热沉影响钛合金薄板焊接残余应力的试验分析

李 菊¹, 关 桥², 郭德伦², 杜欲晓², 孙永春², 史耀武¹ (1.北京工业大学材料学院,北京 100022; 2.北京航空制造工程研究所,北京 100024)

摘 要:采用切条应力释放法测量了钛合金 TC4 薄板常规钨极氩弧焊(GTAW)和动态 控制低应力无变形 GTAW 对接试件中的纵向残余应力和纵向残余塑性应变的分布。 测量结果表明,钛合金常规 GTAW 缝中残余拉应力峰值小于其母材屈服强度,焊缝附 近存在残余压缩塑性应变,动态控制低应力无变形 GTAW 焊技术中热沉的冷却作用使 得热源与热沉之间的高温金属承受强烈的拉伸作用,产生拉伸塑性变形,部分抵消了焊 接过程中已产生的缩短的塑性变形,使得试件中纵向残余塑性应变减小,焊接残余拉应 力峰值降低,残余压应力水平降低。切条应力释放法是一种简便有效的薄板焊后残余 应力测量方法,能够满足工程应用的精度要求。

关键词: 钛合金; 动态低应力无变形焊接; 应力释放法; 残余应力; 残余塑性应变 中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)06-29-04



李 菊

为此,采用 YCY 型机械应变仪测量了钛合金 薄板常规GTAW 和动态控制低应力无变形 GTAW

动态控制低应力无变形(DC-

动态控制低应力无变形焊接法即是在常规

GTAW 接电弧后适当部位,设置一个能跟随电弧移

焊后试件中的残余应力和残余塑性应变,比较研究

了热沉对钛合金薄板焊接残余应力与残余塑性应变

LSND)焊接法简介

0 序 言

钛合金以其密度小、比强度高等优越性能在航 空航天领域得到了广泛的应用¹¹。飞行器上的焊 接结构多属于薄壁构件,而薄壁结构在焊后产生的 残余应力和失稳变形是导致产品质量不稳定的主要 原因之一。因此,有必要对钛合金薄板焊接残余应 力与变形的控制进行研究。

北京航空制造工程研究所在该领域开展了广泛 而深入的研究工作,并相继开发了预置温度场的静 态控制焊接应力与变形的方法和带热沉的动态控制 低应力无变形(DC-LSND, Dynamically controlled low stress no-distortion)焊接新技术^[23]。为了考察 不同焊接条件对焊件中残余应力和变形的影响规 律,必须对其中的残余应力与残余塑性应变进行试 验测量,并用以对数值分析结果进行验证。

测量残余应力的方法有很多,常见的有:电阻应 变片测试法、X 射线测法、磁性测法和云纹测试法 等^[4~7]。采用 YCY 型机械应变仪测定焊接残余应 力是基于释放法原理的接触式、破坏性测量方法的 一种^[8]。此法操作简便,不需复杂、昂贵的专用设 备,能给出满足工程要求的精度,一般适于在试验件 和模拟件上应用。YCY 型机械应变仪是在Gunnert 测试方法基础上改进了的一种结构简单的仪器,保 留了原来方法的优点和测试精度,无论是在施工现 场或在试验室条件下使用均很方便。

 controlled
 动并对焊缝产生急冷作用的热沉,与焊接电弧形成

 为了考察
 一个多源热源一热沉系统,该系统装置示意简图如

 約影响规
 图1所示。

 这进行试。
 Welding direction

 有:电阻应
 Cooling

 (如)回出社社
 Cooling

分布的影响。

1



2 切条应力释放法的测量原理

切条法适于薄板试件,属于用机械加工方法对 试件进行破坏性测量的方法。在薄板构件上,焊接

收稿日期: 2003-02-24 基金项目: 航空基金资助项目(98H25002)

残余应力场的主应力方向一般平行于焊缝轴线 *x* 和垂直于焊缝轴线,在试验用板件中部横向焊接残 余应力较小(可忽略不计),故只讨论焊接纵向残余 应力的测量。如果在焊前测定某点沿 *x* 轴的标距 为*l*_{x0},若在焊后该点的标距内不曾发生塑性变形, 那么焊后再测得 *l*_{x1},即可求出相应的应变

$$\varepsilon_x = \frac{l_{x1} - l_{x0}}{l_{x0}} = \frac{\Delta l_x}{l_{x0}} \,. \tag{1}$$

