船用高强度铝合金焊接接头的残余应力分布研究

胡浩,高飞,邹家生

(江苏科技大学,材料科学与工程学院,江苏 镇江)

摘要:本文采用 X 射线衍射法对 10mm 厚的 1561 高强铝合金对接焊接接头试样的残余应力分布进行了测量与分析, 通过测量了 1561 铝合金焊缝中心横截面的表面残余应力,并采用逐层抛光法分别对 1561 铝合金的焊缝中心、焊趾 及近焊缝区深度方向 0-3mm 进行深抛与测量,表明焊缝中心横截面表面应力分布为压-拉-压交替,纵向应力和横向 应力最大值分别为 190MPa 和 60MPa,近焊缝区域的拉应力高于焊缝中心的拉应力,深度方向应力测量表明焊缝中 心、焊趾、近焊缝区-3mm 内深度方向纵向拉应力分别为 93MPa、157MPa、154MPa,焊缝中心处深抛至-1.5mm 后 纵向拉应力开始递减。本文的残余应力测试结果为后续的应力控制打下了基础。

关键词: 1561 铝合金; 残余应力测量; X 射线衍射法; 深抛

序言

随着船舶不断轻量化、高速化的发展,船舶的建造材料由传统的钢材转向铝合金,1561 铝合金 由于其良好的耐腐蚀性、焊接性及低密度和高强度^[1]的特点,是制造铝合金舰船的优选材料,然而 材料在焊接过程的不均匀受热,使焊件发生热变形和组织变形,从而产生焊接残余应力^[2],焊接应 力对焊接结构的静载承受能力、结构的断裂、疲劳强度、结构刚度、结构稳定性、应力腐蚀、构件 的精度和尺寸的稳定性等都有一定的影响^[3],较大的焊接应力必然影响船舶的寿命,造成结构的脆 性断裂或疲劳破坏,因此对焊件残余应力的检测很有必要性,测试结果也为后续的应力控制打下了 基础。

目前应力的测量主要分为有损和无损检测,有损检测额如盲孔法、环芯法、切条法等,无损检测主要为中子衍射法、超声波法、X 衍射法^[4]等,X 衍射法由于操作便携,测试结果可靠,被广泛用于科研和工业领域中。李庆庆^[5]用 X 衍射法测量了 5E83 铝合金的表面残余应力,得出表面最大纵向拉应力为 55MPa,最大横向拉应力为 79MPa。郭俊康^[6]采用 X 衍射法测量了 30mm 厚板铝合金淬火后表面应力的测量,最大压应力为-220MPa,目前对于材料的测试大多是集中在材料的表面测试,对于材料内部的应力测试研究较少,Weich^[7]利用中子衍射和盲孔法测得钢 S355J2 的残余压应力的最大压应力出现在 0.4mm 至 0.5 mm 处;郭魂^[8]对 7075T7351 铝合金预拉伸板采用逐层应变法测量内部应力,最大值出现在距离表面约试板 1/8 厚处。

本文结合 X 射线衍射仪和 1561 铝合金材料,介绍了测试原理和测试方法,并对铝合金焊缝中 心横截面进行残余应力测量,并分别对焊缝中心、焊趾和近焊缝区进行逐层抛光,测量了试样 0-3mm 内深度方向上的残余应力,为后期应力的调控奠定基础。

1、X 射线衍射法测试残余应力原理

X 衍射法测试原理基本: 材料内应力引起的晶格应变和宏观应变是一致的^[9.10], 假设射线照射范 围内有足够多的晶粒, 且晶面的法线在空间分布均匀, 当试样内有应力时, 晶格的晶格间距 d 会产 生变化, 通过衍射法测量晶格间距d₀, 如果测量的d₀, d_n在误差范围之内则认为无应力, 如 果测量的间距d₀, d_n依次增加则为拉应力, 相反为压应力^[9], 随之表现出来的就是衍射峰值的移动, 移动的大小与被测试样的应力值大小相关^[10], 晶格间距 d, 衍射角θ, 和入射线的波长λ满足布拉格 方程:

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

再通过弹性学的公式可以得出应力测试公式:

 $\sigma = K \cdot M.$

式中的o为应力值,公式 K 为常数, M 为实验测定:

$$K = \frac{E}{2(1+\gamma)} \cot\theta \frac{\pi}{180}.$$
(3)

$$M = \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\phi)}.$$
(4)

