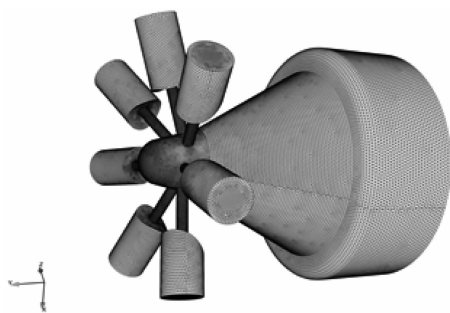


图 2 喷油器 CFD 计算模型

1.3 磨蚀模型

磨料流加工中使用的黏性磨料主要由载体、磨粒和添加剂三部分组成。其中,载体是由以弹性有机硅聚合物为主,添加抗氧化剂、软化剂、润滑剂配制而成;磨粒为碳化硅颗粒。

实际磨料流加工过程中,磨粒以一定的压力和角度作用于零件表面;喷油器内腔表面凸起部分受到高速流动的磨粒的切割,达到材料断裂极限。特别是在零件的壁面、拐角等流速变化较大的部位容易出现粒子与壁面的碰撞,由此造成零件材料的磨蚀切削。故本文采用磨蚀率(单位时间、单位面积被研磨掉的零件表面材料的质量)作为评价指标,通过壁面质量损失描述研磨加工的效果。

磨蚀率受到颗粒速度和碰撞角度等多种因素的影响。目前主流的侵蚀模型中,Finne 模型仅考虑了颗粒速度和角度,对颗粒物属性和被冲击材料属性没有定义。Tabakoff 模型适用性较差,主要适合于铝合金、钛合金等材料。广岛大学 Oka 等基于大量的实验数据提出了新的侵蚀模型。该模型充分考虑了颗粒物属性和靶材属性,比较准确地反应真实情况。因此本文选用 Oka 模型^[8],如(1)式。

$$e_r = 1.0 \times 10^{-9} \rho_w k (Hv)^{k_1} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right)^{k_2} \left(\frac{d}{d_{ref}} \right)^{k_3} f(\gamma) \quad (1)$$

式中: ρ_w 为靶材的密度; Hv 为材料的维氏硬度; v 和 d 分别为颗粒的速度和粒径; v_{ref} 和 d_{ref} 分别为颗粒的参考速度和参考粒径; k 、 k_1 分别为颗粒物性常数; k_2 表示颗粒速度; k_3 表示粒径指数; $f(\gamma)$ 为颗粒碰撞壁面的冲击角函数,其表达式如(2)式。

$$F(\gamma) = (\sin \gamma)^{n_1} [1 + Hv(1 - \sin \gamma)]^{n_2} \quad (2)$$

式中: n_1 、 n_2 表示如下:

$$n_1 = 0.71 (Hv)^{0.14} \quad (3)$$

$$n_2 = 2.4 (Hv)^{-0.94} \quad (4)$$

1.4 计算设置

磨料流加工过程的流动计算采用 Fluent 软件;湍流模拟采用工程上最常用的 RNG $k-\varepsilon$ 模型。将

模拟过程分为两个阶段：第一阶段采用 SIMPLE 算法，离散格式为二阶差分，获得单相纯流场稳态模拟的定常解；第二阶段采用离散相模型，并选用 Oka 磨蚀模型，加入颗粒的离散相，进行两相流磨蚀计算。

载体液的黏度为 $0.016 \text{ (kg} \cdot \text{s)/m}$ ，密度为 870 kg/m^3 ，喷油器材料密度为 7900 kg/m^3 ，硬度为 6.22 GPa 。出、入口边界条件设置为压力入口和压力出口；用湍流强度和水力直径定义出、入口湍流。壁面边界定义为固壁，颗粒碰撞行为设置为 Reflect，磨粒的形状系数为 0.5，代表非圆形。

2 基础模型验证

在对不同结构参数的喷油器模型计算之前，首先针对基础喷油器模型，根据实际研磨加工参数，取不同压力入口进行计算。模拟计算输出的流量与实际研磨过程中的流量对比如图 3 所示。可见，最大误差不超过 5%，说明网格质量可靠，所建模型及计算设置合理，模拟计算结果与实际研磨加工过程基本吻合。

