

盲孔法与压痕法测量 2219 铝合金
熔焊焊缝残余应力的对比分析

黄超群¹, 李 桓¹, 罗传光^{1,2}, 宋永伦³

(1. 天津大学 天津市现代连接技术重点实验室,天津 300072;
2. 四川航天技术研究院,四川 610100; 3. 北京工业大学 机电学院,北京 100022)

摘 要:采用盲孔法和压痕法,分别对 2219 铝合金变极性 TIG 焊焊缝两侧的残余应力进行测量,测量点沿距焊缝中心线 19 mm 的纵截面上布置. 铝合金熔焊的残余应力关于焊缝中心线近似对称相等,在焊缝中心线任一垂直线上,距离焊缝中心线距离相等的两点应力相等. 分别用两种应力测量方法测量焊缝中心线两侧应力,对比两种测量方法对同一大小的应力测量的差别. 测量结果表明,盲孔法与压痕法应力测量结果变化趋势大体一致,沿焊缝方向应力呈现抛物线状,在焊缝中部存在应力最大值. 根据两种测量方法的回归曲线,压痕法测量结果比盲孔法大 20 MPa 左右. 通过 R 软件做配对样本的 t 检验分析,在置信度为 0.95 时,压痕法测量结果减盲孔法测量结果的差值的置信区间为(14,37),平均差值为 25 MPa.

关键词:盲孔法;压痕法;残余应力

中图分类号: TG 407 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20150710004

0 序 言

2219 铝合金属于 Al-Cu-Mn 系列可热处理强化铝合金,因其具有良好的低温及高温力学性能、断裂韧性、抗应力腐蚀性能,现已成为新一代运载火箭箭体结构及推进剂贮箱结构材料^[1]. 由于大多数航天焊接结构焊缝众多且复杂,焊接本身具有加热范围小,温度梯度大的特点,致使结构不可避免地产生焊接热应力和热膨胀,焊后会出现焊接残余应力与变形^[2]. 焊接残余应力与变形是影响构件结构性能、安全可靠性等的重要因素,在结构静载强度、刚度及稳定性、疲劳强度等方面会产生一定的影响^[3]. 盲孔法理论体系完备,测量结果准确,是目前工程上最常用的残余应力测量方法,美国 ASTM 协会已将其纳入标准^[4]. 李亨^[5]用盲孔法测量应力发现铝合金搅拌摩擦焊前进端和后退端应力分布的不对称性及其原因. 谭明鹤^[6]和侯海量等人^[7]提出了盲孔法的塑性修正公式,以提高测量精度. 王红阳等人^[8]采用压痕法和有限元分析软件研究了激光-氩弧复合热源焊接镁合金残余应力的分布规律和特征.

对盲孔法与压痕法两种测量方法的对比分析少

有研究. 在测量航天结构的残余应力时,盲孔法的钻孔深度对结构会产生不良影响,压痕法因压痕深度浅,压痕经打磨后影响可忽略不计,故在测量航天结构等高精度结构中采用压痕法. 文中在 2219 铝合金变极性 TIG 焊焊缝中心线两侧布置测量点,分别用盲孔法和压痕法测量残余应力的分布情况,对比分析两种测量方法的差别,并提出一种数据处理的统计方法,可以通过比较盲孔法和压痕法有限的测量点结果,得到关于两种测量方法总体上的差别.

1 试验方法

1.1 盲孔法与压痕法测量残余应力的原理

盲孔法是在试样上钻孔形成一定尺寸的盲孔,破坏试样中原有的应力平衡,利用应变片测量出应变释放量,进而计算出残余应力. 试验中,盲孔直径为 2 mm,深度 3 mm,由于盲孔有一定的深度,得出的应力为盲孔深度上应力的平均值. 而压痕法通过在试样表面冲击制造一定尺寸的球冠形状,从而形成外加应力场,外加应力场和残余应力场叠加引起应变增量,通过事先标定好的应变增量与弹性应变的关系曲线,从而得到残余应力值. 压痕深度为 0.1~0.12 mm,所测量的应力为表面残余应力. 两种测量方法的应力测量深度不一样,测量原理分别

如图 1、图 2 所示.