式中 E 为材料的弹性模量, γ 泊松比, θ 为衍射角, ϕ 为晶面法线与被测试面法向的夹角^[11]。 2、测试实验方案

2.1 试样的准备

本实验焊接母材为 200mm×100mm×10mm 规格的 1651 铝合金,使用 Ar5M 焊丝,铝合金成分 如表 1,材料性能如表 2。焊接方法采用 TIG 焊接,铝合金板开 V 型破口,为了使试板焊透,对正 面焊好的铝合金采用背面清根再焊,TIG 焊接工艺参数为焊接电流 139A,电压 23.4V,焊接速度 25-45cm/min,板材焊接采用拘束焊接。

表 1 铝合金化学成分表											
牌号	Al	Mg	Mn	Zr	Fe	Si	Zn	Cu	其他杂	质元素	
_									每种	总量	
1561	余量	5.5-6.5	0.7-1.3	0.02-0.12	≤0.4	≤0.4	≤0.2	≤0.1	≤0.05	≤0.15	
Ar5M	余量	4.0-4.9	0.4-1.0	-	≤0.4	≤0.4	≤0.14	≤0.033	≤0	.17	

表 2 试样材料性能参数									
牌号	抗拉强度/MPa	屈服强度/ MPa	延伸率						
1561	≥333	≥175	≥12						
Ar5M	≥315	≥215	≥13						



图1 拘束焊接现场



图 2 焊缝宏观图

2.2 测试设备的参数设置及测定方案

应力测试设备采用加拿大 PROTO 公司生产的便携式 iXRD 应力测试仪,测试方法为同固定Ψ双 侧探测法 (Ψ为射线与测试试样表面的夹角),选用靶材为 Cr 靶 (311 晶),应力计算方法^{sin²}ψ法, 靶材测试电压为 20kv,管电流 4mA,衍射角 20=139.00,计数 11 次。

试板焊接完成后冷却至室温,使用 XRD 衍射法测量试样的焊接残余应力,由于 X 衍射法测量 的是铝合金表面小于 30um 以内的平均残余应力^[12],对于试板其表面氧化物、表面粗糙^[13]等焊接成 型质量因素,会使衍射的射线容易被这些杂质散射,造成测量误差较大,测试在前采用电解抛光手 段对其表面抛点,抛光液为饱和的氯化钠溶液。对于焊缝区域,金属快速凝固使得焊缝表面区域晶 粒过大,导致残余衍射的晶粒过少,衍射强度不稳定,峰值异常,测得应力值不可靠,针对这种情 况可以对表面先进行打磨[10],然后进行电解抛光。







(a) 测试试样

(b) 测试点示意图

3、残余应力测试结果

3.1 焊缝中心横截面的残余应力测试结果与分布

由图 6 可知焊后的铝合金表面应力整体表现为压-拉-压交替分布,纵向拉应力幅度波动高于横向 的拉应力幅度,横向的拉应力较为平缓,主要原因是焊缝冷却凝固时,纵向收缩的程度大于横向收 缩的程度,纵向收缩局限于近焊缝区域,而横向收缩还包括近焊缝的周边区域,两者共同作用导致 了焊缝中心区域的纵向拉应力变化幅度大于横向的拉应力的幅度^[14]。试板表面的横向拉应力出现在 距焊缝中心-45mm 至 60mm 区间,最大拉应力出现在距焊缝中心 15mm 处约 60MPa,焊缝中心处的横 向拉应力约为 50MPa。

图 5 测试试样和测试点示意图





铝合金焊缝中心横截面的纵向拉应力高于横向的拉应力,说明试板的纵向载荷能力要低于横向的载荷能力,较高的拉应力与外界的载荷力相互叠加,会导致加快裂纹的扩展速率,促使结构的脆性断裂,减少了整体焊接结构的稳定性与精度性^[15]。铝合金焊缝中心横截面纵向拉应力呈双峰型

"M"状,在焊缝横截面两侧-45mm 至-35mm, 45 mm 至 60mm 区域内为应力过渡区域,在-30mm 至 35mm 区域内为拉应力,纵向拉应力在 69MPa 至 190MPa 值波动,纵向拉应力最大出现在距离焊缝 中心 15mm 处,约为 190MPa,接近材料的屈服强度,焊缝中心的拉应力约为 105MPa,远离焊缝处 80mm 至 120mm 区域内主要为压应力,主要是因为热源对焊缝进行局部加热时,焊缝区域金属结晶 凝固时,进焊缝区域的金属材料阻碍了其凝固成型,产生了纵向收缩,导致焊后在近焊缝区域产生 纵向收缩形成拉应力,远离焊缝区域就会形成压应力^[14]。 3.2 深度方向的应力测试结果与分布

