

# 空间环境对 LF6 铝合金焊接接头性能的影响<sup>\*</sup>

牛济泰 范东亮 郭伟 许增伟 郭永良

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**文 摘** 采用真空热循环试验装置,模拟近地轨道空间环境,研究了 LF6 铝合金焊接接头拉伸性能和微观组织,分析讨论了真空热循环对焊接接头的影响规律。结果表明:焊接接头强度和塑性变化呈现峰值规律,在循环 75 次左右,达到最大值;晶粒尺寸及位错形貌的变化是接头拉伸性能变化的原因。

**关键词** LF6 铝合金,焊接接头,真空热循环,拉伸性能

## Effect of Space Environment on Properties of LF6 Aluminium Alloy Weld Joint

Niu Jitai Fan Dongliang Guo Wei Xu Zengwei Guo Yongliang

(College of Materials and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** The tensile properties and microstructure of LF6 aluminum alloy weld joint under simulating near-earth space environment are studied by means of vacuum thermal cycling system. The influence of vacuum thermal cycling on the tensile properties of the weld joint is investigated. The strength and the elongation reach their maximum values at about 75 times of cycling. The changes of the tensile properties are resulted from the changes of grain size and the motion of dislocations.

**Key words** LF6 aluminum alloy, Weld joint, Vacuum thermal cycling, Tensile property

### 1 前言

航天器的某些构件,如燃料箱、太阳能电池帆板等,都采用铝合金焊接结构。众所周知,焊接接头是金属结构中最薄弱的部位,研究焊接接头的可靠性是评判整个结构质量与安全可靠性的关键。航天器在绕地球进行近地空间飞行过程中,焊接接头处在比较恶劣的空间环境中。近地空间环境的主要特征是微重力、空间真空和阳阴面温差,同时原子氧与离子氧对材料的腐蚀,太阳紫外线、地球辐射带的质子与电子等对材料的侵害,以及自然陨石微粒和空间碎片等对焊接结构的碰撞等,都是影响接头强度甚至导致接头失效的重要因素。

针对近地空间环境下铝合金焊接接头失效机理分析及可靠性评估的研究,将为航天器设计部门与生产厂家提供重要的技术依据和技术资料,从而可大大降低航天器制造成本,并提高航天器运行的安全可靠性能。

目前,对于空间环境下接头性能变化的研究,主要停留在材料受离子辐照时表面性能退化和在低温疲劳环境下接头脆化这两个方面的研究<sup>[1,2]</sup>。而对焊接接头在空间环境下疲劳寿命的研究,在国内外尚未见报道。针对航天器在近地空间环境下,绕地球飞行时每一圈有 80 K~400 K 的温差。本文主要模拟在该温度环境下,航天器在绕地球长期运行时

收稿日期:2003-11-12

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助:90 205 035

牛济泰,1941 年出生,博士生导师,主要从事新材料焊接性能及先进焊接工艺研究工作

LF6 铝合金焊接接头性能的变化,并分析其变化机理,为进一步建立环境参数与接头性能之间的数学模型创建条件,空间环境其他参数对接头性能的影响将在另文进行讨论。

## 2 试验

### 2.1 材料

材料为 LF6 铝合金板材,标准号 CB3190—82,厚度 3 mm,化学成分见表 1。按 GB/T2651—1989 标准,将被焊板材加工为拉伸试样。

表 1 LF6 化学成分

Tab. 1 Chemical composition of LF6

% (质量分数)							
Al	Mg	Mn	Ti	Fe	Si	Zn	Cu
余量	6.07	0.30	0.044	0.4	0.4	0.2	0.1

### 2.2 焊接试验

焊接工艺参数(填充金属为 LF6 同质)见表 2。

表 2 焊接工艺参数

Tab. 2 Weld technology parameters

焊丝直径 /mm	钨极直径 /mm	喷嘴直径 /mm	焊接电流 (交流)/A	送丝速度 /mm min <sup>-1</sup>	氩气流量 /L min <sup>-1</sup>
3	2.5	8	120~130	60~70	7

