

钛合金薄板带热沉钨极氩弧焊的应变场

Strain Field of Gas Tungsten Arc Welding with a Spot Heat Sink on Titanium Alloy Thin Plate

李 菊¹, 关 桥², 史耀武¹, 郭德伦², 杜欲晓², 孙永春²

(1 北京工业大学材料学院材料连接部, 北京 100022;

2 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

LI Ju¹, GUAN Qiao², SHI Yao-wu¹,

GUO De-lun², DU Yu-xiao², SUN Yong-chun²

(1 School of Materials Science and Engineering,

Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2 Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute,

Beijing 100024, China)

摘要: 采用数值模拟和试验相结合的方法对比研究了钛合金常规钨极氩弧焊 (GTAW) 及带热沉的钨极氩弧焊, 即动态控制低应力无变形 (DC-LSND) GTAW 焊接过程中纵向应变场的形态与发展历史。DC-LSND GTAW 焊接过程中, 由于紧随热源之后热沉冷却介质的急冷作用, 使得热沉作用部位产生强烈收缩, 热源与热沉之间的极大温度梯度, 对高温金属产生较强的拉伸作用, 使得焊缝中拉伸塑性应变增大, 近缝区压缩塑性应变减小, 焊缝与近缝区的不协调应变减小。DC-LSND 焊时, 不但可以降低残余应变, 减小变形; 而且, 在所选用的焊接条件下, DC-LSND GTAW 焊缝中甚至还可获得拉伸的不协调应变。

关键词: 钛合金; 钨极氩弧焊; 热沉; 有限元法; 应变场

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2004) 03-0011-04

Abstract: The longitudinal strain field pattern and the longitudinal strain developing history were studied numerically and experimentally for both the conventional Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and Dynamically Controlled Low Stress No-Distortion (DC-LSND) GTAW welding of a titanium alloy. Results show that high tensile effect generated by heat sink with sharp cooling and contraction of weld metals is acting in the zone between the arc and the trailing heat sink during DC-LSND GTAW welding, which increase tensile plastic strain of weld and decrease compress plastic strain in the zone near to the weld. All of these phenomena mitigate the incompatible strain in the weld and the zone nearby. With the selected welding parameters, residual tensile incompatible strain can be reached in the weld during DC-LSND GTAW welding.

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

钛合金以其密度小, 比强度高, 优越性能在航空航天领域得到了广泛的应用^[1,2]。航空航天飞行器上多为薄壁焊接结构, 钛合金薄壁构件在焊后产生的残余应力和变形十分严重, 如何有效控制薄壁构件的残余应力和变形一直是焊接工程中的重要课题之一。

北京航空制造工程研究所研究开发的动态控制低应力无变形焊接新技术 (DC-LSND, Dynamically Controlled Low Stress No-Distortion), 采用可跟随焊接热源移动的热沉装置, 形成一个热源-热沉多源系统, 在焊接区产生局部可控的温度场和相应的热弹塑性应力应变场, 获得了低焊接残余应力、无变形的薄壁焊接结构^[3,4]。DC-LSND 焊方法与其它控制焊接应力和变形的相比, 不需庞大的专用设备, 操作简

便, 有着广泛的应用前景。但对热沉作用机制, 即获得低应力、无变形焊接结构的定量分析, 尚缺少系统深入的研究。

随着计算机和有限元等数值方法的发展, 焊接过程理论预测方面的工作越来越得到国内外焊接工作者的重视^[5]。迄今为止, 有关钛合金薄壁结构焊接残余应力和变形控制等方面的数值研究工作还很少。本工作采用三维数值模拟和试验相结合的方法对钛合金 TC4 的焊接应变进行了分析, 侧重于对 DC-LSND GTAW 控制应变过程机理的研究。

1 动态控制低应力无变形 (DC-LSND) 焊接法

动态控制低应力无变形焊接法是在电弧后适当

部位, 设置一个能跟随电弧移动并对焊缝产生急冷作用的热沉, 与焊接电弧形成一个多源系统, 用以控制焊接时不协调应变的形成, 从而达到控制薄板失稳变形的目的^[4]。该系统的示意图如图 1 所示。

