

挤压研磨技术应用于电磁阀阀芯去毛刺工艺

刘翔, 曹飞龙, 李旭光, 李波

(西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要:为去除电磁阀阀芯加工后相交小孔处毛刺,以避免毛刺从母材脱落后在阀门内腔形成多余物,通过识别电磁阀阀芯毛刺出现位置及采用常规去毛刺方案的局限性后,提出使用挤压研磨技术方案进行阀芯相交小孔处毛刺去除,同时提出挤压研磨技术中的多余物防控方案,设计并进行正交试验得出有效去除阀芯相交孔处毛刺并避免二次产生的多余物的最优挤压研磨参数。阀芯零件加工后使用挤压研磨技术方案去除阀芯相交孔处毛刺,检查零件相交孔处具备无毛刺、无残留磨料、加工状态一致性好的优点,比常规方案去毛刺的效率提升60%以上。挤压研磨技术工艺方案能够有效去除阀芯狭小内腔相交孔处加工后毛刺,并对类似零件的狭小内腔的相交小孔处毛刺去除提供了有效的借鉴方案。

关键词:电磁阀阀芯;相交小孔;挤压研磨;去毛刺;多余物防控

中图分类号:V261 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2022)03-0093-06

Application of extrusion grinding technology in burr removal of solenoid valve spool

LIU Xiang, CAO Feilong, LI Xuguang, LI Bo

(Xi'an Aerospace Engine Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to remove burrs at the intersecting small holes in the machined solenoid valve spool, so as to avoid the surplus material in the valve cavity after the burrs falling off from the base metal, it was proposed that using the extrusion grinding technology to remove burrs at the intersecting small holes after identifying the burr locations of the solenoid valve spool and learning the limitations of the conventional deburring methods. In addition, the prevention and control scheme of surplus material for extrusion grinding technology was proposed, and the orthogonal experiments was designed and carried out to obtain the optimal parameters in extrusion grinding technology that can effectively remove the burr at the intersecting hole and avoid the secondary generation of surplus material. By removing burrs at the intersecting small holes with the extrusion grinding technology after manufacturing the solenoid valve spool, the intersecting small holes of parts have the advantages of no burrs, no residual abrasives and good consistency of processing state. Compared with the conventional schemes, the deburring efficiency is improved by more than 60% with this method. The extrusion grinding technology can remove the burr at the intersecting

收稿日期:2020-10-29;修回日期:2021-03-10

作者简介:刘翔(1990—),男,硕士,工程师,研究领域为航天阀门制造技术。

small holes effectively and provide an engineering reference scheme for the burr removal at the intersection hole of the narrow inner cavity in other similar parts.

Keywords: solenoid valve spool; intersecting holes; extrusion grinding; burr removal; prevention and control of surplus material

0 引言

电磁阀^[1]是液体火箭发动机控制系统的关键组件,飞行试验时根据系统指令进行打开、关闭动作,为推力室提供氧化剂和燃料,控制推力室的启动及关机。阀芯作为电磁阀重要关键运动零件之一,其内部相交孔为发动机介质的流通通道,塑料面为电磁阀的重要密封面,若阀门工作过程中阀芯相交孔处存在与木材脱落的毛刺或形成多余物,会造成电磁阀密封失效或电磁阀卡滞^[2],目前航天发动机多余物的防控主要集中在成品检测环节^[3-4],预先防控不足。国内学者提出利用磨料流去除阀芯相交孔毛刺,并对磨料流的切削理论和技术进行了概述,但未对电磁阀阀芯的去刺工艺方法进行研究^[5-8]。随着液体动力向小型化发展的趋势,电磁阀零件设计特征尺寸也快速向小型化转变, $\phi 1\text{ mm}$ 及 $\phi 1\text{ mm}$ 以下的相交孔大量出现在电磁阀零件上,同时电磁阀阀芯材料为具备强度低、黏性大特点的耐蚀软磁合金,加工后小孔相交处毛刺不易从母材上去除。本文提出使用挤压研磨技术去除阀芯相交小孔及排气孔孔口毛刺,并对电磁阀阀芯制造过程中的多余物进行控制,提高了阀芯相交孔毛刺去除的一次合格率,同时提高了电磁阀工作可靠性。

