

铝锂合金激光焊 T 型接头残余应力分布特征

Distribution Feature of Residual Stress for T-Joints With Al-Li Alloy by Laser Welding

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室 何恩光 巩水利 吴冰 陈俐

[摘要] 分别采用激光焊、激光填丝焊、MIG 焊等焊接方法对 5A90 铝锂合金 T 型接头进行焊接,然后采用 X 射线衍射法对其进行残余应力测量,获得了 T 型接头垂直于焊缝方向不同位置处的残余应力分布,并分析了不同焊接方法对其残余应力分布规律的影响。

关键词: 铝锂合金 激光焊接 T 型接头 X 射线衍射法 残余应力

[ABSTRACT] The T-joints with Al-Li alloy 5A90 are welded by laser welding, laser-filling welding and MIG welding and so on. The distributions of residual stress of the T-joints are measured by X-ray diffraction, and the infection of different welding methods to the distributions of residual stress is analyzed.

Keywords: Al-Li alloy Laser welding T-joint X-ray diffraction Residual stress

铝锂合金具有低密度、高比强度、高比刚度,优良的低温性能、良好的耐腐蚀性能和卓越的超塑成型性能。试验表明,铝中加入 1%~2% 的锂,密度可降低 3%~10%,弹性模量提高 6%~35%^[1],用其取代常规的铝合金可使构件质量减轻 15%,刚度提高 15%~20%^[2],因此,被认为是航空航天工业中的理想结构材料。在该领域,铝锂合金已在许多结构件上取代了常规高强铝合金,应用日益广泛。激光焊接技术作为近几十年发展起来的一种高质量、高精度、低变形、高效率和高速度的先进焊接方法,在诸多领域中越来越受到重视并广泛地应用。

金属结构经焊接方法加工后,由于构件的不均匀冷却,会在其内部产生焊接残余应力^[3],并且残余应力的峰值往往达到或超过材料本身的屈服极限^[4]。即使是能量集中、焊接速度很高的激光焊接也不例外。当焊接构件投入使用时,它们所载荷引起的工作应力与其内部的残余应力相叠加,将导致焊接构件产生二次变形和焊接残余应力的重新分布,从而降低焊接构件的刚性和尺寸稳定性;焊接构件在残余应力、工作温度和工作介质的共同作用下,还将严重影响焊接结构和焊接接头的疲劳强度、抗脆断能力、抗拉应力开裂以及高温蠕变

能力。因此,对强度和精度要求都很高的航空焊接结构来说,研究其焊接残余应力的具体分布状态显得尤为重要。目前国内外对普通钢材传统熔焊方法的对接、堆焊的残余应力分布规律已经比较熟悉,但对于激光焊接 T 型接头的残余应力分布规律的研究还不是很多。飞机前翼、尾翼以及汽车的许多部件中存在着大量 T 型筋板、T 型接头等结构,测定其焊接残余应力的大小和分布,对优化焊接结构、焊接工艺和提高焊接接头的综合性能具有重要意义。

1 测量方法的选择

残余应力测量技术至今已经形成了几十种测量方法。其中以小孔法和 X 射线衍射法发展较为成熟,采用 X 射线衍射法测量残余应力准确、可靠,特别当应力在小范围内急剧变化时最有效^[5]。而对于激光焊缝来说,应力梯度比较大,采用 X 射线衍射法测量其残余应力分布规律是一种比较理想的测量方法。

2 试验原理

当一束波长为 λ 的单色光 X 射线和一块具有无规晶体取向,晶粒又足够细的多晶体材料相遇时,将产生相互干涉。可以将它阐述为处于有利位向的晶体中一定间距的晶格平面对 X 射线束的选择反射。如图 1 所示。