### 2.3 真空热循环试验

空间热环境模拟试验利用了真空热循环模拟试验装置。该机由主机部分、低温真空炉和微机控制系统组成,另外还配有一套液氮冷却系统。循环周期在 50 min~90 min 内连续可调;温度为 77 K~400 K;最大真空度可达 10<sup>-7</sup> Pa。采用计算机系统实施温度控制和热循环的自动转换。温度循环范围选为 77 K~400 K,周期为 90 min,考虑到热惯性,在最高和最低温度分别保温 5 min,真空度 10<sup>-3</sup> Pa~10<sup>-5</sup> Pa,图 1 为热循环工艺图。

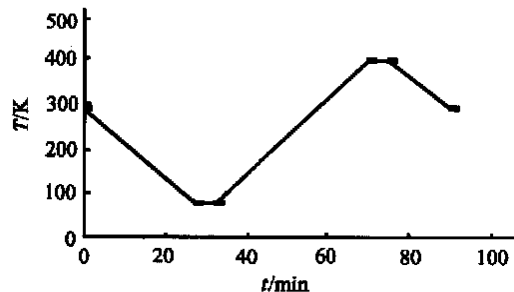


图 1 热循环工艺图

Fig. 1 Thermal cycling procedure diagram

### 2.4 金相组织分析与透射电镜观察

将拉伸试验后断裂的试样制成金相试样,采用多种混合侵蚀剂(按体积分数混合),HF 0.5%、HCl 1.5%、HNO<sub>3</sub> 2.5%、H<sub>2</sub>O 95.5%。在 Olympus PM-10ADS 立式金相显微镜观察合金的金相组织变化;配制 7%高氯酸酒精溶液,对经过磨薄的试样(厚度约 1 mm 左右)进行双喷减薄,在试样未被穿透前(厚度约 0.1 mm 左右),再移至离子减薄机上进行离子减薄,制成透射电镜观察所需样品,在 JEM-2000 透射电子显微镜上观察分析合金的位错组态变化。

## 3 结果及讨论

### 3.1 接头力学性能变化

#### (1) 接头拉伸应力—应变曲线

试验选用了循环 0 次、25 次、50 次、75 次、100 次、200 次、300 次等七种试件进行拉伸,为了更清楚地说明真空热循环后接头性能的变化趋势,选取 0 次、75 次、300 次循环时的拉伸应力—应变曲线进行比较,如图 2 所示。在循环 75 次时,LF6 铝合金焊接接头性能较循环 0 次时有很大升高,待循环到 300 次时,拉伸性能又重新降低。可见在真空热循环环境中 LF6 铝合金接头拉伸性能先升高后又降低,性能变化存在峰值规律。

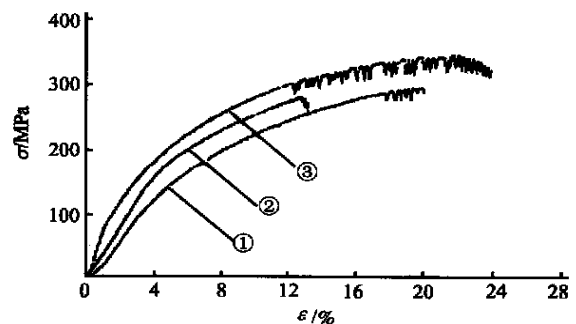


图 2 LF6 铝合金焊接接头真空热循环拉伸应力—应变曲线

Fig. 2 Tensile stress-strain curve of LF6 aluminum alloy weld joint under vacuum thermal cycling  
循环 300 次; 循环 0 次; 循环 75 次。

