

文章编号: 1004 - 0609(2004)08 - 1301 - 07

钛合金带热沉钨极氩弧焊中热沉作用^①

李菊¹, 关桥², 史耀武¹, 郭德伦², 杜欲晓², 孙永春²

(1. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100022; 2. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要: 采用数值模拟和实验相结合的方法研究了钛合金 TC4 薄板常规及带热沉的钨极氩弧焊接过程中温度及应力应变的分布, 考察了热沉对温度场和应力应变场的影响规律, 探讨了使用该技术实现应力和变形控制的机理。结果表明: 带热沉的钨极氩弧焊接过程中, 紧随热源之后热沉急冷作用使得试件形成马鞍形温度场, 而热沉作用部位温度最低。热沉作用部位的急冷收缩对周围金属产生拉伸作用, 使得焊缝及近缝区金属升温过程中产生的压缩塑性应变减小, 冷却过程中产生的拉伸塑性应变增大, 接头中不协调应变减小, 残余应力降低。实验测量与有限元模拟结果吻合良好, 证实了采用热沉控制应力与变形的有效性和有限元模型的正确性。

关键词: 钛合金; 钨极氩弧焊; 热沉; 温度场; 应力场; 应变场; 有限元法

中图分类号: TG 404

文献标识码: A

Role of heat sink in gas tungsten arc welding with trailing spot heat sink for titanium alloy

LI Ju¹, GUAN Qiao², SHI Yao-wu¹, GUO De-lun², DU Yu-xiao², SUN Yong-chun²

(1. School of Materials Science and Engineering,

Beijing Polytechnical University, Beijing 100022, China;

2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, China)

Abstract: The distribution of temperature, stress and strain of titanium alloy Ti-6Al-4V thin sheet were studied with numerical simulation and experiment during conventional gas tungsten arc welding and gas tungsten arc welding with trailing spot heat sink behind welding arc, also named dynamically controlled low stress no-distortion gas tungsten arc welding, the influences of heat sink on temperature, stress and strain fields were investigated, the stress and distortion controlling mechanism of dynamically controlled low stress no-distortion technique was discussed. The results show that, during dynamically controlled low stress no-distortion gas tungsten arc welding, the saddle shape temperature field is formed due to the intense cool effects of heat sink, there exists the lowest temperature in the heat sink applied region. High tensile action of metals is generated by sharp cooling of the heat sink applied region, which decreases the compressive plastic strains in heating process and increases the tensile plastic strains in cooling process within and near the weld. The incompatible strains in the joint decrease and the residual stresses reduce. The simulation results are in good agreement with the experimental results, which proves the effectiveness of DC-LSND technique and the validity of the finite element model.

Key words: titanium alloy; gas tungsten arc welding; heat sink; temperature field; stress field; strain field; finite element method

钛合金以其比强度高, 抗疲劳能力强, 蠕变寿命长和断裂韧性好等优良性能在航空航天领域得到

① 基金项目: 航空基金资助项目(98H25002)

收稿日期: 2003 - 11 - 04; 修订日期: 2004 - 03 - 08

作者简介: 李菊(1970 -), 女, 博士研究生.

通讯作者: 李菊, 电话: 010 - 85701337; E-mail: Lijuxin@yahoo.com

了广泛的应用^[1-3]。航空航天飞行器上多为薄壁结构,采用熔化焊方法制造这类薄壁构件时,会产生十分严重的残余应力和变形,有效地控制薄壁构件的残余应力和变形一直是焊接工程中的关键。

控制焊接残余应力与变形的的方法主要有焊前控制和焊后处理^[4]。由于航空结构设计和材料使用材料的特殊性,采用常规的消除应力与变形的的方法很难有效地去除残余应力与变形。无论焊前控制还是焊后处理,都会增大工作量,增加生产成本,降低生产率。因此,国内外学者对焊接过程中实时控制焊接应力与变形的的方法进行了广泛研究^[5-8]。北京航空制造工程研究所开发了动态控制低应力无变形焊接新技术(DC-LSND),该技术是“主动”控制技术之一,采用可跟随焊接热源移动的热沉装置,获得了低焊接残余应力、无变形薄壁焊接结构^[9]。与其它控制焊接应力与变形的的方法相比,DC-LSND焊不需要庞大的专用设备,对焊接接头形状的适应性很强,操作灵活简便,有着广泛的应用前景。