当入射束 I 以角度 θ 照射到一个无应力的晶体上,

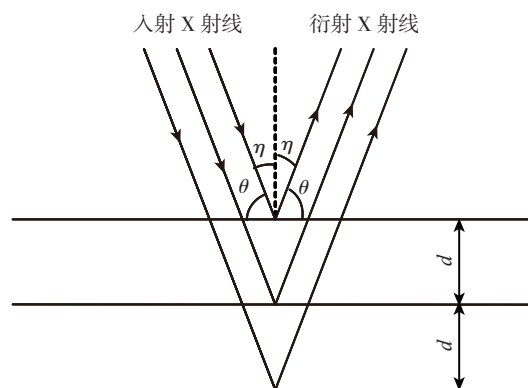


图1 晶体对X射线的衍射图

Fig.1 X-ray diffraction of crystal

由于一定的金属材料其晶面间距 d 是一定的, 所以当 X 射线射入金属点阵后, 相邻两原子面的 X 射线光程差 $2d\sin\theta$ 为波长的整数倍时将发生衍射现象, 其衍射角 θ 、晶面间距 d 和入射线波长 λ 满足布拉格方程:

$$2d \sin \theta = n \lambda, \quad (1)$$

式中, n 为衍射指数; λ 为 X 射线管靶材的特征谱线波长; 2θ 为入射线与衍射线之间的夹角。

当应力引起晶格间距 d 发生变化时, 衍射角 θ 随之变化。从以上布拉格方程中可看出, 欲知晶面间距 d 的变化, 只要测得衍射角 2θ 的变化即可。利用衍射角的变化, 根据弹性力学方程, 应用下式可求出某一方向的应力:

$$\sigma = K \cdot M, \quad (2)$$

式中, K 为应力常数,

$$K = -[E/2(1 + \mu)] \cdot \text{ctg}\theta_0 \cdot \pi/180, \quad (3)$$

M 为实验测定, $M = \partial(2\theta)/\partial(\sin^2 \phi)$; E 为材料的弹性模量; μ 为泊松比; ϕ 为应变方向与试样表面法线的夹角; θ_0 为 $\phi=0$ 时的衍射半角。

3 试验条件和焊接试样

研究采用的材料为铝锂合金 5A90, T 型接头底板和筋板尺寸分别为 $300\text{mm} \times 200\text{mm} \times 3\text{mm}$ 和 $300\text{mm} \times 100\text{mm} \times 3\text{mm}$, 其化学成分如表 1 所示。试件焊接示意图如图 2 所示, 激光焊接时, 激光束与 T 型接头腹板夹角 θ 为 40° , MIG 焊接时电弧与 T 型接头腹板夹角 θ 是 50° 。焊接在专门的夹具上进行。试验采用 Trumpf 公司生产的 3kW, Nd·YAG 激光器, 焊接参数如表 2 所示, 焊接过程中, 用氩气对焊接处进行保护。

表1 铝锂合金5A90的化学成分(质量分数) %

Mg	Li	Zr	Fe	Si	Ti	Al
4.9~5.4	1.8~2.2	0.08~0.13	<0.12	<0.1	<0.05	余量

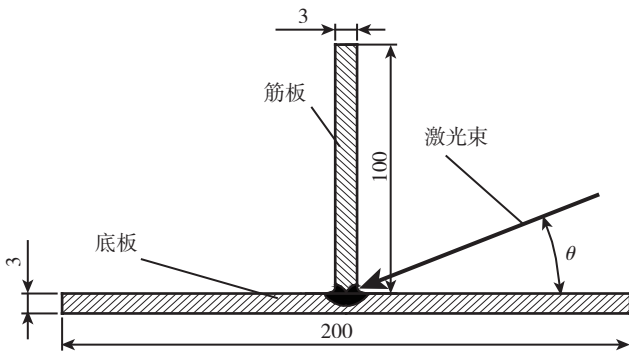


图2 试件焊接示意图

Fig.2 Diagram of T-joints by laser beam welding

表2 激光焊接工艺参数

编号	焊接方法	激光功率 P/W	焊接速度 V/(m·min ⁻¹)	热输入 q/(kJ·m ⁻¹)
1	激光焊接	2600	3.3	13.13
2	MIG 焊接	-	0.9	41.78
3	激光焊接	2800	2.1	22.2
4	激光焊接	2600	3.0	14.4

