

温差拉伸和随焊激冷配合使用控制焊接变形

郭绍庆¹, 袁 鸿¹, 徐文立², 谷卫华¹, 田锡唐²

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘 要: 对温差拉伸和随焊激冷配合使用控制铝合金薄板焊接变形的联合工艺进行了数值模拟和试验研究。数值分析表明, 随焊激冷更倾向于在焊缝中心造成显著的纵向塑性拉伸, 而温差拉伸则倾向于在近缝区造成显著的塑性拉伸。将二者配合使用, 不仅可以靠温差拉伸将焊缝和近缝区在加热阶段形成的纵向塑性压应变控制在较低的水平, 还可以靠随焊激冷增加冷却阶段的纵向塑性拉伸进一步抵消焊缝区已经形成的压应变。因而充分发挥二者的作用, 有效地控制焊件的残余变形。试验研究与数值模拟得到的结论基本一致, 随焊激冷和温差拉伸联合使用, 可使 540 mm×300 mm×2 mm 的 LY12CZ 薄板焊后纵向挠曲由单独使用温差拉伸时的 2.87 mm 和单独使用随焊激冷时的 4.88 mm 降低到 0.80 mm 的水平。

关键词: 焊接变形; 温差拉伸; 随焊激冷; 数值模拟; 铝合金

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2004)06-82-05



郭绍庆

0 序 言

铝合金薄板壳焊接结构在航空航天领域的应用日趋广泛, 但是由于焊接造成的残余应力和变形会降低其临界压曲载荷, 经常造成结构的失稳破坏。为减小焊接残余应力和变形, 国内外先后进行了大量研究, 并提出了许多方法, 这包括预拉伸法、强迫冷却法、均匀和局部加热法、随焊热碾压和焊后冷碾压法等^[1]。在这些方法中温差拉伸和随焊激冷只需通过局部加热和冷却措施, 调整焊接温度场, 控制焊缝和近缝区塑性应变的发展, 减小塑性变形的大小和范围, 达到控制焊接变形的目的。因而应用起来简便易行, 在薄板焊接变形的控制方面有着独特的优势^[2]。

温差拉伸技术是指在焊前和焊接过程中冷却焊缝和近缝区, 加热焊缝全长两侧区域, 在焊件上预置一马鞍形温度场, 使焊缝区承受预拉伸^[3]。实际上除了这种静态温差拉伸技术以外, 还有一类动态温差拉伸技术。可用于防止焊接热裂纹的随焊激冷法, 也能够造成一种纵向的移动温差拉伸效果。将随焊激冷法用于焊接变形的控制, 又可称之为动态温差拉伸。Burak、Biman、Lobanov 和关桥等人先后对这两类变形控制技术进行了研究^[4~10]。但是将静态的全长温差拉伸和随焊激冷造成的动态温差拉伸配合使用控制薄板焊接变形, 这方面的研究至今

未见报道。

针对 LY12CZ 高强铝合金薄板, 一方面采用二维平面应力的瞬态有限元分析技术, 对温差拉伸和随焊激冷配合使用的焊接工艺过程进行数值模拟, 揭示和预测了该联合工艺控制薄板焊接变形的机理和效果。另一方面, 通过焊接变形对比试验, 验证了采用该联合工艺控制焊接变形的实际效果。

1 数值模拟

1.1 模拟模型

在焊接变形的有限元模拟中, 受所用分析软件计算能力的制约, 焊件尺寸为 150 mm×100 mm×2 mm, 小于实际焊接试板, 这对焊缝及近缝区的塑性应变和残余应力分析结果会造成一定影响, 但不会影响对新工艺控制变形的机理和规律的揭示。材料为 LY12CZ 铝合金, 焊接方法为自动钨极氩弧焊, 采用不填丝的表面熔敷方式焊接。图 1 给出了同时采用随焊激冷和静态温差拉伸时的焊接过程示意图。模拟时从距开始端板边 5 mm 处起焊, 到距结束端板边还有 10 mm 处止焊, 焊接速度为 5 mm/s。随焊激冷时, 冷源在热源后方 D_c 处随焊枪同步移动。温差拉伸时, 冷却焊缝及近缝区, 加热焊缝两侧区域。

