

# 铼与钛合金电子束焊接头脆性相控制研究

李仕民

(上海空间推进研究所,上海 200233)

**文 摘** 通过对铼与钛合金焊接脆性的产生机理进行分析,采取增加中间层材料进行电子束焊接的方法来克服接头脆性。根据理论分析的结论确定了中间层材料类别,制定了多组中间层配方成分,通过焊接试验与相关测试,最终实现了对接头脆性相的有效控制。

**关键词** 铼,钛合金,中间层,电子束焊

## Controlling Method of EBW Joint Brittleness of Rhenium and Titanium Alloy

Li Shim in

(Shanghai Spaceflight Institute of Power Machinery, Shanghai 200233)

**Abstract** By analyzing the mechanism of brittleness forming in the EBW joint between rhenium and titanium alloy, the brittleness can be overcome by adding intermediate layer. The elements of intermediate layer are confirmed according to the analyzing result, and several kinds of intermediate layer with different composition are designed. EBW joints without brittleness are finally obtained after welding test.

**Key words** Rhenium, Titanium alloy, Intermediate layer, EBW

### 1 引言

随着航天工业的不断发展,大量的高熔点难熔金属(钨、铼、钼、铌等)被应用于航天发动机的关键耐高温元件中<sup>[1~4]</sup>。铼具有熔点高、强度高以及塑性好,且具有优异的机械稳定性。铼没有脆性临界转变温度,在高温和急冷急热条件下均有很好的抗蠕变性能,适于超高温和强热震工作环境<sup>[5]</sup>。而钛及钛合金因密度小、比强度高、耐腐蚀、耐高温、无磁、焊接性能好等优异综合性能,在化工、医疗、航空航天等领域得到广泛应用。在航天发动机推力器的接头设计中,既要能够利用铼的高温性能,同时要求系统有更小的质量,因而采用铼与钛合金的接头结构,见图 1。

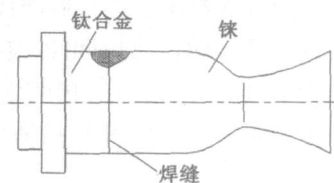


图 1 铼与钛合金接头的航天发动机推力器

Fig 1 Space thruster with Re and Ti alloy

### 2 材料焊接性分析

铼虽然具有较好的焊接性能,但是由于铼熔点很高,必须采用高能量密度的焊接方法(如电子束焊、激光焊和爆炸焊等)才能保证具有足够的熔深和冶金结合<sup>[6~8]</sup>;并且铼特别容易氧化,因此必须在严格的无氧气氛中进行焊接,才能防止铼材焊缝和热影响区的氧化,从而避免导致焊缝硬度升高及其脆化,高真空环境的电子束焊接是目前焊接铼材料的最佳选择。

钛及钛合金总体上属于焊接性良好,焊接作为钛合金加工中的重要手段,有着提高材料利用率、减轻结构质量、降低成本等方面独特的优势,因而一直是航空、宇航工业上应用的重要结构材料。由于钛合金极易受到 N、H、O 等元素的影响而产生脆化,因此高真空环境的电子束焊也是其进行连接的最佳选择。

从铼钛相图<sup>[9]</sup>可知,在靠铼侧焊缝熔合区会产生  $Ti_3Re_{24}$  化合物。由于焊缝接头中存在浓度差异,就不可避免地会产生  $Ti_3Re_{24}$  化合物,从而影响接头的塑韧性,严重时会产生裂纹。图 2 为铼钛接头断口

收稿日期:2006-05-15;修回日期:2006-08-30

作者简介:李仕民,1974年出生,高级工程师,主要从事航天材料高能束连接技术研究

SEM扫描照片。可以看出,二者接头脆化现象非常明显。

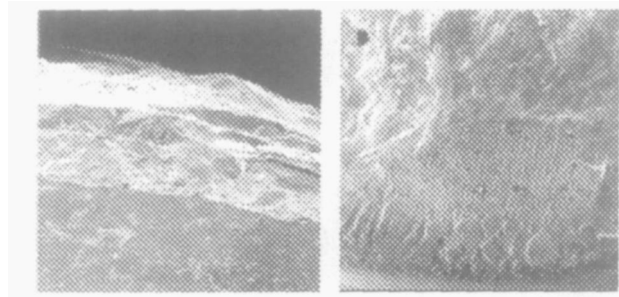


图 2 铼钛接头拉伸试验后 SEM断口形貌 200 ×

Fig 2 Fracture surface of Re and Ti after welding

### 3 控制措施

铼与钛合金接头脆性相主要为  $Ti_3Re_{24}$ ,脆化现象主要是由于接头元素梯度差异造成的,改善接头元素差异的方法较多,如改变电子束的扫描轨迹、改变接头焊接的冷却速度等,但最为有效的方法应该是在接头中增加新的元素。本文主要针对该方法开展接头脆性相控制的研究试验。

