

# 某型滑轨组件焊接工艺研究

## Study on Welding Process of a Type of Slide Rail Sub-Assembly

北京航科发动机控制系统科技有限公司 马晓锋

**[摘要]** 某型滑轨组件采用结构钢基体与厚度为1.5mm的无油自润滑轴承衬板焊接而成。结构钢基体采用18Cr2Ni4WA材料,具有支撑、保证整体刚性的作用。将自润滑衬板冲压成形与滑轨紧密贴合后,边缘采用电子束焊接工艺进行连接。提出一种抗脱落、耐摩擦、精度高、摩擦系数小、成本低、能承受较大载荷的高压燃油柱塞泵滑轨的结构设计方案及加工工艺。

**关键词:** 滑轨组件 自润滑轴承 电子束焊接 焊接工艺

**[ABSTRACT]** A type of slide rail sub-assembly is constructed with an oil-free self-lubricating bearing lining plate of 1.5mm thickness welded onto a structural steel frame. The structural steel is made of 18Cr2Ni4WA alloy, and is used for supporting and ensuring the overall rigidity of the sub-assembly. The oil-free self-lubricating bearing lining plate is fitted into the slide rail tightly by stamping, of which the edges is jointed closely via electron beam welding. The study puts forward a structural design and manufacturing process for slide rail of high pressure fuel ram pump, which has the properties of anti shedding, friction resistant, high precision, low friction coefficient, low cost, and can withstand greater loads.

**Keywords:** Slide rail sub-assembly Self-lubricating bearing Electron beam welding Welding process

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.119

某型高压燃油泵是一种流量可变的直轴式轴向(倾斜柱塞)柱塞泵,用于发动机尾喷口控制系统中,可根据发动机的工作状态和喷口液压作动筒活塞上所需的力输出适当压力和流量的燃油。滑轨组件与滑轨体配合,用于调整斜盘角度。

滑轨组件正向承受17000N压力,涂层粗糙度 $R_a=0.2\mu\text{m}$ ,工作600h后,工作表面不能异常磨损;环境温度: $-40\text{℃}\sim+120\text{℃}$ (允许短时 $+200\text{℃}$ ,1h内持续工作时间不超过3min);工作介质:3#喷气燃料(GB6537-2006);工作高度:18000m。

传统加工滑轨的工艺为:基体进行磷化打底后喷涂石墨润滑涂层或者基体吹砂后喷涂自润滑涂层。由于工况比较恶劣,经常会使涂层脱落,不耐摩擦,降低了滑轨及整个燃油泵的寿命。另外,该型滑轨组件承受的压力较大,很难采用石墨、铜合金等传统润滑材料制造。

本课题所提出的滑轨组件设计方案由5种材料通过焊接、电镀、烧结和压制等工艺以层片结构复合在一起,钢基体(18Cr2Ni4WA)起支撑、保证整体刚性的作用,表层(PTFE+MoS<sub>2</sub>)起耐磨润滑作用。本课题通过对样件的分析测量,进行焊接等工艺试验,确定各零件的加工工艺尺寸,并研究了滑轨组件的整体加工工艺,从而实现该类零件的国产化<sup>[1-6]</sup>。

### 1 分析测量

结合样件进行分析讨论,确定组件的基本结构和尺寸、零件材料及标准。

产品样件及依实际尺寸绘制的图纸分别如图1、2所示。

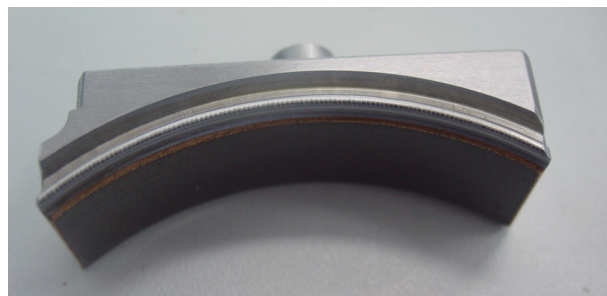


图1 滑轨组件实物样件

Fig.1 Sample of slide rail sub-assembly

金相组织、各部分的材料及厚度见图3。通过金相组织观察及分析,该件是由5层不同组分材料复合连接而成,各层间的连接方式分析见图4。

如图5所示,结构钢与10号碳钢之间是通过焊接连接的,边缘有明显的焊缝及热影响区。分析焊缝尺寸、结晶形态以及焊缝中化学成分的变化情况,结合金相组织特点及焊缝形貌,判断采用的焊接工艺是电子束焊接。