由于对称取焊件一半进行分析。焊缝中心线上各点的横向位移为零, 第一个节点处的纵向位移也

为零。为确保相同的焊缝宽度,对于常规焊和随焊激冷,有效热输入取作 195 J/mm,对于温差拉伸有效热输入取作 248 J/mm。电弧能量分布遵循高斯分布,集中系数取作 0.7 mm^{-2} 。热源被看作是焊缝宽度内单元的内部热源。通过建立焊缝各单元的时间函数,来模拟移动的焊接热源。

随焊激冷时,冷源跟随热源同步运动。冷源的能量分布也近似用高斯分布描述。激冷距离 D_c 定义为冷源与热源的中心间距。冷源既可以用表面冷流输入,也可以用内部冷源输入。冷源的功率根据冷却介质的显热值、吸收效率和流量求得。冷源和热源的集中程度系数 k_w 和 k_L 均根据试算获得,调节 k_w 和 k_L 使计算获得的温度随时间的变化曲线与实测吻合。

热分析中考虑了凝固潜热。LY12CZ 的液相线温度为 911 K,固相线温度为 775 K,熔化潜热为 385 J/g。

试件的上下表面进行辐射和对流换热。

在静态温差拉伸中,为模拟水冷铜块的冷却作用,将冷却区宽度(15 mm)内对流边界对流系数取作 $1.821 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,这大约是空气中自由对流系数的 20 倍。电热带加热效果由辐射边界条件模拟,加热区离焊缝中心 10 mm,宽度为 17.5 mm。通过调节加热区的环境温度,来获得不同的预热峰值温度和温差。在预置温度场达到稳态后开始焊接。焊接完成后过一段时间逐渐去除预置的温度场。

热分析得到的温度历史作为随后力学分析的载荷历史。力学分析中采用平面应力假设。

材料的热物理性能(包括导热系数 K 、比热容 C_p)和力学性能(包括屈服强度 σ_s 、弹性模量 E 、应变硬化模量 H 、泊松比 ν 和线膨胀系数 α)随温度而改变。

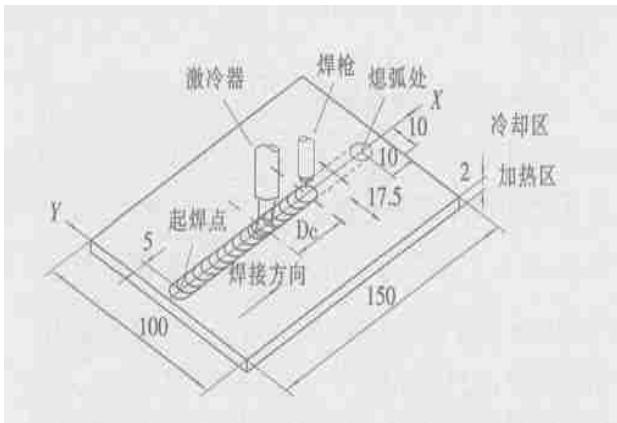


图 1 采用随焊激冷和温差拉伸的焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welding process with trailing intense cooling and thermal tensioning

1.2 模拟结果及分析

1.2.1 温度、应变和应力演变

图 2a 描述了焊缝中心线上点($X=75 \text{ mm}, Y=0 \text{ mm}$)在不同工艺中的焊接热循环。这里随焊激冷的冷源功率为热源功率的 23.4%,冷源和热源中心