熔化焊中材料表面受到焊接热源作用,温度通过材料表面传递到材料内部,从而产生不均匀的 温度场,导致试样发生不均匀的塑形变形而产生内部残余应力^[16]。



图 8 距离焊缝中心 15mm 处的深度方向应力测试

图9 焊趾深度方向应力测试

由表面应力测试结果可知,在距离焊缝中心 15mm 处的近焊缝区域出现拉应力的峰值,因此首 先对该区域进行深抛,测量其深度方向 0-3mm 内应力的变化,图 8 为近焊缝区处采用逐层电解抛光 进行深抛得到的应力值,深度截面应力均为拉应力,纵向拉应力变化梯度高于横向拉应力,横向较 为平缓,深度方向的应力整体表现没有规律,整体的应力值在 78MPa 至 215MPa 之间波动,纵向的 拉应力最大值出现据表面-1.56mm 处,约为 215MPa,此处表面测量值为 188MPa,0-3mm 以内纵向 应力平均值为 154MPa,横向应力变化较小,在 30MPa-90MPa 波动,最大横向应力出现在-2mm 处 约为 90MPa,横向拉应力平均值 66MPa。

焊趾是焊接结构中较为薄弱的部位,也是裂纹易产生区域,所以对焊趾应力分布研究很有必要。 图 9 为焊趾处采用逐层抛光测量的应力值,由于焊缝的余高影响,对余高进行打磨,打磨区域的表 层应力测试值较小,纵向应力约为 43MPa,主要原因是余高的减少降低了该区域的局部突变,使得 焊缝处应力降低,焊趾对试板截面的拘束降低,使得应力的释放从而降低应力^[17]。焊趾垂直截面的 纵向应力均为拉应力,在-0.25mm 至-1.75mm 内应力波动不大,最大应力值出现在约-3mm 处,为 236MPa。焊趾近表面处纵向应力分别为 145MPa 和 188MPa,焊趾内部纵向应力要高于表面测试的 应力。焊趾 0-3mm 内的纵向拉伸平均应力值为 157MPa。焊趾处深度截面的横向应力值整体较小,在-38MPa 至 60MPa 范围波动,最大的横向拉应力首次出现在-1mm 处,为 60MPa。



焊缝区域是应力较难测试的区域,与焊趾测量方法相同,先对其表层进行打磨,测试结果分布 如图 10,焊缝中心深度方向的纵向应力整体在 28MPa 至 170Mp 波动,最大值出现在距离焊缝距表 面-0.37mm 处,为170MPa,焊缝中心深度截面的应力在-1.3mm 内波动较大,无明显规律,从-1.3mm 出开始焊缝中心深度方向的纵向应力逐渐下降,-2.5mm 开始纵向应力基本与横向应力分布基本重 合,横向应力测试值在-0.5mm 处有波动,可能是由于该点处横向晶面间距较大,引起衍射峰值测量 误差。横向应力值在 11MPa 至 80MPa 之间波动,横向应力值最大出现在距焊缝表面-2mm 处为 80MPa。焊缝中心深度方向 0-3m 以内纵向拉应力平均值 93MPa,横向拉应力平均值为 58MPa。 **4、结论**

通过对 10mm 厚 1561 铝合金 TIG 焊接接头表层及深度方向的应力测量实验可以得到以下结论: (1) 在拘束焊状态下,铝合金试板的焊缝中心两侧的横向应力和纵向应力均为拉应力,焊缝中心的 应力值小于近焊缝区的应力值,最大拉纵向拉应力值距焊缝中心 15mm 处约为 190MPa,最大的横 向拉应力值为 60MPa, 拉应力区域在焊缝中心两侧-35mm 至 30mm 区域内。