1 电磁阀阀芯现有制造流程中多余物控制的局限性

1.1 电磁阀阀芯多余物产生位置识别

电磁阀阀芯为典型的非金属塑料压装入金属阀芯基体的结构,金属阀芯基体上 $\phi 1\text{ mm}$ 及 $\phi 1\text{ mm}$ 以下小孔均采用钻削方式加工,钻削完成后须在20倍显微镜下进行毛刺手工刮除,然后采用热能去毛刺方法进行毛刺去除。阀芯基体加工完成后与非金属塑料块压装形成阀芯,塑料密封槽小孔因塑料压装形成半封闭结构,易存储微细多余物,因此阀芯加工后需在30倍放大镜下对盲小孔内多余物

进行去除。阀芯制造过程如图1所示,阀芯制造过程中多余物产生位置如图2所示。阀芯斜孔和塑料密封槽小孔相交部位,因孔径较小且深度较大,容易造成毛刺等多余物残留。

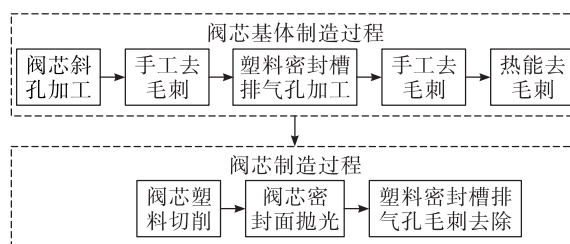


图1 电磁阀阀芯制造过程

Fig.1 Manufacturing process of solenoid valve spool

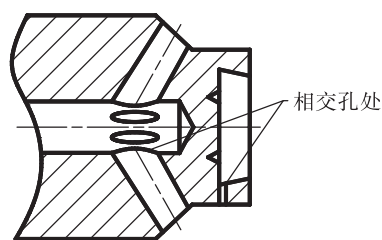


图2 电磁阀阀芯制造过程中多余物产生位置

Fig.2 Position of surplus material in manufacturing process of solenoid valve spool

1.2 现有制造流程中多余物控制的局限性

现有阀芯相交小孔去毛刺的方式是首先操作者使用工具对存在毛刺的部位直接进行机械去除,随后采用热能去毛刺方式对内孔微观纤维毛刺进行去除。

阀芯上多为 $\phi 1\text{ mm}$ 及 $\phi 1\text{ mm}$ 以下的相交孔结构,且位于零件深腔,受空间位置影响,小型工具去除毛刺轨迹无法完全沿内孔相贯棱边进行切削,去除毛刺效果差,且对已加工表面造成二次划伤,去除过程中需要反复多次使用内窥镜、放大镜检查,因此手工去毛刺效率低下且加工一致性差。手工去毛刺效果如图3所示。

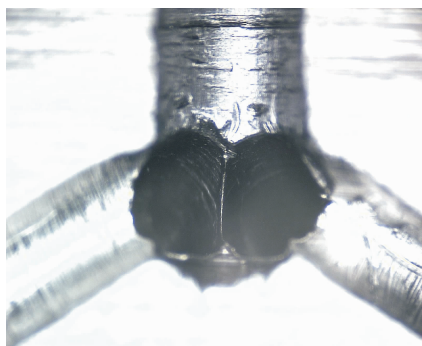


图3 手工去毛刺后示意图

Fig. 3 Schematic diagram of manual burr removal

热能去毛刺技术是一种常用的特种加工去毛刺技术,此前已经有研究者对钢、铝、铜等材料进行试验分析,能够将零件相交孔处毛刺进行去除^[9],但加工后针对精加工零件在热能去毛刺后需进行酸洗去除氧化色会影响易加工表面的质量。热能去毛刺技术的操作方法为采用氢气和氧气按照特定比例混合进行点火,使用点火后发生爆炸瞬间产生的热量进行毛刺去除,但因爆炸过程不可控易造成零件过烧的情况且对较大毛刺难以去除,国内外未推广使用热能去毛刺技术进行阀芯相交孔处的毛刺去除^[10-11]。

2 电磁阀阀芯挤压研磨去毛刺和多余物控制工艺流程

2.1 挤压研磨技术

挤压研磨技术也称磨粒流加工技术,通过载有磨料的黏弹体软性磨料介质,在压力作用下流过零件被加工面而实现的表面光整加工^[12-15],即在零件加工后提高零件内部复杂流道或异形流道的表面质量^[16-17],同时当采用流动性好、不易黏附类型的磨料介质在特定参数下亦可实现微量切削从而进行微小锥孔的加工^[18-19]。基于挤压研磨技术的上述优势,此前研究已将该项技术应用于宏观零件的棱边毛刺去除^[20],针对使用磨料流进行小型零件内部微小相交孔处毛刺去除未进行研究。挤压研磨技术的主要特点是磨粒受挤压力作用与产品零件表面接触后将零件材料进行研磨去除,挤压过程中磨粒随机方式进行排列,在挤压力作用下按一种方