#### (2) 接头强度和塑性的变化规律

LF6 铝合金焊接接头强度与延伸率随热循环周次的变化如图 3 所示,接头的性能变化呈现峰值规律。

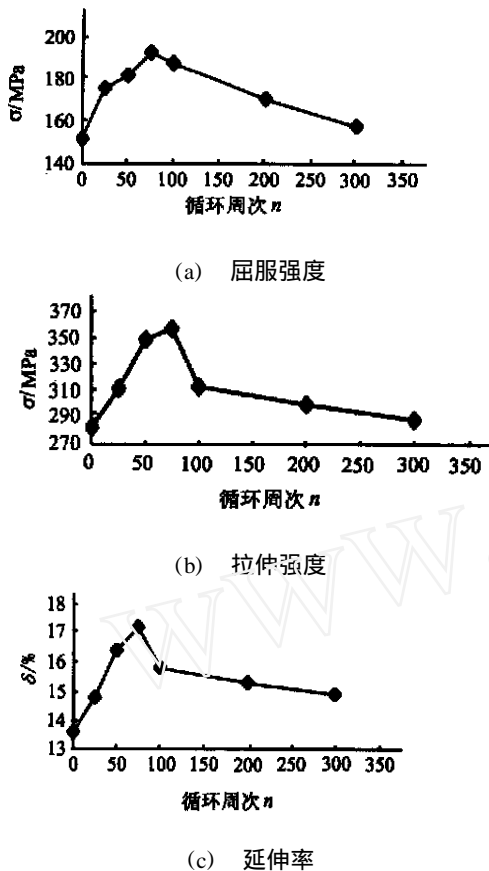
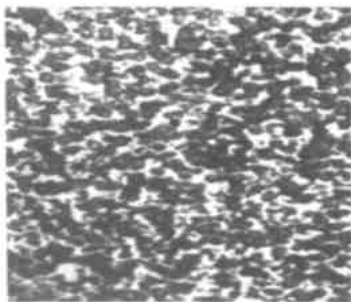


图3 LF6 铝合金焊接接头强度与延伸率随热循环周次变化曲线

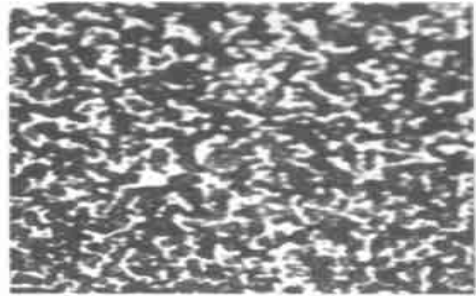
Fig. 3 Change of LF6 aluminum alloy weld joints strength and elongation with thermal cycling times

### 3.2 接头金相组织的变化

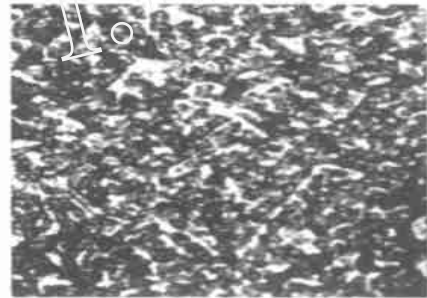
图4为真空热循环后拉伸试样断口附近的金相组织照片。可见,随着循环周次的增加,合金组织逐渐变细,并在循环75次左右达到峰值,此时组织最细,见图4(b);此后,循环次数继续增加,组织又逐渐变粗如图4(c),在循环300次时,组织更加粗大见图4(d)。



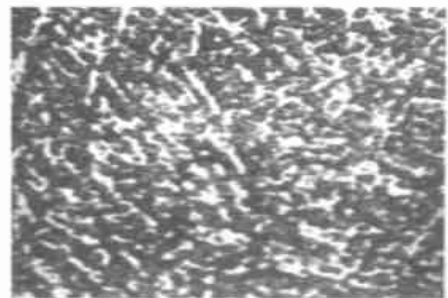
(a) 循环0次



(b) 循环75次



(c) 循环200次



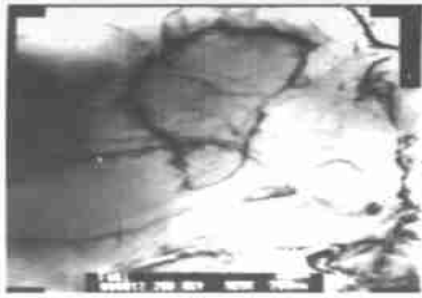
(d) 循环300次

图4 真空热循环后拉伸试样断口附近的金相组织 200 ×

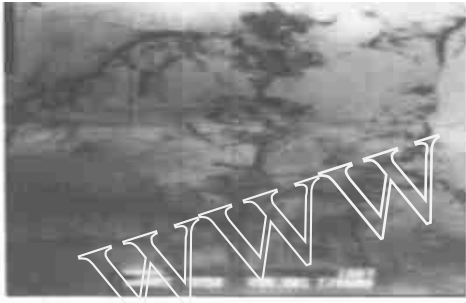
Fig. 4 Metallurgical structures around tensile fracture after vacuum thermal cycling