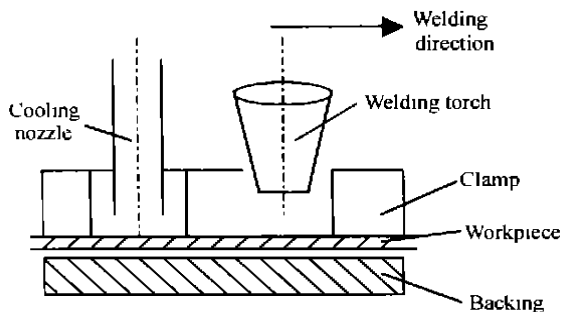


图 1 DC-LSND 焊接装置示意图

Fig. 1 Schematic of DC-LSND welding

2 计算模型

2.1 有限元网格及边界条件

采用 ANSYS 软件对钛合金 TC4 薄板对接焊进行分析, 试件的焊后尺寸为 $320\text{mm} \times 300\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 。考虑到结构的对称性, 取其一半进行三维数值模拟, 有限元网格如图 2 所示。其中最小单元尺寸为 $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 2.5\text{mm}$, 网格中共有 3460 个单元, 7292 个节点。同时假设: 材料各向同性; 不考虑粘性和蠕变的影响。

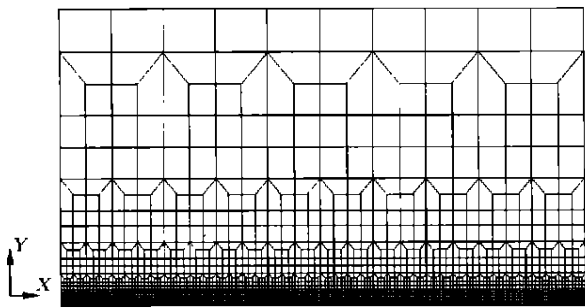


图 2 有限元网格

Fig. 2 Mesh used in FEA

2.2 计算参数

对常规的和带有热沉的钨极氩弧焊分别进行有限元模拟。焊接电流 200A, 焊接电压 11.9V, 焊接热源的有效利用率 η 为 67%^[6], 试件背面有铜垫板。热源及热沉的行走速度为 12m/h, 两者中心相距 30mm。热沉冷却介质流量为 4L/min。在对常规 GTAW 及动态低应力无变形 GTAW 的数值模拟中, 焊接参数均相同。

钛合金 TC4 的材料参数由文献 [7] 获得, 屈服强度、弹性模量等力学性能参数均随温度而变化。

3 计算结果及分析

对于温度场的研究已在文献 [8] 中讨论, 应力场的结果也已另撰文描述, 在此不再重述, 本文主要对纵向应变场进行分析讨论。

3.1 纵向应变随时间变化过程

选取距焊缝中心不同距离的点, 分别分析其纵向塑性应变过程, 从而给出焊缝和近缝区在焊接过程中的纵向塑性应变变化。在所选用的焊接条件下, 焊缝半宽为 5mm, 选取的五个点位于 $x = 160\text{mm}$ 垂直焊缝的横向截面上, 距焊缝中心的距离分别为 $y = 0\text{mm}$, 4mm, 焊缝区; $y = 8\text{mm}$, 10mm, 近缝区; $y = 12\text{mm}$, 无塑性变形区。在常规 GTAW 及 DC-LSND GTAW 两种焊接方法中纵向塑性应变随时间的变化过程分别示于图 3, 4。