向进行流动,加工原理如图4所示,通过挤压研磨可将软性磨料输送至零件内腔的所有部位进行研磨加工,因此可用于阀芯零件狭小深腔位置的小尺寸相交孔处毛刺去除。

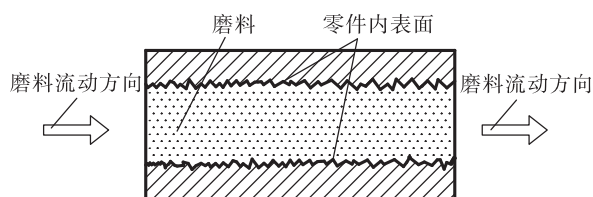


图4 挤压研磨原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of extrusion grinding principle

2.2 挤压研磨技术的加工介质

挤压研磨技术的加工介质是具有切割性、柔软性和黏弹性的半固态载体高分子材料和磨砂组成的磨料,如图5所示。高分子碳化硅(SiC)磨料的尺寸在0.005~1.5 mm之间,显微硬度为2 840~3 320 kg/mm,莫氏硬度9.5级,具备较高内聚力和较小附着力的特点,使用过程中不会黏附在工件上二次形成多余物。



(a) 挤压研磨用磨料



(b) 挤压研磨用工装

图5 磨粒示意图

Fig. 5 Diagram of wear debris

2.3 基于挤压研磨技术的阀芯去毛刺和多余物控制工艺流程

阀芯基体 $\phi 1\text{ mm}$ 及 $\phi 1\text{ mm}$ 以下小孔加工完成后,使用挤压研磨技术对两处小孔进行毛刺去除,同时在阀芯塑料进行切削加工之前,对半封闭空间进行封堵防护,避免多余物进入,具体工艺流程如图 6 所示。

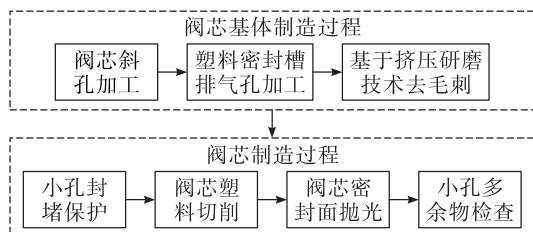


图 6 阀芯挤压研磨技术多余物控制工艺流程

Fig. 6 Control process of surplus material in valve spool with extrusion grinding technology

3 电磁阀阀芯挤压研磨去毛刺和多余物控制工艺设计

3.1 阀芯挤压研磨去毛刺工艺方案设计

基于挤压研磨技术的阀芯去毛刺,将阀芯放置在挤压研磨工艺装备内呈圆形阵列,工艺装备固定在设备工作台上,使磨料阀芯内腔往返运动去除阀芯交口相贯部位的毛刺。具体工艺方案如图 7 所示。

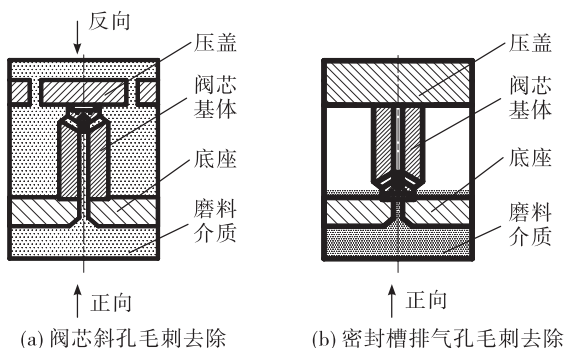


图 7 阀芯挤压研磨去毛刺工艺方案

Fig. 7 Process plan of extruding grinding for burr removal in valve core

因阀芯斜孔尺寸较大,采取先正向后反向的流动方案,密封槽排气孔相交处毛刺较小,采取正向的流动方案去除毛刺,其去除时加工介质数量较少,应保证加工介质不流入阀芯斜孔内。

结合上述工艺方案设计,电磁阀阀芯挤压研磨工艺装备设计主要采用上、下盘和支撑螺栓组成,保证设备夹紧力完全作用在支撑螺栓上。一次可放置零件 10~18 个,上下盘磨料流动的通道孔径为 $\phi 6\text{ mm}$,具体结构如图 8 所示,可提高磨料的驱动力,使磨料在阀芯内腔中充分、快速地流动,减少磨料滞留时间。