### 3.3 接头位错组态的变化

图5为接头的位错组态照片。图5(a)为循环25次时的位错组态,位错密度较小;在循环次数达到75次时,位错密度最大[见图5(b)];图5(c)为循环200次之后,位错聚集成位错墙;图5(d)为循环300次后的组态,位错聚集成位错墙,新的亚晶形成,晶粒粗大,内部位错密度大大减小。



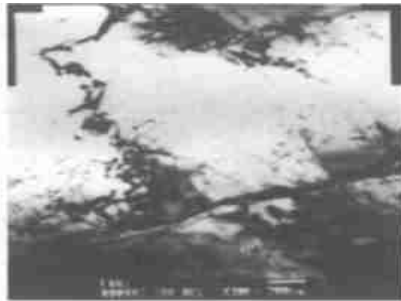
(a) 循环 25 次



(b) 循环 75 次



(c) 循环 200 次



(d) 循环 300 次

图 5 LF6 铝合金焊接接头热循环条件下的位错组态 20 000 ×

Fig. 5 Dislocation configuration of LF6 aluminum alloy weld joint after thermal cycling

### 3.4 接头力学性能变化机理

宇航材料工艺 2004 年 第 1 期

#### (1) 组织变化

图 4 表明,在循环 75 次之前,随着循环的进行,接头组织逐渐变细;在循环 75 次时,接头的组织最为细小;循环 75 次~300 次之间,晶粒又逐渐变粗。根据霍尔—佩奇(Hall-Petch)公式:

$$\sigma_s = \sigma_i + Kd^{-\frac{1}{2}}$$

式中,  $\sigma_i$ 、 $K$  是与材料有关的常数,  $d$  为晶粒平均直径。此时合金接头的性能与晶粒的大小密切相关,随着晶粒尺寸的变细,接头力学性能就会升高,之后因为晶粒逐渐变粗,焊接接头的强度和韧性又会下降。关于晶粒尺寸在真空热循环下的变化机理有待进一步深入研究。

#### (2) 位错运动

LF6 铝合金具有较低的层错能,在热循环过程中,由于高低温间的交替变化,使得合金内部产生热应力,导致合金内局部发生热变形。热变形时位错增殖与位错相互抵消和重组之间出现动态平衡,呈现稳态流变特征<sup>[3,4]</sup>。真空热循环前期,位错密度上升,导致接头性能提高;循环后期,热变形过程中由于热应力作用而使材料软化,性能又逐渐下降。LF6 铝合金热变形后期的特征是位错密度降低:LF6 铝合金热循环时试件内部产生的热应力,导致位错运动,同一滑移面上的异号位错相互抵消,同号位错聚集成墙,从而出现了亚结构的特征<sup>[4~6]</sup>。

根据 F-R 位错源增殖机制<sup>[3]</sup>,如图 6 所示:设在滑移面上有一段位错,其两端点被钉住[图 6(a)]。由于位错具有的弹性能使得位错具有线张力,线张力使位错线尽量缩短。在热应力作用下,位错线将发生弯曲,见图 6(b)、(c)。随着位错线的弯曲,在达到图 6(d)所示程度时,钉轧点下方的两段符号相反的位错相遇并相互抵消,使得位错分成了两个部分,其一是闭合线圈,另一部分又重新成为位错源见图 6(f)。如此重复作用下,就会在滑移面上不断产生位错圈,这样晶体内部的位错密度就会不断增大。这种位错圈在力的作用下将逐个地移到晶体表面形成滑移阶,晶体便会发生可以观察到的宏观塑性变形。