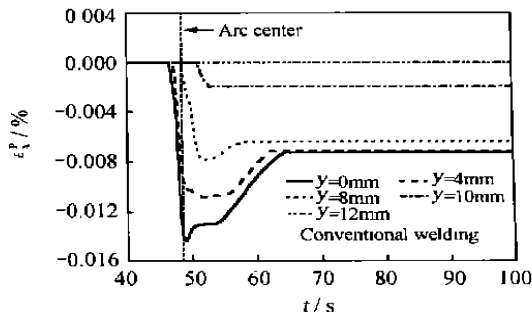


图 3 常规焊中 $x = 160\text{mm}$ 截面上距焊缝中心不同距离的点的纵向塑性应变过程

Fig. 3 Conventional welding: longitudinal plastic strain ϵ_y^p histories for the points at $x = 160\text{mm}$ section with various distances to the weld centerline

图 3 为常规焊中 $x = 160\text{mm}$ 截面上各点纵向塑性应变随时间的变化过程。可以看到, 无论是焊缝中心 $y = 0\text{mm}$ 的点、焊缝中 $y = 4\text{mm}$ 的点还是近缝区 $y = 8\text{mm}$, $y = 10\text{mm}$ 的点, 焊接过程中均产生了压缩塑性变形; $y = 12\text{mm}$ 的点没有塑性变形产生, 说明距焊缝中心 12mm 以外的区域为弹性区。焊缝中心 $y = 0\text{mm}$ 的点, 随着电弧的临近迅速升温, 膨胀受压, 产生较大的压缩塑性应变; 电弧到来, 金属熔化, 形成熔池, 虽然熔融的金属自身为无应力无应变的状态, 但由于熔池并不是孤立存在的, 熔池内的金属是在已发生压缩塑性变形的近缝区的框架下熔化的, 因而 $y = 0\text{mm}$ 的点在经历熔化这一阶段时仍表现为缩短的应变。电弧经过, 熔池金属凝固, 焊缝形成; 在随后的降温过程中, 焊缝冷却得快, 近缝区冷却得慢, 焊缝受近缝区金属的拉伸, 由于设定钛合金 TC4 的“力学熔点”为 800, 因而从熔池凝固到冷却至 800 的时间段内, 焊缝金属产生拉伸塑性应变, 但并无相应的应力产生; 在温度降至 800 后, 力学抗力恢复, 焊

缝在两侧金属的拉伸作用下产生拉伸弹性应变, 塑性应变不再发生变化。焊缝中 $y = 4\text{mm}$ 的点具有同样的变化规律, 不再多述。 $y = 8\text{mm}$, $y = 10\text{mm}$ 等近缝区的点同焊缝一样, 随着电弧的临近, 近缝区金属升温, 膨胀受压, 产生压缩塑性应变; 在电弧经过该横向截面后, 冷却收缩, 由于 $y = 8\text{mm}$ 的点升温过程中所达到的温度最高值超过了 800 [8], 因而从开始冷却到温度降至 800 [8] 的过程中, 产生了拉伸塑性应变, 一定程度上补偿了升温过程中产生的压缩塑性应变, 使得最终的不协调应变 (所谓不协调应变, 就是若将物体处于既无外力也无内力的状态看作为基准状态, 不协调应变就是表征从应力状态切离后处于自由状态时, 与基准状态相比所发生的应变) 减小; 虽同为近缝区的点, 由于与焊缝中心距离的不同造成升温所能达到的最高温度不同, 因而 $y = 10\text{mm}$ 的点塑性应变变化规律与 $y = 8\text{mm}$ 的点有所不同。 $y = 10\text{mm}$ 的点升温的最高温度低于 800 [8], 在冷却过程中产生拉伸弹性应变, 加热过程中产生的压缩塑性应变在冷却过程中保持不变。

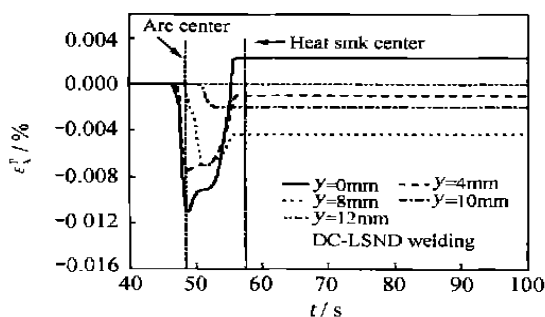


图4 DC-LSND 中 $x = 160\text{mm}$ 截面上距焊缝中心不同距离的点的纵向塑性应变过程

Fig. 4 DC-LSND: longitudinal plastic strain ϵ_x^p histories for the points at $x = 160\text{mm}$ section with various distances to the weld centerline