目前,该技术已成功用于热裂纹和变形的控制^[10, 11],但对热沉作用机制,即获得低应力、无变形焊接结构的根本原因,尚缺少系统深入的定量分析。有关采用DC-LSND焊接技术对钛合金薄壁结构焊接残余应力和变形进行控制的数值研究工作还没有报道。为此,本文作者采用三维有限元数值模拟和实验相结合的方法,对比研究了钛合金TC4常规GTAW和带热沉GTAW焊接过程中温度及应力应变场的分布及发展历史,探讨了热沉对温度及应力应变的影响规律和降低焊接残余应力与变形的机理。

1 动态控制低应力无变形焊接法

动态控制低应力无变形焊接法(DC-LSND)是在焊接电弧后的适当部位设置一个随电弧移动并对焊缝产生急剧冷却作用的热沉,与焊接电弧形成一个多源系统,用以实现对焊接残余应力和变形的控制^[9]。该多源系统的示意图见图1。热沉的冷却介质选用氩气雾化冷却水,冷却强度可通过控制水的流量进行调节。水的雾化作用大大增强了冷却效果,在焊接过程中对焊接电弧采取了特殊设计的保护措施,从而有效地防止了水蒸汽对电弧的干扰,保证了焊接过程的正常进行和良好的焊接质量。热沉中心与热源中心的距离可调,以改善焊接控制效果。

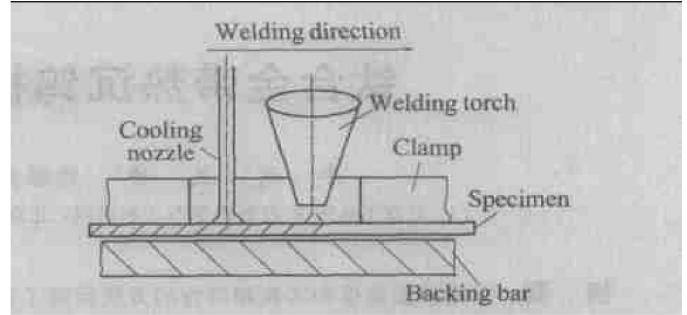


图1 DC-LSND焊接装置示意图

Fig. 1 Schematic of DC-LSND welding

2 计算模型

2.1 几何条件

采用ANSYS商用有限元分析软件对钛合金TC4薄板对焊进行分析,试件的焊后尺寸为320 mm × 300 mm × 2.5 mm。考虑结构的对称性,取其一半进行三维数值模拟。由于试件厚度与长宽相比相对较薄,厚度方向仅划分为一层,有限元网格的XY视图如图2所示。因焊缝及其相邻部位是研究的重点,所以这一区域有限元网格细分,其中最小单元尺寸为1 mm × 1 mm × 2.5 mm。网格中共有3460个单元,7292个节点。

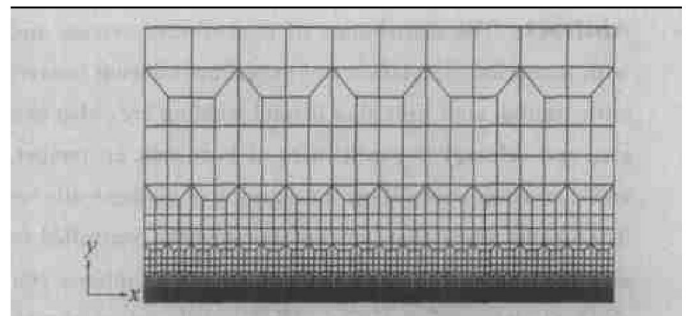


图2 有限元网格

Fig. 2 Mesh of FEA

2.2 材料参数

钛合金TC4的材料参数由见文献[12],热物性参数与力学性能参数均与温度相关。假定泊松比为0.33,其值和温度无关,其它物性参数如表1所示。

表1 室温时的热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters at room temperature

Material parameters	Value
Surface emissivity	0.3
Solidus temperature	1 604 °C
Liquids temperature	1 660 °C

