# 电子束改性技术应用于回转体零件的工艺试验研究

# 张永和 何 俊 王世伟

(兰州空间技术物理研究所表面工程技术重点实验室,兰州 730000)



摘要:针对回转体零件进行电子束表面改性处理时,需要克服电子束圆形焦斑能量分 布不均匀和直线飞行可达性差的局限,利用电磁扫描控制原理设计出的特征束斑波形,在 TC4钛合金材料表面进行了试验,验证了通用电子束焦斑采用波形扫描可以获得能量均匀 分布的表面加热效果;利用电磁偏转方式研制了电子束运动轨迹控制装置,通过对回转体 样件进行全表面处理试验,验证了回转体内外表面全方位的电子束加工可达性和可行性, 突破了电子束无法进行内表面处理的局限。以上试验结果表明,利用电子束对旋转曲面进 行表面改性应用是可行的。

关键词: 电子束; 改性; 电磁偏转; 回转体; 可行性

# Process Experimental Study of Electron Beam Modification Technology Applied to Rotary Parts

Zhang Yonghe He Jun Wang Shiwei

(Science and Technology on Surface Engineering Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

**Abstract:** The energy distribution of circle beam spot was uneven, and the trajectory of beam after leaving the electron gun was a straight line, all of these are defects when the electron beam was used for the modification treatment of the surface for rotary parts. Based on the principle of electromagnetic scanning, this paper designed a special beam spot waveform, which energy distribution is uniform, and the result of TC4 titanium alloy surface modification proved this. Controlled the electron beam trajectory by electromagnetic deflection equipment, the test on rotary surface modification showed that: by controling the trajectory of electron beam to modify the whole surface of rotary parts was feasible. All the above test results proved that, the electron beam can be used to modify variety of surfaces, and can get uniform treatment layer.

Key words: electron beam; surface modification; electromagnetic deflection; rotary parts; feasibility

#### 1 引言

发动机是航天运载系统的"心脏",为航天器轨 道运动和姿态控制提供所需要的力和力矩。目前,我 国用于空间飞行器姿/轨控的高温液体火箭发动机喷 管一般采用高温合金制造,是一种典型的回转体结 构,并通过在其表面加涂耐高温的硅化物涂层来提高 燃烧室工作温度。但受材料性能的影响,工作温度通 常低于1500℃,部分燃料被用作冷却剂未能完全燃烧 就被排出,除了降低燃烧效率外,未完全燃烧的燃料 还是一种潜在的羽流污染源,它对敏感器、太阳电池 和其它星上敏感表面有不利的影响<sup>[1, 2]</sup>。

随着航天技术的进一步发展和深空探测活动的 开展,现有的发动机材料和制造工艺已经不能够满足 高性能航天发动机的要求。新材料和新工艺的开发越 来越受到材料工作者的关注,如开发新型防护涂层、

作者简介:张永和(1981-),工程师,材料加工工程专业;研究方向:电子束加工 及表面改性技术研究。 收稿日期:2013-03-22

研制复合材料、发展喷管旋压及焊接技术、采用CVD 法制备铼/铱喷管等。但由于技术难度大、周期长、费 用高、风险大,目前还只是探索和研究阶段,无法直 接用于型号任务。在未来一段时间内,我国发动机喷 管将继续采用铌合金加涂硅化物涂层方式,如何快 速、经济、有效地提高硅化物涂层的性能成为当务之 急<sup>[3~7]</sup>。

利用电子束进行材料改性处理研究越来越受到 重视,国内外很多高校和研究院所纷纷开展了电子束 改性技术的研究。何俊等人在国内率先开展了针对铌 合金硅化物涂层的电子束熔覆表面改性技术研究。针 对涂层预置技术、电子束熔覆改性技术和改性层功能 试验等三方面进行了大量研究工作,取得了较好的涂 层改性效果,为该技术的应用奠定了技术基础<sup>[8,9]</sup>。

# 2 试验

# 2.1 原理

电子束表面改性处理技术是直接将高能量、高密度的电子束热源作用于材料表面,通过表层晶格高频振动将能量迅速传递到涂层内部和基体表面,发生快速熔凝,改变微观组织结构形成改性层,以提高或弥补表层所缺少的功能性能。利用电子束进行表面改性处理具有其他方法无可比拟的优点,主要表现为热输入易于精确控制,能量利用率(高达90%)不依赖于材料表面特性,电子束截面形状调节方便,易于异型工件的处理,真空环境条件具有脱气作用可以获得洁净的涂层质量等<sup>[8~12]</sup>。

在电子束改性处理过程中,需要克服通用电子束 焦斑能量呈高斯分布、热作用效果为透镜状的缺陷。 表面改性处理要求电子束束斑具有较大的一次性作 用区,在整个束斑作用范围内输入能量均匀,确保改 性层厚度的一致性,避免改性后涂层性能出现较大波 动。另外,电子束改性处理主要是通过直接入射到工 件表面的方式进行,而类似喷管这类回转体结构零 件,内表面才是电子束改性处理的关键部位,这些位 置电子束无法直接垂直作用,存在不可达性的限制。

