

# 1420 铝锂合金薄板激光焊接头的撕裂韧性研究

钟 飞<sup>1</sup>, 史耀武<sup>1</sup>, 李晓延<sup>1</sup>, 巩水利<sup>2</sup>, 陈 俐<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100022 2 北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

**摘要:** 对 1420 铝锂合金及其激光焊接头的撕裂韧性进行了研究。试验按照美国材料试验学会 ASTM B 871-01 《铝合金产品撕裂试验标准》进行。同时调查了铝合金及激光焊接接头的硬度分布及显微组织。撕裂试验表明, 所有试样的启裂能均高于裂纹扩展能。不论启裂能还是裂纹扩展能, 基材均高于焊缝及热影响区, 基材 L-T 方向高于 T-L 方向。断口观察发现, 基材的断口表面, 特别是 T-L 方向存在长而深的撕裂凹槽, 焊缝及热影响区试样表面主要是沿晶或沿亚晶的脆性断口。由基材的高韧性到焊缝与热影响区的低韧性, 是由于发生了断裂模式的转变, 发生了由延性断裂向沿晶脆性断裂的转变。

**关键词:** 1420 铝锂合金; 激光焊接; 撕裂韧性

中图分类号: TG146 文献标识码: A 文章编号: 1005-5053(2005)02-0020-06

铝合金薄板广泛用于航空航天及汽车制造业。在飞机结构中, 铝合金的用量占飞机结构总重量的 60%~80%。近年发展起来的铝锂合金, 由于密度比常规铝合金的更小, 弹性模量更大, 显著降低结构的重量, 已引起航空航天部门的高度重视。

广泛采用的铝锂合金有 Al-Mg-Li 合金系和 Al-Li-Cu-Mg 合金系。俄罗斯采用的 1420 铝锂合金是含 Zr 的 Al-Mg-Li 系合金, 它除了具有一般 Al-Li 合金共有的优点外, 还具有优良的抗腐蚀性能, 良好的焊接性能。目前有关 1420 铝锂合金焊接的研究主要集中在焊接工艺、焊接缺陷、焊接接头的显微组织及对接头力学性能的影响方面<sup>[1~4]</sup>。关于铝锂合金及其焊接接头的断裂韧性研究目前报道很少, 主要涉及 2090 及 8090 铝锂合金<sup>[5,6]</sup>。对 1420 铝锂合金薄板及其焊接接头断裂韧性或撕裂韧性的研究, 国内外几乎没有公开报道。本研究在对铝锂合金薄板及其激光焊接接头组织性能分析的基础上, 测试了材料及焊接接头撕裂性能, 为改进铝锂合金材料冶金性能、正确设计铝锂合金薄板焊接结构、合理制定焊接工艺及选择焊接方法提供参考。

## 1 试验方法

试验采用俄罗斯进口 1420 铝锂合金, 板厚 2.5

mm。按照 GB 3076-82 《金属薄板(带)拉伸试验方法》<sup>[7]</sup>, 测量原材料的拉伸力学性能。试样设计及尺寸如图 1 所示。试样厚度为板材的原始厚度。拉伸试验温度为室温, 加载速度为 1 mm/min。

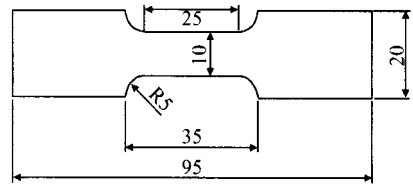


图 1 拉伸试样形状和尺寸 /mm

Fig 1 Shape and dimension of tensile specimen /mm

焊接试板的尺寸为 90mm × 90mm, 采用英国产 AM 356 型 4.5kW YAG 激光焊接, 焊接规范为: 功率 1800W, 焊接速度 2.7m/min。为了评价现行焊后热处理工艺(430~465℃加热, 保温 20min, 空冷)对断裂性能的影响, 部分试件按照上述规范进行了热处理。

