

# 随焊锤击对高强铝合金焊接接头应变分布的影响

徐文立<sup>1</sup>, 代宝昌<sup>2</sup>, 刘雪松<sup>1</sup>, 方洪渊<sup>1</sup>, 田锡唐<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 大庆石油管理局, 大庆 163457)

**摘要:** 采用云纹分析的试验力学方法, 研究了不同情况下 LY12CZ 高强铝合金焊接接头应变场的分布特点。研究结果表明, 断裂前夕, 常规焊接头的云纹条纹稀疏且不均匀, 拉伸过程中应力集中在薄弱环节焊趾部位, 焊接接头的力学性能指标较差; 采用随焊锤击工艺, 由于在焊接过程中同步锤击强化了焊趾部位, 断裂前夕焊接接头的云纹条纹分布比较密集均匀, 断裂部位由焊趾转移到焊缝, 焊接接头的力学性能指标较常规焊有了较大提高, 这充分说明随焊锤击技术对于实现高强铝合金焊接接头的强化是行之有效的。

**关键词:** 拉伸应变; 随焊锤击; 云纹分析; 接头强化

中图分类号: TG441 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)02-27-04

徐文立



## 0 序 言

高强铝合金具有高的比强度和比刚度, 在航空航天领域有着广泛的应用前景。但此类合金在焊接时, 具有高的热裂敏感性, 焊接接头软化区过宽, 弱化严重, 致使焊接接头强度大幅度降低, 大大限制了高强铝合金焊接结构的广泛应用。为此, 许多科研工作者提出了多种高强铝合金焊接接头的强化方法。从冶金角度考虑, 人们采用焊接热模拟试验方法, 改变焊丝成分, 进行热处理等方法研究和改善接头区的组织和性能, 提高接头强度<sup>[1]</sup>。从力学角度出发, 一些科研工作者采用振动时效、碾压强化、温差拉伸等方法, 也取得了较好的效果<sup>[2~9]</sup>。随焊锤击是最近提出的一种先进的焊接方法, 它具有设备简单、应用灵活、生产成本低、效率高等优点, 不仅能够有效地防止高强铝合金的焊接热裂, 控制薄板壳结构的焊接变形, 而且能够实现焊接接头的强化<sup>[6, 7]</sup>。该文采用航空航天领域常用的高强铝合金 LY12CZ 薄板, 利用天津大学研制的智能云纹干涉仪的图像处理软件, 采用云纹测试技术, 对母材、常规焊、随焊锤击试样拉伸过程中的应变场分布规律进行了研究, 并对焊接接头的力学性能进行了测试。这对掌握材料的塑性流动规律, 了解焊接结构的使用可靠性, 揭示随焊锤击的强化原理具有重要的意义。

收稿日期: 2002-11-30

基金项目: 国防科工委九五预研项目(18°8°4②)

## 1 云纹图像处理原理

云纹法是一种全场应变分析方法, 是利用两组互相重叠的栅线间光的几何干涉现象产生明暗相间的云纹来测量各种机械量和物体变形规律, 求得位移场和应变场的试验力学研究方法。云纹栅有试件栅和基准栅之分, 将试件栅用粘胶粘于试件表面, 拉伸时与试件一起变形, 在其上重叠一块基准栅。由于光的干涉作用就会产生云纹。试件变形时, 试件栅栅线间距发生变化, 云纹随之变化。从云纹的疏密程度可以反映出应变量的大小。该研究中采用的是平行云纹, 其应变计算公式为。

$$\epsilon = \frac{p}{p \pm f}, \quad (1)$$

式中:  $\epsilon$  为应变;  $f$  为相邻两条云纹间距 (mm);  $p$  为基准栅的栅线节距 (mm)。

由于  $f > p$ ,  $f \pm p \approx f$ , 所以式(1)可由式(2)表示

$$\epsilon = \frac{p}{f}. \quad (2)$$

对于 LY12CZ 试件, 该研究采用 20 线/mm 的栅板, 进行面内云纹分析, 利用天津大学研制的智能云纹干涉仪的图像处理软件, 便可获得焊缝附近的应变场分布。利用此软件进行云纹图像进行处理计算时, 大体上可以分为以下几步。