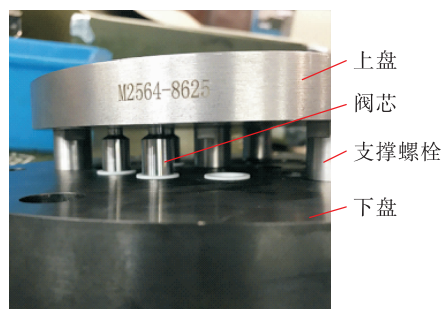


图 8 挤压研磨工艺装备

Fig. 8 Extrusion and grinding equipment

3.2 阀芯挤压研磨去毛刺主要工艺参数

将挤压研磨光整技术中的磨料颗粒度、磨料压力、研磨时间加工因素结合阀芯零件结构特点和材料特性进行挤压研磨去毛刺技术工艺参数研究,阀芯材料为耐蚀软磁合金 1J116,布氏硬度约为 188,抗拉强度 390 N/mm^2 ,阀芯斜孔采用高分子碳化硅的磨料(80#)、磨料压力采用 8 MPa 进行毛刺去除,最终影响毛刺去除效果的工艺参数主要为正向、反向的去除时间^[18-19],选取 3 水平正向时间和 3 水平反向时间进行正交试验,试验结果见表 1。

密封槽排气孔尺寸较小,需要选取颗粒较小的加工介质,采用高分子碳化硅的磨料(200#)、磨料压力采用 8 MPa 进行毛刺去除,其影响毛刺去除的工艺参数主要为正向去除时间。通过控制挤压研磨正向 6 水平单因素试验,试验结果见表 2。

表 1 阀芯斜孔挤压研磨去毛刺主要工艺参数工艺试验

Tab. 1 Experiment of main technological parameters for burr removal by extrusion grinding in the oblique hole of valve spool

名称	相交孔状态	磨料	时间/s		挤压研磨去毛刺后相交孔状态
			正向	反向	
1#	阀芯斜孔	碳化硅 80#	60	90	多处交口仍有毛刺
2#			60	120	5 处交口仍有毛刺
3#			60	150	2 处交口处毛刺去除,斜孔孔口存在显著倒角
4#			90	90	2 处交口处存在轻微毛刺
5#			90	120	交口处毛刺已去除,孔壁良好,相交孔处圆滑过渡
6#			90	150	交口处毛刺已去除,斜孔孔口存在显著倒角
7#			120	90	直孔 $\phi 5.1\text{ mm}$ 超大 $0.01\sim 0.02\text{ mm}$,交口仍有毛刺
8#			120	120	直孔 $\phi 5.1\text{ mm}$ 超大 $0.01\sim 0.02\text{ mm}$,交口处毛刺已去除
9#			120	150	直孔 $\phi 5.1\text{ mm}$ 超大 $0.01\sim 0.02\text{ mm}$,斜孔孔口存在显著倒角

表 2 密封槽排气孔挤压研磨去毛刺主要工艺参数工艺试验

Tab. 2 Experiment of main technological parameters for burr removal by extrusion grinding in the vent hole of seal groove

名称	相交孔状态	磨料	正向/s	挤压研磨去毛刺后相交孔状态
1#	密封槽排气孔	碳化硅 200#	40	交口仍有毛刺
2#			60	交口仍有毛刺
3#			80	交口处存在轻微毛刺
4#			100	交口处毛刺已去除,孔壁良好,阀芯斜孔内无加工介质
5#			120	交口处毛刺已去除,斜孔孔口存在显著倒角
6#			140	交口处毛刺已去除, $\phi 0.5\text{ mm}$ 孔超大 0.01 mm ,阀芯斜孔内有少许加工介质

根据工艺试验结果,阀芯斜孔交口毛刺去除效果良好的方案为正向 90 s、反向 120 s,密封槽排气孔交口毛刺去除效果良好的方案为正向 100 s,试验去除的效果如图 9 所示。