用 HXD-1000 显微硬度计测量焊接接头的显微硬度。为分析焊接接头的断裂性能, 对焊接试件的金相组织进行了金相观察, 试件研磨抛光后在 1% HF + 1.5% HCl + 2.5% HNO<sub>3</sub> + 95% H<sub>2</sub>O 的溶液中腐蚀, 用 OLYMPUS PMG3 显微镜观察金相组织。

撕裂试验前, 首先测量试样韧带区的厚度及长度。试验在 MTS 810 材料试验系统上进行。试验环境温度为 22℃, 加载速度为 1mm/min。撕裂试样加载前, 先用 200~400N 的预载荷以提高位移测量

精度。记录载荷-位移数据及曲线, 观察裂纹的扩展方式及路径。

## 2 常规性能试验结果

### 2.1 化学成分与拉伸性能

用 X 射线荧光光谱测得材料的化学成分如表 1 所示。

拉伸测试性能指标如表 2 所示。1420 A+Li 合金基材的拉伸应力应变曲线如图 2 所示。

表 1 1420 铝锂合金化学成分 /w %

Table 1 Chemical composition of 1420 A+Li alloy /w %

Mg	Li	Zr	Fe	Si	H	P
5.04	2.0	0.11	0.09	0.2	< 0.1	0.004
S	Cl	Ca	Ti	Cu	Ba	Al
0.04	0.02	0.03	0.015	0.01	0.016	Balance

表 2 1420 铝锂合金力学性能

Table 2 Mechanical properties of 1420 A+Li alloy

Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation %
280.0	439.0	9

\* Tension is along rolling direction

### 2.2 焊接接头硬度分布

典型焊缝横截面轮廓如图 3 所示。焊缝上表面有下凹, 内部有小气孔。气孔的生成与焊接过程溶解的氢气以及合金高温加热生成的锂蒸气有关。

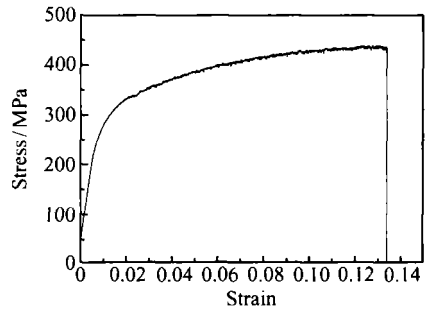


图 2 1420 铝锂合金薄板试样拉伸曲线

Fig 2 Tensile curve of 1420 A+Li alloy sheet

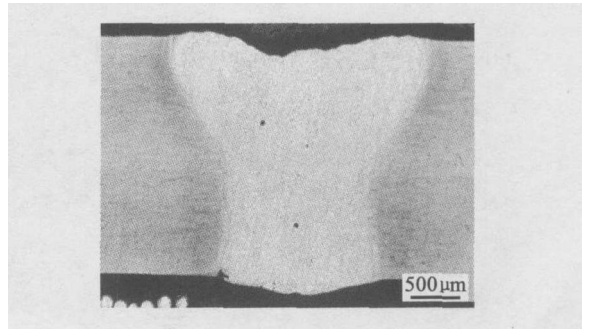


图 3 典型焊缝横截面轮廓

Fig 3 Configuration of cross-section for typical weld

1420 焊接接头热处理前后硬度分布如图 4 所示。横坐标原点为焊缝中心, 硬度呈基本对称分布。热处理前焊缝 HV 平均值为 136.103, 母材 HV 平均值为 113.257; 热处理后焊缝 HV 平均值为 89.654, 母材 HV 平均值为 100.597。热处理后总体硬度降低, 但焊缝硬度下降更多, 平均下降了 46.40HV, 而母材平均下降了 12.66HV。因此, 焊后态, 焊接接头为焊缝强度高匹配状态; 经焊后热处理, 焊接接头为焊缝强度低匹配状态。