#### 3.1 确定加入元素

增加新的元素应该满足的原则如下:(1)加入元素与铼或钛都具有良好的冶金连接性能;(2)加入元素能保证产品的高温设计性能。

通过分析钼-铼的二元相图<sup>[10]</sup>以及钼-钛相图<sup>[9]</sup>可知,钼-铼合金是一种固溶合金,铼在钼中生成固溶体,在 2 250 时最大的溶解度为 53% (原子分数)Re左右,因此铼原子分数低于 53%的钼铼合金焊接性良好;而钼与钛之间无限互溶,可以形成无限固溶体组织,在靠近钛侧形成  $\beta$ -Ti固溶体,钼在  $\beta$ -Ti中的固溶度较低,在靠近钼侧形成钼的固溶体或  $\alpha$ -Ti固溶体。同时钼元素的熔点比钛高,因此采用钼作为中间层增加元素较为合适。

#### 3.2 中间层的配比

在对铼、钛基本性质进行分析的基础上,确定了 7种配比进行实验,以便获得最佳的中间层配比,达到抑制脆性相的目的。具体金属粉末配比见表 1。

表 1 合金粉末配比

Tab 1 Mixture ratio of powder

配方	% (质量分数)		
	Re	Mo	Ti
1#	80	8	12
2#	70	18	12
3#	60	28	12
4#	50	38	12
5#	40	48	12
6#	30	58	12
7#	20	68	12

### 3.3 中间层的制备

将不同配比量的铼粉、钼粉、钛粉用有机粘接剂和无水乙醇等混合后涂在钛合金试样基座上,经干燥固化后,进行真空电子束熔炼,使粉末材料与钛合金熔合作为中间层。粉末堆高见图 3。

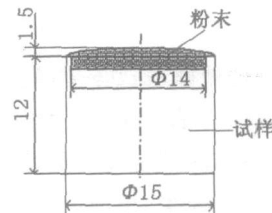


图 3 粉末堆高

Fig 3 Titanium alloy sample with powder

### 4 增加中间层后的接头焊接及分析

#### 4.1 接头电子束焊

熔炼好的中间层首先进行硬度测试,以确定中间层的机械加工性能;然后进行内部成分扫描,以验证中间层内部成分的均匀性及其是否存在脆性相。由于 5#配比具有较好的机械加工性能,其本身内部成分分布均匀并且无脆性相。因此将熔炼好的 5#中间层进行加工以达到需要连接的接头结构形式,然后进行真空电子束焊接。焊接规范为:能量占空比为 9:1,电子束对准焊缝,加速电压 60 kV,聚焦电流 598 mA,焊接速度 9.89 mm/s,真空室真空度  $2 \times 10^{-2}$  Pa,预热束流 4 mA,焊接束流 16 mA,重熔束流 8 mA。为了充分的润湿和保持良好的焊缝成形,焊接完成后进行一次重熔。焊接束流加载曲线如图 4 示。

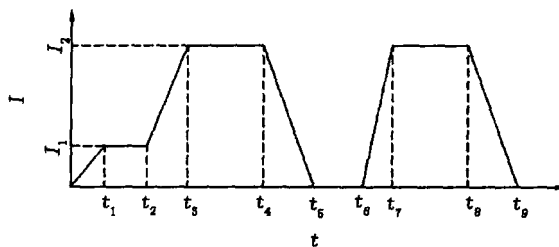


图 4 焊接过程焊接束流加载曲线示意图

Fig 4 Beam loading curve

#### 4.2 焊后分析

接头的外观质量焊缝成形良好,未发现裂纹等明显缺陷。内部质量则通过解剖进行截面成分扫描,以判断接头元素过渡是否均匀,同时可以根据元素的分布曲线判断是否有  $Ti_3Re_{24}$ 成分的相产生,即可知是否产生了脆性相。截面截取见图 5,扫描结果见表 2。