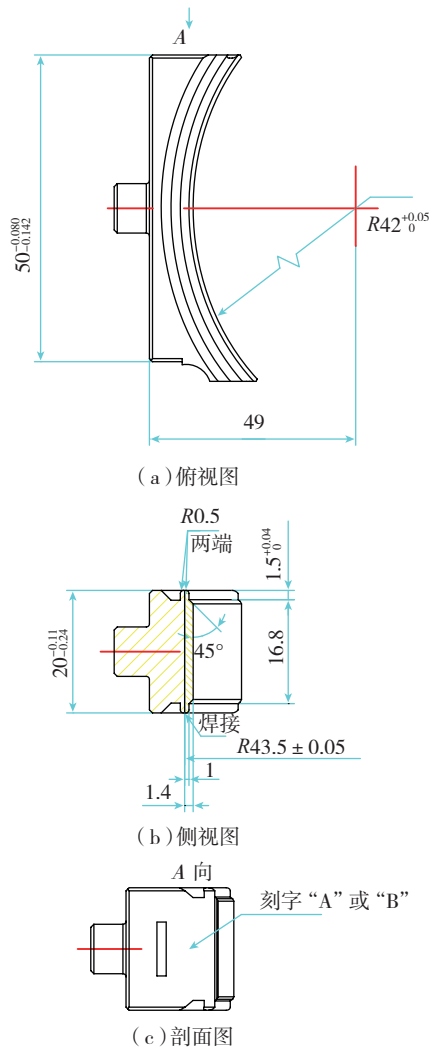


图2 滑轨组件绘制图纸

Fig.2 Drawings for slide rail sub-assembly

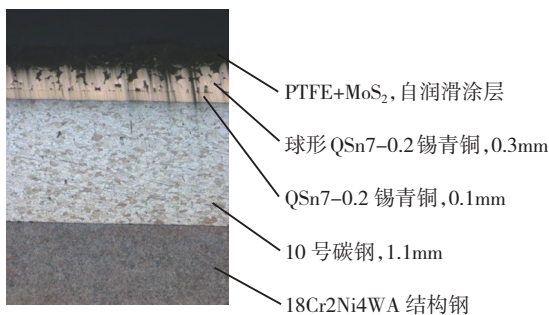


图3 金相组织及各部分的材料

Fig.3 Metallographic microstructure and materials of each part

## 2 加工工艺分析及讨论

### 2.1 初选方案

方案 1: 18Cr2Ni4WA 钢基体→焊接 10 号碳钢板→电镀铜层→烧结铜层→涂覆自润滑涂层(嵌入铜层工艺);