列。将焊接全过程按热弹性理论计算, 同时假设材料为各向同性, 且不考虑粘性和蠕变的影响。

2.3 边界条件

有限元分析中, 用 200 步模拟电弧从试件一端行进到另一端的焊接过程, 接着用 90 步模拟板冷却。初始温度和环境温度均为 20 °C, 考虑暴露表面与周围介质的辐射换热和对流换热, 辐射热损失转换成对流换热的方式考虑。为实施钛合金的高质量焊接, 采用带背面保护的成型铜垫板, 计算中以强对流换热来模拟铜垫板的散热作用, 强对流换热系数经过一系列数值实验得到。

在力学分析中, 由于结构的对称性, 不允许存在垂直于对称平面的位移, 施加其它约束可防止刚体转动。

2.4 热源与热沉模型

热源以表面热流的方式施加。焊接电弧加热斑点上比热流的分布近似地以高斯模型描述, 根据这一关系, 距加热中心任一点 A 的热流密度可表示成如下形式^[13]:

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \quad (1)$$

式中 $q(r)$ 为 A 点的热流密度; q_m 为加热斑点中心的最大热流密度; r_0 为电弧有效加热半径; r 为 A 点离电弧加热斑点中心的距离。

试件与雾化冷却水之间的换热以单个圆形射流冲击传热模型来模拟, 表达式为

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{K} \cdot d}{\lambda} \quad (2)$$

$$\frac{\overline{Nu}}{Pr^{0.42}} = g\left[\frac{r}{d}, \frac{h}{d}\right] \cdot f(Re) \quad (3)$$

$$g\left[\frac{r}{d}, \frac{h}{d}\right] = \frac{d}{r} \cdot \frac{1 - 1.1(d/r)}{1 + 0.1[(h/d) - 6](d/r)} \quad (4)$$

$$f(Re) = 2 \left[Re \left(1 + \frac{Re}{200}\right)^{0.55} \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中 g , f 分别是 $(\frac{r}{d})$ 、 $(\frac{h}{d})$ 和 Re 的函数; \overline{Nu} 为平均努谢尔数; \overline{K} 为冷却介质与工件间的平均传热系数; λ 为冷却介质的导热系数; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; r 为被冷却范围的半径; d 为冷却介质喷嘴直径; h 为喷嘴到传热面之间的距离。由此可以得到热沉作用处的平均传热系数 \overline{K} 。各参数的具体定义和计算方法参见文献[14]。

在数值模拟过程中热沉和热源都以给定的焊接速度移动。

2.5 焊接参数

对常规和添加辅助热沉的钨极氩弧焊接过程分别进行有限元模拟, 焊接参数和热沉参数分别如表 2 和 3 所列。

表 2 焊接参数

Table 2 Welding conditions

Welding conditions	Value
Welding current	200 A
Welding voltage	11.9 V
Welding speed	3.3 mm/s
Arc efficiency	67% ^[15]
Heat source effective radius	5 mm

表 3 热沉参数

Table 3 Heat sink parameters

Heat sink parameters	Value
Distance between arc and heat sink	30 mm
Cooling media flow rate	$6.67 \times 10^4 \text{ mm}^3/\text{s}$

3 结果与讨论

3.1 温度场分析

对常规焊接和 DC-LSND 焊接过程中达到准稳态后某一时刻温度场进行对比分析。本文选取焊接进行 60 s, 电弧中心行走 198 mm 和热沉中心行走 168 mm 时的温度场进行研究, 此时试件上表面的温度场如图 3 所示。

由图可见, DC-LSND 焊同一温度的等温线范围小于常规焊等温线的相应值。高温等温线在热沉前方回缩, 产生畸变。在热沉前方, 等温线高度集中, 温度梯度增大。在焊缝纵向(x 向), 热沉处温度最低, 热沉通过后, 由于周围高温金属的作用, 温度又有所升高, 但仍远低于常规焊的相应值。在焊缝横向(y 向), 常规焊焊缝中心温度始终最高, 随着与焊缝中心线距离的增加, 温度逐渐降低。而 DC-LSND 焊中, 在热沉中心所在位置, y 上近缝区温度最大, 焊缝中心温度小于近缝区温度。综上所述, DC-LSND 焊中热沉的存在, 使试件上整体温度场发生畸变, 形成马鞍型的温度分布。畸变的温度场和金属的急冷收缩必然导致不同的应力应变演变历史与分布形态。

