

文章编号:1673-9981(2008)01-0039-04

2124 铝合金超厚板断裂韧性的研究

冯 广, 毛大恒, 湛利华, 游江海, 刘 坚

(中南大学机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 采用三点弯曲法测试了 2124 铝合金的断裂韧性,并用扫描电子显微镜对试样断口纵剖面的组织形貌进行了观察.试验结果表明,2124 铝合金的断裂韧性比国际标准略低,试样断口有明显的解理断裂特征,微坑较多,气孔、疏松、夹杂物以及第二相质点明显,裂纹源主要是 θ 相、夹杂物以及疏松. S 相对材料的断裂韧性没有影响.

关键词: 三点弯曲法; 断裂韧性; 组织; 解理
中图分类号: TG339 **文献标识码:** A

在航天航空工业中常用质轻、延展性和耐损伤性高的 2024 和 2124 铝合金做承载构件. 2124 铝合金比 2024 铝合金含铁和硅少,杂质的体积含量低^[1];具有强化作用的 S 相 (Al_2CuMg) 呈颗粒状,并且在固溶热处理时没有分解,提高了合金的强度^[2].

本文通过测试 2124 铝合金不同方向上的断裂韧性,观察其宏观断口及微观形貌,分析了 2124 铝合金断裂韧性的影响因素及其机理.

1 材料和实验方法

实验材料为 2124 铝合金超厚板材的横断面,样品尺寸为 400 mm×300 mm×120 mm,其化学成分列于表 1. 试样的加工工艺流程为:熔炼铸造→热轧→淬火(常温水淬)→预拉伸→人工时效,其中热处理工艺为:495 ℃淬火,保温 3 h,24 ℃水冷却,用硝酸盐清洗. 样品的常规机械性能列于表 2.

表 1 2124 铝合金的化学成分
Table 1 The chemical composition of 2124 Al alloy

元素	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ti	Cr	Si	Ni	Al
含量 w/%	4.67	1.46	0.63	0.18	0.04	0.01	<0.01	0.12	<0.01	余量

表 2 2124 铝合金常规的机械性能
Table 2 Mechanical properties of 2124 Al alloy

方向	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%
T-L	460	463	5.6
L-T	400	410	1.9

按厚宽长的比例为 1:2:8 加工试样,在 T-L 和 L-T 两个方向(第一个字母表示裂纹面的法线方向,第二个字母表示预期的裂纹扩展方向;L 表示长度或主变形方向,T 表示宽度或最小变形方向)制备

试样,采用标准三点弯曲法测试 2124 铝合金试样的断裂韧性^[3-4]. 在 MTS810 型电子万能试验机上预制疲劳裂纹时,用正弦波加载,加载频率为 10Hz,总循环次数为 $10^4 \sim 10^6$,用位移控制疲劳裂纹扩展 3 mm. 注意:开始时最大疲劳载荷应该使应力强度因子的最大值不超过材料断裂韧性 K_{Ic} 估计值的 80%,载荷最低值应使最小载荷与最大载荷之比为 $-1 \sim 0.1$. 另外,预制裂纹时要保证两侧裂纹对称扩展.

收稿日期:2007-09-03
作者简介:冯广(1982-),男,湖南芷江人,硕士研究生.

用 600 万像素 SONY 数码相机拍摄试样的宏观断口. 用线切割法将断口切下 $35\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 样品用于微观形貌观察. 先用汽油除断口的油渍, 再用石油醚清洗, 最后用高倍扫描电子显微镜观察断口.