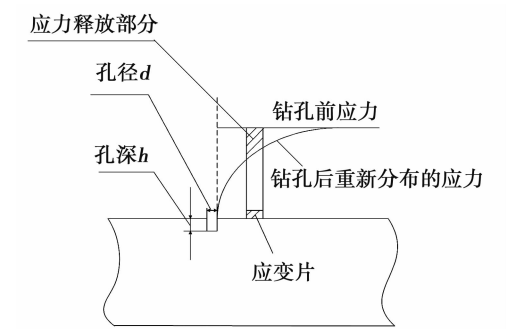


图 1 盲孔法测量应力原理

Fig. 1 Principle of blind hole method to measuring residual stress

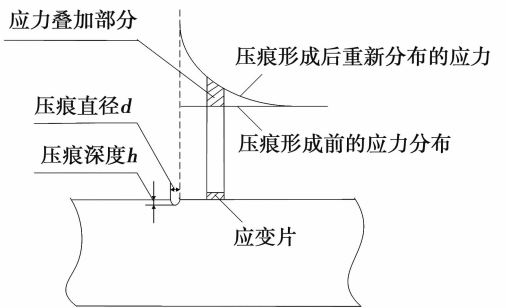


图 2 压痕法测量应力原理

Fig. 2 Principle of indentation method to measuring residual stress

1.2 试验方法与过程

试验件为两块尺寸为 500 mm × 150 mm × 6 mm 的 2219 铝合金平板经变极性 TIG 焊得到的焊接件. 焊缝宽度为 18 mm. 2219 铝合金为可热处理强化铝合金,主要强化元素是 Cu. 表 1 为其化学成分和力学性能.

表 1 2219 铝合金的化学成分(质量分数,%)和力学性能
Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of 2219 Al alloy

Cu	Mn	Fe	Si	Al	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)
0.68	0.32	0.23	0.49	余量	432	11.1

试验中为尽可能使试验条件相同,盲孔法和压痕法均采用中国科学院沈阳金属所生产的 KJS-3P 型压痕应力测试仪. 盲孔法采用该仪器测量出应变的变化量,再通过相关公式计算出残余应力. 压痕法可直接采用该设备读出残余应力数值. 盲孔法采用的应变片型号为 BE120-2CA-K,该应变片有 0°,

45°,90°方向三个测量通道,大多数应力测量都是测量三个通道的应变变化量. 由于焊接残余应力的主方向沿焊缝和垂直于焊缝方向,为简化测量和计算过程,只测量 0°和 90°方向,即沿焊缝和垂直焊缝方向的应变变化量,然后计算残余应力. 压痕法采用应变片型号为 BA120-1BA(11)-ZKY.

在焊缝长度方向上的中间部位,温度波动小,焊接工艺参数、熔滴过渡等较为稳定,在纵向方向的约束影响也不大,使得残余应力曲线分布较稳定^[9]. 残余应力测量点取在焊缝长度方向的中间部位两侧的母材. 根据弹性力学分析的结果,若孔中心距大于 10 倍钻孔半径,各孔之间测量结果的相互影响已经很小^[10]. 在试验中盲孔法钻孔半径为 1 mm,取中心距为 20 mm 的两个孔,两孔之间的测量不会相互干扰. 测试点布置位置见图 3. 所示小方块代表用盲孔法测量的点,小圆点代表用压痕法测量的点. 沿焊接方向点依次分为组 1,组 2,⋯,组 16. 每一组均包含一个盲孔法测量点和一个压痕法测量点,两个测量点关于焊缝中心线对称. 两排测量点离焊缝中心线的距离均为 19 mm,两测试点的距离均取 20 mm.

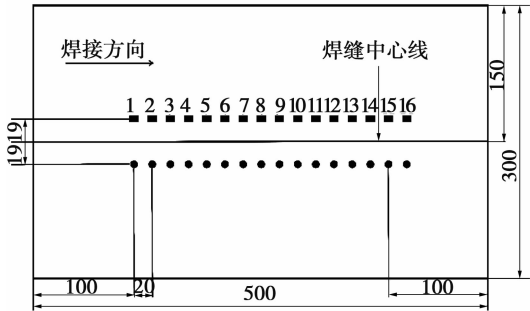


图 3 测量点分布图 (mm)