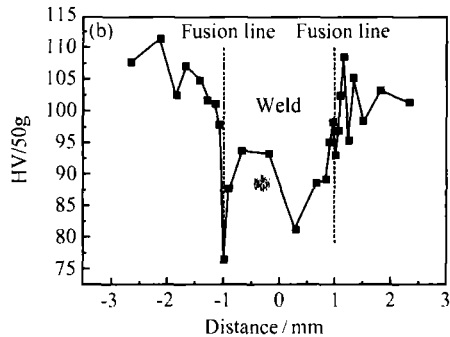
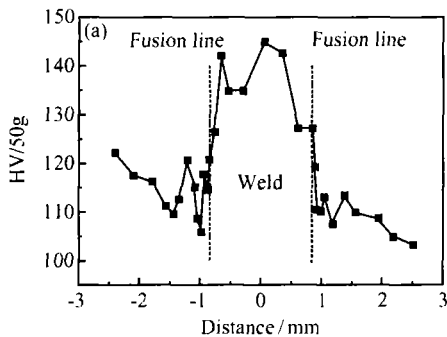


图 4 1420 铝锂合金焊接接头的硬度分布

(a) 焊后态; (b) 焊后热处理态

Fig 4 Hardness distribution of welded joint for 1420 A+Li alloy

(a) as-weld (b) post-weld heat treatment (PWHT)

### 2.3 金相组织

典型金相组织如图 5 所示。可以看出,焊缝组织为等轴树枝晶,靠近熔合线的部分存在细晶带,基

材有明显的晶粒轧制拉长现象。热处理后,看不到基材沿轧制方向拉长的晶粒,基材晶粒变细,而且细晶带消失。热处理前后,焊缝组织没有明显变化。

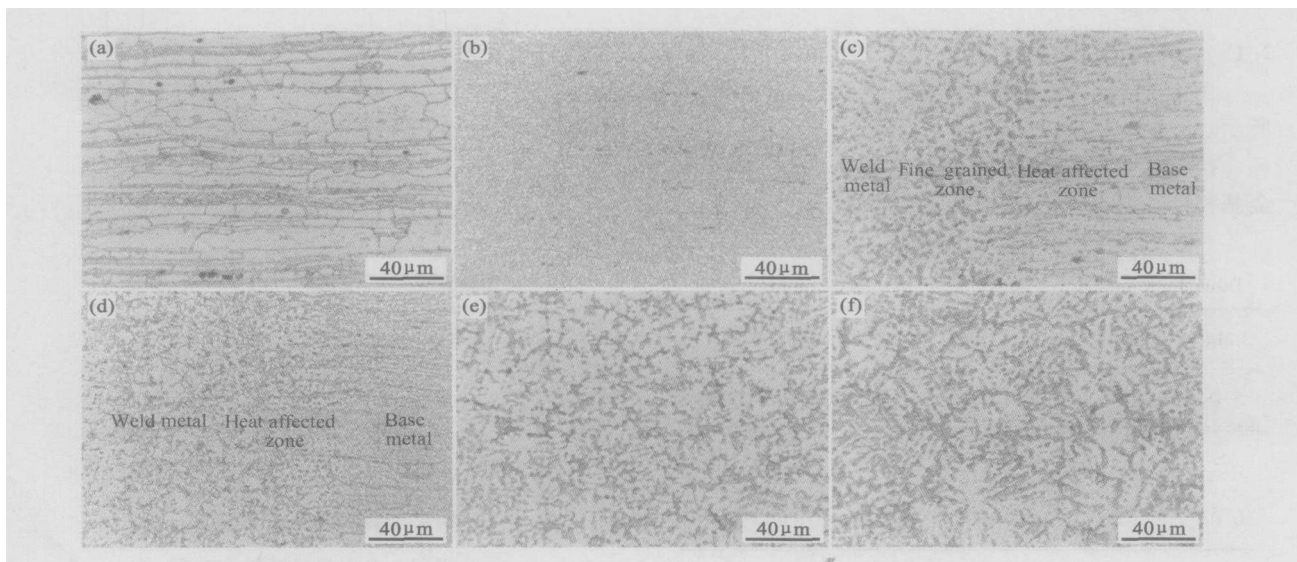


图 5 1420 铝锂合金焊接接头金相组织

(a) 基材, 焊后态; (b) 基材, 焊后热处理态; (c) HAZ, 焊后态; (d) HAZ, 焊后热处理态; (e) 焊缝, 焊后态; (f) 焊缝, 焊后热处理态