### 1.1 原始云纹图像的增强处理

选择不同的灰度变换函数进行变换, 使得图像变得更加清晰、细腻、容易识别。

### 1.2 云纹图像的二值化处理

云纹图像包括黑条纹、白条纹和噪声, 采用二值化方法从中提取出黑条纹(或白条纹)作为研究对象。

### 1.3 条纹图的细化处理

经过二值化的云纹图是有宽度的条纹图形, 计算机要取出这样条纹的特征是不容易的, 必须进行条纹的细化处理。该研究采用了一种基于 8 邻接的条纹细化方法, 从二值化后的条纹图形中求出宽度为 1 个像素的骨骼线。

### 1.4 条纹级别的判别

该图像处理软件将模式识别技术引入云纹条纹的识别判断。

### 1.5 二维 U、V 位移图的力学量计算

在对二维 U、V 云纹图进行计算时, 在确定计算范围、给出采样密度后, 就得到一系列的节点。不论是水平方向还是垂直方向, 都是一系列的离散值。为得到条纹之间的任一点的数值, 采用最小二乘法进行曲线拟合, 以求出级次拟合表达式, 进而求出位移、应变、应力等力学量的解析表达式。

### 1.6 计算结果的图示化

用户程序生成的位移、应变、应力等数据可以用 GRAFTOOL、EXCEL 等软件用图形的方式直观地表示出来。

## 2 试验研究方法

试验材料为板厚 2 mm 的 LY12CZ 高强铝合金, 采用气动的锤击方式, 锤击频率为 75 Hz, 随焊锤击部位如图 1 所示。离焊接熔池较近的一对锤头, 锤击部位是熔池后方处于脆性温度区间(BTR)范围内的焊缝及其热影响区金属两侧; 离熔池相对较远的锤头, 锤击的部位为焊趾。焊接方法为 TIG 焊, 用两块 540 mm×150 mm×2 mm 的 LY12CZ 板材进行

对接拼焊, 焊丝为 LY9, 采用的焊接参数见表 1, 随焊锤击参数见表 2, 用于拉伸应变场云纹分析的试样尺寸见图 2。为粘贴云纹试件栅, 对于带焊缝的试样需将余高磨平。试验前, 用 502 胶将试件栅粘贴在拉伸试样的中心部位, 揭掉试件栅表面的胶片, 然后用缝纫机油将基准栅吸附在试样栅表面上。调整基准栅位置, 使之恰好不出现云纹图像。最后将准备好的拉伸试样安装在拉伸机上进行拉伸, 并用照相机拍摄下不同时刻的云纹照片作为研究对象。

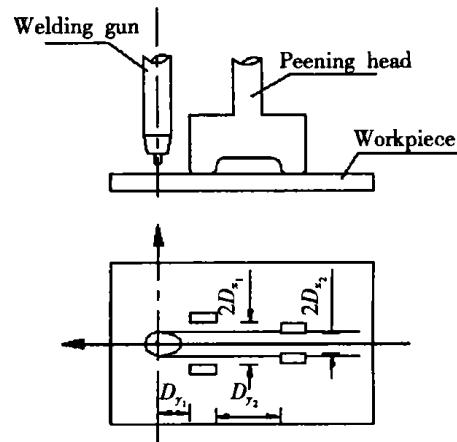


图 1 随焊锤击位置示意图  
Fig. 1 Position of trailing peening

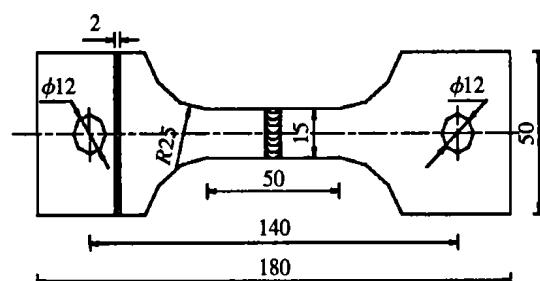


图 2 云纹试验试样  
Fig. 2 Specimen for moiré experiment

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameters

Welding current I / A	Welding velocity $v_1 / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	Filler velocity $v_2 / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	Arc voltage U / V	Rate of argon flow / ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )
120	300	540	16	5.8