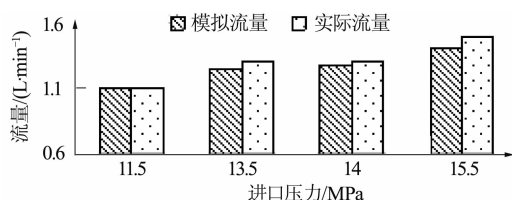


图3 模拟流量与实际流量对比

3 变结构参数模拟结果分析

选取 3 个喷油器结构参数：喷孔直径 (D)、交点位置 (A) 和喷雾锥角 (β)；每种结构参数选取 3 个变量，如表 1 所示。其中加或减分别表示在基础模型上加或减去相应数值。

表 1 结构参数变量

参数	变量 1	变量 2	变量 3
喷孔直径/mm	0.12	0.14	0.16
交点位置/mm	-0.2	+0.1	+0.2
喷雾锥角/(°)	-10	-5	+10

交点是指某喷孔中心线与喷油器中心线的交点；交点位置定义为交点到指定直径为 2 mm 截面的距离，记为 A ，如图 4 所示。基础喷油器各喷孔 A 值是不同的，可见， A 值实际上反映了喷孔上下位置。

三种变交点位置计算：基于基础模型，同时改变每个孔的 A 值，即每个喷孔的 A 值分别为基础模型 A 值减少 0.1 mm 和增加 0.2 mm、0.3 mm。

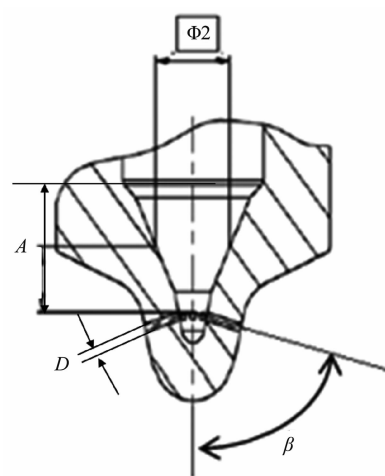


图4 交点及喷雾角定义

如图 4 所示，喷孔中心线与气缸和燃烧室中心线存在一定的夹角。三种变喷雾锥角计算：基于基础模型，同时改变每个孔的角度值 β ，即分别在基础模型基础上减少 10° 、 5° 和增加 10° 。

3.1 不同喷孔直径磨蚀分析

不同喷孔直径磨蚀率如图 5 所示。可见不同直径的喷孔其入口处的磨蚀都明显高于喷孔壁面的磨蚀。由磨蚀率公式可知：磨蚀率与碰撞壁面的颗粒数、颗粒碰撞壁面的角度和速度以及颗粒尺寸等相关。

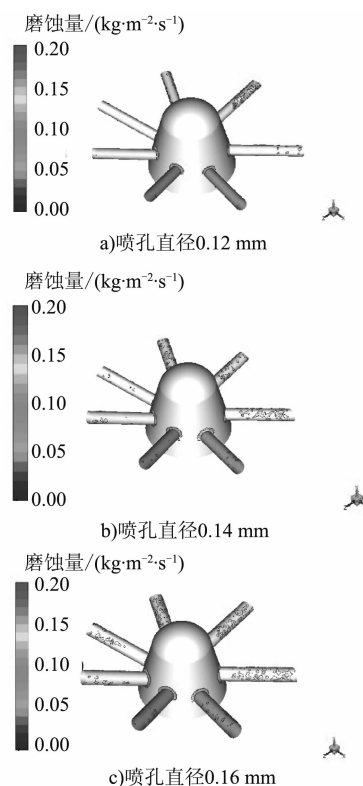


图5 不同喷孔直径磨蚀云图

由图 6 的湍流强度分布图可知：由于流向发生改变，且喷孔直径与喷油器直径相差很大，喷孔入

口处的湍流强度高于喷孔壁面。这导致流体磨料在入口的运动更为活跃,对油道壁面的切削能力更强,使更多的颗粒在此处与壁面碰撞,形成较大的磨蚀磨削效果,由此逐渐形成一定的圆角。



图 6 不同喷孔直径湍流强度云图

另外,在喷口入口处,上部磨蚀均小于下部磨蚀,这主要是由于喷孔与喷油器轴线有向下的喷孔夹角,且流动域变小,导致喷孔入口处流体在此处形成涡流,对入口处下侧的冲击高于上侧。