Fig 5 Microstructure of 1420 Al-Li alloy welded joints

(a) base metal as-weld (b) base metal PWHT; (c) heat affected zone(HAZ), as-weld (d) HAZ PWHT; (e) weld metal as-weld (f) weld metal PWHT

### 3 撕裂试验结果与讨论

试验按照美国材料试验学会 ASTM B 871-01 《铝合金产品撕裂试验标准》进行<sup>[8]</sup>。该标准适宜 1 ~ 6.35mm 铝合金薄板,可测量缺口韧性及裂纹扩展阻力,撕裂试验与断裂韧性试验结果已建立了良好的关系。

基材及焊接接头的撕裂试验试样几何尺寸示于图 6。基材试样按 L-T 及 T-L 方向制备。L 为板材纵向轧制方向, T 为板材宽度方向。L-T 为预期裂纹沿 T 方向扩展, T-L 为预期裂纹沿 L 方向扩展。焊接试样的缺口开在焊缝中心或熔合线。试样厚度方向不加工,采用原始板厚。试样缺口线切割加工,缺口根部半径为 0.06mm。

所有撕裂试验试样的载荷位移曲线形状相似,图 7 为典型焊后态撕裂试样的载荷位移曲线。

试验数据的处理结果如表 3 所示,每个数据为两个试样的平均值。表中:

启裂能 ( $IE$ ) 表示试样启裂所需要的能量,对应载荷位移曲线峰值载荷前的面积。

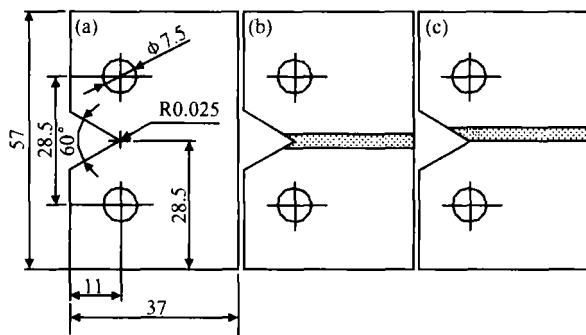


图 6 撕裂试样形状和尺寸 /mm

(a) 基材试样; (b) 焊缝试样; (c) 热影响区试样

Fig 6 Shape and dimension of tearing specimen/mm

(a) base metal specimen (b) weld metal specimen (c) HAZ specimen

裂纹扩展能 ( $PE$ ) 表示裂纹扩展需要的能量,对应载荷位移曲线从峰值载荷到完全断裂时的面积。撕裂强度 ( $TS$ ) 表示撕裂试样能承受的最大应力。

$$TS = \frac{P}{A} + \frac{MC}{I} = \frac{P}{bt} + \frac{3P}{bt} = \frac{4P}{bt} \quad (1)$$

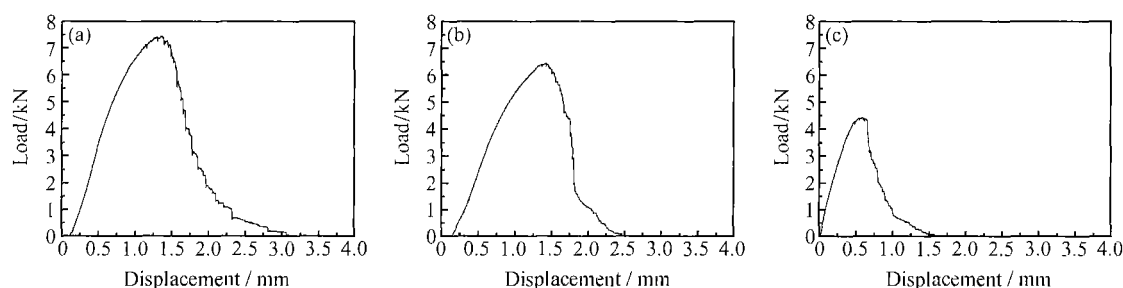


图 7 典型焊后态撕裂试样的载荷位移曲线

(a) 母材 T-L 试样; (b) 热影响区试样; (c) 焊缝金属试样

Fig 7 Load-distance curve of tear test for as-welded specimens

(a) base metal specimen of T-L direction; (b) HAZ specimen; (c) weld metal specimen