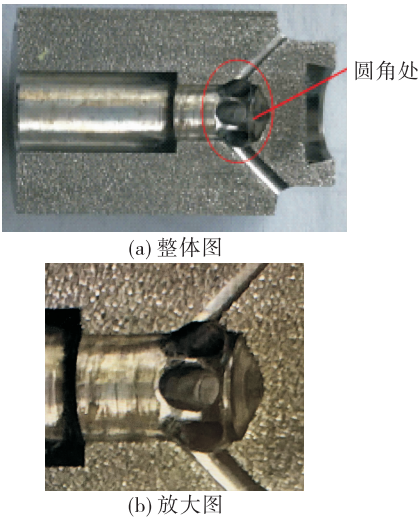


图 9 零件去除毛刺后示意图

Fig. 9 Schematic diagram of parts after burr removal

4 应用效果与特性

挤压研磨去除电磁阀阀芯相交小孔毛刺和多余物控制工艺方法,加工介质可充分、规则地去除相交小孔处连接毛刺和锐边结构,且对阀芯内孔进行抛光提高了表面光洁度,阀芯交口毛刺去除的效率大幅度提升。使用该技术前 1 件零件去除交口毛刺约 10 min,优化后一套夹具可对 12 件零件同时进行去毛刺,平均一件零件去除时间约 6 min,去毛刺时间缩短 40%,提高了现有制造流程的效率,电磁阀阀芯具备高度的设计一致性,可设计通用型夹具提高该项技术的适应性。

5 结语

基于挤压研磨的阀芯毛刺去除和多余物控制工艺方法,解决了电磁阀阀芯相交小孔手工去除毛刺一致性差、效率低的问题,消除了加工相交处毛刺脱落母材造成多余物的风险。该方法适用于具

有类似相交小孔结构的小型零件的毛刺去除,对提高产品性能具有参考意义。

参考文献:

- [1] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(上)[M]. 北京:宇航出版社,1994.
- [2] 史秋明,谢荣华. 电磁阀滑动副的设计参数灵敏度分析与可靠性研究[J]. 火箭推进,2013,39(3):72-78.
SHI Q M, XIE R H. Design sensitivity analysis and reliability research on sliding pairs of solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(3):72-78.
- [3] 牛书锋,张国悦. 液氧/煤油发动机多余物自动检测技术[J]. 火箭推进,2019,45(4):69-73.
NIU S F, ZHANG G Y. Automatic detection technology of redundancy in LOX/kerosene engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(4):69-73.
- [4] 秦永涛,宋阳,苏红芳,等. 火箭发动机试验管道多余物人机环境控制方法[J]. 火箭推进,2015,41(6):80-85.
QIN Y T, SONG Y, SU H F, et al. Method of man-machine-environment control over foreign object debris in pipelines used in rocket engine test[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(6):80-85.
- [5] 戴根林. 磨料流技术去除交叉孔毛刺[J]. 航天制造技术,2002(1):25-28.
- [6] 董志国. 磨料流加工的切削机理及加工工艺的研究[D]. 太原:太原理工大学,2012.
- [7] 陈曦,刘军. 磨粒流技术在航天零件相贯孔去毛刺中的应用[J]. 金属加工(冷加工),2014(16):30-33.
- [8] 高航,吴鸣宇,付有志,等. 流体磨料光整加工理论与技术的发展[J]. 机械工程学报,2015,51(7):174-187.
- [9] 赵奔,魏凯,刘超,等. 高压开关液压机构零件热能法去毛刺工艺研究[J]. 高压电器,2013,49(3):134-138.
- [10] 温从众,耿艳娟,李苹. 液压腔体零件交接孔热能去毛刺工艺研究[J]. 机床与液压,2016,44(16):33-35.
- [11] 中国航天科技集团公司 7103 厂. 热能去毛刺工艺研究[J]. 航天制造技术,2002(1):14-15.
- [12] 柏余杰. 微小孔精密挤压研磨工艺与控制方法研究[D]. 上海:上海大学,2016.
- [13] 李俊烨,许颖,杨立峰,等. 非直线管零件的磨粒流加工实验研究[J]. 中国机械工程,2014,25(13):1729-1733.
- [14] 郭成宇. 微小孔磨粒流抛光机理及实验研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
- [15] 王忠,王凯,王鹏,等. 挤压研磨对喷油器流量及雾化性能的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2019,40(5):497-503.
- [16] 石岩,郭志,刘佳,等. SLM 增材制造微流道内表面磨粒流抛光工艺与机理[J]. 表面技术,2021,50(9):361-369.
- [17] 李俊烨,朱志宝,张心明,等. 异形截面孔磨粒流精密加工质量分析[J]. 中国机械工程,2021,32(17):2063-2073.
- [18] 段泽斌,轧刚,董志国,等. 可控倒锥角微孔磨料流加工成形研究[J]. 机械设计与制造,2018(3):116-119.
- [19] 刘月普. 倒锥形微细喷孔磨料加工成型研究[D]. 太原:太原理工大学,2014.
- [20] 闫波,张方东,黄铁军,等. 基于磨料流加工技术叶片泵转子去毛刺试验研究[J]. 机床与液压,2020,48(4):67-70.