

# 航天用铝合金/焊丝焊接性研究

焦好军 周炼刚 王明正 程昊 张志勇

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**文 摘** 针对 2A14、2219、2195、2A97、1460 铝合金, 通过焊接热模拟试验、焊接裂纹敏感性试验和拉伸试验, 建立了材料脆性温度区间大小和焊接性的关系及焊丝主成分和焊接性的关系。结果表明, 试验合金焊接性从好到差的排列顺序为 2219、2A14、1460、2195、2A97。其中 2A14、2219 铝合金现用焊丝可以满足推进剂贮箱用铝合金焊接性要求。脆性温度区间较小时, 焊接性良好, 随脆性温度区间增加, 焊接性变差; 采用满足主成分含量之和为 6% 的焊丝焊接时, 若抗裂性满足要求, 则接头延伸率满足要求。

**关键词** 铝合金, 焊接裂纹敏感性, 接头延伸率

## Weldability of Aluminum Alloys/Filler for Aerospace

Jiao Haojun Zhou Liangang Wang Mingzheng Cheng Hao Zhang Zhiyong

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Through experiments of welding thermo-simulation, welding crack sensitivity and tension on aluminum alloys marked 2A14, 2219, 2195, 2A97, 1460, relationships between BRT and weldability, total content of main elements in welding wire and weldability are established. Results show that the less BRT, the better weldability; when 6% of total content of main element is used in the welding wire, joint elongation will be eligible if the ability anticrack is good. Rank of weldability is 2219, 2A14, 2195, 2A97.

**Key words** Aluminum alloys, Welding crack sensitivity, Joint elongation

### 0 引言

铝合金在航天金属材料中占有重要位置, 运载火箭贮箱、卫星贮箱、管路系统等航天主体结构都采用铝合金焊接结构。铝合金在航天推进剂贮箱的应用可以分为三代, 第一代为我国目前正在使用的 2A14 铝合金; 第二代为大型运载火箭要采用的 2219 铝合金; 第三代为重运载将要采用的高强铝锂合金, 以 2195、2A97 和 1460 为代表。

良好的焊接性是铝合金用于推进剂贮箱焊接结构的前提, 通常推进剂贮箱用铝合金焊接性应满足下列要求: (1) 裂纹敏感性满足  $K_1 < 10\%$ ,  $K_2 = 0$ ; (2) 接头室温、 $-196^\circ\text{C}$  下延伸率  $\delta_5 > 3.0\%$ ; (3) 接头强度系数  $n > 0.5$ 。

本文通过焊接热模拟研究了 2A14、2219、2195 和 2A97 铝合金的裂纹敏感性, 并通过实际焊接研究材料和焊丝联合使用的焊接性。

### 1 试验

#### 1.1 材料

2A14、2219、2195、2A97、1460 铝合金的热处理状态及配用焊丝见表 1。几种铝合金化学成分见表 2。试板焊前经过酸洗、打磨处理。

表 1 几种铝合金热处理状态及配用焊丝

Tab. 1 Heat treatment condition and the match welding wire of aluminum alloys

合金牌号	板厚/mm	热处理状态	焊丝
2A14	2.5	T6	BJ-380C
2219	4	T87	2325
2195	2	T6	H2195
2A97	2	T6	2407
1460	2	T6	BJ-380A、2325

收稿日期: 2013-03-15; 修回日期: 2013-04-25

作者简介: 焦好军, 1962 年出生, 研究员, 主要从事铝合金、钛合金焊接材料及工艺研究。E-mail: jiaohaojun@yahoo.com.cn

表 2 几种铝合金化学成分

Tab.2 Nominal chemical composition of aluminum alloys

wt%

牌号	Cu	Si	Mn	Mg	Zr	Li	其他	Al
2A14	3.9~4.8	0.9~1.2	0.4~1	0.4~0.8	-	-	Zn:0.3 Fe:0.7	Bal
2219	5.8~6.8	-	0.2~0.4	≤0.02	0.1~0.25	-	Ti:0.02~0.1	Bal
2195	3.7~4.3	-	-	0.25~0.8	0.08~0.16	0.8~1.2	Ag:0.25~0.6	Bal
2A97	2.3~3.0	0.035	-	0.25~0.8	0.25~0.6	1.3~1.9	-	Bal
1460	2.5~3.5	-	-	-	0.12	1.9~2.5	Sc:0.1~0.2	Bal