4 测试条件和测量方法

试件焊完冷却至室温, 然后采用 X 射线衍射仪对试件的残余应力进行测试。由于试件表面存在氧化皮、油污等杂质, 射线容易被这些杂质吸收或散射, 使得测量结果不能反映试件表面真实的应力状况。所以测试前, 采用化铣的方法, 去除试件表面的应力附加层, 然后再进行应力测试。由于试件结构的特征和测试设备的特点, 无法在试件正面测试残余应力, 所以测试只能在 T 型接头背面进行。在垂直于焊缝的方向进行布点, 如图 3 所示, 垂直于焊缝的方向, 分别测试距离焊缝中心 0mm、1mm、2mm、3mm、4mm、6mm、8mm、20mm 处进行测量。在每个测试点测量 X 向和 Y 向 2 个方向的应力。实验在室温下进行。

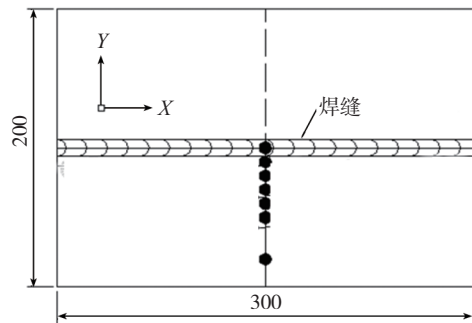


图3 测量点分布图

Fig.3 Arrangement of strain gages

5 试验结果

5.1 试件 1 的应力测试结果

试件 1 的残余应力测试结果如图 4 所示, 从图中可以看出, 在焊缝中心, X 向应力为压应力, Y 向应力为拉应力, 在距焊缝中心约 2mm 处, X、Y 2 个方向的应力都变为拉应力, 并且 X 向应力达到最大值 99MPa, 随后 X 向应力减小, 但仍为拉应力, 而 Y 向则变为压应力, 并且其值达到 55MPa。随着远离焊缝中心, Y 向应力值先减小后增大, 而 X 向应力值一直增大, 直到距离焊缝中心约 7mm 处, Y 向应力变得很小, 而 X 向应力变得没有规律。

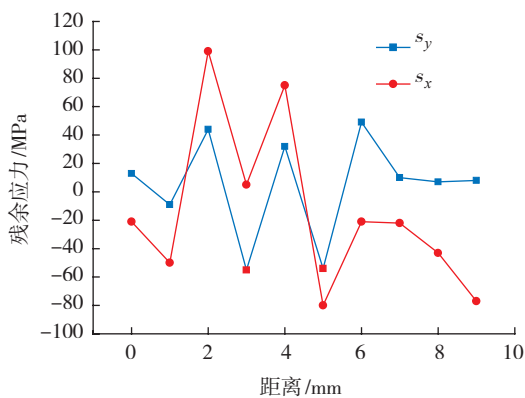


图4 试件1的残余应力分布图
Fig.4 Distribution of residual stress for specimen 1

5.2 试件 2 的应力测试结果

试件 2 的焊接方法为 MIG 焊,对试件 2 测量了其垂直于焊缝方向应力分布特征,测量结果如图 5 所示。在垂直于焊缝方向上,在焊缝中心, X 向应力为压应力,且其值达到了 109MPa,而 Y 向为很小的拉应力。随离焊缝中心距离增加,在距焊缝中心 1mm 处, X 向压应力减小,而 Y 向拉应力增大,在距焊缝中心 2mm 处, X 向应力变为拉应力,而 Y 向应力变为压应力。在距焊缝中心 4mm 处, Y 向拉应力达到最大值约 97MPa,距焊缝中心 6mm 处,2 个方向应力都减小。距焊缝中心约 6mm 外,应力分布没有规律。

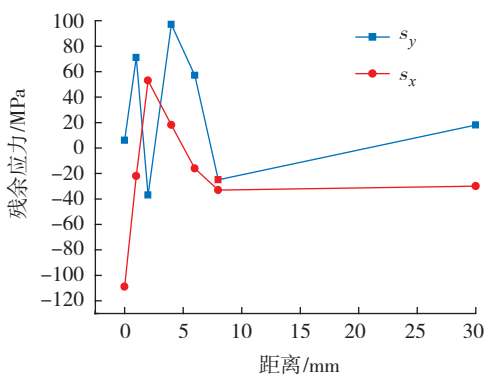


图5 试件2在垂直于焊缝方向的应力分布
Fig.5 Distribution of residual stress vertical to welding seam for specimen 2