3.2 应力应变场分析

有限元数值计算结果表明, 熔合线与焊缝中心

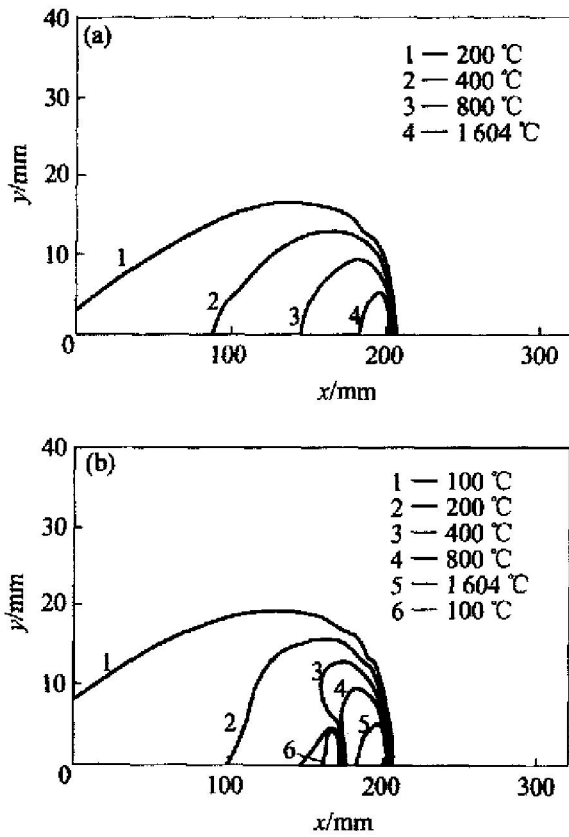


图3 常规焊和DC-LSND焊的温度场

Fig. 3 Temperature fields for conventional and DC-LSND welding

(a) —Conventional GTAW;
(b) —DC-LSND GTAW

线的距离为5 mm。为此，选取试板中部 $x = 160$ mm 截面上距焊缝中心0和8 mm的点，分别考察焊缝及近缝区的应力应变，所得结果分别示于图4和5中。

由图4可知，常规焊焊缝中心 $y = 0$ mm 的点，随着电弧的临近迅速升温，膨胀受压，产生压应力和压缩塑性应变。电弧使金属熔化，形成熔池，熔融金属失去力学抗力，应力减小为0(数值计算中为避免“0”值导致的不收敛，采用一个小的屈服应力值来近似模拟熔融金属的状态)。经过电弧后，熔池金属凝固形成焊缝，随后的降温过程使焊缝比近缝区冷却得快，收缩过程中受到近缝区金属的拉伸作用。钛合金TC4的“力学熔点”设定为800 °C，从熔池凝固(1604 °C)到冷却(800 °C)过程中，由于焊缝仍处于“力学熔化”状态，所以焊缝中应力仍然为0，且在焊缝金属中产生拉伸塑性应变，使焊缝内的总塑性应变减小。当温度低于800 °C时，力学抗力恢复，焊缝内只产生拉伸弹性应变，塑性应变不再发生变化。随着冷却过程的进行，拉应力逐渐增大，拉应力增大的速度随着冷却的进行逐渐减