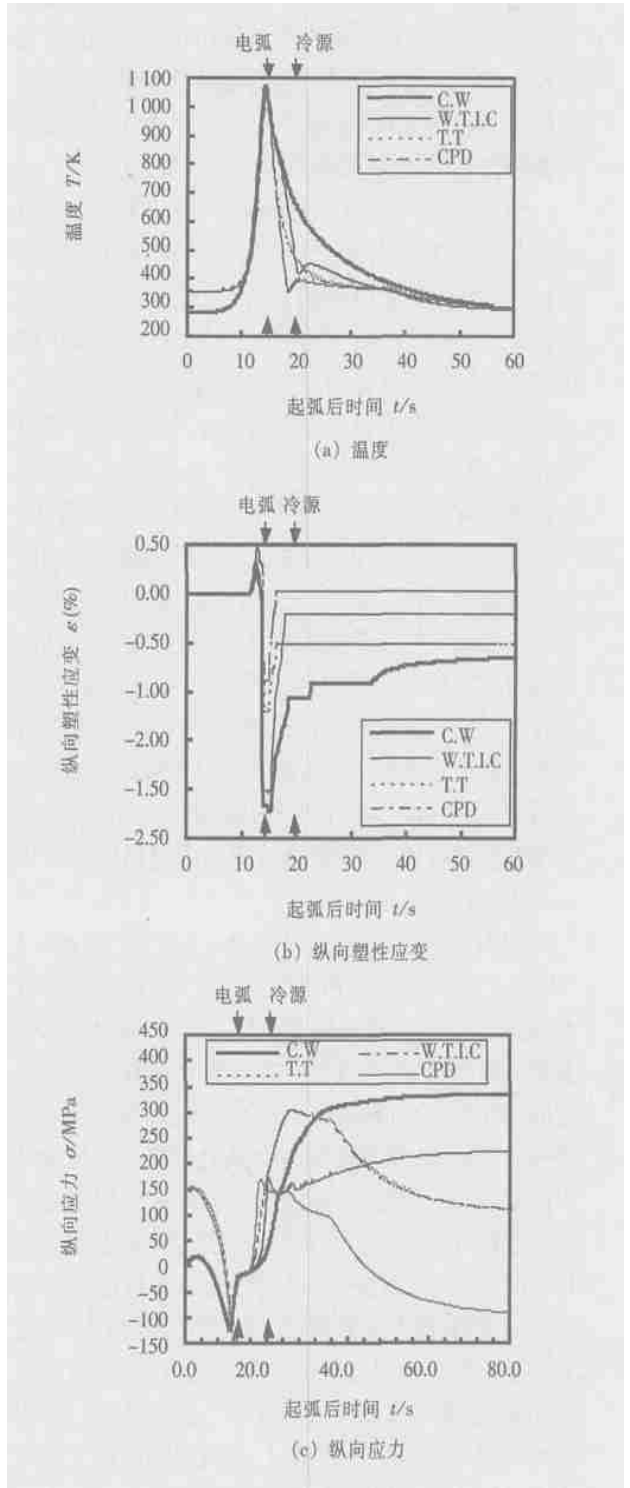


图 2 不同工艺时给定点($X=75 \text{ mm}, Y=0 \text{ mm}$)的温度、纵向塑性应变和应力演变

Fig. 2 Evolution of temperature, longitudinal plastic strain and stress at point

注: C.W—常规焊; W.T.I.C—随焊激冷; T.T—温差拉伸; CPD—温差拉伸和随焊激冷配合使用

间距为 30 mm; 温差拉伸马鞍形温度场的温差为 115 K, 其中焊缝中心温度 359 K, 焊缝两侧预热峰温 474 K, 由此造成的焊缝中心纵向预拉伸应力可以达到母材屈服强度的 51%。由图 2a 可以看出, 采用温差拉伸使焊缝中心在焊前温度提高至 359 K, 不同工艺的温度上升阶段基本相似, 差别主要体现在降温阶段。采用随焊激冷后, 焊缝中心降温加快, 且出现一低谷。温差拉伸也使焊缝降温加快, 虽无温度低谷, 但其水冷铜垫板的冷却效果看上去更强。两者配合使用, 焊缝的降温速度进一步加快。