5.3 试件 3 和试件 4 应力测试结果

在垂直于焊缝方向上,在焊缝中心,试件 3 和试件 4 的 Y 向应力都为压应力,试件 4 的 Y 向应力随远离焊缝中心,压应力值逐渐减小,到距焊缝中心约 8mm 处变为拉应力。而试件 3 的 Y 向应力在距焊缝中心 2mm 处变为拉应力,接着在 3mm 处又变为压应力,接着又变

成拉应力,并且拉应力随远离焊缝中心,其值逐渐增大,在距焊缝中心 8mm 处变成压应力。试件 4 在焊缝中心的 X 向应力为压应力,并随远离焊缝中心,压应力值变小,在距焊缝中心 4mm 处压应力值达到最大,其值约为 59MPa,之后变成拉应力。试件 3 在焊缝中心的 X 向应力为拉应力,随着远离焊缝中心,变成压应力,接着又变成拉应力,并且拉应力减小,在距焊缝中心约 6mm 处又变成压应力。应力分布分别如图 6 和图 7 所示。

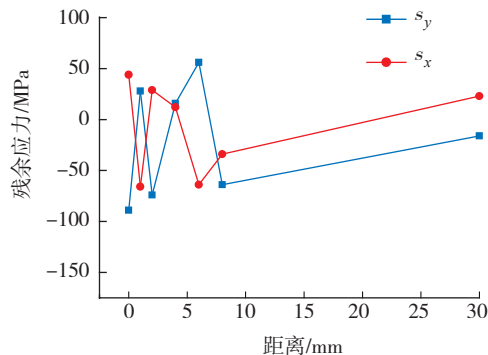


图6 试件3在垂直于焊缝方向的应力分布
Fig.6 Distribution of residual stress vertical to welding seam for specimen 3

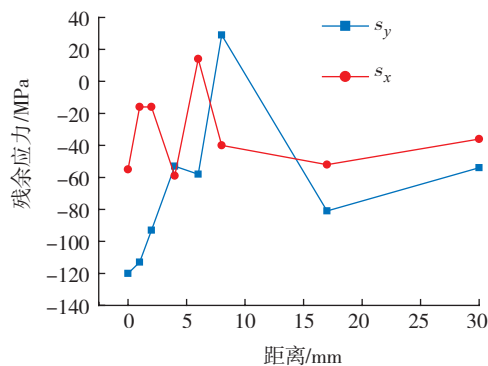


图7 试件4在垂直于焊缝方向的应力分布
Fig.7 Distribution of residual stress vertical to welding seam for specimen 4

6 讨论

焊接残余应力的最大值达到材料屈服强度的 1/2 左右。从以上应力测试结果可以看出,纵向残余应力的峰值一般都大于横向残余应力的峰值,出现这个现象的原因与焊接试件本身的结构形式有关,即焊缝在横向受到的拘束程度比较小,而纵向受到的拘束程度比较大。

从应力测试结果可以看出,激光焊接在距离焊缝中心约 6mm 内比较有规律,之外应力都比较小,残余应力分布梯度比较大,残余应力最大值出现在熔合线附近。而对于 MIG 焊接,其残余应力在距离焊缝中心大

(下转第 97 页)

表4 Level 2级评估不同裂纹深度下的剩余强度

a/mm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
σ_{max}/MPa	252	248	240	229	213	191	162	123	72

为了分析 1Cr18Ni9Ti 导管的疲劳寿命, 根据对 Paris 公式直接求定积分得到的公式:

$$N = N_f - N_0 = \int_{N_0}^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(K)^m}, \quad (2)$$

式中, N_0 为裂纹扩展至 a_0 时的循环次数(若 a_0 为初始裂纹长度, 则 $N=0$), N_f 为裂纹扩展至临界长度 a_c 时的应力循环次数, C 、 m 是与环境、频率、温度和循环特性等因素有关的材料常数(以测试 1Cr18Ni9Ti 材料焊缝的疲劳裂纹扩展速率时结果)。假设导管表面的初始裂纹长度为 $a_0=0.1mm$, 最终扩展到临界裂纹长度 $a_c=0.9mm$ 时, 将 a_0 、 a_c 和上述材料参数代入公式(2)后, 计算出焊缝位置在不同的应力下的疲劳剩余寿命(即导管的剩余寿命), 计算结果如表 5 所示。根据发动机设计所提供的单根导管受到振动时其频率在 100~200Hz。因此, 当 1Cr18Ni9Ti 导管 TIG 焊振动时的频率在 150Hz 时, 1Cr18Ni9Ti 导管的疲劳裂纹扩展寿命换算成小时后结果如表 5 所示。

