

# 低应力无变形焊接新技术 ——薄板构件的LSND焊接法

关 桥研究员 郭德伦工程师 李从卿工程师

(北京航空工艺研究所)

## 摘 要

低应力无变形 (LSND) 焊接法 是一种在薄板焊接时, 利用特定的预置温度场积极控制焊接热应力应变发展过程的新技术。采用相应措施防止工件在焊接温度场共同作用下的瞬态失稳变形, 以保证有效的“温差拉伸效应” 跟随焊接热源, 定量地控制焊缝纵向压缩塑性应变。改变焊后残余应力场使之重新分布, 采用常规的焊接方法和焊接工艺参数, 即可达到焊后低应力无变形的效果。

han      ying      wen  
主题词      焊接      应力      温度场

## 0 序 言

从保证焊接结构的完整性、制造工艺的合理性和使用过程中的可靠性角度来看, 薄壁构件中的焊接残余应力和失稳变形是导致产品质量不稳定的主要问题。因此在传统的制造技术中不得不在焊后采用费工耗资的矫正变形和消除残余应力的附加工序。

与焊接变形不可避免性的概念相悖, “低应力无变形焊接法” 是旨在薄板焊接过程中通过由特定的预置温度场所提供的“温差拉伸效应” 积极地控制焊接应力与变形。采用这种低应力无变形焊接技术, 薄壁构件的焊接失稳变形是完全可以避免的。当然, 也不再需要在焊后进行“消极” 地矫正变形或消除残余应力的附加处理工序。

## 1 焊接残余应力与变形的“积极控制法”

为了控制薄壁构件焊接应力与变形, 人们通常所采取的措施可分为焊前、焊后和焊接过程中三类。焊前和焊后的控制措施大多需要专用的工艺装备, 在生产过程中增加了一道工序, 并且受工件具体结构的影响, 这些工艺措施在实际生产中的运用具有一定的

局限性。在焊接过程中采取措施来减小应力与变形的的方法也很多,诸如采取相应的夹具,强迫冷却焊接区、减小焊接热输入或采用温差法<sup>[1]</sup>等。这类方法虽然可以减小变形或在一定程度上降低残余应力水平,但很难做到消除变形或定量地控制残余应力水平。这是因为这些方法未能从根本上解决薄壁构件焊接变形的特殊问题——主要是在焊接过程中产生失稳变形。

薄壁构件的低应力无变形焊接法(Low Stress Non-Distortion Welding——简称LSND法)的原理是:采取措施阻止工件的瞬态面外失稳变形,保证由可控的预置温度场所提供的特殊温差拉伸效应。在焊接过程中该“拉伸效应”一直跟随焊接热源,并对热应力应变的产生和发展过程进行实时而积极的定量控制。焊后,残余应力的峰值可以控制在低于临界失稳应力的水平,工件保证了原有的平直状态而不发生失稳变形<sup>[2~4]</sup>。

## 2 试验研究方法 with 结果的定量分析

在探索性试验研究的基础上,设计制造了LSND焊接法专用装置。在5083铝合金、18-8不锈钢和低碳钢等薄壁试件上进行了系统的LSND焊接法工艺研究试验。与普通的焊接方法相对比,进行了在不同条件下的宏观残余失稳变形的测定与残余应力水平及其分布特征的测量。试件尺寸:用两块 $1000 \times 100 \text{ mm}^2$ 的平板,对接焊成 $1000 \times 200 \text{ mm}^2$ 的试样,厚度范围为 $0.7 \sim 3.0 \text{ mm}$ 。焊接条件:采用不添加焊丝的钨极氩弧焊;用LSND法焊接时,工艺参数与普通焊接法的工艺参数保持一致,便于定量地对比其差别。

### 2.1 对试件焊后宏观失稳变形的评定

根据薄板试件焊后失稳变形的特点,对试件在水平放置和垂直放置状态的挠曲度在平台上进行了测量,评定判据取其平均值: $h$ ——在水平状态的判据; $f$ ——在垂直状态的判据; $n$ ——测量点数;数量单位为mm。

$$h = \left( \sum_{i=1}^n h_i \right) / n \quad f = \left( \sum_{i=1}^n f_i \right) / n$$

### 2.2 焊接残余应力的测量

采用机械应变仪<sup>[5]</sup>对焊接残余应力及焊缝横向收缩量、纵向残余塑性变形的分布进行了系统的测量分析,比较了LSND焊接法与普通焊接的不同。同时也用电测法作了对比性测量。

## 3 “温差拉伸效应”与“瞬态失稳变形”的控制

图1所示为实施LSND焊接法的原理。图1中 $T$ 为所要求的预置温度场分布曲线, $\sigma$ 为与 $T$ 相对应的温差应力分布曲线; $P_1$ 与 $P_2$ 为两个外加的拘束力,用以阻止试件的瞬态面外失稳变形。用1、2、3分别标出冷却——加热——冷却三个不同的区域。

预置温度场的最高温度  $T_{max}$  位于距焊缝中心线为  $H$  的部位;  $P_2$  位于加热区外侧的冷却区, 距焊缝中心线为  $G$ 。由此种特定的温度场所提供的“温差拉伸效应”是指在焊缝区所形成的  $\sigma_{max}$ , 该拉伸效应跟随着焊接热源, 并在熔池前后控制着焊接热应力与应变的产生与发展。图 2 所示为 LSND 焊接装置用于平板(薄板)对接焊时的结构示意图。