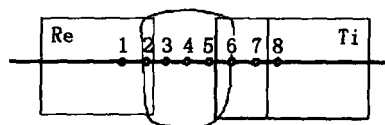


图 5 扫描截面示意图

Fig 5 Scanning section

表 2 截面化学成分测试结果  
Tab 2 Composition-testing result

测试点	% (质量分数)				
	Re	Ti	Mo	Al	Sn
1	100	-	-	-	-
2	81.82	10.87	7.31	-	-
3	55.82	32.73	11.45	-	-
4	44.06	40.09	13.52	2.33	-
5	38.38	44.98	14.23	2.42	-
6	15.22	60.11	19.70	4.67	-
7	-	83.94	3.84	8.98	3.23
8	-	85.42	2.70	8.81	3.07

从化学成分的扫描结果看出,元素过渡基本均匀,可以判断未出现脆性相。此外,还对焊缝进行了XRD分析,得到的衍射图谱见图6。从图谱中可以看出,焊缝组织为单相 $\beta$ -Ti固溶体组织,Mo和Re均为Ti的稳定化元素,因此形成了 $\beta$ -Ti单相固溶体,没有产生第二相或金属间化合物脆性组织。

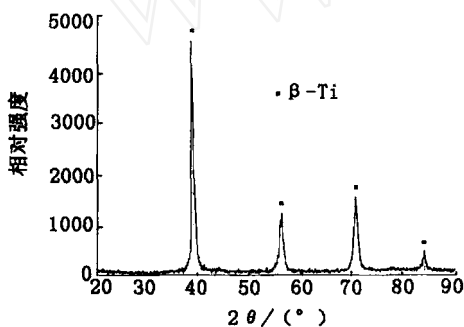


图 6 铼钛 EBW 接头焊缝 XRD 图谱  
Fig 6 X-ray diffraction pattern of welding joint

此外,对接头进行了包括气密、液压以及拉伸等相关验证试验,试验结果证明接头性能能够满足产品设计要求。

## 5 结论

(1)通过分析 Mo - Re, Mo - Ti相图,设计调整粉末配比,并进行电子束熔炼制备中间层,确定了采用钼作为添加元素制备中间层的方案可行。

(2)通过制定相应的电子束焊接规范,设定束流加载曲线,进行了增加电子束熔炼制备的中间层进行铼钛接头的电子束焊接试验。对焊后的接头进行截面成分扫描分析,表明了采用添加中间层焊接的接头焊缝元素过渡均匀,未出现脆性相;通过对接头的XRD分析,可知焊缝组织为 $\beta$ -Ti单相固溶体,证明没有脆性相产生。

(3)增加了中间层的铼钛电子束焊接头通过了气密、液压以及拉伸等相关验证试验,能够满足产品设计要求。

综上所述,采用添加中间层进行铼钛接头电子束连接可以有效阻止脆性相的形成。

## 参考文献

- 1 陈健. 燃烧室新材料在卫星双组元低推力发动机上的应用. 航天控制, 2001; (4): 8
- 2 许菱, 许孙曲. 高熔点金属的新应用. 稀有金属快报, 2000; (11): 15 ~ 16
- 3 李曙光. 难熔金属应用几例. 航天工艺, 1996; (3): 40
- 4 胡德昌, 胡滨. 航天航空用新材料 难熔金属及其合金. 航天工艺, 1996; (3): 34 ~ 40
- 5 Stechman C, Woll P, Fuller R et al. A high performance liquid rocket engine for satellite main propulsion. AIAA, 2000 - 3161
- 6 Reed B D, Biaglow J A. Rhenium mechanical properties and joining technology. NASA Technical Memorandum 107317, AIAA 96 2598
- 7 John O M, Dan J T, Gary K L. Directed light fabrication of rhenium components: materials science and technology division. NM 87545, 1987
- 8 Donald J, Butler S. Joining and fabricating rhenium using explosive metal working techniques. Project Engineer, WA 98382, 1998
- 9 葛志明. 钛的二元素相图. 北京: 国防工业出版社, 1977
- 10 Villars P, Prince A, Okamoto H. Handbook of ternary alloy phase diagrams. Materials Park: ASM International, 1995

(编辑 任涛)