图 2b 描述了焊缝中心线上点($X=75$ mm, $Y=0$ mm)在不同工艺中的纵向塑性应变的演变。在焊接过程中该点随着电弧的移近, 先是发生少量的纵向伸长(这是由于横向挤压过大引起), 接着发生较大幅度的纵向塑性压缩, 随着电弧移走和温度降低, 又发生程度不等的纵向塑性拉伸。随焊激冷与常规焊相比, 冷却阶段的纵向塑性拉伸显著增加, 因而最终造成的焊缝纵向缩短减少。从图中还可以看出, 冷源造成的塑性拉伸主要发生在冷源和热源之间的焊缝金属上, 这是因为该处温度较高, 塑性拉伸容易产生。温差拉伸与常规焊相比, 电弧移近时的纵向伸长有所增加, 而随后的纵向塑性压缩显著减少, 虽然在冷却阶段的纵向塑性拉伸过早结束, 但最终造成的纵向缩短仍减少。将温差拉伸和随焊激冷配合使用时, 加热阶段的纵向塑性压缩减少, 而冷却阶段的塑性拉伸增加, 因此最终造成的焊缝纵向缩短进一步得到控制。

图 2c 为不同工艺时焊缝中心点($X=75$ mm, $Y=0$ mm)的纵向应力演变情况。可以看出, 常规焊和随焊激冷时, 焊缝先经受一较小的纵向拉应力, 接着经受纵向压应力, 该压应力先是增加, 随着电弧靠近和温度升高, 材料软化, 压应力减小, 随着电弧移走和温度降低, 应力逐渐变为纵向拉应力。与最终纵向塑性应变相对应, 随焊激冷最终纵向残余应力较常规焊有所降低。温差拉伸使焊缝中心预先承受 150 MPa 的纵向拉应力, 焊接开始后随着电弧移近经受压应力, 随着电弧移走又逐渐经受拉应力, 但随着焊后温差拉伸用马鞍形温度场的去除, 拉应力又开始降低, 最终残余拉应力比随焊激冷还低。随焊激冷与温差拉伸配合使用时, 其纵向应力演变兼有二者的特点, 最终残余拉应力水平最低。

1.2.2 焊后应变和应力分布

焊后纵向塑性应变和残余应力分布由图 3 给出。由图 3a 可以看出, 随焊激冷与常规焊相比显著降低了焊缝及其邻近区域的纵向缩短, 并使塑性压缩区的宽度略微减小。最大的塑性拉伸发生于焊缝

中心区。温差拉伸降低焊缝及近缝区纵向塑性压缩的作用比随焊激冷还要大, 这表现在塑性压缩区的宽度和压缩的幅度都发生了降低, 在近缝区甚至出现了塑性拉应变。将温差拉伸和随焊激冷配合使用后, 焊缝及近缝区的纵向塑性拉伸进一步增加, 最终导致该区域保留一定的纵向塑性拉应变。

焊缝金属的收缩应变和近缝区的塑性压应变亦称固有应变或非协调应变, 它们是在焊件中造成残余应力和变形的根本原因。降低或消除焊接固有应变是控制焊接残余应力和变形的最根本的途径。焊件中固有应变的降低, 一方面能够降低焊缝及其邻近区域的纵向拉应力, 从而减小实际焊件因沿厚度方向应力非对称分布引起的纵向挠曲; 另一方面能够相应地降低焊缝两侧区域的纵向压应力, 从而减小发生失稳变形的可能性。从不同工艺焊后纵向塑性应变的分布看, 随焊激冷和温差拉伸都具有降低焊件中固有应变的作用, 但各有特点, 随焊激冷更倾向于在焊缝中心造成显著的塑性拉伸, 而温差拉伸则倾向于在近缝区造成显著的塑性拉伸。将二者结合使用, 可以充分发挥二者的作用, 将焊接固有压应变控制到极低的水平, 甚至出现了相反的拉应变。这对防止薄壁件的翘曲和失稳变形特别有利。