电子束表面改性技术要应用于回转体结构(如发 动机喷管)的改性处理,必须满足如前所述的均匀束 斑技术,克服电子束不可达性的限制,这是电子束最 终能够垂直作用于被处理表面,并获得厚度均匀一 致、表面平整光滑的改性层的关键。

2.2 试验设备与材料

试验在 LARA52 型真空电子束焊机上进行。该焊 机的电子枪最大功率为 6kW,电子束电流变化范围 0~100mA 且连续可调;加速电压为 20~60kV 连续 可调。机械运动部分是一个 X-Y 工作平台,配有沿 Z 轴方向可以升降和旋转的工作转台,通过专业的 CNC 系统进行控制。

电子束轨迹控制采用自行研制的电磁偏转装置。 该装置通过对励磁电流的无极调节可以获得 100~ 4000Gs 的磁感应强度,磁场均匀度在 95%左右,完 全可以满足对电子束轨迹控制的需要。

均匀束斑技术试验材料选择 TC4 钛合金板材,其 规格为 100mm×60mm×10mm。

电子束可达性试验采用回转体结构样件,采用 TC4 棒材利用车削方式加工,分为直段和喇叭口端两 部分。直段内径为10mm,壁厚为2mm。

#### 2.3 试验方法与参数

试验方法主要采用电磁偏转原理,当带电粒子在 磁场中运动时,会受到力的作用而发生偏转。其中, 均匀束斑的产生主要是利用电子枪底部的两个相互 垂直的 x、y 电磁扫描线圈,当高频运动的电子束以 一定角度进入二维磁场时,会受到洛沦兹力的作用, 通过改变磁场强度的方式可以控制电子束的扫描波 形,从而产生任意二维平面图形<sup>[13, 14]</sup>。在电子束表面 改性过程中,为保证改性处理区域热输入的均匀性和 一致性,电子束能量在垂直于运动方向的分量必须是 相等的,为此,设计了如图1所示的束斑波形。其中, *L*为工作距离;xo'y 为工件放置平面,y 向为运动方向; o 为电子束发射阴极,o'为发射极在平面上的投影。



图1 电子束均匀束斑波形示意图

电子束离开电子枪后在无外部干扰情况下将作 直线运动,通过在回转体零件周围建立一个外加磁 场,当高速直线运动的电子束进入磁场时,必然会受 到洛伦兹力的作用而发生偏转,如图2所示。电子束 运动轨迹发生偏转后便可突破直线运动不可达性的 限制,实现回转体内表面改性处理。



图 2 回转体内表面电子束改性电磁偏转示意图

根据被处理表面的形貌,通过调整磁场强度改变 电子束的偏转半径,使电子束偏转后能够垂直作用于 样件表面,通过 CNC 控制转台旋转实现整个内表面 的电子束改性处理。磁场强度大小与电子束运动速度 有关,表1列出了加速电压为40kV时,电子束偏转 半径与所需磁感应强度值。表2列出了试验过程的相 关工艺参数取值情况。

偏转半径 <b>R</b> /mm	磁感应强度 B/Gs
2	3360
3	2240
4	1680
5	1344
6	1120
7	960
8	840
9	747

表1 40 kV 下偏转半径与磁场对照表

从2 IC4 抵抗已了不加为自己成担害级							
加速电压	束流	扫描频率	速度	束斑宽度			
/kV	/mA	/Hz	$/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	/mm			
40	25	400	8	30			

圭) TC1 针折由子声斑均匀料计险条料

# 3 试验结果与讨论

#### 3.1 均匀束斑试验结果

利用图1所示的束斑波形在TC4钛合金板材表面 进行热作用均匀性试验,结果如图3所示。图4为通 用电子束圆形焦斑作用获得的透镜状效果。利用 JSM-5600LV型真空扫描电子显微镜对两种束斑改性 处理层厚度进行了测量,其中,通用束斑波形处理后 的最厚为4.73mm,最薄处为1.09mm,最厚处位于束 斑中心位置,这主要是因为通用束斑为圆形焦斑直接 聚焦得到的,热源能量为高斯分布,中间能量大四周 能量小;而均匀束斑处理后的热作用区域厚度均匀一 致,基本都在 1.1~1.2mm 之间,这是因为利用电子 束扫描获得的均匀束斑波形的设计遵循了运动过程 中能量分布和沉积特点,整个束斑波形内部能量分布 均匀,相当于面热源,保证了改性层质量的均匀一致。