方案 2:(1)18Cr2Ni4WA 钢基体成形→(2)复合

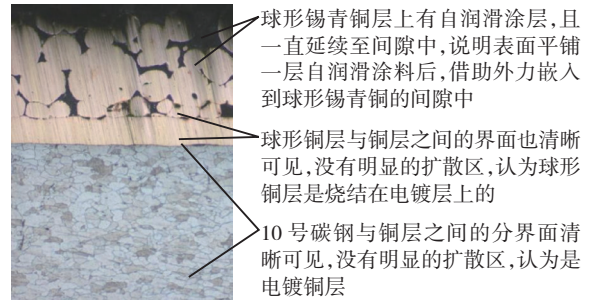


图4 各层材料之间的连接

Fig.4 Joints of each layer

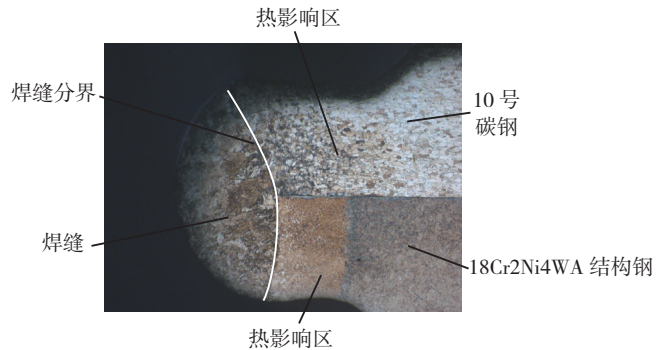


图5 18Cr2Ni4WA结构钢与10号碳钢的连接

Fig.5 Joint of structural steel 18Cr2Ni4WA and 10# carbon steel

成形件(自润滑轴承衬板):10 号碳钢板→电镀铜层→烧结铜层→涂覆自润滑涂层(嵌入铜层工艺)→(3) 18Cr2Ni4WA 钢基体与复合成形件焊接。

### 2.2 方案讨论及结果

方案 1 实施起来有以下困难:电镀铜层时对焊接质量有影响,烧结铜层的厚度不好保证,自润滑涂层嵌入烧结铜层内十分困难。

方案 2 具有一定的可行性,先将预制好的自润滑轴承衬板加工成形,如图 6 所示。自润滑轴承衬板由 4 层复合而成:电磁纯铁(钢背)+0.01mm,电镀铜层+0.15mm,球形铜粉烧结层,在烧结层内部也嵌有自润滑涂料。电镀铜层是为了提高烧结铜层与基体的结合力,一般控制在 0.03mm 以内时结合力较好;球形铜粉

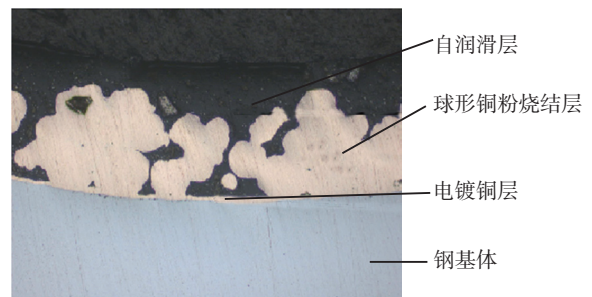


图6 自润滑轴承衬板的金相组织

Fig.6 Metallographic microstructure for self-lubricating bearing lining plate

烧结层的厚度可以调整,工艺是比较成熟的。然后,将经过加工成形的衬板与 18Cr2Ni4WA 钢基体进行焊接。

通过上述分析讨论,认为方案 2 具备可行性,即采取预制完成的自润滑轴承衬板与钢件焊接的工艺。

但是,如果选择方案 2,随即产生以下关键问题:自润滑轴承涂层的耐火温度为 300℃,焊接熔池温度超过 1300℃,如何控制受热区域?在保证焊接质量的前提下,如何保证自润滑涂层不会失效?为此,焊接工艺参数的选择、焊接工装夹具的设计及焊接缺陷的控制手段是本课题主要的研究内容。

### 3 加工工艺的确定

#### 3.1 零件焊接区域工艺尺寸的确定

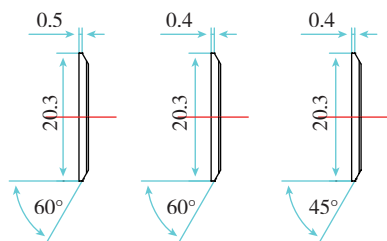
零件焊接区域包括衬板和滑轨,工艺尺寸需确定焊接区域厚度、倒角形式及尺寸。

衬板焊接区域和滑轨体焊接区域均采用相同的加工工艺:相关区域加工成顶角,顶角分别为 45° 和 60°,端边厚度分别为 0.4mm 和 0.5mm,部分试验件的设计见图 7 和图 8。图 7 (b)为加工完成的衬板实物,图 8 (b)为加工完成的滑轨体实物。

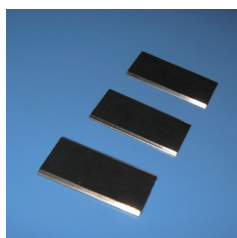
将上述衬板和滑轨体经过交叉组合焊接试验对比,发现将衬板焊接区域加工为顶角 45°、端边厚度 0.4mm,同时将滑轨体焊接区域加工为顶角 60°、厚度 0.5mm,可满足滑轨组件焊接工艺尺寸要求。焊接试件如图 9 所示。

#### 3.2 自润滑轴承衬板的加工成形

将预制完成的自润滑轴承衬板(平板),经过磨削去



(a) 试验件设计图(mm)