同常规焊一样, DC-LSND 焊缝及近缝区各点在加热过程中升温膨胀, 受压, 产生压缩塑性应变; 距焊缝中心 $y = 10\text{mm}$ 的点纵向塑性应变变化规律与常规焊相似, 塑性应变大小与常规焊的相应值相近; 同样, $y = 12\text{mm}$ 的点的塑性应变为 0, 表明距焊缝中心 12mm 以外的区域为弹性区。由此可见, 在所选用的焊接条件下, DC-LSND 焊中热沉对距焊缝中心 10mm 以外的区域塑性应变影响较小, 热沉的作用突出体现在对焊缝中纵向塑性应变的影响上。焊缝中 $y = 0\text{mm}$, $y = 4\text{mm}$ 的点, 随着电弧的临近, 温度迅速升高, 升温膨胀受压, 产生压缩塑性应变; 电弧到来, 熔池金属熔化, 同常规焊一样, 焊缝中的塑性应变为一个缩短的应变值; 电弧经过, 熔池凝固, 焊缝形成;

由于热沉紧随电弧之后, 热沉作用部位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, 使得这之间处于“力学熔化”状态的高温金属产生较大的拉伸塑性应变, 极大程度补偿了已产生的缩短的塑性应变, 使得最终的不协调应变减小, 焊缝中心甚至产生了相反方向的拉伸不协调应变。热沉对近缝区的塑性应变也有一定程度的影响, $y = 8\text{mm}$ 的点塑性应变规律虽然同常规焊相似, 但应变值小于常规焊的相应值, 表明热沉作用部位金属的急冷收缩使得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, 从而使最终的不协调应变减小。

由此可见, DC-LSND 焊中热沉的急冷收缩, 对熔池与热沉之间的金属产生强烈的拉伸作用, 使得焊缝中纵向拉伸塑性应变增大, 近缝区纵向压缩塑性应变减小, 焊缝和近缝区的不协调应变减小, 残余应力降低, 在优选的焊接规范下, 可以获得低应力、无变形的焊接构件。

3.2 焊接过程中横向截面上的纵向塑性应变随时间的变化过程

有了以上结果, 现在研究焊接过程中某时刻垂直焊缝的几个典型截面上纵向塑性应变的分布。选取不同截面分析应变发展过程, 与选取一个截面分析不同时刻的应变等价。为了排除起弧与熄弧的影响, 对焊接过程达到准稳态后某一时刻的纵向塑性应变的分布进行分析。本工作选取焊接开始 60s , 即电弧中心行走至 198mm 、热沉中心行走至 168mm 时的纵向塑性应变进行研究, 分析结果示于图 5。选取的截面分别为 $x = 208\text{mm}$, 熔池前; $x = 192\text{mm}$, 熔池存在的横截面; $x = 178\text{mm}$, 熔池与热沉之间; $x = 168\text{mm}$, 热沉所在截面; $x = 144\text{mm}$, 热沉之后。两种方法塑性应变变化历程分别示于图 5 中。