(2)沿近焊缝 15mm 处进行深抛,深度方向应力测试结果表明,据表面 0-3mm 内母材的横向应力和纵向应力均为拉应力,最大拉纵向拉应力出现在-1.56mm 处,约为 215MPa,最大横向拉应力在据母材表面-2mm 处,约为 90MPa,0-3mm 内纵向拉应力平均应值 154MPa,横向拉应力平均值 66MPa。
(3)经打磨后的焊趾表层残余应力较小,纵向应力约为 43MPa,沿焊趾处进行深抛,深度方向应力测试结果表明,最大纵向拉应力值应力值出现在约-3mm 处,约为 236MPa,最大横向拉应力出现在-1mm 处,约为 60MPa,0-3mm 内纵向拉应力平均应值为 157MPa。

(4) 对焊缝中心处进行深抛,深度方向应力测试结果表明,纵向拉应力最大值出现在距离焊缝表面 -0.37mm 处,约为 170MPa,距焊缝中心深度方向-1.3mm 处开始焊缝的纵向应力逐渐下降,-2.5mm 开始纵向应力基本与横向应力分布基本重合,横向的拉应力值最大出现在距焊缝表面-2mm 处,约为 80MPa,0-3mm 内纵向拉应力平均值为 93MPa,横向拉应力平均值为 58MPa。

参考文献

[1] Shanguo Han, Shida Zheng, Detao Cai, et al. Microstructure Characteristics and Properties of 1561 Aluminum Alloy Weldments Processed by Different MIG Welding [J]. Materials Science.983:163-168.

[2] Liljedahl C,Brouard J,Zanellato O,et al. Weld residual stress effects on fatigue crack growth behaviour of aluminium alloy 2024-T351[J].International Journal of Fatigue.2009,31(6):1081-1088.

[3] 张正伟,张昭,张洪武.焊接残余应力对 2024 铝合金薄板疲劳寿命的影响[J].焊接学报.2014,35(10): 29-32.

[4] 郑卜祥,宋永伦,席峰,等. 对接焊铝合金板材残余应力的 X 射线测试[J].机械工程学报.2009, (03): 275-281.

[5] 李庆庆,李晓延,杨东霞,等 5e83 铝合金 tig 焊接头残余应力分布研究[J].焊接学报.2013,4:P22-25.

[6] 郭俊康,吴运新,胡永会.X 射线衍射法在测量铝合金厚板表面残余应力中的应用[j].轻合金加工技术.2010, 38(4);31-33.

[7] Weich I. Edge layer condition and fatigue strength of welds improved by mechanical post-weld treatment[J]. Welding in the World. 2011, 55:3-12.

[8] 郭魂,左敦稳,王树宏,等.铝合金预拉伸厚板内残余应力分布的测量[j].华南理工大学学报.2006.34(2): 33-36.

[9] 于康,孙亚非,陈晓江.X 射线衍射残余应力测试方法及应用[J].火箭推进.2015,41(2):102-107.

[10] 马昌训,吴运新,郭俊康. X 射线衍射法测量铝合金残余应力及误差分析[J].热加工工艺. 2010,39(24):5-8.

[11] ASSIS J T,MONIN V, TEODOSIO JR. X-Ray analysis of residual stress distribution in weld region[J]. Adances in X-ray Analyais.2002 (45):225-231.

[12] 苟国庆,黄楠,陈辉,等.X 射线衍射法测试高速列车车体铝合金残余应力[J].西南交通大学报.2012.47(4):618-622.

[13] Fitzpatrick M E,Fry A T,Holdway P,et al.Detennination of residual stresses by X-ray diffraction-issue[J].Teddington National Physical Laboratory .2005:31-35.

[14] 朱春沅,李桓,黄超群,等.2219 铝合金焊接残余应力分布分析[J].焊接学报.2017,38(11):32-36.

[15] James M N,Hughes D J,Chen Z,et al. R esidual stresses and fatigue performance [J].Engineering Failure Analysis, 2007, 14(2):384 - 395.

[16] 李亭,史清宇,李红克,等.铝合金搅拌摩擦焊接头残余应力分布[J].焊接学报.2007.28(6);105-108.

[17] 石康柠,汪殿龙,梁志敏,等.余高去除对铝合金 TIG 焊接头残余应力的影响[J].焊接学报.2017, 5,;11-13.

作者简介:

胡浩,男,硕士研究生,江苏科技大学,焊接,15395075206 高飞,男,副教授,江苏科技大学,焊接,13952845133 邹家生,男,教授,江苏科技大学,焊接,13305280882



江苏船舶微信公众号, 欢迎关注, 欢迎投稿!