2 结果与分析

2.1 断口分析

图 1 和图 2 分别为 L-T 和 T-L 方向上的断口

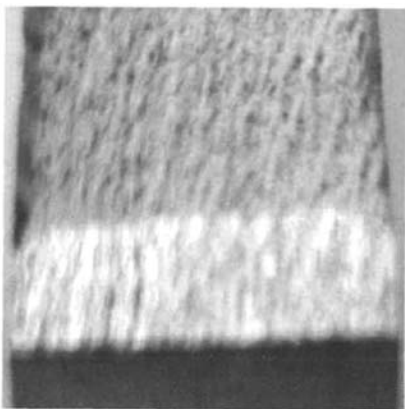


图 1 L-T 方向宏观断口图片

Fig. 1 Macro-fracture profile image in L-T direction

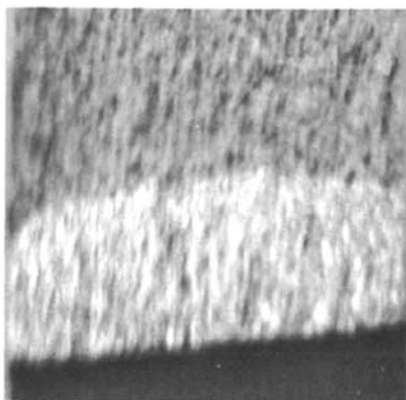


图 2 T-L 方向宏观断口图片

Fig. 2 Macro-fracture profile image in T-L direction

图 3 为试样断口的扫描电镜照片, 断口处可分为三个区: 疲劳区、微坑区、延伸区^[5-6]. 图 3(a) 为疲劳区的扫描电镜照片. 该区存在明显的疲劳裂纹, 同时还有许多球状颗粒. 对这些球状颗粒(图 3(a)中的 A 点)进行能谱分析(表 3), 发现这些球状颗粒为铝基体粒子, 显然是在预制疲劳裂纹时磨碎的颗粒. 图 3(b) 为延伸区的扫描电镜照片. 该区存在明显的解理台阶, 并且可以看到大量的河流状花样, 这是解理断口的重要特征. 另外, 从图 3(b) 还可以看到很多白色块状物呈纤维状分布在铝基体中, 对白色块状物和零星分布的黑色物质(图 3(b)中的 B 点)进行能谱分析(表 3), 发现白色块状物为 CuAl_2 和 $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$ 的混合物, 黑色物质为非金属夹杂物, 主要成分为 Si, C 和少量的 Cl. 图 3(c) 为微坑区的扫描电镜照片. 从图 3(c) 可以看到破碎了的 θ 相, 并

照片, 从上往下分为三个区: 下面黑色为机械加工缺口, 中间亮白区为疲劳裂纹区, 上面区域为断口撕裂区. 断口观察表明, 试样断裂时发生的塑性变形不明显, 属脆性断裂; 两个方向的断口均为平断口, 沿着断裂方向均可以看到很多长条形撕裂纹路, 并且有很多微坑. 试验中加载时, 试样缺口处受剪切应力的作用, 断口面存在很多微坑, 可以判断两个方向的断裂都属于微坑聚集型剪切断裂^[6]. 微坑是在剪切应力的作用下形成的.

且在 θ 相周围存在大量的裂纹、气孔和疏松. 另外, 从图 3(c) 还可以看到很多细小的白色颗粒状物质分布在铝基体上, 对这些白色颗粒(图 3(c)中的 D 点)进行能谱分析(表 3), 发现这些白色颗粒是 S 相质点和 MnAl_6 的混合物.

图 3(b) 显示, CuAl_2 和 $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$ 的混合物比较疏松, 有的地方甚至存在气孔, 加载时, 这些地方往往会成为裂纹源引发裂纹的扩展. 而 S 相呈弥散质点分布在铝基体中, 对裂纹扩展没什么影响, 因此, 对合金的断裂韧性几乎没有影响. 为了提高合金的断裂韧性, 在熔炼时可加一些物理外场(电磁场和超声波)或细化剂来细化 θ 相, 使 θ 相呈点、球状分布, 同时, 在热轧时适当加大下轧量. 另外, 在熔炼时尽量除去非金属杂质, 以提高合金的力学性能.

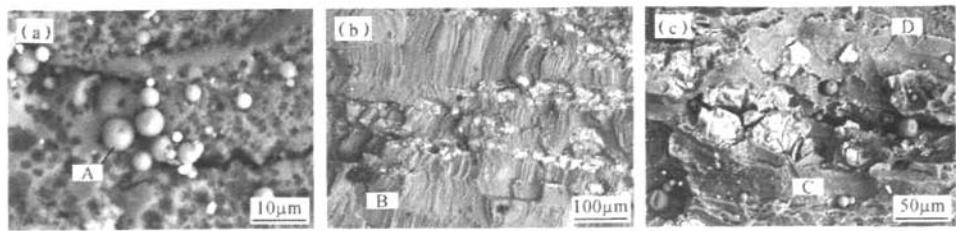


图 3 试样断口电子扫描照片
(a) 疲劳区,2000×; (b) 延伸区,100×; (c) 微坑区,500×
Fig. 3 SEM morphologies of the fracture surface
(a) fatigue zone,2000×; (b) extension zone,100×; (c) microscopic holes, 500×

表 3 断口部位物质的能谱分析
Table 3 The EDS analysis results of the fracture surface

分析点(图 3)	Al	Cu	Mg	Fe	Mn	C	O	Si	Cl
A	94.1	5.9	—	—	—	—	—	—	—
B	1.28	0.69	0.63	1.7	—	72.22	19.07	0.65	3.76
C	59.49	25.86	—	8.64	6.02	—	—	—	—
D	83.32	3.47	1.80	—	4.10	—	—	—	—