在所选用的焊接条件下, 焊缝半宽为 5mm 。图 5a 为常规焊塑性应变变化过程。电弧与截面相距较远时 ($x = 208\text{mm}$), 焊缝及近缝区没有发生塑性变形, 塑性应变为 0; 随着热源的临近, 受热膨胀, 压缩塑性应变逐渐增大, 在热源到来的 $x = 192\text{mm}$ 截面, 焊缝中已存在着较大的缩短的塑性应变, 近缝区也存在着压缩塑性应变; 在电弧经过之后的冷却过程中, 焊缝冷却得快, 近缝区冷却得慢, 当焊缝温度仍高于力学熔化温度时, 焊缝在两侧金属的拉伸作用下, 产生拉伸塑性应变, 由图 5a 中可以看到从 $x = 192\text{mm}$ 开始至 $x = 178\text{mm}$, $x = 168\text{mm}$, $x = 144\text{mm}$ 截面由于有拉伸塑性应变的产生, 焊缝中已存在的缩短的塑性应变不断减小。近缝区压缩塑性应变区域随着冷却过程的进行有所扩大, 这是因为在焊缝冷却过程中, 远离焊缝的区域温度有所增高, 膨胀受压, 导致新的压缩塑

性应变区的形成。

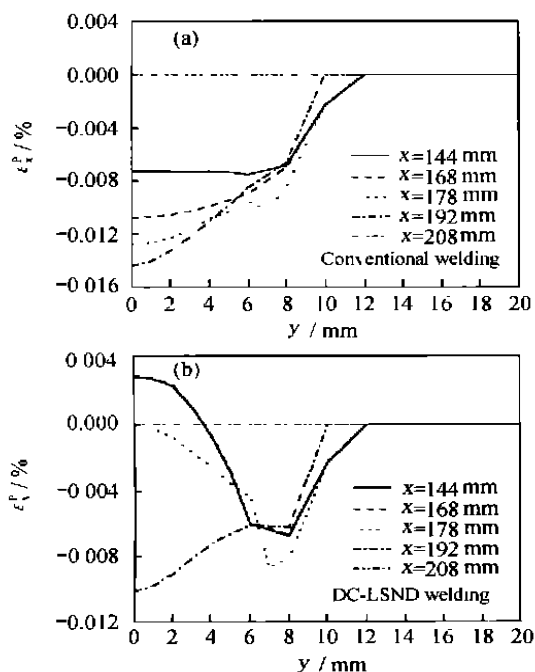


图5 不同横截面上塑性应变的分布

(a) 常规焊; (b) DC-LSND 焊

Fig. 5 Distributions of plastic strain

ϵ_p^r at different sections

(a) conventional welding; (b) DC-LSND welding

图5b为DC-LSND焊塑性应变的变化过程。同常规焊一样, $x = 208\text{mm}$ 截面没有塑性应变产生; 随着热源的临近, 压缩塑性应变不断增大, 在热源到来时 ($x = 192\text{mm}$), 近缝区产生了压缩塑性应变; 熔池以两侧压缩塑性变形区为框架, 也相应地存在很大的缩短的塑性应变。熔池凝固、焊缝形成; 与常规焊不同, 随后的冷却过程中, 由于紧随热源之后的热沉的急冷收缩, 使处于“力学熔化”状态的焊缝高温金属产生很大的拉伸塑性应变, 由图5b中可以明显看到 $x = 178\text{mm}$ 截面焊缝中产生了较大的拉伸塑性应变, 此拉伸塑性应变不断增大, 到 $x = 168\text{mm}$ 截面, 即热沉所在的截面, 焊缝中甚至产生了符号相反的拉伸的不协调应变, 继续冷却, 焊缝中的塑性应变变化不大 ($x = 144\text{mm}$ 和 $x = 168\text{mm}$ 的曲线几乎重合)。同常规焊一样, 近缝区的压缩塑性应变区在冷却过程中有所扩大。

综合以上分析可知, DC-LSND 焊中, 热沉的急冷收缩使热源与热沉之间的高温金属产生很大的拉伸塑性应变, 近缝区压缩塑性应变略有减小, 焊缝和近缝区的不协调应变减小, 甚至可以获得焊缝中的拉伸残余应变。

3.3 残余态的纵向塑性应变

为了进一步研究常规焊及 DC-LSND 焊纵向残余塑性应变的分布, 将采用两种方法焊接时, $x = 160\text{mm}$ 截面纵向残余塑性应变 ϵ_x^p 沿焊缝横向, 即垂直于焊缝方向的分布进行了对比, 示于图6。