式中:  $P$ —最大载荷;  $t$ —试样韧带厚度;  $b$ —试样韧带长度;  $M$ —弯矩;  $C$ —中性轴至最远边缘的距离;  $I$ —惯性矩。

单位裂纹扩展能 ( $UPE$ ) 表示裂纹扩展能与试样原始横截面积的比, 是材料抵抗裂纹扩展的强韧性

综合度量。可以用  $UPE$  的值衡量材料的断裂韧性。

$$UPE = \frac{PE}{bt} \quad (2)$$

撕裂强度对屈服强度比 ( $TYR$ ) 为试样撕裂强度除以拉伸试样确定的材料屈服极限。

表 3 撕裂试验结果的平均值  
Table 3 Average of tear test results

Type	Energy at crack initiation $IE / \text{kN} \cdot \text{mm}$	Energy at crack propagation $PE / \text{kN} \cdot \text{mm}$	Total energy $E / \text{kN} \cdot \text{mm}$	Tear strength $TS / \text{MPa}$	Unit energy at crack propagation $UPE / \text{N} \cdot \text{mm}$
Base metal T-L	6 005	3 567	9 572	476.25	65.24
Base metal L-T	6 200	4 427	10 646	489.57	70.81
Weld metal	1 697	1 358	3 054	320.93	23.59
HAZ	4 419	2 092	6 511	431.60	35.90
Weld metal PWHT	1 949	1 174	3 123	304.52	19.23
HAZ PWHT	1 727	1 372	3 099	301.77	22.54

所有试件在裂纹缓慢扩展过程中不断伴有小的脆性裂纹突进及清脆的断裂小声音, 且都无面外变形。除一个焊后热处理态 HAZ 试样属 C 型断裂, 偏转角约  $40^\circ$  外, 其他都属正常的 A 型断裂, 偏转角  $< \pm 5^\circ$ 。

图 8 给出的是裂纹启裂能、裂纹扩展能及单位裂纹扩展能的直方图。可以看出, 所有试样的启裂能均高于裂纹扩展能。不论启裂能还是裂纹扩展能, 都是母材高于焊缝及热影响区。另外, LT 方向母材试样又高于 TL 母材试样。热处理后试样的裂纹扩展能没有改善。

用 FEIQUANTA 200 型扫描电镜观察铝锂合金及焊接接头撕裂试样的断口。从图 9a 和 b 可以看

出, 基材 T-L 试样, 裂纹沿主轧制方向扩展, 断口上撕裂的凹槽长而深, 从铝板厚度方向看, 属于“饼/饼撑”状结构, 撕裂抗力较小, 所以基材 T-L 试样的启裂能和裂纹扩展能比 L-T 方向试样小。从图 9c 至 f 可以看出, 焊缝及热影响区的断口相似, 具有明显的沿晶或沿亚晶断裂的特征。断口表面有局部的延性断裂, 属于表面带韧窝的沿晶断裂。沿晶断裂产生的原因是, 焊接加热使金属间化合物质点溶解并沿晶界析出富集, 晶界弱化造成的<sup>[9]</sup>。由于从基材到焊缝及热影响区存在断裂模式的转变, 发生由延性断裂向脆性沿晶断裂的转变, 导致焊缝及热影响区的启裂能和裂纹扩展能大幅降低。而且焊后热处理也没有好转。