在喷孔壁面,7个喷孔的磨蚀分布不一致,这主要是由各喷孔结构和布置上的差异导致的。各个喷孔中心线与喷油器中心线夹角不同,且每个喷孔在喷油器截面上的投影两两之间的间隔也不相同。

随着喷孔直径的增大,喷口入口处的最大磨蚀率有所不同,这主要是由入口处颗粒速度和湍流差异综合导致。

随着喷孔直径的增大,喷孔壁面的磨蚀明显增大,如表 2 所示。这是由于随直径增大,喷孔内研磨液的湍流变强,研磨液中颗粒与壁面碰撞的机会增多,导致喷孔壁面的磨蚀量也随之增大。

可见,喷孔直径对喷孔壁面磨蚀效果有较大影响,所以在实际研磨过程中,应根据喷油器实际直径变化,适当调整研磨液的进口压力和加工时间等

加工参数,以达到满意的研磨效果。

表 2 不同喷孔直径喷孔壁面的平均磨蚀率

喷孔直径/mm	0.12	0.14	0.16
平均磨蚀率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	4.39e^{-5}	5.83e^{-5}	8.51e^{-5}

3.2 不同交点位置磨蚀分析

图 7 为不同交点位置的磨蚀云图。从图 7 中可以看出:不同交点位置喷孔入口磨蚀位置基本相同,只是最大值稍有差异。当交点位置从上至下变化时,喷孔入口处最大磨蚀率增大,这主要是由喷孔入口处颗粒速度差异导致。喷孔离喷嘴底部越近,喷孔入口处的流场受喷嘴底部流场的扰动越明显(图 8)。

表 3 显示:相对于基础模型,随着交点位置值增大,即孔位置向下移动,孔壁平均侵蚀量有增加趋势。

表 3 不同交点位置喷孔壁面的平均磨蚀率

交点位置/mm	-0.2	+0.1	+0.2
平均磨蚀率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	8.66e^{-6}	1.09e^{-5}	1.54e^{-5}