Fig. 3 Distribution of measuring points

2 试验结果

盲孔法 A, B 值用三点弯试验进行标定,用三点弯进行标定是在有外加作用力的情况下钻孔,可有效的排除钻孔引起的孔边塑性变形对 A, B 值的不利影响,从而使标定结果更加准确,使测量精度提高. 标定结果: $A = -1.322, B = -2.931$. 计算公式为

$$C = (A + B) / 4AB = -0.274 \tag{1}$$

$$D = (B - A) / (B + A) = 0.378 \tag{2}$$

$$\sigma_x = C(\Delta \varepsilon_x + D \Delta \varepsilon_y) \tag{3}$$

$$\sigma_y = C(\Delta \varepsilon_y + D \Delta \varepsilon_x) \tag{4}$$

式中: $\Delta\epsilon_x$ 为沿焊缝方向的应变变化量; $\Delta\epsilon_y$ 为垂直焊缝方向的应变变化量; σ_x 为沿焊缝方向的残余应力; σ_y 为垂直焊缝方向的残余应力. 盲孔法各个测量点沿焊缝和垂直焊缝的应变变化量如表 2 所示. 依据表 2 盲孔法测量的应变变化量和计算公式, 可以计算出盲孔法测量的各点沿焊缝和垂直焊缝方向的残余应力. 盲孔法和压痕法各组点的残余应力测量结果如表 3 所示.

表 2 盲孔法测量的应变变化量

Table 2 Variable quantity measured by blind hole method

组别	平行应变变化量 $\Delta\epsilon_x$	垂直应变变化量 $\Delta\epsilon_y$
1	-367	91
2	-398	116
3	-463	90
4	-524	94
5	-495	60
6	-433	132
7	-569	162
8	-536	209
9	-625	226
10	-548	158
11	-520	139
12	-359	46
13	-437	164
14	-315	11
15	-257	8
16	-251	42

表 3 盲孔法和压痕法测量的残余应力

Table 3 Residual stress measured by blind hole method and indentation method

组别	盲孔法		压痕法	
	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_x/MPa	σ_y/MPa
1	91	13	103	23
2	97	9	131	27
3	117	23	139	14
4	133	28	153	18
5	129	34	150	27
6	104	8	158	6
7	139	14	149	-19
8	125	-1	170	-32
9	147	2	148	-55
10	133	13	113	34
11	128	15	134	-7
12	93	6	149	-22
13	102	0	153	-18
14	85	23	124	-13
15	69	24	112	31
16	64	14	82	38

3 试验结果对比

从表 3 的试验结果可以看出, 在距离焊缝中心线 19 mm 的纵截面上, 两种方法测量的横向应力有正有负, 且在同一组点中, 即测量同一残余应力大小的两点, 盲孔法和压痕法测量所得数值有不同正负号的情况, 这是由测试点较小的横向残余应力值、仪器测量精度和随机误差三方面原因造成. 从表 3 中可以看出, 横向应力的数值较小, 大部分测量的横向应力在 $\pm 30\text{ MPa}$ 之间, 考虑到仪器的测量精度以及测量过程各种随机因素的影响, 则可能造成两种测量方法测量结果正负号不同的现象.

对两种方法测量的纵向残余应力进行分析. 将表 3 中测量的纵向应力用更加直观的条形图表示出来, 如图 4 所示. 纵向应力均为正值. 盲孔法测量的最大值和最小值分别为 147 和 64 MPa. 压痕法测量的最大值和最小值分别为 170 和 82 MPa. 同时可看出除第 10 组点外, 压痕法的测量结果较盲孔法有不同程度的增大, 即在测量同一大小的残余应力时, 压痕法测量结果大于盲孔法测量结果. 造成该现象的原因是由两种测量方法测量深度和测量原理不同引起的, 盲孔法钻孔深度为 3 mm, 所测量的应力为该深度的平均应力值, 而压痕法压痕深度极浅, 测量的是材料表面的应力值. 若在材料厚度方向存在应力梯度, 即使在同一点用两种方法测量, 测量值仍会存在差异. 文中试验用板在正面到背面方向存在负的应力梯度, 使压痕法测量结果大于盲孔法测量结果. 若在板正面到背面方向存在正的应力梯度, 则压痕法的测量结果会小于盲孔法测量结果.