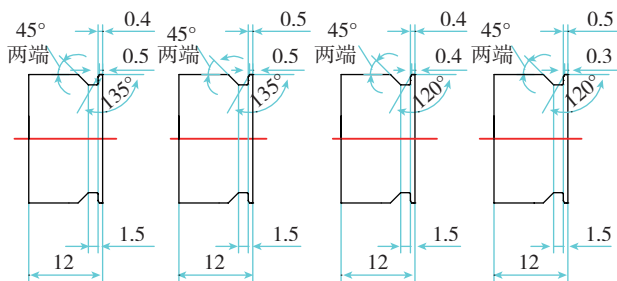


(b) 衬板实物

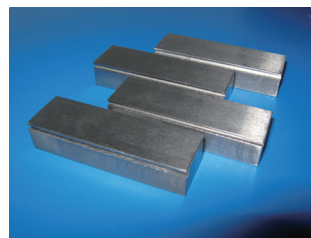
图7 衬板焊接试验件设计及实物图

Fig.7 Drawing and physical pictures of welded testing piece for lining plate

除衬板背面的电镀铜层,冲压成形后待与钢基体进行焊



(a) 试验件设计图(mm)



(b) 滑轨体实物

图8 滑轨体焊接试验件设计及实物图

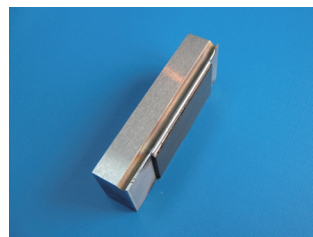
Fig.8 Drawing and physical pictures of welded testing piece for slide rail body



(a) 端边厚度 0.5mm、顶角 45° 的试验件



(b) 端边厚度 0.5mm、顶角 60° 的试验件



(c) 端边厚度 0.4mm、顶角 45° 的试验件

图9 焊接试件

Fig.9 Welded testing pieces

接。

### 3.3 焊接工装夹具的设计

自润滑衬板涂层的耐火温度为 300℃,焊接熔池温度超过 1300℃,如何控制受热区域,使焊接过程中输入的热量迅速地传递出去,成为了焊接工装设计的难点。焊接工装设计如图 10 所示,焊接过程中热量输出如图 11 所示。

焊接过程中,由焊接夹具及紧贴自润滑衬板的紫铜将产生的热量迅速沿着预计的散热方向传导出去,保证自润滑衬板涂层不会受到高温而失效。

同时,依据滑轨组件的设计图,其向心角为 67°,通过工装约束,可实现 4 件滑轨组件组合一次焊接,然后进行切割加工。

### 3.4 焊接变形的控制

自润滑衬板受热恢复形变以及焊接各阶段由热胀冷缩造成的内应力的复杂变化是焊接变形的原因。

为了控制焊接中的变形,通过对零件的结构、焊缝的分布及加工工序的分析,结合焊接结构理论及大量的试验,采取了以下措施。

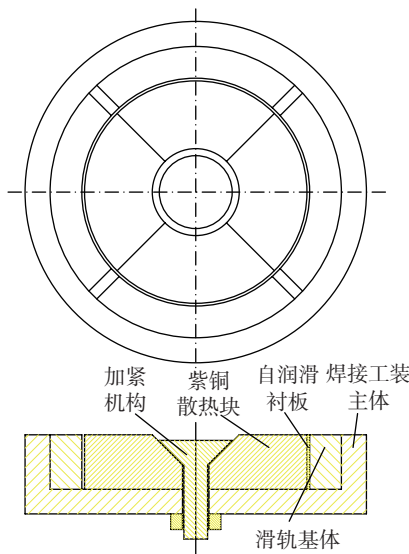


图10 焊接工装设计

Fig.10 Fixture design for welding

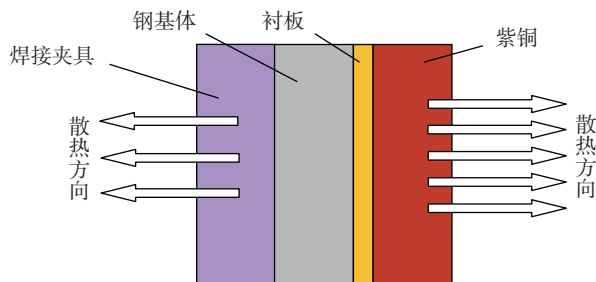


图11 焊接过程中热量输出

Fig.11 Thermo-outflow of welding practice

(1)严格按照 GJB 1718 电子束焊接中有关装配的要求执行,控制配合间隙 $\leq 0.1\text{mm}$ ,错位量 $\leq 0.1\text{mm}$ ;

(2)正式焊接前需要点焊定位和小电流弥缝焊,采用 8 点对称点焊定位,使用 1/2 焊接电流弥缝焊;