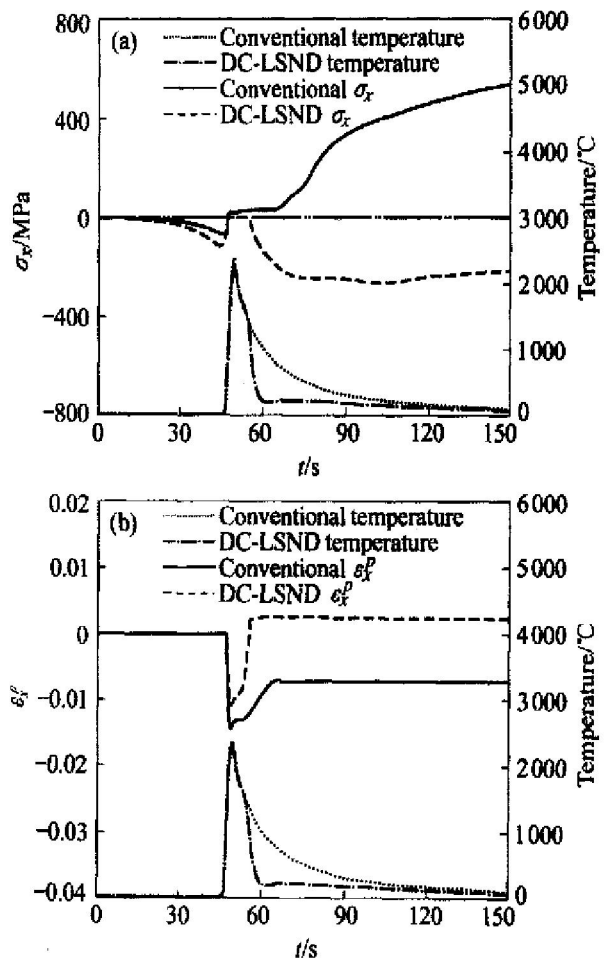


图4 常规焊和DC-LSND焊条件下的应力应变

Fig. 4 Longitudinal stress(a) and plastic strain(b) of a point at weld centerline with conventional and DC-LSND welding conditions ($x = 160$ mm, $y = 0$ mm)

慢，直至室温，形成残余拉应力。

由图3(b)可知，DC-LSND焊中，热沉作用部位金属温度最低，金属的急冷收缩对熔池与热沉之间的金属产生强烈的拉伸作用，使该区域内处于“力学熔化”状态的高温金属产生较大的拉伸塑性应变(如图4(b)所示)，很大程度上补偿了已产生的缩短的塑性应变，使最终的塑性应变减小，在焊缝中心产生了拉伸塑性应变和受压应力(如图4(a)所示)。

热沉对近缝区的塑性应变也有一定程度的影响。从图5可看出，DC-LSND焊中 $y = 8$ mm 点的塑性应变规律虽然同常规焊的塑性应变规律一致，但残余塑性应变值小于常规焊的相应值。热沉作用部位金属的急冷收缩使近缝区在升温过程中产生的压缩塑性应变减小，冷却过程中产生的拉伸塑性应变增大，从而使最终的塑性应变减小，残余应力降低。

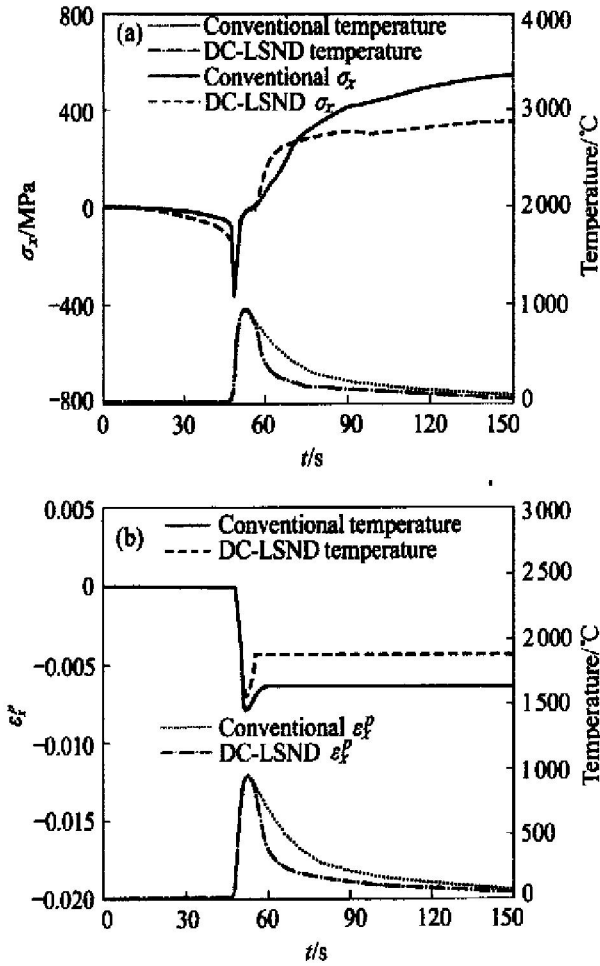


图 5 常规焊和 DC-LSND 焊条件下的应力应变

Fig. 5 Longitudinal stress(a) and plastic strain(b) of a point near weld with conventional and DC-LSND welding conditions ($x = 160 \text{ mm}$, $y = 8 \text{ mm}$)