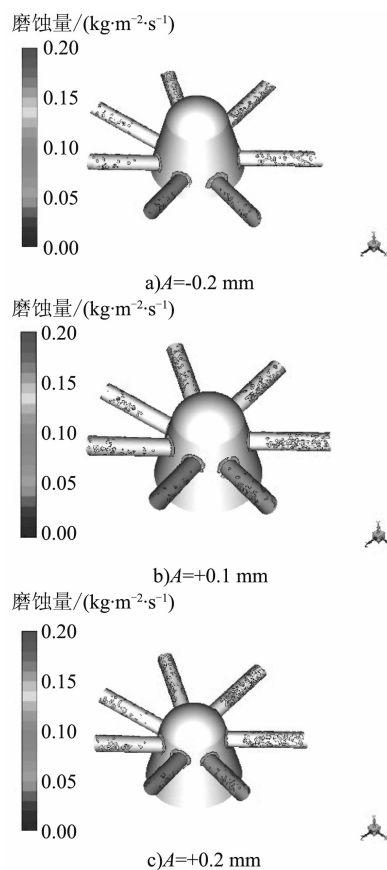


图 7 不同交点位置的磨蚀云图

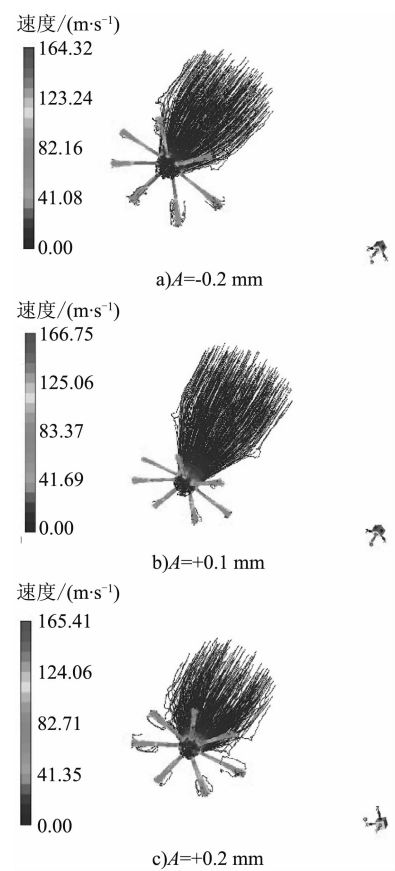


图 8 不同交点位置颗粒速度云图

3.3 不同喷孔锥角磨蚀分析

从图 9 中可以看出：同一喷孔锥角的喷孔入口处的磨蚀量均高于喷孔壁面的磨蚀量，并且入口局部出现最大磨蚀量。这主要是由入口处颗粒速度和湍流强度综合影响导致。

表 4 显示：随着喷雾锥角的增大，喷孔壁面平均磨蚀量略有增大。从图 9 可以看出：喷孔壁面的磨蚀域扩大。这说明随着喷孔锥角的增大，磨蚀量的增长主要由于喷孔磨蚀域的扩大而不是磨蚀厚度的增大。这是因为随着喷孔锥角的增大，即喷孔直径的改变，研磨液对喷孔后段壁面形成的压力更强。从图 10 也可以看出：喷孔内研磨液的颗粒流速有所增大，这有利于增大研磨颗粒与喷孔壁面碰撞的机会。

喷孔锥角/(°)	-10	-5	+10
平均磨蚀量/ (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	4.11e ⁻⁵	6.09e ⁻⁵	9.96e ⁻⁵

喷孔锥角对喷孔壁面磨蚀效果有较大影响，所以在实际研磨过程中，应根据喷油器喷雾锥角的变化，适当调整研磨液的进口压力和加工时间等加工参数，以达到满意的研磨效果。

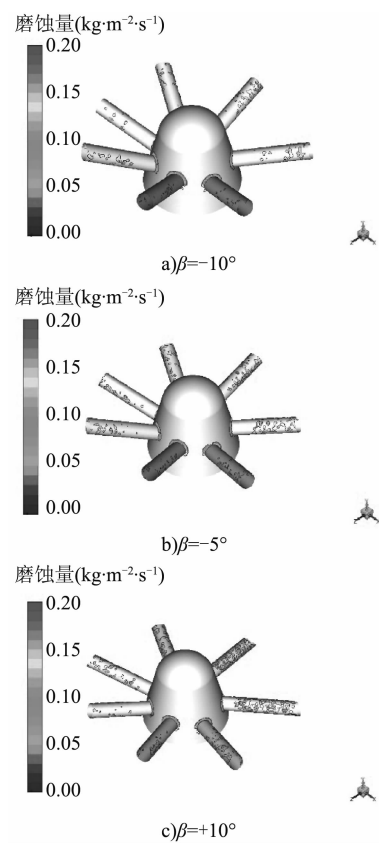


图 9 不同喷孔锥角的磨蚀云图

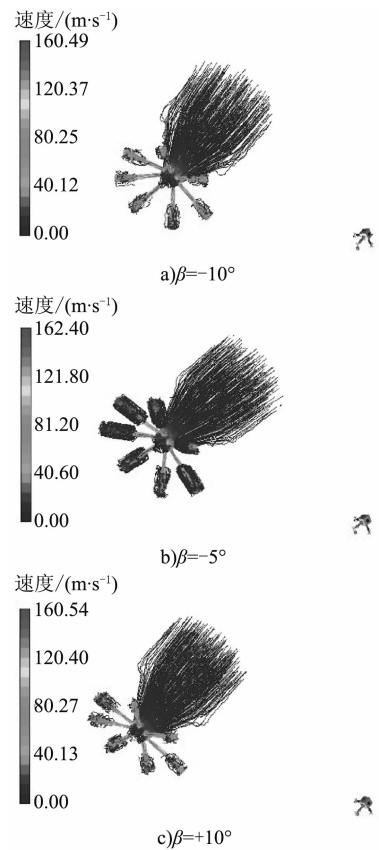


图 10 不同喷雾锥角颗粒速度云图

(下转第 49 页)