焊后纵向残余应力分布(见图 3b)表明, 随焊激冷使焊缝及近缝区的残余拉应力明显降低, 两侧压应力也相应降低, 但应力分布与常规焊比较相似。温差拉伸控制焊接残余应力的作用更加明显, 残余应力幅值降到较低的水平, 并且与塑性应变分布相对应, 塑性拉伸最显著的近缝区出现了压应力, 焊缝中心仍为拉应力。将随焊激冷与温差拉伸相结合, 焊缝及近缝区残余应力全部变为压应力, 其两侧出现一定的拉应力, 靠近试件边缘又变为压应力。焊缝及近缝区压应力的出现是由于该区域在焊接过程中发生了纵向伸长, 它对整个试件实际上起着纵向支撑的作用, 特别有利于防止焊件在使用过程发生失稳变形。

在此须指出, 残余应力的分析结果数值较高, 常规焊达到 320 MPa 以上, 超过母材 LY12Z 屈服强度 σ_s (310 MPa), 这与铝合金焊接纵向残余应力较低(仅为 0.6~0.8 σ_s)出入较大。其原因在于, 经固溶和自然时效的 LY12 焊接时发生熔化和凝固, 刚刚凝固的焊缝相当于处于固溶态。根据文献[11, 12], LY12 在淬火后 0.5 h 以内仍保持柔软状态(σ_s 在 150 MPa 左右), 如果焊接造成的非协调应变足够大, 就会在焊缝中造成达到材料此刻 σ_s 的纵向残余应力, 该残余应力远低于焊前 σ_s , 考虑屈服后继续塑性变形引起应变硬化, 残余应力会进一步增加, 达

到焊前母材 σ_s 的 0.6~0.8。受所采用软件功能限制, 尚不能对材料软化前后 σ_s 作分别描述, 因此导致计算得到的残余应力过高。为提高铝合金焊接残余应力模拟的准确性, 今后应将热加工历史对材料力学性能的影响反映进分析模型中。

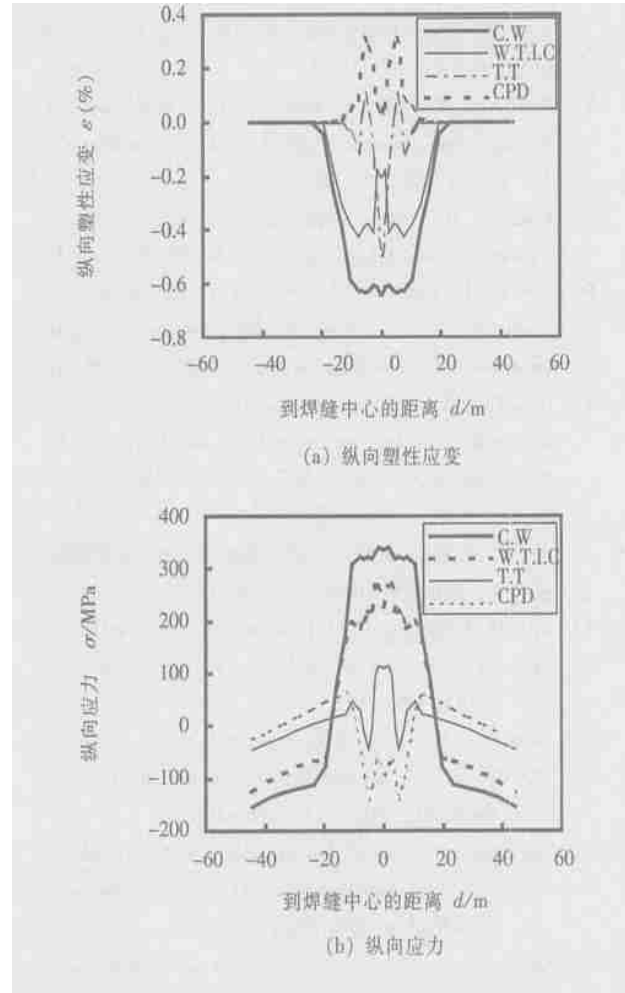


图 3 焊后截面($X=75\text{ mm}$)纵向塑性应变和纵向残余应力分布

Fig. 3 Distribution of longitudinal plastic strain and residual stress at the cross section after welding