(3)工装采用楔形块预夹紧散热。

### 3.5 焊接工艺的确定

#### 3.5.1 该类零件焊接的难点

该类零件是某型燃油柱塞泵上的耐磨损、耐疲劳的关键件,焊接总厚度为 0.9mm,必须采用精密控制的焊接工艺,自润滑衬板涂层的耐火温度为 300℃,采用电子束焊接主要注意以下几点。

(1)参数控制:在保证熔深及接头强度前提下采用尽可能小的焊接规范;

(2)工艺控制:注意焊接区洁净度,保证焊缝一次成形,不得连续补焊;

(3)工装夹具:工装与待焊零件贴合紧密,保证良好散热效果;

(4)零件状态:机加工后零件的贴合间隙满足焊接需求。

#### 3.5.2 焊接接头的清洁

焊缝清洁对保证焊缝质量很重要,自润滑轴承衬板制作时应确保没有表层 (PTFE+MoS<sub>2</sub>) 材料及铜元素进入对焊界面,否则焊接时会造成焊接飞溅,严重影响焊缝成形。

焊接前用丙酮或乙醇擦洗焊接接头表面,去除待焊件表面的油脂污物。

#### 3.5.3 焊接参数的选定

焊接之前,根据焊接材料的种类、焊接厚度和零件的设计要求来选择合适的焊接工艺参数。

加速电压:本课题所使用的 THDW-15 电子束焊机的最高加速电压为 120 kV,焊接总厚度为 0.9mm (厚度为 0.4mm 的电磁纯铁+厚度为 0.5mm 的 18Cr2Ni4WA 结构钢),选用加速电压为 60 kV。

聚焦电流:焊接总厚度为 0.9mm (同上),虽然理论上采用聚焦、表面聚焦和下聚焦都可以,但考虑到焊缝尺寸及力学性能,减少零件变形,应在 380~390 mA 之间进行选择。

焊接束流:结合焊接材料的种类,在保证焊缝力学性能的前提下,确保自润滑衬板涂层不会因焊接受热失效,焊接束流选择在 10mA 以下。

焊接速度:结合焊缝长度、工装的设计结构以及其他工艺参数对焊缝组织的影响,在 250~1100 mm/s 之间进行选择<sup>[7]</sup>。

表 1 为部分试验的焊接工艺参数,其所对应的焊缝金相组织如图 12 所示,可以看出图 12 (d)为最理想状

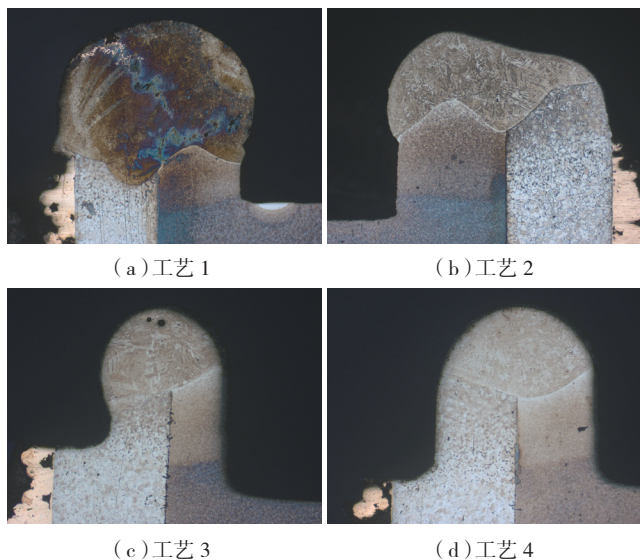


图12 焊缝组织

Fig.12 Welding seam microstructure

态,其与样件焊缝的金相组织对比见图 13。

从图 13 可以看出,试件与样件的金相组织十分相似,其焊缝、熔合区、过热粗晶区、相变重结晶区、不完全洁净区、时效脆化区及未受影响区基本一致。

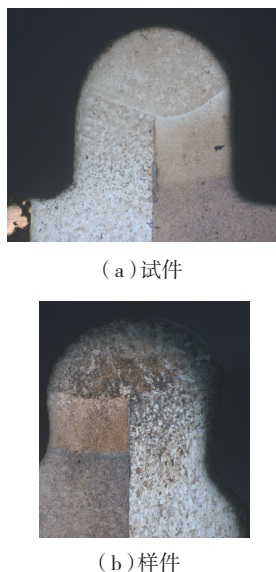


图13 试验件与样件焊缝金相对比

Fig.13 Metallographic comparison of test piece with sample piece

表1 试验工艺参数(部分)