3.3 残余应力应变

为了进一步研究热沉对最终焊接接头中应力和应变分布的影响, 将常规焊和 DC-LSND 焊焊接条件下, $x = 160 \text{ mm}$ 截面上纵向残余应力和残余塑性应变沿板宽方向的分布进行了对比, 对比结果如图 6 所示。

由图 6(b) 可看出, 常规焊焊缝内 ($y \leq 5 \text{ mm}$) 及近缝区 ($5 \text{ mm} \leq y \leq 12 \text{ mm}$) 中存在压缩塑性应变。采用热沉后, 由于热沉作用部位金属的急冷收缩产生拉伸作用, 焊缝中心 $0 \sim 3.4 \text{ mm}$ 处为残余拉伸塑性应变; $3.4 \sim 12.0 \text{ mm}$ 的焊缝及近缝区存在压缩塑性应变, 但值减小, 最大值由常规焊的 7.19×10^{-3} 减小至 DC-LSND 焊的 5.07×10^{-3} 。与之相对应的, 残余应力分布也不同。常规焊 $0 \sim 11.2 \text{ mm}$ 的焊缝及近缝区存在残余拉应力, 焊缝中心处应力最高 (623 MPa), 为钛合金 TC4 室温屈服应力的 63%, 远未达到材料的屈服极限。由于图 4(a) 中常

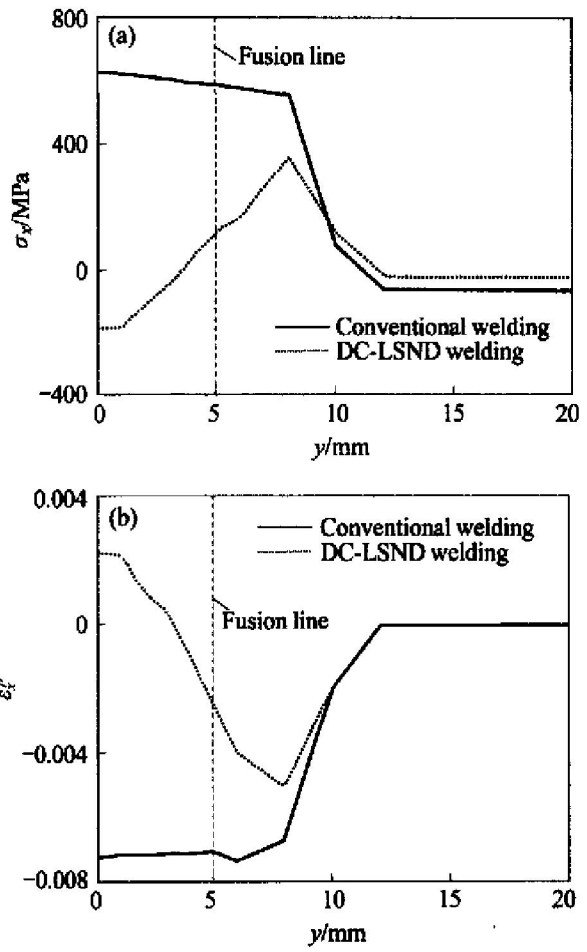


图 6 常规焊和热沉焊条件下

残余应力和残余塑性应变的横向分布

Fig. 6 Transversal direction distributions of residual longitudinal stress(a) and residual plastic strain(b) under conventional and DC-LSND welding conditions (a) —Residual stress; (b) —Residual plastic strain