按照公式(2)即可求出焊接残余应力 σ_x ,式(2)中的 E 为弹性模量。

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \,. \tag{2}$$

这样的测试法只适用于弹性应力场内的测定, 能给出远离焊缝区(未产生不协调塑性应变区)的应 力分布状态。在焊缝附近,由于在焊接过程中已经 发生了塑性变形,需用"释放法"测定残余应力场。 "释放法"即是在焊后给出标距 l[']x0(含相应于残余 应力的弹性应变量),利用切割法将带有标距的部位 解除周围材料的约束,则因拘束而产生的残余应力 被释放出来,其中的弹性内变形也被释放出来。切 割后再次测得标距的长度为 l[']x1,标距长度变化为

$$\Delta l_x = l'_{x1} - l'_{x0}.$$
 (3)

按照式(1)、(2)求焊接残余应力时,由式(3)计算得 到的 Δl_x 应加一负号代入式(1),即分割前受拉应 力,分割后的释放应变为负值;反之,其释放应变为 正值。总之,"释放法"就是测定焊后和释放后标距 长度的变化所反映的应变值,从而换算出残余应力 的方法。

若在焊前给出标距 *l["]x*0, 焊后测量标距孔长度为 *l^{"x1}*,释放后再次测量标距的长度为 *l^{"x2}*,那么,

$$\Delta l_x = l''_{x2} - l''_{x1}, \qquad (4)$$

同理,式(4)中 Δl_x 也必须加一负号代入式(1),按照 式(1)、(2)求出焊接残余应力。

从上述对标距的三次测量结果,也可直接得到 焊缝附近的不协调残余塑性应变的分布

$$e_x^p = \frac{l''_{x2} - l''_{x0}}{l''_{x0}} = \frac{\Delta l_x}{l''_{x0}},$$
(5)

式中: 🖞 为纵向残余塑性应变。

3 试验过程

3.1 试件制备

试验采用的是钛合金 TC4 常规 GTAW 和动态 控制低应力无变形 GTAW 焊平板对接试件,焊后试 件尺寸均为 320 mm×300 mm×2.5 mm,焊前分别 在垂直焊缝方向上距焊缝中心不同距离处加工出机 械应变仪测量所需的标距孔。每对孔标距 50 mm, 在试件上焊缝一侧距焊缝中心的标距孔分别为 8 mm、12 mm、20 mm、32 mm、48 mm、80 mm,在焊缝 另一侧为 10 mm、16 mm、24 mm、40 mm、64 mm。 钻孔方案示意图如图 2 所示。图中焊缝中心及距焊 缝中心线两侧各 4 mm 的孔为焊后加工所成。







3.2 试件焊接

试件的焊前准备及焊接按航空工业标准 HB/Z 120—1987" 钛及钛合金钨极氩弧焊工艺" 进行严格 的准备、清理和焊接。焊接设备为纵缝自动氩弧焊 机,试件装卡用双支点琴键式夹具。为实施钛合金 的高质量焊接,采用了带背面保护的成型垫板和实 施焊接保护的拖罩。焊接工艺参数见表 1。

表 1	钛合金焊接规范和	DC-LSND	焊的热沉参数

Table 1	Welding parameters and heat s	sink parameters of	conventional and	DC-LSND GTAW

Welding	Welding current	Arc voltage	Welding speed	Distance between arc	Cooling media flow rate
conditions	<i>I/</i> A	U/ V	$v/(m \circ s^{-1})$	and heat sink D/m	$Q/({\rm m}^{3} {\rm o} {\rm s}^{-1})$
Conventional GTAW	200	11.9	3.3×10^{-3}	—	—
DC-LSND GTAW	200	11.9	3.3×10^{-3}	0.03	6. 67× 10 ⁻⁵

3.3 试件切割及数据读取

焊缝横截面形状示于图 3,焊缝宽度均为 12 mm。采用线切割方式释放应力,线切割方案示意 图见图 2。各窄条并未完全切割开,而是呈梳状连 接在一起。线切割后标距孔须在每一窄条的中间, 保证各个窄条的平直,防止由于窄条弯曲变形带来 的误差。