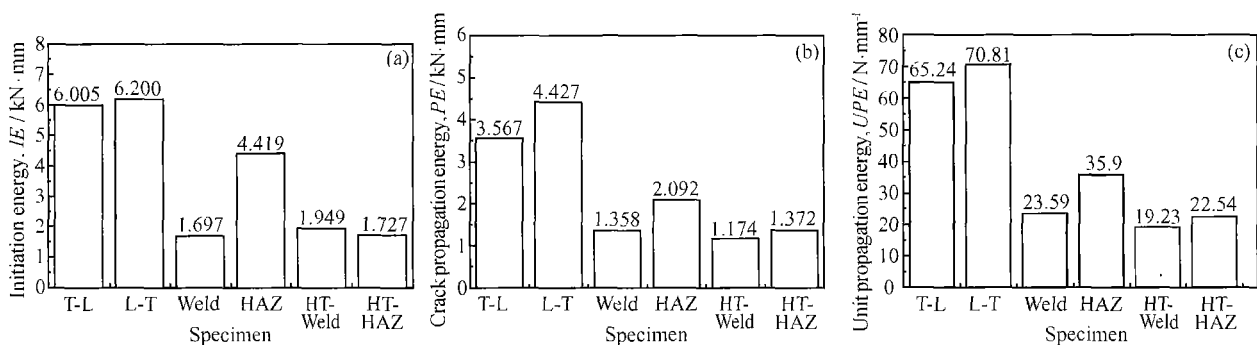


图 8 试样撕裂能的平均值

(a) 启裂能; (b) 裂纹扩展能; (c) 单位裂纹扩展能

Fig 8 Average of tear energy of specimens

(a) energy at crack initiation; (b) energy at crack propagation (c) unit energy at crack propagation

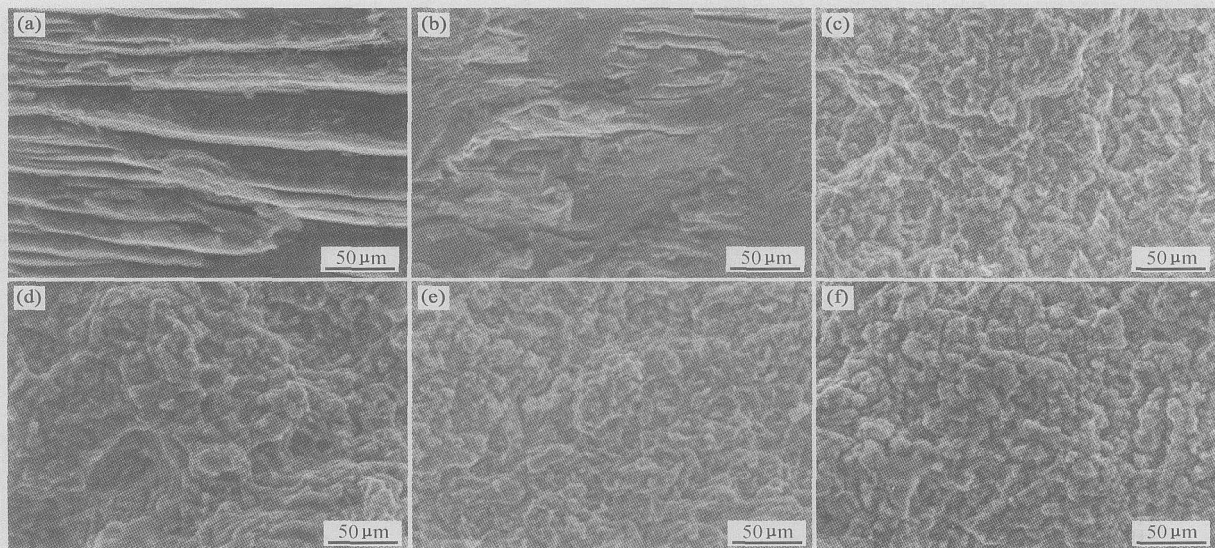


图 9 1420 铝锂合金及其焊接接头的扫描断口照片

(a) 基材 T-L; (b) 基材 L-T; (c) 焊缝, 焊后态; (d) 焊缝, 焊后热处理态; (e) HAZ, 焊后态; (f) HAZ, 焊后热处理态