规焊的残余塑性应变值小于材料的屈服应变, 低于“力学熔点”的冷却过程中仅有拉伸弹性应变产生, 而再无塑性应变产生。这一结果与文献[3]中所给出的实验测试结果“钛合金焊接残余应力的峰值远低于材料的屈服极限, 焊缝中的拉应力峰值一般约为 $0.6 \sim 0.7 \sigma_s$ ”的结论相一致。DC-LSND 焊 $0 \sim 3.4 \text{ mm}$ 出现残余压应力, 焊缝中心残余压应力最大 (180 MPa); $3.4 \sim 11.7 \text{ mm}$ 的焊缝及近缝区仍为残余拉应力, 应力值较常规焊明显减小。残余拉应力峰值为 356 MPa , 不再位于焊缝中心, 而是位于距离焊缝中心 8 mm 处。同时, 由于热沉的采用, 远离焊缝区 ($y > 12 \text{ mm}$) 中的压缩残余应力减小至约为常规焊的 $1/3$, 残余压应力低于临界失稳应力后即不产生失稳变形。

由于 DC-LSND 焊采用热沉, 降低了残余应力和压缩塑性应变, 改变了焊后残余应力应变场的分

布形态,因而可以通过优选焊接工艺参数,达到控制薄板残余应力和变形的目的。

为了验证有限元分析结果的正确性,实验测量了常规 GTAW 焊和 DC-LSND GTAW 焊 TC4 薄板对接的纵向残余应力的分布。试件尺寸及焊接条件与数值模拟中所用条件相同。残余应力测试方法为切条释放法,采用机械应变仪进行测量,测量跨距 50 mm,切条释放用线切割,测量结果如图 7 所示。

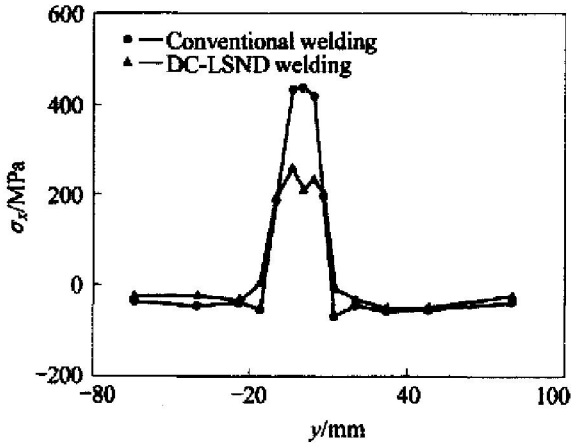


图 7 实验测得的纵向残余应力的横向分布

Fig. 7 Transversal direction distributions of residual stress measured experimentally under two welding conditions

图(7)与图 6(a)相比可知,常规焊残余应力分布趋势与数值模拟结果一致。常规 GTAW 焊焊缝残余拉应力峰值为 439 MPa,由于该应力值为所切窄条内的平均应力值,与 FEA 计算所得焊缝中心应力峰值不能对应比较,DC-LSND 焊残余拉应力峰值出现在近缝区(258 MPa)。DC-LSND 焊焊缝中心的拉应力远远低于常规焊的相应值,焊缝两侧的残余压应力水平也略有降低。DC-LSND 焊焊缝中心数值计算结果与实验结果有一定差异,由于试验值为所切窄条内的平均值,应力测试点不够细密,因而不能测量出焊缝中心区剧烈变化的残余应力。

计算结果和实验表明,在电弧后添加强冷热沉,能够在焊缝区和近缝区产生强拉伸作用,降低焊接残余应力和残余压缩塑性应变,改变残余应力应变场的分布形态,达到控制应力与变形的目的。

4 结论

1) 在 DC-LSND GTAW 焊中,由于热沉急冷作用,在试件上形成马鞍形温度场,热沉作用部位处于该温度场的低谷。热沉的施加使得电弧与热沉

之间的金属温度迅速降低,该区域的温度梯度增大。

2) 在 DC-LSND GTAW 焊中,热沉作用部位金属的急冷收缩对周围金属产生强烈的拉伸作用,使焊缝及近缝区金属升温过程中产生的压缩塑性应变减小,冷却过程中产生的拉伸塑性应变增大,接头不协调应变减小,残余应力降低。