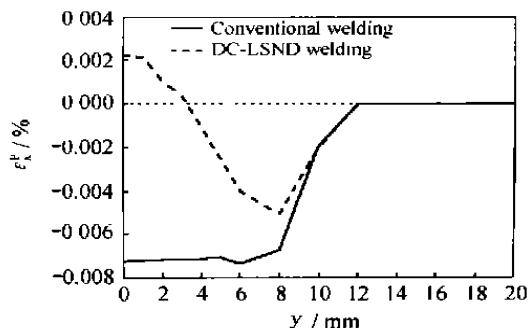


图6 残余态时 ϵ_x^p 沿焊缝横向的分布

Fig. 6 Distribution of residual ϵ_x^p in y direction

由图6看到, 两种方法纵向残余塑性应变的分布趋势有很大不同, 常规焊焊缝为压缩塑性应变, 而在所选用的规范参数条件下, DC-LSND 焊焊缝中心为拉伸塑性应变; 近缝区均为压缩塑性应变, 但 DC-LSND 焊的压缩塑性应变小于常规焊的相应值。由此可以看出, 残余态时, DC-LSND 焊焊缝与近缝区的不协调应变小于常规焊的相应值, 正因如此, 选用优选的规范参数用 DC-LSND 焊可以获得低应力、无变形的焊接构件。

4 试验研究结果

试验测量了常规 GTAW 焊和 DC-LSND GTAW 焊 TC4 薄板对接时纵向残余塑性应变 ϵ_x^p 的分布。试件焊后尺寸为 $320\text{mm} \times 300\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 。试件的准备、清理和焊接按航空工业标准 HB/Z 120—87 “钛及钛合金钨极氩弧焊工艺”进行。焊接设备为纵缝自动氩弧焊机, 采用双支点琴键式焊接夹具。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。焊接电流 200A , 焊接电压 11.9V , 焊接速度 12m/h 。DC-LSND GTAW 焊热沉与热源相距 30mm , 冷却介质流量为 4L/min 。残余塑性应变的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 50mm , 切条释放用线切割。由于焊缝金属的熔化, 焊缝中的残余塑性应变无法测得。测量结果如图7所示。

从图7可以看到, 无论是常规焊还是 DC-LSND 焊, 焊缝两侧均有压缩塑性应变产生, 并且随着远离焊缝中心距离的增加, 压缩塑性应变减小为0, 这一结果和数值模拟结果一致, 验证了数值模拟的正确性。

(下转第48页)

参考文献

- [1] S X Li, E G Flisou, D J Smith. J Strain Analysis, 1994, 29 (2): 147—153.
- [2] S X Li, D J Smith. Mater Sci Tech, 1995, 11: 1253—1260.
- [3] S S K Gunturi, D W MacLachlan. Material Science Engineering, 2000, A 289: 289—297.
- [4] R Chieragatti, L Remy. Mater Sci Eng, 1991, A 141: 1—9.
- [5] J S Crompton, J W Marton. Mater Sci Eng, 1984, 64: 37—43.
- [6] S M Copley, B H Kear, G M Powe. Mater Sci Eng, 1972, 10: 87—93.
- [7] W W Milligan, S D Antolovich. Metall Trans, 1987, 18A: 85—95.
- [8] D P Pope, S S Ezz. Inter Metals Rev, 1984, 29 (3): 136—167.
- [9] D M Shah, D N Duhl. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Superalloy, TMS-AIME [C]. Warrendale: PA, 1984. 105—114.
- [10] R G Davies, T L Johnston. Ordered Alloy [M], 1970. 447.
- [11] D M Shah, D N Duhl. J Met, 1981, 33 (12): 24.
- [12] S M Copley, B H Kear. Trans AIME, 1967, 239: 984.