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 焊接热模拟试验

采用 Gleebe 动态热-力学模拟试验机测定材料的脆性温度区间(BTR),零强度温度(ZST)可直接测定,零塑性温度可通过测定热塑性曲线获得。

### 1.2.2 焊丝焊接性试验方法

标准十字搭接焊接裂纹敏感性试验方法,标准拉伸试验,不去除余高。

## 2 结果和分析

## 2.1 焊接热模拟试验

### 2.1.1 脆性温度区间

2A14、2219、2195 及 2A97 的 ZST 分别为:593、592、594 和 613℃。图 1 为 4 种合金的热塑性曲线。表 3 为 4 种铝合金的脆性温度区间 BTR。由表 3 可知,按脆性温度区间由大到小排列 4 种合金的顺序为:593、592、594 和 613。2A97、2195、2A14、2219, BTR 越大焊接裂纹敏感性越大。

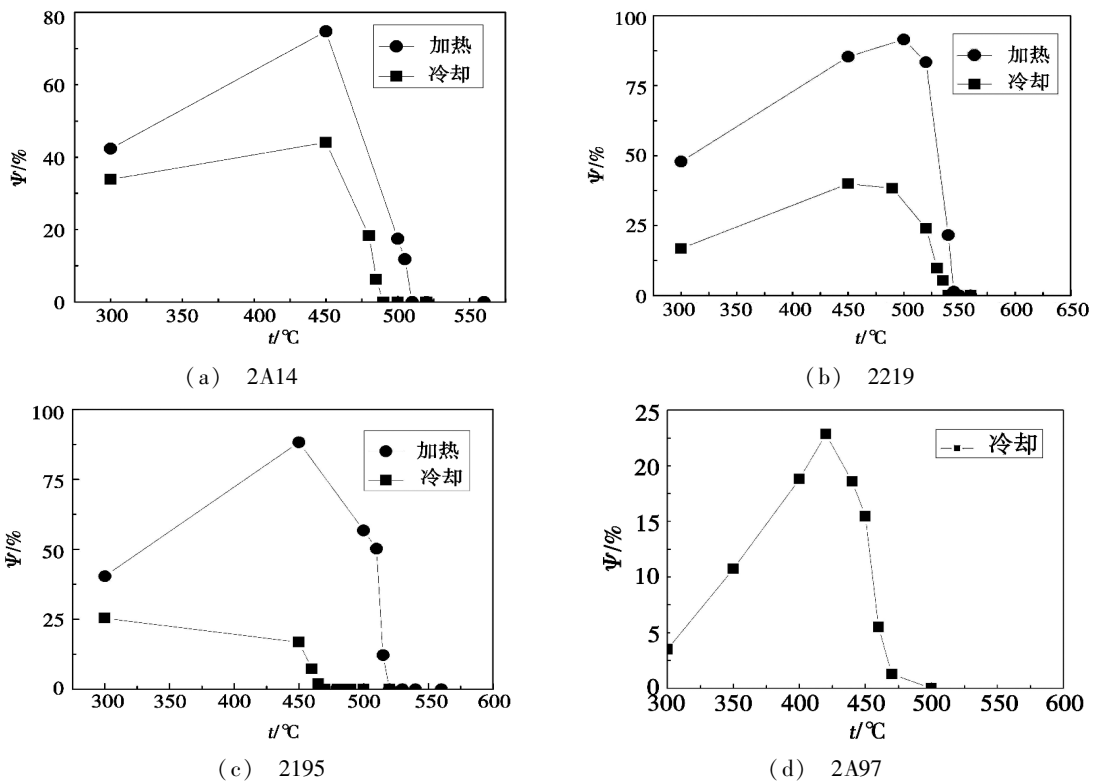


图 1 几种铝合金的热塑性曲线

Fig.1 Thermal plasticity curves of aluminum alloys

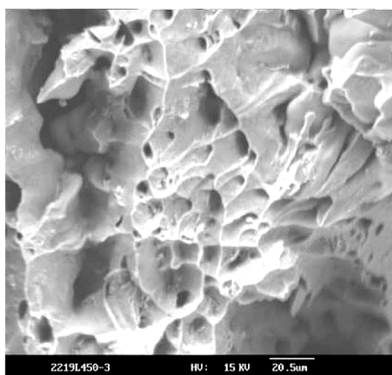
表 3 几种材料的脆性温度区间

Tab.3 Brittle temperature range °C

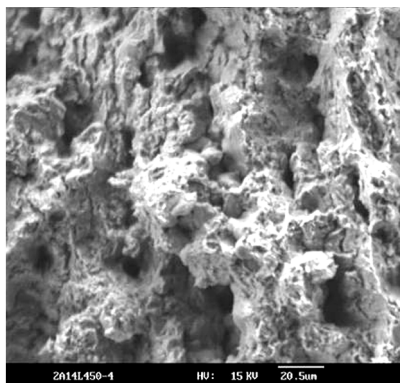
牌号	零塑性温度		ZST	BTR
	加热	冷却		
2A14	510	490	593	103
2219	550	540	592	52
2195	520	470	594	124
2A97	-	470	613	143

### 2.1.2 热塑性冷却过程断口形貌

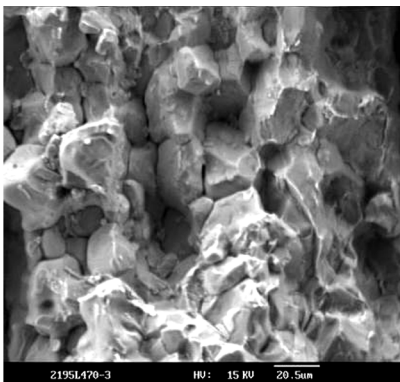