3) 在计算条件下,热沉的采用使得焊缝中心残余塑性应变由压缩转变为拉伸,近缝区压缩塑性应变减小。焊缝中部残余应力由拉应力转变为压应力,近缝区残余拉应力降低,拉应力峰值所在位置由常规 GTAW 焊的焊缝中心移至 DC-LSND GTAW 焊的近缝区。采用热沉使试板上残余压应力水平降低,当残余压应力低于临界失稳应力时不产生失稳变形,这就是 DC-LSND 焊低应力无变形的实质所在。

4) 实验结果与数值模拟结果吻合良好,有限元模拟有效地揭示了热沉急冷拉伸作用降低焊接残余应力,减小焊接变形的本质原因。

REFERENCES

[1] Joseph R D. Metals Handbook[M]. Ohio: Metals Park, 1990. 634 - 646.

[2] 萧今声, 许国栋. 提高高温钛合金性能的途径[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(4): 97 - 105.
XIAO Jin-sheng, XU Guo-dong. Several ways to improve mechanical properties of high temperature Ti based alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(4): 97 - 105.

[3] 关 桥. 钛合金薄壁构件的焊接应力与变形[J]. 国际航空, 1979(2): 37 - 41.
GUAN Q. Welding stress and distortion in titanium alloy thir walled structure[J]. International Aviation, 1979 (2): 37 - 41.

[4] GUAN Qiao. A survey of development in welding stress and distortion controlling in aerospace manufacturing engineering in China[J]. Welding in the World, 1999, 43 (1): 14 - 24.

[5] Michaleris P, Sun X. Finite element analysis of thermal tensioning techniques mitigating weld buckling distortion [J]. Welding Journal, 1997, 76(11): 451 - s - 457 - s.

[6] Michaleris P, Dantzig J, Tortorelli D. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures [J]. Welding Journal, 1999, 78(11): 361s - 366s.

[7] Dong P, Hong J K, Rogers P. Analysis of residual stresses in AFlI repair welds and mitigation techniques

- [J]. *Welding Journal*, 1998, 77(11): 439 - 445.
- [8] Guan Q, Guo D L, Leggat R H. Low stress non-distortion (LSND) welding—a new technique for thin materials [J]. *Welding International*, 1994, 8(7): 41 - 48.
- [9] 关 桥, 张崇显, 郭德伦. 动态控制的低应力无变形焊接新技术[J]. *焊接学报*, 1994, 15(1): 8 - 15.
GUAN Qiao, ZHANG Chong-xian, GUO De-lun. A new welding technique of dynamically controlled low stress non-distortion [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1994, 15(1): 8 - 15.
- [10] Yang Y P, Dong P, Zhang J, et al. A hot-cracking mitigation technique for welding high-strength aluminum alloy [J]. *Welding Journal*, 2000, 79(1): 9 - 17 - s.
- [11] 郭绍庆, 田锡唐, 徐文立. 随焊激冷减小铝合金薄板的焊接变形[J]. *焊接*, 1998(9): 8 - 11.
GUO Shao-qing, TIAN Xi-tang, XU Wen-li. Reduction of welding distortion in thin aluminum alloy sheet welded joint by trailing intensive cooling [J]. *Welding and Joining*, 1998(9): 8 - 11.
- [12] 中国航空材料手册编辑委员会编. 航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
Chinese Aeronautical Materials Handbook Compiling Committee. *Aeronautical Materials Handbook* [M]. Beijing: Chinese Standards Press, 1988.
- [13] 陈 楚, 汪建华, 杨洪庆. 数值分析在焊接中的应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.
CHEN Chu, WANG Jian-hua, YANG Hong-qing. *The Numerical Simulation of Welding Processes* [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1985.
- [14] Massoud K. *Principles of Convective Heat Transfer* [M]. New York: Springer, 2001.
- [15] 关 桥, 彭文秀, 刘继达, 等. 焊接热源有效利用率的测试算法[J]. *焊接学报*, 1982, 3(1): 10 - 23.
GUAN Qiao, PENG Wen-xiu, LIU Ji-da, et al. The calculation method of welding arc efficiency based on the experimental measurement [J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 1982, 3(1): 10 - 23.

(编辑 李艳红)