2.2 断裂韧性

在 T-L 和 L-T 两个方向切取厚 15 mm、宽 30 mm、长 120 mm 的试样,在压头移动速率为 1 mm/min 的条件下进行断裂韧性试验.试样压断后,用读数显微镜测量机械切口和疲劳裂纹的长度. a_0 表示机械切口前缘的裂纹长度, a_1 和 a_5 均为试样表面处的裂纹长度, a_2, a_3, a_4 分别为在 1/4, 1/2, 3/4 宽度上测量的裂纹长度,裂纹长度的平均值列于表 4.

表 4 裂纹长度
Table 4 Crack length mm

方向	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
T-L	14.70	14.57	14.93	14.85	14.77	14.37
L-T	14.70	14.79	15.28	15.41	15.45	14.89

图 4 为测得样品的 $P-V$ 曲线.由图 4 可知,所测曲线属于第二类曲线,应取第一个“迸发”载荷作为临界载荷 $P_Q^{[2]}$.

对于三点弯曲试样,断裂韧性的条件值 K_Q 计算式^[3-4]如下:

$$K_Q = \frac{P_Q}{BW^{1/2}} f\left(\frac{a}{W}\right).$$
 (1)

式(1)中: P_Q —临界载荷; B —试样厚度; W —试样宽度; a —裂纹长度, $a = \frac{a_2 + a_3 + a_4}{3}$; $f(a/W)$ —修正系数.

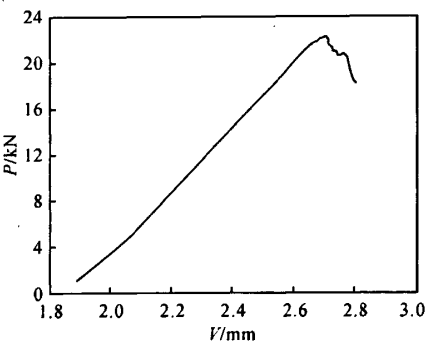


图 4 试样的 $P-V$ 曲线
Fig. 4 $P-V$ curve of the sample

将实测数据代入式(1),可得出各方向 K_Q 的平均值,即为试样的断裂韧性 K_{IC} ,其结果列于表 5.从

表5 室温测得的断裂韧性

Table 5 The fracture toughness tested at room temperature

变形方向	断裂韧性 $K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	
	试验值	国际标准
T-L	28.01	31.9
L-T	26.15	27.5

表5可以看出,T-L和L-T两个方向的断裂韧性比国际标准略低。

3 结论

2124铝合金超厚轧板材在T-L和L-T两个方向上的断裂韧性比国际标准略低。试样在平面应变条件下产生脆性断裂,其断口为解理断口。试样断裂的裂纹源主要是 θ 相、夹杂物以及疏松,大量粗大的 θ 相成为解理断裂的萌生点。S相呈弥散分布,对材料的断裂韧性几乎没有影响。为了提高合金的断裂

韧性,应从以下方面改进:提高熔铸技术,尽量降低合金熔体中的含气量和除去非金属夹杂物;加大热轧时的变形量,使 θ 相尽量破碎或呈点、球状,减少基体的疏松。

参考文献:

- [1] 田荣璋,王祝堂. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙:中南大学出版社,2000.
- [2] 高云震. 铝合金断裂韧性[M]. 北京:冶金工业出版社,1980.
- [3] 钢铁研究总院. GB4161—84 金属材料平面应变断裂韧度 K_{IC} 试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,1997.
- [4] 崔振源. 断裂韧性测试原理和方法[M]. 上海:上海科学技术出版社,1981:27.
- [5] 金属断口分析编写组(上海交通大学). 金属断口分析[M]. 上海:国防工业出版社,1979.
- [6] 崔约贤,王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998.

Research on fracture toughness of 2124 aluminum alloy

FENG Guang, MAO Da-heng, ZHAN Li-hua, YOU Jiang-hai, LIU Jian

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The fracture toughness of 2124 Al-alloy was determined by three-point bending test method, the fractograph of the fracture profile was observed by the use of scanning electron microscope. The results show that the fracture toughness value of 2124 Al-alloy is slightly low compared with those of the similar international products. The fracture surface showed obvious cleavage fracture characteristics with many micro-holes, gas-pocket, inclusions and the second phase particles. The crack initiated primarily from the-phase, inclusions and loose holes, while the S-phase has no influence on the fracture toughness.

Key words: three-point bending; fracture toughness; structure; cleavage