图 2 为热塑性曲线测试时冷却至 450℃ 拉断后的断口形貌。试样经历焊接热循环冷却至 450℃,由图 2 可知,(1)2219 铝合金塑性完全恢复,断口为韧窝形貌;(2)2A14 铝合金塑性未完全恢复,断口为“泥巴”形貌;(3)2195 铝锂合金塑性未恢复,断口为“岩石”形貌;(4)2A97 铝锂合金断口出现“土豆”形貌。说明在试验拉应力作用下,经历焊接热循环作用会产生液化裂纹,抗裂性从好到差排列为:2219、2A14、2195 和 2A97,和 BTR 的结果一致。



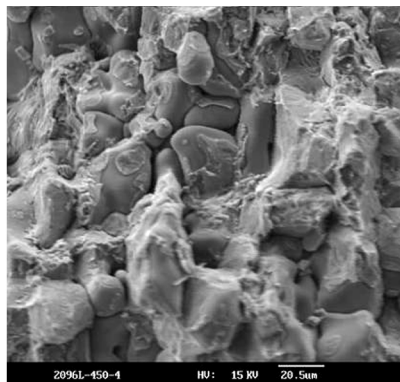
(a) 2219



(b) 2A14



(c) 2195



(d) 2A97

图2 高温冷却至450℃断口形貌

Fig.2 SEM photographs showing the fracture morphology at 450°C

## 2.2 2A14/BJ-380C 焊接性试验结果及分析

### 2.2.1 焊接裂纹敏感性

2A14/BJ-380C 十字搭接焊接裂纹敏感性  $K_1 = 6.5\%$ ,  $K_2 = 0$ , 满足  $K_1 < 10\%$ ,  $K_2 = 0$  的要求。

### 2.2.2 拉伸性能

表4为2A14/BJ-380C 手工氩弧焊接头拉伸性能。由表4可知, 2A14/BJ-380C 接头满足室温、-196℃下  $\delta_5 > 3.0\%$ , 接头强度系数  $n > 0.5$  的要求。

表4 2A14/BJ-380C 手工氩弧焊接头拉伸性能

Tab.4 Tensile properties of manual TIG welded 2A14/BJ-380C joint

$t/^\circ\text{C}$	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	冷弯角/ $^\circ$
常温	258	324	4.7	29.5~32
-196	267	413	5.4	-
-253	-	445	2.9	-

## 2.3 2219/2325 焊接性试验结果及分析

### 2.3.1 焊接裂纹敏感性

2219/2325 十字搭接焊接裂纹敏感性  $K_1 = 1.2\%$ ,  $K_2 = 0$ , 满足  $K_1 < 10\%$ ,  $K_2 = 0$  的要求。