Fig. 3 Geometry of weld cross section

测量均在专用夹具中进行,以保持试件的平面 状态并使测量操作方便。从试件的正反两面进行测 量,以消除板件的局部翘曲变形(通常是由于失稳造 成)带来的附加弯曲应力。测量所用 YCY 型机械 应变仪原理图如图 4 所示,详细工作原理可参考文 献 8]。



1Fixed shaft; 2Moving shaft; 3Axle; 4,5Steel ball; 6 Gauge; 7Screw 8 Measure end of gauge; 9Spiral; 10 Balance block; 11Limit arm 图 4 应变仪工作原理图 Fig. 4 Schematic diagram of working principle of YCY measure apparatus

焊前读取标距孔的原始读数 l'_{x0} , 焊后再次读 取各对标距孔的长度 l'_{x1} , 而后在靠近测点处将试 件沿垂直于焊缝方向切断, 再在各测点间切出几个 梳状切口, 使内应力得以完全释放。再次测量释放 后各对标距孔的读数 l''_{x2} , 求出纵向塑性应变及弹 性应变, 计算出焊接纵向残余应力。 4 试验结果与分析

图 5a 为纵向残余应力的横向分布。由图可 见,在所采用的焊接条件下,无论是常规焊还是 DC -LSND 焊,焊缝中心及其附近区域为拉应力,由焊 缝中心至试件边缘,拉应力逐渐转变成压应力,这是 由于焊接残余应力的特点——自平衡性所决定的。 常规焊试件,焊缝中心拉应力最高为 438.5 M Pa, 但仅为钛合金 TC4 室温下屈服强度的 45 %, 远未达 到材料的屈服强度。这一结论同文献[9]的研究一 致。DC-LSND 焊的残余应力分布趋势有所不同。 残余应力的峰值并未出现在焊缝的中心, 而是出现 在距焊缝中心一定距离处。从焊缝中心至试件边 缘,应力增大达到拉应力峰值后再逐渐下降变成压 应力。无论是拉应力还是压应力, DC-LSND 焊的 结果都比常规焊的结果小,焊缝中心应力仅为 208 M Pa, 中心线两侧拉应力峰值最大为 257.8 MPa, 仅 为常规焊残余拉应力峰值的 59%。DC-LSND 焊 近缝区残余压应力的水平低于常规焊的相应值,与 此相对应,在焊缝两侧的边缘区域,残余压应力值也 相应下降,当其值低于薄板失稳的临界应力值时,板 件不再发生失稳变形;即可达到动态控制低应力无 变形焊接的目标。





由于焊缝部位经历熔化凝固过程,因而无法测 得焊缝中纵向残余塑性应变 e⅔。由图 5b 可见,无 论是常规焊还是 DC-LSND 焊, 近缝区纵向残余塑 性应变 💱 均为负的塑性应变(常规焊近缝区有极小 的拉应变,最大拉伸塑性应变为0.000 13,设备的测 量精度为 0.000 2, 故该拉应变是测量误差所致), 这 表明释放应力后焊缝附近较周围区域缩短了,同样 表明这一部位在应力释放前承受拉伸作用,这一结 果也与图 5a近缝区中残余应力为拉应力相对应。 近缝区金属产生压缩塑性变形,是由于该部位金属 在焊接过程中电弧到来之前,被迅速加热到很高温 度,升温膨胀,受到周围材料的限制,产生压缩塑性 变形,在随后的冷却降温过程中该压缩塑性变形不 能全部恢复,保留到室温,形成残余压缩塑性变形。 由此可见,焊缝的熔化、凝固和冷却均是在其两侧已 经发生了压缩塑性变形的金属框架下进行的:换言 之,焊接接头区(焊缝与近缝区)的纵向残余塑性应 变是负的塑性应变,即焊缝区与近缝区共同缩短了, 这也得到了试验结果的证实。