2 试验研究

2.1 试验方法

为清楚地显示控制焊接变形的效果, 所用试件尺寸选为 $540\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 焊接方法为自动钨极氩弧焊。在试件中心沿长度方向焊接, 焊丝选用与 LY12CZ 成分接近的 LY9 焊丝。焊件夹持于琴键式夹具中, 夹具的油囊内压为 0.8 MPa 。焊接速度 $v=5\text{ mm/s}$ 。焊接电流 I 根据所采用工艺的不同而不同, 以保证相同的焊缝宽度。

温差拉伸在专门设计的分体底板琴键式夹具上

进行, 中部铜垫板内通水冷却焊缝及近缝区, 两侧底板槽内的电热带加热两侧区域。冷却区宽度为 50 mm , 两侧加热区宽度为 55 mm 。两侧加热峰值温度由温控仪调节。

随焊激冷以水作冷却介质。采用喷水炬将水雾化后随焊喷洒于焊缝及近缝区, 激冷功率以单位时间内供应的冷却水流量 Q_w 表示。

焊后在平台上用立式游标卡尺测量焊件的面外变形, 用切槽法测量焊件中纵向残余应力分布。

2.2 试验结果及分析

为定量比较焊件的变形, 取焊缝两侧距焊缝中心 10 mm 的纵向平行线上的最大挠曲平均值 f_{\max} 作为评定指标, 测量结果由表 1 给出。由表中数据可以看出, 随焊激冷使焊接挠曲显著降低, 但效果不及温差拉伸, 将两者结合使用, 控制变形的效果进一步提高。

表 1 不同焊接工艺得到的焊接变形

Table 1 Welding distortion of specimen in different processes

试件编号	激冷功率 $Q_w / (\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	温差 $\Delta T / \text{K}$	挠曲 f_{\max} / mm
1	—	—	10.8
2	30	—	4.88
3	—	90	2.87
4	20	90	0.91
5	40	90	0.80

图 4 为不同焊接工艺得到的焊件中纵向残余应力分布测量结果。可以看出, 随焊激冷与常规焊相比, 显著降低了焊缝区的拉应力, 焊缝中心甚至出现压应力, 但近缝区拉应力降低不显著。温差拉伸降低焊缝及近缝区残余应力的总体效果比随焊激冷好, 焊缝及近缝区拉应力显著降低, 两侧压应力也控制在较低的水平。在温差拉伸的基础上配合使用随焊激冷, 焊缝承受较大的残余压应力, 近缝区和两侧区域承受拉应力, 更远处至试件边缘承受较小的压应力。焊缝受压, 相当于对整个焊件提供了纵向支撑作用, 能够减小纵向挠曲并有利于防止焊件受压失稳。因此温差拉伸和随焊激冷配合使用, 具有更好的控制焊接变形的效果。

数值模拟和试验研究均表明, 随焊激冷和温差拉伸在控制焊接应力和变形方面各有特点, 随焊激冷主要依靠增加降温阶段的纵向塑性拉伸, 而温差拉伸主要依靠降低加热阶段的纵向塑性压缩, 达到降低焊接纵向缩短、控制焊接变形的效果。前者对

焊缝中心作用突出,后者对近缝区效果显著。将两者结合使用,可充分发挥各自优势,获得最佳的变形控制效果。

另外,从不同工艺控制焊接变形的效果和规律看,试验研究和数值模拟得到的结论基本一致。这说明将数值模拟用于焊接变形分析和预测,有助于揭示不同工艺的变形控制机理,获得试验研究难以得到的规律性认识。