位错是晶体中最主要的缺陷形式,85%的应变能存储在位错中,位错密度越大,应变能越大。位错间存在应力场,位错通过应力场相互作用;因此位错

密度增加,使得位错运动阻力相应增加,表现在拉伸时所需要的应力就会增大。从另一个角度来说,位错数量增加,位错间的相对运动就会形成割阶(相互成一定角度的位错的交互作用)、会合位错(两个滑移面上不相互平行的位错之间相遇而形成)等位错障碍,使得位错滑移所需要的应力增大。

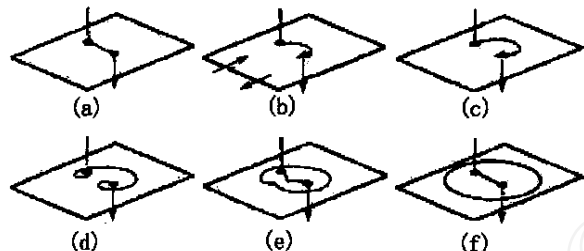


图6 F-R位错增殖机制

Fig.6 F-R dislocation multiplication mechanism

LF6 铝合金焊接接头在热循环前期所积累的变形存储在循环后期可能导致接头微观组织局部区域发热软化。同一滑移面上的异号位错在热应力产生的激活作用下,相互吸引、会聚而消失,不在同一滑移面上的异号刃形位错则通过空位凝聚消除半原子面或空位逃逸制造半原子面而消失。因而,在循环超过 75 次后,晶内位错密度开始下降,见图 5 (d);循环 300 次时,同号位错迭加,开始形成明显的位错墙,境内位错密度显著下降。由于位错密度的不断下降,以及亚晶粒的生成长大,导致了在热循环次数超过 75 次后,LF6 铝合金焊接接头的拉伸强度和延伸率不断下降。

#### 4 结论

(1) 真空热循环对 LF6 铝合金焊接接头的拉伸性能影响很大,随着热循环次数的增加,接头的屈服强度、拉伸强度和延伸率呈现峰值变化规律,在循环 75 次左右达到峰值。

(2) 真空热循环拉伸试样金相组织观察表明:焊接接头组织晶粒变化呈现峰值规律,随着循环次数的增加,晶粒逐渐变细,在循环 75 次左右时,晶粒最细;然后又逐渐变粗。位错组态表明:随着循环次数的增加,位错密度不断上升,循环 75 次左右达到峰值,焊接接头强度和塑性达到最大值。超过循环 75 次之后,随循环次数的增加,逐步形成位错墙,导致强度下降。

#### 参考文献

- 1 Heinz A et al. Recent development in aluminum alloy for aerospace application. *Materials Science and Engineering*, 2000; 280 (1): 126 ~ 135
- 2 Ehrstrom J C, Warner T. Metallurgical design of alloys for aerospace structures. In: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference ICAA*, 2000: 28 ~ 33
- 3 潘金生, 仝健民, 田海波. 材料科学基础. 清华大学出版社, 2001: 266 ~ 269
- 4 沈健, 唐京辉, 谢永生. Al-Zn-Mg 合金的热变形组织演化. *金属学报*, 2000; 10(36): 1 033 ~ 1 036
- 5 吴运学等. 碳化硅/铝复合材料热循环损伤的初步研究. *宇航材料工艺*, 1992; 22(4): 62 ~ 66
- 6 Hatherly M. Recrystallization and related annealing. Pergamon Press, 1995: 379 ~ 385

(编辑 李洪泉)

## 《宇航材料工艺》征订启事

还未订阅 2004 年《宇航材料工艺》的各界朋友请速来编辑部订阅。

刊号 CN 11—4824/V, 国际标准刊号 ISSN 1007—2330, 双月刊 64 页, 国际大 16 开本, 激光照排, 逢双月出版, 每期 10.00 元, 全年 60.00 元。

信汇至开户银行: 北京市工商银行方庄支行东高地分理处; 户名: 七〇三所; 帐号: 0200006509014409480 (务必将订单与银行回执复印件寄回)

邮汇至编辑部, 地址: 100076 北京市 9200 信箱 73 分箱 18 号, 电话 68383269