DC- LSND 焊焊缝附近塑性应变小于常规焊的 相应值, 这是由于焊接过程中仍处于高温状态下的金 属在紧随电弧后热沉的作用下急冷收缩, 导致热源与 热沉间的金属受到强烈的拉伸, 产生拉伸塑性变形, 抵消一部分在升温膨胀过程中产生的压缩塑性变形, 从而使残余塑性应变减小。由于焊接残余应力产生 的根本原因在于焊缝及其附近区域的塑性变形, 该塑 性变形的减小势必导致残余应力的降低。因而, DC - LSND 焊接残余应力小于常规焊的相应值。从图 5a 中还可以看出, DC- LSND 焊残余拉应力峰值不再位 于焊缝中心, 而是位于距焊缝中心一定距离处, 这是 由于在热沉作用下, 焊缝中部所受的急冷拉伸作用最 强, 产生的拉伸塑性应变最大所致。 力峰值仅为基体材料屈服强度的 45%; 焊缝两侧为 压缩塑性应变区。

(2)DC-LSND 焊中, 热沉的急冷拉伸作用使 得接头内纵向残余塑性应变减小, 焊接残余拉应力 峰值降低, 焊缝两侧压应力也减小; 当压应力低于薄 板临界失稳应力值时, 不再发生失稳变形, 即可达到 低应力无变形焊接的目标。

(3)切条应力释放法可以有效地测定钛合金薄 板焊后纵向残余应力及纵向残余塑性应变。

参考文献:

- [1] 曹春晓, 闫渊林, 黄 旭. 我国航空系统钛合金发展现状与展望[J]. 钛工业进展, 2002, (4): 26~29.
- [2] 关 桥,郭德伦,李从卿.低应力无变形焊接新技术—薄板构件的LSND焊接法[J].焊接学报,1990,11(4):231~237.
- [3] Zhang C X, Guan Q, Guo D L. Study on application of dynamic control of welding stress and distortion in thin aluminium elements
 [C]. Proc. of the Int. Symp., JWS, Nagoya, 1996, 539 ~ 544.
- [4] 唐慕尧. 焊接测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [5] 中国机械工程学会焊接学会.焊接手册(第2卷,第2版)[M].
 北京:机械工业出版社,2001.
- [6] Guan Qiao. A survey of development in welding stress and distortion cntrolling in aerospace manufacturing engineering in China
 [J]. Welding in the World, 1999, 43 (1): 14~24.
- [7] Guan Q, Cao Y. Verification of FE programs for welding thermal strain—stress analysis using high temperature moiré measurement
 [J]. Welding in the World, 1993, 31 (5): 344 ~ 347.
- [8] 关 桥. 关桥论著选编[M]. 北京: 北京航空制造工程研究所档案馆, 2002.235~239.
- [9] 关桥. Остаточные напряжения, де Формации и прочность тон колистовых элентов сварных конструкций из титан овых сплавов [J]. СВ АРОЧ-НОЕ ПРОИЗВОДСТВО, 1962, (10): 310~321.

5 结 论

(1)钛合金 TC4 薄板焊接接头中焊接残余拉应

作者简介: 李 菊, 女, 1970 年出生, 博士研究生, 主要从事焊接 应力与变形的控制研究工作, 发表论文 4 篇。

Email: lijuxin@yahoo.com

《焊接学报》被《EI》收录的论文目次

2003年第2期

基于模拟退火算法的工件位置标定	殷树言等
TiB ₂ 金属陶瓷与 TiAl 金属间化合物的扩散连接	李卓然等
深冷处理提高镀锌钢板点焊电极寿命的机理	吴志生 等
不同窗口的电弧光谱信息与焊丝熔滴过渡	杨运强 等
低碳钢 A-TIG 焊的活性剂研制	张瑞华 等
穿孔等离子弧焊接中等离子云的检测	单 平等
CO ₂ 焊接超声传感焊缝跟踪控制规则与参数	胡绳荪等

随焊锤击对高强铝合金焊接接头应变分布的影响	徐文	立	等
CO_2 焊短路过程动特性与外特性的关系	杨立	军	等
铝合金电阻点焊的形核特点	程方	杰	等
P91 耐热钢焊接区的微观组织结构分析	李亚	江	等
激光参数对 Ni 基熔覆层结构及耐磨性的影响…	吴	萍	等
金刚石与硬质合金钎焊接头应力场分析	徐	超	等
关于焊接残余应力形成机制的探讨	游	敏	瓮