- [13] D A Finn. Trans AIME, 1960, 218: 145.
- [14] B H Kear, H G F Wilsdorf. Trans AIME, 1962, 224: 382.
- [15] P H Thornton, R G Davies, T L Johnston. Metall Trans, 1970, 1: 207.
- [16] S Takiuchi, E Kuramoto. Acta Metall, 1973, 21: 1415.
- [17] C Lall, S Chin, D P Pope. Metall Trans, 1979, 10A: 1323.
- [18] V Paidar, D P Pope, V Vitek. Acta Metall, 1984, 32: 435—448.
- [19] B H Dear, B J Pearcey. Trans AIME, 1987, 279: 1209.
- [20] B H Kear, A F Giamei, J M Silcock, R K Ham. Scripta Metall, 1969, 3: 123.
- [21] P Caron, T Khan. Philos Mag, 1988, 57A: 859.
- [22] M Condat, B Decamps. Scripta Metall, 1987, 21: 607—609.
- [23] W W Milligan, S D Antolovich. Metall Trans, 1991, 22A: 2309—2318.

收稿日期: 2003-04-02; 修订日期: 2003-08-25

作者简介: 李影 (1974-), 男, 工程师, 博士, 研究方向为高温结合材料的力学行为, 联系地址: 北京市 81 信箱 23 分箱 (100095)。

* * * * *

(上接第 14 页)

虽然无法测得焊缝中的残余塑性应变, 但由图 7 中还是可以看出, DC-LSND 焊近缝区的压缩塑性应变小于常规焊的相应值, 与数值模拟结果一致。

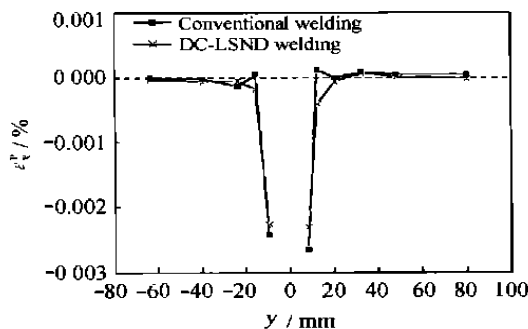


图 7 实验测得的纵向残余塑性应变沿焊缝横向的分布

Fig. 7 Experimental measured residual ϵ_y^p distribution in y direction

5 结论

(1) DC-LSND GTAW 焊中, 紧随电弧之后热沉作用部位金属的急冷收缩对熔池与热沉之间的高温金属产生强烈的拉伸作用, 使得焊缝中纵向拉伸塑性应变增大, 近缝区纵向压缩塑性应变减小, 焊缝与近缝区的不协调应变减小。

(2) 在所选用的焊接条件下, DC-LSND GTAW 焊缝中出现了与常规焊符号相反的拉伸的不协调应变。

(3) 试验与数值模拟的结果吻合良好, 有限元模拟可用于分析 DC-LSND 焊中热沉对纵向残余塑性应变的影响规律, 定量地揭示采用热沉获得低应力、无变形焊接结构的机理。

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] James D Destefani. Introduction to Titanium and Titanium alloys, Metals Handbook, Vol2 [M]. 1990. 634—646.
- [3] 关桥, 张崇显, 郭德伦. 动态控制薄板构件低应力无变形焊接法及其装置 [P]. 中国专利: 93101690.8, 1993—02—25.
- [4] Zhang C X, Guan Q, Guo D L. Study on application of Dynamic control of welding stress and distortion in thin aluminium elements [A]. Proc of the Int Symp [C]. Nagoya: JWS, 1996. 539—544.
- [5] 陈丙森. 计算机辅助焊接技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [6] 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.
- [7] 中国航空材料编委会航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [8] 李菊, 关桥, 史耀武, 等. 钛合金薄板带热沉的 TIG 焊温度场 [J]. 焊接学报, 2003, 24 (1): 69—72.

收稿日期: 2003-07-04; 修订日期: 2003-12-28

作者简介: 李菊 (1970-), 女, 博士研究生, 主要从事焊接应力与变形的控制工作, 联系地址: 北京 340 信箱 102 室 (100024)。