工艺序号	加速电压 /kV	聚焦电流 /mA	焊接束流 /mA	焊接速度 / (mm·s <sup>-1</sup> )
1	60	387.7	9	1039
2	60	381.4	7	250
3	60	383.2	5	500
4	60	383.3	4.5	400

#### 4 实际零件的焊接

通过上述工艺方案的实施,滑轨组件实际焊接零件的局部及整体焊接后的产品见图 14 和 15。

图 16 为加工完成的零件,可见自润滑涂层未出现受热失效,焊缝成型良好,外观圆整、平滑、连续。

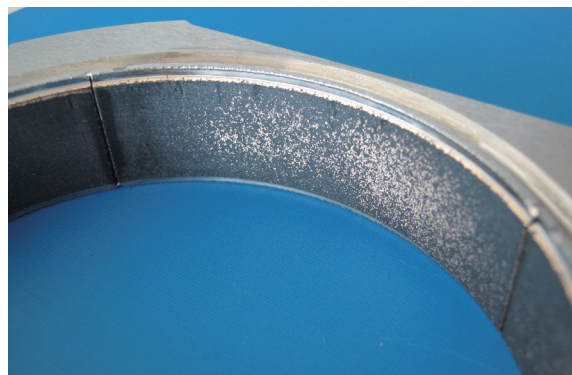


图14 零件局部

Fig.14 Local view of part

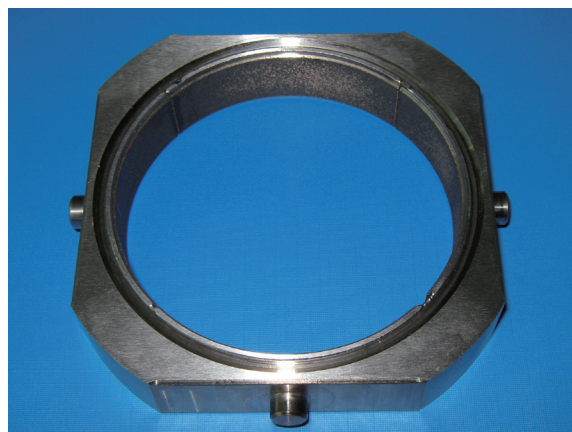


图15 进行整体焊接后的产品

Fig.15 Product after overall welding and assembly

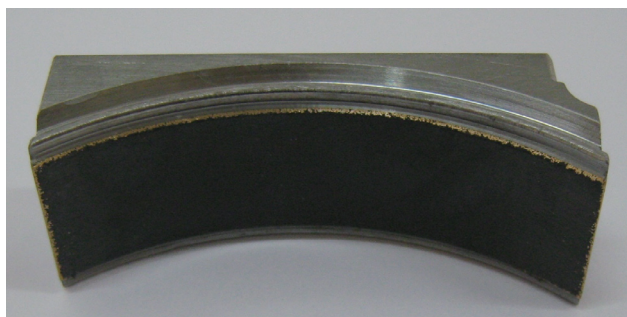


图16 加工完成的零件

Fig.16 Parts after processing

#### 5 结论

(1)通过工艺试验研究,采用电子束焊接可实现结

(下转第 131 页)

中心摆动,靠模轮在靠模型面上的随形运动通过叶盆仿形机构和叶背仿形机构中的刚性结构传递到砂轮,砂轮在叶片毛坯上进行型面的磨削。项目组人员突破了双面抛光机床结构设计、砂轮定制、砂轮损耗及补偿等关键技术研究,通过金刚石砂轮和弹性砂轮磨削过程的组合使用,使加工完成的样件达到了叶型精度和表面粗糙度要求。该机床主要用于叶型扭转较小、叶身高100~300mm的静子叶片的抛光,叶片抛光的重复性好,节省了抛光过程中的离线检测时间,因此抛光效率高,且机床成本较低,利于在航空发动机叶片的批生产中应用。