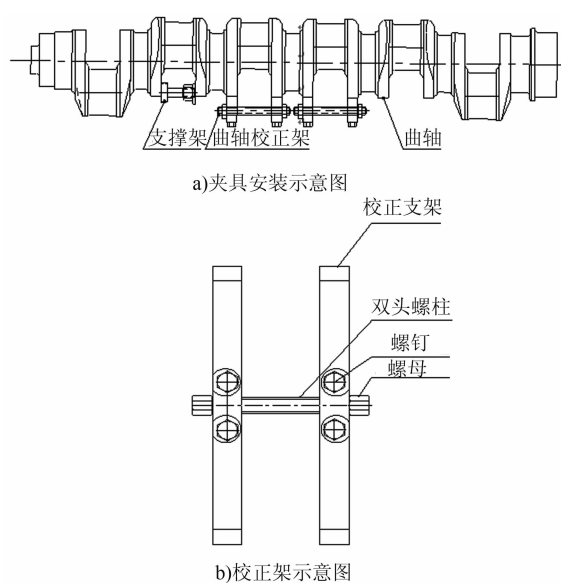


图3 曲轴氮化变形控制夹具

较粗、硬度较软的砂轮；而精磨应选用粒度较细、硬度较硬的砂轮；先进的高精度磨削应优先选用具有耐用度高、形状位置公差好的 CBN 砂轮。鉴于曲轴的高转速、高承载、高强度、高抗疲劳性要求，对曲轴的高精度加工工艺研究显得尤为重要。通过摸索变形规律，优化工艺方案，严格控制工艺参数，新型曲轴的加工质量得到有效控制，为支撑新一代动力系统研制提供了技术保障。

参考文献

- [1] 杨韶, 马士乾. 发动机曲轴加工工艺分析及现状 [J]. 工程技术 (全文版), 2016 (5): 238.
- [2] 段绍林, 毛泽永, 宋利强. 曲轴机加工工艺与设备现状及发展趋势 [J]. 内燃机, 2010 (4): 27-30.
- [3] 邓昭东. 发动机曲轴加工工艺分析及现状 [J]. 装备制造与教育, 2015, 29 (3): 33-36.

4 结论

通过以上案例分析表明：轴颈粗磨应选用粒度

(上接第 45 页)

4 结论

为真实描述柴油机喷油器喷孔磨料液加工过程的磨蚀效果，基于磨蚀模型和多相流离散相模型，建立了柴油机喷油器液力研磨过程的 CFD 计算模型。通过对比基础模型的计算流量与实测流量，验证了所建模型的有效性，模拟计算分析得到如下结果。

(1) 磨蚀率分布规律：各喷孔入口处的磨蚀量均明显高于喷孔壁面的磨蚀量；各喷口入口处上部磨蚀量均小于下部；各喷孔壁面的磨蚀率具有较明显的不均匀性；不同喷孔的磨蚀率有较大差异。

(2) 不同结构参数的影响结果：喷孔直径和喷雾锥度的变化对喷孔壁面磨蚀量的影响较大，随着两者的增大，喷孔壁面的磨蚀量有所增大；交点位置的变化对喷孔壁面磨蚀量的影响较小。

参考文献

- [1] 谢京武, 张朝晖. 针阀体喷孔去毛刺工艺的研究 [J]. 现代车用动力, 2001 (3): 36-37 + 50.

- [2] 刘建新, 杜慧勇, 李民. 喷油嘴喷孔毛刺现象燃油喷雾的影响 [J]. 洛阳工学院学报, 2002, 23 (2): 44-49.
- [3] HOLGUIN A C, FOSTER D E. Investigation of microflow machining effects on diesel injector spray characteristics [C]. SAE paper 2004-01-0026.
- [4] 张艳岗, 董家广, 苏铁熊, 等. 柴油机电控单体泵油道孔磨粒流加工数值模拟及挤磨压力优选 [J]. 现代制造工程, 2017 (4): 91-96.
- [5] 黄颖, 张向军, 李勇, 等. 喷油嘴微喷孔挤压研磨液及其试验研究 [J]. 中国表面工程, 2011, 24 (5): 68-72.
- [6] 马会青, 刘利, 杨晓宁, 等. 双排喷孔液体挤压研磨压力的研究 [J]. 现代车用动力, 2011 (3): 41-43 + 47.
- [7] 李俊烨, 刘薇娜, 杨立峰. 喷油嘴小孔磨粒流加工特性三维数值分析 [J]. 制造业自动化, 2012, 34 (6): 27-29.
- [8] OKA Y I, OKAMURA K, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact [J]. Wear, 2005, 259 (S1-6): 95-101.