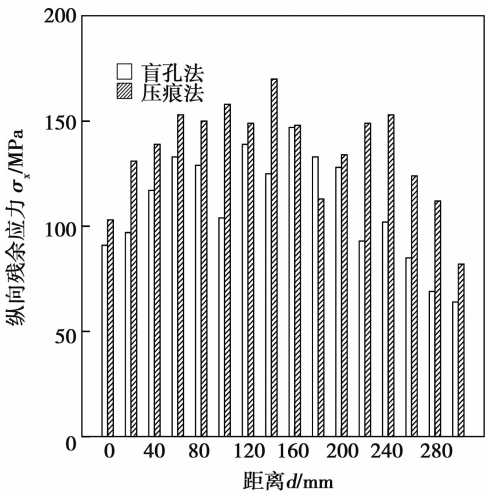


图 4 盲孔法和压痕法测量的纵向应力对比
Fig. 4 Comparison of longitudinal stress measured by blind hole method and indentation method

用统计学中 SPSS 软件处理两种测量方法所得的纵向残余应力,如图 5 所示. 该图利用 SPSS 软件得到纵向应力的二次回归模型. 在得到回归模型后,再利用 R 软件进行回归诊断,显示盲孔法测量的 A、C 点和压痕法的 B 点为离群点,如图 5 所示. 该离群点产生的原因通常是由于应变片粘贴质量较差造成. 在删除 A、B、C 三个离群点后,再次用 SPSS 软件进行二次回归,回归曲线如图 6 所示. 回归分析的 R^2 值是衡量回归模型拟合度优劣的一个重要参数, R^2 值越大,则模型的拟合度越好. 盲孔法在删除离群点 A 后, R^2 由之前的 0.808 7 提高到 0.900 3,压痕法的 R^2 值由 0.640 8 提高到 0.877 1,说明在删除离群点后,回归模型的拟合精度增大,则利用回归模型进行预测的准确度提高. 删除离群点后,盲孔

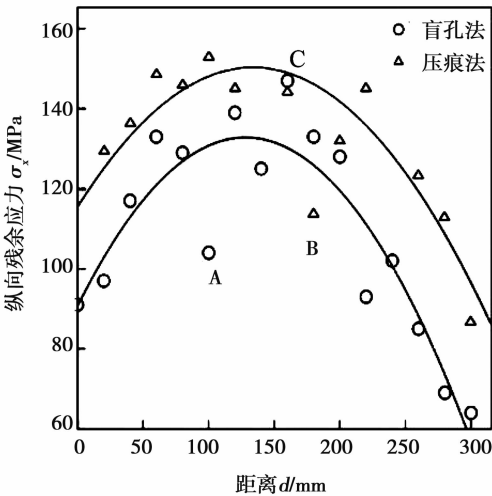


图 5 未删除离群点的二次回归曲线
Fig. 5 Quadratic regression retaining outlier

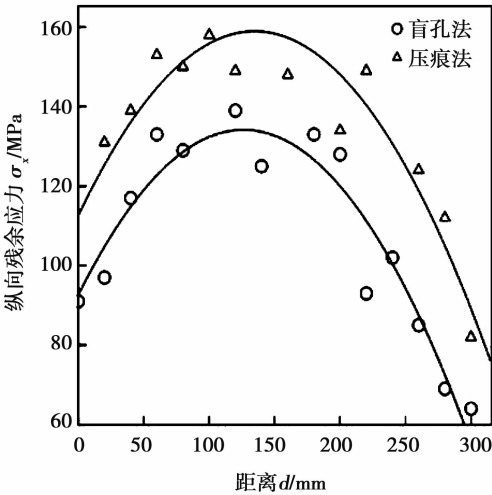


图 6 删除离群点的二次回归曲线
Fig. 6 Quadratic regression without outlier

法和压痕法的二次回归曲线分别为

$$\hat{y} = 92.622 + 0.658 3x - 0.002 608x^2 \quad (5)$$

$$\hat{y} = 112.600 + 0.688 6x - 0.002 556x^2 \quad (6)$$

由两条二次回归得到的回归曲线可以看出,盲孔法和压痕法测量结果有相同的变化趋势,呈现抛物线状,且在焊接方向上,压痕法与盲孔法的测量差值先增大后减小,在焊缝长度方向的中间位置,测量差值达到最大值. 由此也可以得到距离焊缝中心线 19 mm 的母材上沿焊接方向的纵向应力分布情况:在焊接方向上,纵向残余应力先增大后减小,在接近焊缝长度方向的中间位置达到最大.

在较为理想的测量条件下,根据两个回归曲线方程,因为 x 和 x^2 的系数相差均较小,所以压痕法与盲孔法的差值为常数项的差值,大约为 20 MPa,也即压痕法测量结果比盲孔法大 20 MPa 左右.