Fig 9 SEM fractography of 1420 Al-Li alloy and welded joints

(a) base metal T-L; (b) base metal L-T; (c) weld metal as-weld (d) weld metal PWHT; (e) HAZ as-weld (f) HAZ, PWHT

## 4 结 论

(1) 撕裂试验表明, 所有试样的启裂能均高于裂纹扩展能。不论启裂能还是裂纹扩展能, 基材均高于焊缝及热影响区, 基材 L-T 方向高于 T-L 方向。

(2) 断口观察发现, 基材的断口表面, 特别是 T-L 方向断口存在长而深的撕裂凹槽, 焊缝及热影响区试样表面是沿晶或沿亚晶的脆性断口。由基材的高韧性到焊缝与热影响区的低韧性的过渡, 是由于发生了断裂模式的转变, 发生了由延性断裂向沿晶

脆性断裂的转变。

(3) 焊后热处理对焊接接头断裂性能的影响不明显。

致谢 本研究得到北京航空制造工程研究所高能束流加工技术国防科技重点实验室的资助。

## 参考文献:

- [1] 王永, 胡捷, 胡国平, 等. 可焊铝锂合金焊接研究现状 [J]. 有色金属, 2002, 54(1): 16-18
- [2] 刘萝威. 轻合金焊接工艺在航空航天上的应用 [J]. 航天

- 制造技术, 2002(2): 49-52
- [3] BRATUKH N A G, DENISOV B S, SOTNIKOV V S. 1420 铝锂合金飞机结构的焊接工艺问题 [J]. 材料工程, 1997 (2): 38-41
- [4] 邹世坤, 段爱琴. 铝锂合金激光焊接特性研究 [J]. 焊接技术, 2001 30(4): 13-14
- [5] CHEN S C, HUANG J C. Comparison of post-weld microstructures and mechanical properties of electron- and laser-beam welded 8090 Al-Li alloy plates [J]. Materials Transactions, JM, 1999, 40(10): 1069-1078
- [6] OSAKI S, HARA K. Relationship among fracture toughness, fracture mode and tensile properties of Al-Li alloys [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2001, 51(4), 228-233.
- [7] GB 3076-82 金属薄板(带)拉伸试验方法 [S].
- [8] American Society for Testing and Materials ASTM B 871-01, Standard test method for tear testing of aluminum alloy products, Annual Book of ASTM Standards, Volume 02.02-Aluminum and Magnesium Alloys [R]. Philadelphia, 2001.
- [9] DORWARD R C. Fracture behavior of commercial Al-Li alloys, Advances in Fracture Research, vol 4[A]. SALAMA K, ed Proceedings of the 7th International Conference of Fracture [C]. Houston Texas, 1989. 2413-2422.

## Study on Tearing Toughness of Laser-welded Joint for a 1420 Aluminum-lithium Alloy Sheet

ZHONG Fei<sup>1</sup>, SHI Yaowu<sup>1</sup>, LI Xiaoyan<sup>1</sup>, GONG Shuli<sup>2</sup>, CHEN Li<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. National Key Laboratory for High Energy Density Beam Processing Technology, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**Abstract** Tear test on Al-Li alloy 1420 and laser-welded joints was carried out. The test was based on the ASTM B 871-01, standard test method for tear testing of aluminum alloy products. Meanwhile, hardness distribution and microstructure of the alloy and welded joints were investigated. It was indicated from the tear test that energy at crack initiation was higher than that at crack propagation. Moreover, the energy at both crack initiation and propagation of base metal was higher than that of weld metal and heat affected zone. The energy at both crack initiation and propagation of base metal with L-T direction was higher than that with T-L direction. Fractography showed that there was long and deep tearing grooves on the fractography of the base metal, especially with the T-L direction. However, there was inter-granular or inter-subgranular brittle feature mainly on weld metal and heat affected zone. Transition from the higher toughness of the base metal to the lower toughness of the weld metal and heat affected zone was ascribed to the change of fracture model. The fracture model was changed from ductile void coalescence fracture to brittle inter-granular fracture.

**Key words** 1420 aluminum-lithium alloy; laser welding; tearing toughness