### 2.3.2 拉伸性能

表5为2219/2325 变极性氩弧焊接头拉伸性能,

由表5可知, 2219/2325 接头满足  $\delta_5 > 3.0\%$ ,  $n > 0.5$  的要求。

表5 2219/2325 变极性氩弧焊接头拉伸性能

Tab.5 Tensile properties of VPTIG welded 2219/2325 joint

$t/^\circ\text{C}$	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$
常温	140	282	5.1
-196	-	344	4.4
-253	267	380	3.6

## 2.4 2195、2A97、1460 铝锂合金焊接性

### 2.4.1 2195/H2195 焊接性

#### 2.4.1.1 焊接裂纹敏感性

2195/H2195 十字搭接焊接裂纹敏感性  $K_1 = 3.1\%$ ,  $K_2 = 0$ 。满足焊接裂纹敏感性要求。试样见图3。

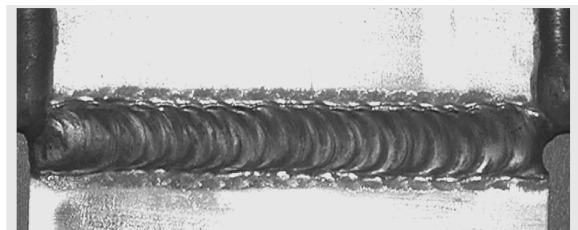


图3 2195/H2195 十字搭接焊缝

Fig.3 Intercrossed lap joints of 2195/H2195

### 2.4.1.2 拉伸性能

2195/H2195 接头拉伸强度平均值为 336 MPa, 母材强度值取 570 MPa,  $n$  为 0.59,  $\delta_5$  为 2.3%, 不满足  $>3\%$  的要求。图 4 为 2195/H2195 接头组织, 可知, 接头组织正常。A 部位 AlSi 相, B 部为 AlSiCu 相, C 部为  $Al_2Cu$  相。