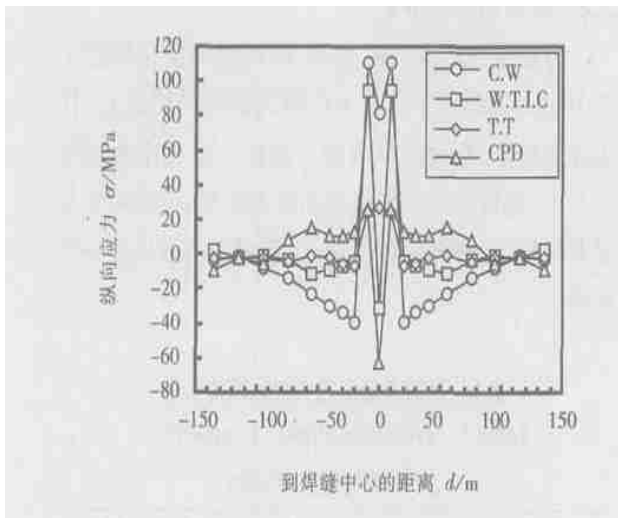


图4 不同工艺试验焊后纵向残余应力分布

Fig. 4 Distributions of longitudinal residual stress in different technical experiments

3 结 论

(1) 随焊激冷更倾向于在焊缝中心造成显著的纵向塑性拉伸,而温差拉伸倾向于在近缝区造成显著的塑性拉伸,二者各有特点。

(2) 将温差拉伸和随焊激冷配合使用,不仅可以靠温差拉伸将焊缝和近缝区在加热阶段形成的纵向塑性压应变控制在较低的水平,还可以靠随焊激冷增加冷却阶段的塑性拉伸进一步抵消焊缝区已经形成的压应变。

(3) 温差拉伸和随焊激冷配合使用可以充分发挥二者的作用,更加有效地控制焊件的残余变形。

(4) 随焊激冷和温差拉伸联合使用,使 540 mm × 300 mm × 2 mm 的 LY12CZ 薄板焊后纵向挠曲由

单独使用温差拉伸时的 2.87 mm 和单独使用随焊激冷时的 4.88 mm 降低到 0.8 mm 的水平。

参考文献:

- [1] Pavlovsky V I, Masubuchi K. Residual stresses and distortion in welded structures[J]. WRC Bulletin, 1994, 388-390.
- [2] 关 桥. 飞行器薄壳结构焊接变形控制与焊接力学的发展 [A]. 第八次全国焊接会议论文集, (第一册)[C]. 北京: 机械工业出版社, 1997. 51-57.
- [3] Burak Ya I, Besedina L P, Romanuk Ya P, et al. Controlling the longitudinal plastic shrinkage of metal during welding[J]. Avt. Svarka, 1977, (3): 27-29.
- [4] Lobanov L M. Heat abstracting paste reduces distortions [J]. Welding and Metal Fabrication, 1982, (3): 65-70.
- [5] Bimman U I, Petrov A V, Poluashinov V A, et al. Macroscopic plastic deformation in welded joint during welding with auxiliary forced cooling[J]. Welding Production, 1988 (10): 40-41.
- [6] Guan Qiao, Zhang Chongxian, Guo Delun. New technique for dynamically controlled low stress non-distortion welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1994, 15(1): 8-15.
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.
- [7] Guan Q, Zhang C X, Guo D L. Dynamic Control of welding distortion by moving spot heat sink[J]. Welding in the World, 1994, 33(4): 308-312.
- [8] Guan Q, Guo D L, Li C Q, et al. Low stress non-distortion (LSND) welding-a new technique for thin materials[J]. Welding in the World, 1994, 33(3): 160-167.
- [9] Guo Shaoqing, Xu Wenli, Liu Xuesong, et al. Finite element analysis of welding distortion control by trailing intense cooling[J]. China Welding, 2000, 9(2): 127-134.
- [10] Guo Shaoqing, Li Xiaohong, Xu Wenli, et al. Welding distortion control of thin aluminum alloy plate by static thermal tensioning[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2001, 17(1): 163-164.
- [11] 张宝昌. 有色金属及其热处理. 西安: 西北工业大学出版社, 1993.
- [12] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第2版, 第3卷)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

作者简介: 郭绍庆, 男, 1969年10月出生, 博士, 高级工程师, 从事材料焊接性和焊接工艺以及焊接过程数值模拟研究, 已发表论文16篇。

Email: shaoqing.guo@biam.ac.cn