对表 3 中盲孔法和压痕法测量所得的纵向应力进行配对样本的 t 检验. 在 16 组测量点中,每组包含一个盲孔法和一个压痕法测量点,构成一个配对. 配对样本的 t 检验是从两组总体数据中各取一组有一定容量的样本,对样本进行假设检验,从对两组样本的对比检验中发现两个总体的均值差异. 盲孔法和压痕法各测得样本容量为 16 的样本后,对样本进行 t 检验,可以得到关于两种测量方法之间的差异.

从 t 检验结果可以看出: $p = 0.000\ 236\ 8 < 0.05$,则拒绝两种测量方法均值相等的假设,即认为两种测量方法的测量数值具有显著差异,这是由于两种测量方法的测量原理与测量应力的深度不同造成的. 在置信度为 0.95 时,置信区间为[14,37],即在测量试验中,测量距焊缝中心线 19 mm 母材的应力时,压痕法与盲孔法的测量差值有 95% 的概率会在区间[14,37]中,即 $\sigma_x(\text{压}) = \sigma_x(\text{盲}) + (14,37)$,平均差值为 25 MPa. 这种数据处理的意义在于:当用其中一种测量方法测量出残余应力数值后,可大致估计出用另一种方法的测量值.

4 结 论

(1) 当试样厚度方向存在正的应力梯度,则压痕法测量结果小于盲孔法;当存在负的应力梯度,压痕法测量结果大于盲孔法.

(2) 在距离焊缝中心线 19 mm 的母材上,沿着焊接方向,纵向应力呈抛物线状,在焊缝中部位置达到残余应力最大值.

(3) 在较为理想的测量条件下,根据两条回归

曲线,压痕法测量结果比盲孔法大 20 MPa 左右.

(4) 在试验中,压痕法和盲孔法测量结果的差值有 95% 的概率会在区间[14,37]中,即 $\sigma_x(\text{压}) = \sigma_x(\text{盲}) + (14,37)$,平均差值为 25 MPa.

参考文献:

[1] 张 海. 2219 铝合金 FSW-VPPA 交叉焊缝组织性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

[2] 郑卜祥. 航天铝合金板件的焊接应力与变形研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2008.

[3] 赵亚楠, 张壮南, 贾连光. 焊接残余应力研究概况 [J]. 钢结构工程研究, 2012, (3): 194 - 199.

Zhao Yanan, Zhang Zhuangnan, Jia Lianguang. Research on welding residual stress [J]. Research on Steel Structural Engineering, 2012, (3): 194 - 199.

[4] 王庆明, 孙 渊. 残余应力测试技术的进展与动向 [J]. 机电工程, 2011, 28(1): 11 - 15.

Wang Qingming, Sun Yuan. Research development on the test methods of residual stress [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(1): 11 - 15.

[5] 李 亭. 2024 铝合金搅拌摩擦焊研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007.

[6] 谭明鹤, 王荣辉, 黄永辉. 盲孔法测残余应力中应变释放系

数的修正方法 [J]. 热加工工艺, 2007, 36(19): 65 - 68.

Tan Minghe, Wang Ronghui, Huang Yonghui. Correctional method of strain release coefficients by blind-hole technique to measure residual stress [J]. Hot Working Technology, 2007, 36(19): 65 - 68.

[7] 候海量, 朱 锡, 刘润泉. 盲孔法测量 921A 钢焊接残余应力的应变释放系数研究 [J]. 船舶工程, 2003, 25(1): 57 - 60.

Hou Hailiang, Zhu Xin, Liu Runquan. Study on the strain release coefficient of welding residual stress of 921A steel by blind-hole method [J]. Ship Engineering, 2003, 25(1): 57 - 60.

[8] 王红阳, 迟明声, 黄瑞生, 等. 激光-氩弧复合热源焊接镁合金残余应力分析 [J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 33 - 36.

Wang Hongyang, Chi Mingsheng, Huang Ruisheng, et al. Residual stress analysis of magnesium alloy by laser-TIG hybrid welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(11): 33 - 36.

[9] 付 强. 铝合金薄板搅拌摩擦焊残余应力及失稳变形的预测研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.

[10] 陆才善. 残余应力测试: 小孔释放法 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.

作者简介: 黄超群,男,1992 年出生,硕士研究生. 主要从事铝合金残余应力的研究. Email: 1020363303@qq.com

通讯作者: 李 恒,男,教授. Email: lihuan@tju.edu.cn