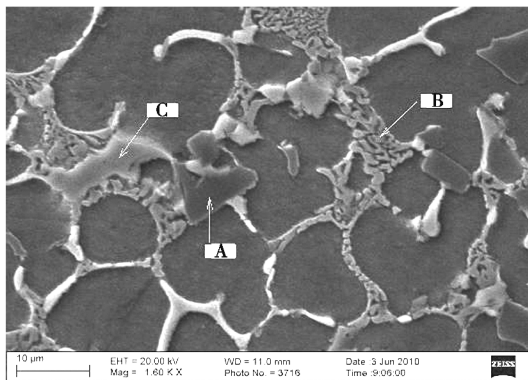


图 4 2195/H2195 焊缝组织

Fig. 4 Microstructure of 2195/H2195 welded joint

图 5 为 2195/H2195 接头拉伸断口, 接头呈偏脆性断裂特征。

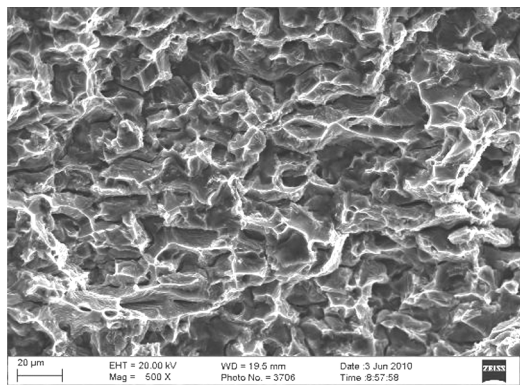


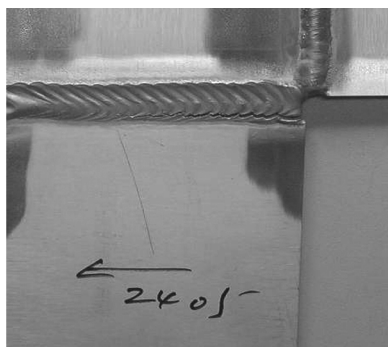
图 5 2195/H2195 接头拉伸断口

Fig. 5 Fracture morphology of 2195/H2195 welded joint

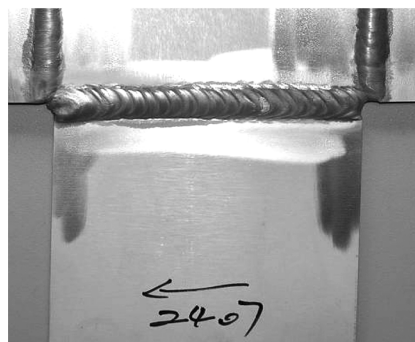
### 2.4.2 2A97/2407 焊接性

#### 2.4.2.1 焊接裂纹敏感性

2A97/2407 十字搭接裂纹敏感性  $K_1 = 0.8\%$ ,  $K_2 = 0$ 。满足焊接裂纹敏感性要求。试样见图 6。



(a) 2A97



(b) 2407

图 6 2A97/2407 十字搭接焊缝

Fig. 6 Intercrossed lap joints of 2A97/2407

### 2.4.2.2 拉伸性能

2A97/2407 接头拉伸强度平均值为 335 MPa, 母材强度值取 570 MPa,  $n=0.59$ ,  $\delta_5$  为 1.2%, 不满足  $>3\%$  的要求。图 7 为 2A97/2407 接头组织。

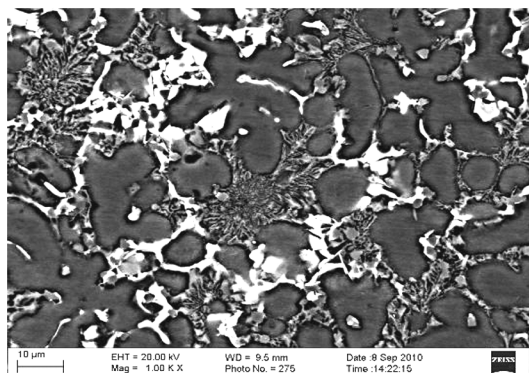


图 7 2A97/2407 焊缝组织

Fig. 7 Microstructure of 2A97/2407 joint

由图 7 可知, 接头组织正常。图 8 为 2A97/2407 接头拉伸断口, 接头呈偏脆性断裂特征。

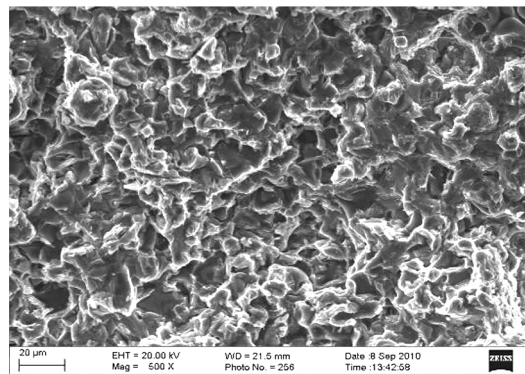


图 8 2A97/2407 接头拉伸断口

Fig. 8 Fracture morphology of 2A97/2407 joint

### 2.4.3 1460 铝锂合金焊接性

选用现有焊丝 BJ-380A 和 2325, 手工氩弧焊, 十字搭接裂纹敏感性试验结果见表 6。可知, 采用 BJ-380A 焊丝焊接 1460 铝锂合金裂纹敏感性很大, 采用 2325 的较低, 特别是十字搭接的前 2 条焊缝未出现液化裂纹, 说明 1460 铝锂合金采用 2325 类焊丝满足



技术要求是有前景的。

表 6 1460 十字搭接裂纹敏感性  
Tab. 6 Crack tendency of 1460

焊丝	结晶裂纹长度/mm	液化裂纹长度/mm	$K_1/\%$	$K_2/\%$	
BJ-380A	第一道	0	第一道	70	
	第二道	0	第二道	70	
	第三道	0	第三道	75	
	第四道	0	第四道	30	
	总长	0	总长	245	0
2325	第一道	0	第一道	0	
	第二道	10	第二道	0	
	第三道	5	第三道	15	
	第四道	5	第四道	25	
	总长	20	总长	40	5

## 2.5 讨论

### 2.5.1 焊丝主合金元素含量和焊接性的关系

纵观已经工程使用的铝合金焊丝,具有一个共同的经验性规律:主合金元素含量之和为 6wt%。

如焊接 5A06 的焊丝 5B06 含 Mg 量为 6wt% ;焊接 2219 铝合金的焊丝 2319/720 含 Cu 量为 6wt% ;焊接 2A14 铝合金的焊丝 BJ380 为 4wt% Cu+2% Si, BJ-380A 为 2wt% Cu+4wt% Si, BJ-380B 为 3wt% Cu+3wt% Si; BJ-380C 和 2325 焊丝也符合这一规律。