图 4 通用束斑波形处理结果

## 3.2 电子束可达性控制试验结果

利用电磁偏转原理对电子束的运动轨迹进行了 精确地控制,电子束在模拟样件内表面的作用结果如 图 5 所示,其中,图 5a 为电子束偏转 90°后垂直作 用于管状内表面的试验结果,图 5b 为电子束偏转特 定角度以后垂直作用于喇叭口回转体内表面的试验 结果。从图中可以看出,利用磁场对电子束的运动轨 迹进行人为设定和控制,使其按照预定角度垂直作用 于被处理表面,实现均匀一致的表面改性处理效果是 可行的。



b 旋转曲面内表面试验结果 图 5 电子束可达性控制试验结果

# 4 结束语

a. 电子束表面改性处理技术用于回转体零件(如 发动机喷管)的改性应用是可行的。 b. 利用二维磁场进行电子束扫描控制,可以产生 各种平面波形,满足不同条件下对表面改性输入能量 均匀性的要求。

c. 利用磁场对电子束的运动轨迹进行偏转控制, 可以克服电子束不可达性的限制,实现喷管内外表面 全方位的改性处理。

#### 参考文献

- 1 张春基,吕宏军,贾中华,等. 铌钨合金材料在液体火箭发动机上的应用[J]. 宇航材料工艺,2007(6):57~60
- 2 宋力昕. 航天材料发展趋势分析[C]. 中国空间科学学会第七次学术年 会, 2009, 47~52
- 3 顾明初.国外氢氧发动机研制的一些近况[J].导弹与航天运载技术, 2001(1): 51~54
- 4 崔红,孟宇. 航天动力复合材料技术发展现状及设想[C]. 2005 年南京复 合材料技术发展研讨会论文, 2005, 20~24
- 5 李争显. 铌合金表面高温抗氧化涂层[J]. 稀有金属快报,2006,25(4): 6~9
- 6 胡昌义,陈力. 铼/铱发动机喷管研究最新进展[J]. 贵金属,2007,28(4): 57~62

- 7 徐宁. 国外固液发动机喷管用烧蚀材料试验研究[J]. 飞航导弹, 2002(10): 60~62
- 8 何俊,于斌,张涛,等. 预置涂层电子束熔覆改性技术研究[J]. 航天制造技术,2008(6): 5~9
- 9 何俊,张秉刚,郑坤,等. 铌合金电子束表面熔覆层裂纹控制. 焊接学报[J], 2012(6): 109~112
- 10 Proskurovsky D I, Rotshtein V P, Ozur G E, et al. Physical foundations for surface treatment of materials with low energy, high current electron beams[J]. Surface & Coatings Technology, 2000, 125: 49~56
- 张迪,单际国,任家烈.高能束熔覆技术的研究现状及发展趋势[J].激 光技术,2001,25(1):39~42
- 12 Wang X, Han X G, Lei M K, et al.. Effect of high-intensity pulsed ion beams irradiation on corrosion resistance of 3l6L stainless steel. Materials Science & Engineering A, 2007, 457: 84~89
- 13 郭光耀,刘方军,韩瑞清. 电子束扫描控制系统[J]. 焊接学报,2003, 24(1): 91~93
- 14 李少青,王学东,张毓新,等.基于可编程控制的扫描电子束加工技术[J]. 焊接学报,2005,26(7):59~62

#### (上接第19页)

表	1	铝合金变极性	TIG 焆	*焊接工	艺参数
~~		n u x ~ M u	110 /	1 12 -	

脉冲参数			变极性参数		其他焊接参数				
基值	峰值	基值	峰值	反向	正向	反向	焊接速度	电弧	送丝速度
电流	电流	时间	时间	电流	时间	时间		高度	
40A	105A	0.2s	0.1s	125A	19ms	4ms	200mm/min	2.5mm	750mm/min



a 焊缝正面成形 b 焊缝背面成形 B 9 滑油箱焊缝外观情况

通过采取上述的工艺措施,开展了铝合金结构变 极性 TIG 焊接,所焊接的滑油箱焊缝成形良好,如图 9 所示。同时,原有的翘曲变形得到明显改善。焊后 对滑油箱进行测试,接头强度为116MPa(LF6母材强 度为325MPa,3A21母材强度为117MPa),达到母材 强度的99.1%;焊缝中不存在未焊透、未熔合和凹坑 缺陷;焊缝中不存在链状气孔和表面气孔。各项指标 均满足 QJ2698-95 I 级焊缝要求。

#### 5 结束语

研究了铝合金滑油箱变极性 TIG 焊接工艺及变 形控制措施,通过改变接头形式、焊前预热、设计焊 接工装和焊接工艺优化等措施,有效地控制了滑油箱 的焊接变形,摸索出一套优化的变极性 TIG 焊工艺参 数,得到了合格的滑油箱产品。本文中所提到的铝合 金焊接的工艺措施及变形控制措施,对于其他类似产 品的焊接均具有借鉴意义。

# 参考文献

 中国机械工程学会焊接学会.焊接手册(第2版第2卷).北京:机械工 业出版社,2001,7:507~508