## 5 叶片抛光技术的发展趋势

针对叶片抛光的技术难点,结合国内外抛光技术现状,可以总结出叶片抛光技术的发展趋势具有以下特点。

(1)叶片型面越来越复杂,出现了宽弦叶片、掠形叶片、弓形叶片等新型结构,专一形式的抛光方法已不能解决叶片全部位的抛光。针对不同结构、不同材料的叶片,需要采用不同的抛光方法,从进给方式、工艺模式、磨具的特殊要求等方面综合考虑,加工工艺越来越复杂。同时,各部位抛光需要机床的运动形式、规格参数差异很大,在同一个机床上完成叶片不同部位的抛光较难实现。因此,多工位、多种加工方式并行的工艺策略更适用于叶片全部位的抛光。砂轮磨削、砂带磨削两种技术需要各自发挥优势、适宜的分工、有机的整合。这对工程技术人员提出了更高的要求,需首先进行充分的工艺试验,积累大量的工艺数据,然后再进行整套抛光设备的开发。

(2)叶片抛光工艺已不是简单的去余量和上光,完全演变为一种最终成形的加工方法,是保证叶片最终加工质量的最后一个环节。由于叶片加工精度、表面质量要求高,需进行加工过程的在线实时检测,使机床能根据磨具状态变化进行实时补偿。经过长时间的抛光过程,磨具的直径会随着不断磨损而逐渐变小,由于机床加工路径不变,导致磨具与工件会逐渐分离,无法完成抛光过程。磨具实时检测、实时补偿功能可以解决这个问题。每次运动前均要检测磨具大小,根据检测结果调整磨具中心位置,从而保证磨具的切深恒定。

(3)在叶片大批量生产中,抛光的加工效率显得尤为重要。解决方案之一是减少离线检测时间和重复装夹时间,叶片抛光需要在一次装夹中完成;解决方案之二是减少机床空走刀时间,同时对可能报废的叶片采取拯救措施,因此机床须具备自适应加工功能。航空发动机叶片毛坯型面和进排气边误差均大于允差,为提高抛

光效率,加工前需进行毛坯余量分布状况的测量。根据测量结果,通过模型重构技术生成现实毛坯状态下的模型,判断是否能够加工出合格的产品,并在叶型扭转误差和轴线弯曲误差允许范围内制定个性化的加工程序。此加工程序应基于分层去除的工艺策略,减少机床空走刀,逐步修正叶片的局部误差。

## 6 结论

随着航空发动机性能的不不断提高,新材料、新结构的叶片不断出现,叶型曲线也越来越复杂,给叶片抛光技术带来了更大的挑战。经过众多学者、工程技术人员多年来的不断努力,我国在叶片抛光工艺和装备技术上取得了较大的进步,但与国外相比较,国内研究还不够系统和深入。针对叶片抛光加工精度、加工质量、加工效率等要求,争取在机床结构设计、在线检测、实时补偿、自适应加工等关键技术取得突破。只有这样才能快捷有效地提高叶片加工质量,提高我国航空发动机制造水平。

(责编 一帆)

(上接第123页)

构钢基体与厚度为1.5mm的自润滑衬板的焊接连接。

(2)自润滑衬板加工出三角倒角形式,顶角为45°,端边厚度为0.4mm;滑轨基体加工出三角倒角形式,顶角为60°,厚度为0.5mm,可满足滑轨组件焊接工艺尺寸要求。

(3)实施电子束焊接,焊接束流:4.5mA;焊接速度:400mm/s;聚焦电流:383.3mA;加速电压:60kV。

(4)通过设计焊接工装、抗变形措施以及精确的焊接工艺参数控制,可实现焊缝成形良好,防止自润滑涂层受热失效的目标。

## 参考文献

- [1] 刘春飞,张益坤.电子束焊接技术发展历史,现状及展望(I).航空制造技术,2003(1):33-36.
- [2] 康文军,梁养民.电子束焊接在航空发动机制造中的应用.航空制造技术,2008(21):54-56.
- [3] 毛智勇.电子束焊接技术在大飞机中的应用分析.航空制造技术,2009(2):92-94.
- [4] 张益坤,成志富.电子束焊接技术在航天产品中的应用.航空航天焊接技术,2008(21):52-53.
- [5] 陈国庆,张秉刚,冯吉才.电子束焊接在航空航天工业中的应用.航空航天焊接技术,2011(11):42-45.
- [6] 冯吉才,王廷,张秉刚,等.异种材料真空电子束焊接研究现状分析.焊接学报,2009(10):108-112,118.
- [7] 唐家鹏,关世玺.真空电子束焊接工艺研究.新技术新工艺,2009(1):55-57.

(责编 谷雨)