符合这一规律的焊丝若抗裂性满足要求,则  $\delta_5$  和  $n$  满足要求。即:

$$\sum_{i=1}^n X_i = 6\%$$

$$\text{且, } K_1 < 10\%, K_2 = 0$$

$$\text{则, } \delta_5 > 3.0\%; n > 0.5$$

式中,  $X_i$  为焊丝中第  $i$  种主合金元素含量。

若不符合这一规律,分 2 种情况:(1) 主合金元素含量之和 < 6wt%, 抗裂性不易满足要求,但  $\delta_5$  和  $n$  较高;(2) 主合金元素含量之和 > 6wt%, 抗裂性易满足要求,但  $\delta_5$  比较低,  $n$  一般会满足要求。

第一种情况由于抗裂性不满足要求,一般不会形成工程上使用的焊丝;第二种情况虽然  $\delta_5$  较低,可能会形成焊丝, H2195 和 2407 焊丝属于这种情况。显然,能够满足工程应用的焊接接头  $\delta_5$  的最低值的确定是非常重要的,目前航天工程上确定  $\delta_5 \leq 3.0\%$ 。

### 2.5.2 脆性温度区间和焊接性的关系

表 7 为脆性温度区间和焊接性的关系,由表 7 可知,脆性温度区间越大,焊接性越差。脆性温度区间较小时,采用满足  $\sum_{i=1}^n X_i = 6\%$  条件的焊丝即可获得满

足要求的焊缝,如 2219 和 2A14 铝合金;脆性温度区间较大时,采用满足  $\sum_{i=1}^n X_i = 6\%$  条件的焊丝难以获得满足要求的焊缝,主要表现为抗裂性和  $\delta_5$  难以兼顾,如 2195 和 2A97 铝合金。

1460 铝锂合金采用满足  $\sum_{i=1}^n X_i = 6\%$  条件的焊丝焊接虽然  $K_1$ 、 $K_2$  不满足要求,由于十字搭接的第一条和第二条焊缝满足要求,在拘束应力较小时是可以工程应用的。可以认为 1460 铝锂合金的焊接性优于 2195 和 2A97。

一般理论认为,脆性温度区间越大,焊接裂纹敏感性越大。但铝锂合金的焊接试验结果证明,这一理论并不准确,脆性温度区间大,通过调整焊丝成分可使焊接裂纹敏感性不大,但焊接性并不好,准确描述应是脆性温度区间越大,焊接性越差。

表 7 脆性温度区间和焊接性的关系

Tab. 7 Relationship between BTR and weldability

合金及焊丝	BTR/°C	$K_1/\%$	$K_2/\%$	$\delta_5/\%$
2219/2325	52	1.2	0	>3.0
2A14/BJ-380C	103	6.5	0	>3.0
2195/H2195	124	3.1	0	2.3
2A97/2407	143	0.8	0	1.2
1460/2325	-	5.0	10.0	-

## 3 结论

(1) 2A14/BJ-380C、2219/2325 满足推进剂贮箱用铝合金焊接性要求。

(2) 2195、2A97 等铝锂合金脆性温度区间较大,焊接性较差,现有 H2195、2407 焊丝可解决抗裂性要求,但  $\delta_5$  较低。

(3) 已经工程使用的铝合金焊丝,具有一个共同的经验性规律:主合金元素含量之和为 6wt%。

(4) 铝合金脆性温度区间越大,焊接性越差。

### 参考文献

- [1] 熊焕. 低温贮箱和铝锂合金的应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2001(6): 33-40
- [2] 夏德顺. 航天运载器贮箱结构材料工艺研究[J]. 导弹与航天运载技术, 1999(3): 32-41
- [3] 许贵芝. 氩弧焊接方法对铝锂合金焊接接头性能和破坏的影响[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(3): 49-51
- [4] 林 W E. 铝锂合金焊接裂纹敏感性[J]. 导弹与航天运载技术, 1996(5): 33-60

(编辑 吴坚)