表5 不同应力水平下导管的疲劳裂纹扩展寿命
(扩展量0.1~0.9mm)

应力水平/MPa	N_f (焊缝)	
	次数	小时/h
27	5.39×10^8	998
30	3.43×10^8	635
35	1.77×10^8	328
40	9.98×10^7	185
45	6.02×10^7	112
50	3.83×10^7	71

3 结论

(1) 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 TIG 焊对接接头具有良好的力学性能, 其抗拉强度能达到母材强度的 90% 以上, 屈服强度达到母材的 80%, 延伸率达到母材的 70% 左右, 其断裂韧性低于母材。在裂纹扩展前期, 接头疲劳裂纹扩展速率低于母材; 在裂纹扩展后期, 接头的疲劳裂纹扩展速率高于母材。

(2) 壁厚为 1.0mm、直径为 10mm 的 1Cr18Ni9Ti 导管 TIG 焊对接结构在工况振动载荷 27MPa 和最大振动载荷 50MPa 下, 只会发生泄漏失效。所以, 可以将壁

厚当作是导管的损伤容限, 预留一定壁厚, 其损伤容限 $a_c=0.9mm$ 。而且导管在发动机实际服役过程中, 断裂不是导管破坏的主要形式, 泄露为导管存在的主要问题。

(3) 获得了初始裂纹 $a_0=0.1mm$ 时不同应力幅值下的 1Cr18Ni9Ti 导管 TIG 焊对接结构的剩余寿命; 在工况振动载荷 27MPa, 振动频率 150Hz 下, 初始裂纹为 0.1mm 导管的剩余寿命为 998h。

参考文献

- [1] 许锬俊. 航空发动机导管结构完整性要求的初步研究. 航空发动机, 1994(3): 53-62.
- [2] 刘涛, 陈振中, 徐林林. 液压导管用不锈钢板材振动损伤研究. 沈阳航空工业学院学报, 2007, 24(2): 15-17.
- [3] 唐有才, 马乃苍, 房学祥, 等. 飞机液压导管破裂故障分析及措施. 航空工程与维修, 2001(2): 19-20.
- [4] 王敏. 导管高频感应钎焊在飞机制造中的应用. 航空制造技术, 2002(11): 35-38.
- [5] 张彦华. 焊接力学与结构完整性原理. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [6] 范荣辉, 朱明, 惠松晓, 等. TA15 (ELI) 钛合金厚板损伤容限性能研究. 金属热处理, 2007, 32(2): 27-29. (责编 亦非)

(上接第 93 页)

约 10mm 内比较有规律, 之外应力值比较小, 分布没有规律。原因在于: 激光焊接的能量密度高, 焊接速度快, 焊缝深宽比大, 热影响区小, 温度梯度大, 从而导致焊接残余应力分布比较集中; MIG 焊接的能量密度比较低, 焊接速度低, 焊缝深宽比小, 热影响区大, 温度梯度比较小, 从而导致焊接残余应力在焊缝较大范围内变化。

7 结论

(1) 焊接残余应力的最大值达到材料屈服强度的 1/2 左右。

(2) 激光焊接在距离焊缝中心约 6mm 内比较有规律, 而对于 MIG 焊接, 其残余应力在距离焊缝中心大约 10mm 内比较有规律。

参考文献

- [1] Rioja R J. Fabrication methods to manufacture isotropic Al-Li alloys and products for space and aerospace applications. Materials Science and Engineering, 1998, A257: 100-107.
- [2] 潘肃. 铝锂合金的发展及其工艺特性. 航天工艺, 1994(5): 40-45.
- [3] 王者昌. 焊接应力变形原理若干问题的探讨(二). 焊接学报, 2008, 29(7): 69-73.
- [4] 唐慕尧. 焊接测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [5] Namba Y. Mechanish of float polishing. The science of polishing technique digest. Tub2-1, monterey, CA, 1984. (责编 可岚)