表 2 随焊锤击参数

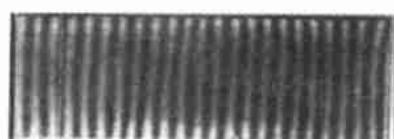
Table 2 Parameters of trailing peening

Peening force / MPa	Peening travel / mm	$D_{y_1}$ / mm	$D_{y_2}$ / mm	$2D_{x_1}$ / mm	$2D_{x_2}$ / mm
0.5	1	18	54	10	6

## 3 拉伸云纹的图像处理及结果分析

为处理图像方便, 取右半场图像作为分析研究对象, 统一提取不同情况下应变场中拉伸轴线上的应变数据, 并将应变分布曲线进行了对称处理。图 3、4、5 分别为 LY12CZ 母材、常规焊、随焊锤击试

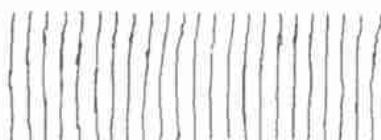
样断裂前夕的云纹图像及其图像处理结果,其拉伸轴线上的应变分布曲线如图6所示。



(a) Just before fracture ( $\sigma=456$  MPa)



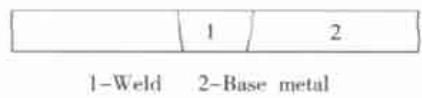
(b) After dualization ( $\sigma=456$  MPa)



(c) After stripe fining ( $\sigma=456$  MPa)

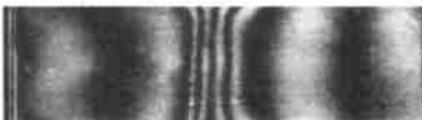
图3 母材拉伸云纹及图像处理(12 L/mm)

Fig. 3 Tensile moiré and image processing of base metal



1-Weld 2-Base metal

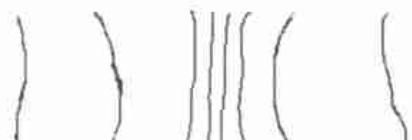
(a) Welded joint



(b) Just before fracture ( $\sigma=234$  MPa)



(c) After dualization ( $\sigma=234$  MPa)



(d) After stripe fining ( $\sigma=234$  MPa)

图4 常规焊件拉伸云纹及图像处理(20 L/mm)

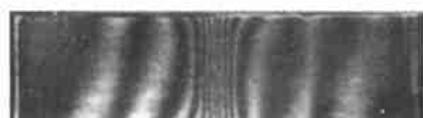
Fig. 4 Tensile moiré and image processing of conventional welded joint

由图3可知,对于LY12CZ母材,随着拉伸载荷的逐渐加大,云纹条纹逐渐加密,说明应变量增加。由于LY12CZ母材金属各部位的组织及力学性能均



1-Weld 2-Base metal

(a) Welded joint



(b) Just before fracture ( $\sigma=325$  MPa)



(c) After dualization ( $\sigma=325$  MPa)



(d) After stripe fining ( $\sigma=325$  MPa)

图5 随焊锤击件的拉伸云纹及图像处理(20 L/mm)

Fig. 5 Tensile moiré and image processing of welded joint with trailing peening

匀一致,所以在云纹图像上表现为条纹分布均匀、间距基本相等的特点。拉伸断裂前夕,当作用在试样两端的拉伸应力  $\sigma=456$  MPa 时,母材的应变已高达 0.13 左右,并基本呈一水平直线分布(如图 6 所示)。

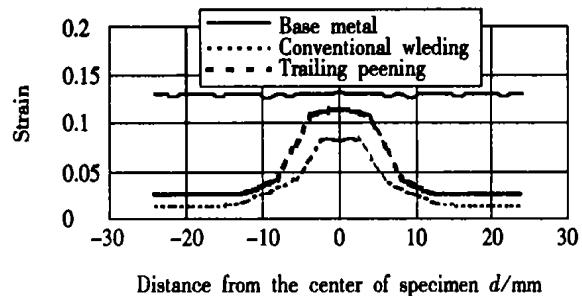


图6 拉伸断裂前夕不同 LY12CZ 试样轴线上的应变分布曲线

Fig. 6 Curves of strain distribution along tensioning axis for different LY12CZ specimens just before fracture

从图4可以看出,LY12CZ常规焊件与母材的拉伸云纹图像有明显不同。焊接接头部位的云纹相对较为密集,说明在焊接接头处存在应变集中,而远离焊缝的母材部位云纹则十分稀疏,应变量不大。在图6中,当在试样两端作用的拉伸应力  $\sigma=234$  MPa 时,即将发生断裂,此时焊接接头区的应变量为 0.08 左右,而母材金属部位的应变量仅在

0.014 附近。因此对于 LY12CZ 常规焊件, 焊趾部位是整个接头的薄弱环节, 在拉伸过程中, 容易在此处产生严重的应力集中, 从而导致在母材金属承受的拉伸载荷不太大时, 已经达到焊趾区金属的断裂强度。

与常规焊相比, 断裂前夕随焊锤击焊件的云纹图像更加均匀, 条纹相对较密。由于随焊锤击使焊接接头尤其是薄弱环节焊趾部位得以强化, 应变幅值较高的区域不再局限于焊接接头部位, 而是扩展至锤击区的外侧(如图 5 所示)。由图 6 可以看出, 随焊锤击试样的整体应变曲线均在常规焊的上方, 说明焊接接头的整体应变量较大。断裂前夕, 焊接接头乃至锤击区附近的应变量在 0.11 附近, 母材的应变量也由常规焊时的 0.014 提高至 0.025 左右。

表 3 给出了不同 LY12CZ 试样的力学性能测试结果。在该研究中, 对于常规焊和随焊锤击试样均需去除焊缝余高, 焊接接头的延伸率测量标距为 30 mm。可以看出, 随焊锤击带来的应变强化效果非常明显, 不论是抗拉强度、延伸率还是冷弯角, 与常规焊相比均有了大幅度提高, 断裂位置也由焊趾转移到焊缝上。

表 3 不同 LY12CZ 试样的力学性能

Table 3 Mechanical properties of different specimens of LY12CZ

	$\sigma_b$ MPa	$\delta$ (%)	Fracture position	Cold bending angle (°)
Base metal	461.7	19.10	Base metal	180
Conventional welding	265.42	2.72	Weld toe	20.17
Welding with trailing peening	334.04	4.09	Weld	27.17

## 4 结 论

(1) 对于 LY12CZ 母材, 拉伸云纹图像表现为条纹分布均匀、间距基本相等的特点。拉伸断裂时应

变量较大, 应变分布曲线基本上为水平直线。

(2) LY12CZ 常规焊件, 云纹条纹分布存在明显的不均匀性。拉伸过程中, 应变主要集中在焊接接头的焊趾部位, 直到断裂前夕, 母材处的应变量仍很小。

(3) 随焊锤击由于强化了焊接接头的薄弱环节焊趾部位, 云纹条纹与常规焊相比明显加密, 焊接接头的整体应变量显著提高。

(4) 随焊锤击是一种行之有效的强化手段, 与常规焊相比, 不论是抗拉强度、延伸率还是冷弯角都有了大幅度提高。

## 参考文献:

- [1] 王引真, 贺 勇, 王忠平, 等. 热应变对 2090 铝锂合金焊接热影响区显微组织和力学性能的影响 [J]. 材料科学与工艺, 1996, 14(3): 81~85.
- [2] 高 翔, 柯新和. 振动处理对铝合金焊接结构变形与内应力的影响 [J]. 宇航材料工艺, 1999, (2): 38~42.
- [3] Liu W P, Tian X T, Zhang X Z. Preventing weld hot cracking by synchronous rolling during welding [J]. Welding Journal, 1996, 75(9): 297s~304s.
- [4] Tian Xitang, Guo Shuoqing, Xu Wenli. Influence of trailing intense cooling on welding hot cracking susceptibility of aluminum alloy LY12CZ [J]. Space Navigation Material & Technology, 1998, 28(5): 48~52.
- [5] Guan Q, Guo D L, Li C Q, et al. Low stress non-distortion (LSND) welding—a new technique for thin materials [J]. Welding in the World, 1994, 33(3): 160~167.
- [6] 徐文立. 随焊锤击控制铝合金薄板焊接应力变形及接头质量的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
- [7] Xu Wenli, Tian Xitang, Liu Xuesong, et al. A new method for welding thin plate of aluminum alloy LY12CZ with high strength [J]. China Welding, 2001, 10(2): 129~134.

**作者简介:** 徐文立, 男, 1973 年出生, 工学博士, 讲师。现主要从事焊接应力及变形控制、焊接力学及可靠性评估等方面的研究工作, 发表论文 20 余篇。

**Email:** xuwenli@0451.com