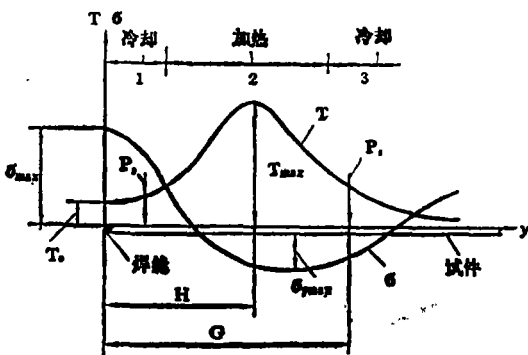


图 1 低应力无变形焊接法原理示意图

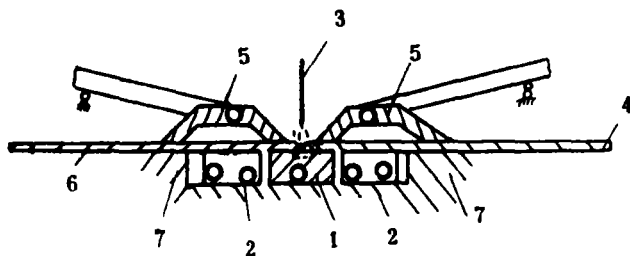


图 2 LSND焊接法用于薄板对接焊

图2中1为冷却区, 2为加热区, 3为电弧, 4和6为工件, 5为双支点铰结式琴键压块用以同时保证拘束力  $P_1$  与  $P_2$ , 7为该装置的  $P_1$  支承也是  $P_2$  的下支承, 兼有在加热区外侧冷却试件并阻止试件面内弯曲变形的功能。

根据待焊板材的力学性能和热物理特性以及工件本身的结构特征, 可以确定所需预置温度场分布的基本参数:  $T_{max}$ 、 $T_0$  与  $H$  (图 1)。就 LSND 法的原理而论, ( $T_{max} - T_0$ ) 值越大,  $H$  值越小, 则温度梯度越大, 也就是说温差拉伸效应也越显著, 相应的  $\sigma_{max}$  值也越高。当  $T_{max}$  和温度梯度高于一定值后, 与其相对应的压缩热应力的峰值  $\sigma_{Pmax}$  (图 1) 就可能超过材料的压缩屈服极限, 在加热区又出现新的压缩塑性变形区。试验结果表明, 低应力无变形的实际效果可以由上面所提到的两种完全不同的方案来实施。方案 I 是将  $\sigma_{max}$  保持在最大值, 以  $\sigma_{Pmax} < \sigma_s$  为条件, 其中  $\sigma_s$  为材料的屈服极限。这时所得到的焊后压缩残余应力的最大值  $\sigma_{comp, max} < \sigma_{cr}$  (失稳临界应力值)。因此, 焊件不会发生失稳变形。方案 II 是在  $\sigma_{P, max} > \sigma_s$  的条件下, 将  $\sigma_{max}$  仍然保持在最大值 (图 1)。这时, 在加热区内会出现新的压缩塑性变形, 与此相对应的焊后残余应力分布为一个特殊的拉—压相间的残余应力场。在这样的条件下, 即便是在两侧拉应力中间的压应力峰值比  $\sigma_{cr}$  稍高, 试件也不会发生失稳变形。这两种实施方案都可以保证工件在焊后完全没有失稳变形, 平整如初。

对于预置温度场的测试结果表明, 由于铝合金的热传导系数 ( $120 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) 比不锈钢的热传导系数 ( $14.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) 高出近 8 倍之多, 在同一加热功率条件下, 铝合金试件比不锈钢试件上的温升速度要慢得多。为了达到 LSND 的效果, 在不锈钢试件上的  $T_{max}$

比在铝合金试件上的  $T_{max}$  要高。温度场的形态与温升, 不仅取决于待焊材料本身, 而且也与加热元件的功率、夹具中的冷却条件与热耗散和绝缘条件密切相关。

在薄壁构件上实施 LSND 焊接法的关键在于采取措施防止工件在预置温度场中焊接时发生面外的“瞬态失稳变形”, 以保证所需要的“温差拉伸效应”。在通常的“单支点加压”夹具中施焊时, 工件总会产生面外的“瞬态失稳变形”, 这种变形跟随电弧移动; 如果同时再引入预置温度场, 则由于瞬态压应力场的叠加而形成更明显的瞬态失稳变形。失稳变形释放了内应力场的势能, 使应力水平降低到最低。因此, 由  $\sigma_{max}$  所体现的“温差拉伸效应”也随之骤减, 达不到低应力无变形的焊接效果。为了防止这类面外瞬态失稳变形的发生, 在 LSND 焊接法中引入了“双支点加压”方案, 如图 1 与图 2 所示。 $P_1$  与  $P_2$  为在两个支点上施加的拘束力, 阻止了工件面外失稳变形, 保证了温差拉伸效应的有效性, 从而达到完全无变形的焊接效果。

## 4 试验研究结果的分析与讨论

### 4.1 LSND 焊接法的必要条件与充分条件

对于采用“双支点加压”系统, 防止“瞬态失稳变形”, 保证“温差拉伸效应”, 进行了系统的试验研究。以  $h$  与  $f$  为判据, 在不锈钢和铝合金试件上对比了不同情况下的焊接变形。

试验结果清楚地表明, 只有 LSND 焊接法才能达到完全无变形的结果:  $h=0, f=0$ 。若仅采用双支点加压系统而无预置温度场或单支点加压有预置温度场, 均达不到低应力无变形的焊接效果。

可见, 预置温度场所提供的温差拉伸效应虽然是薄壁构件 LSND 焊接法的必要条件, 但并非充分条件。“双支点加压”系统是保证 LSND 焊接法的充分条件。也就是说, 只有当采用预置温度场和双支点加压系统时, 二者相辅相成, 才能构成实现 LSND 焊接法的必要条件和充分条件。

### 4.2 宏观变形测量结果的对比分析

图 3 为在不锈钢材料上, 用两种焊接方法所得到的试件宏观变形情况对比的实物照

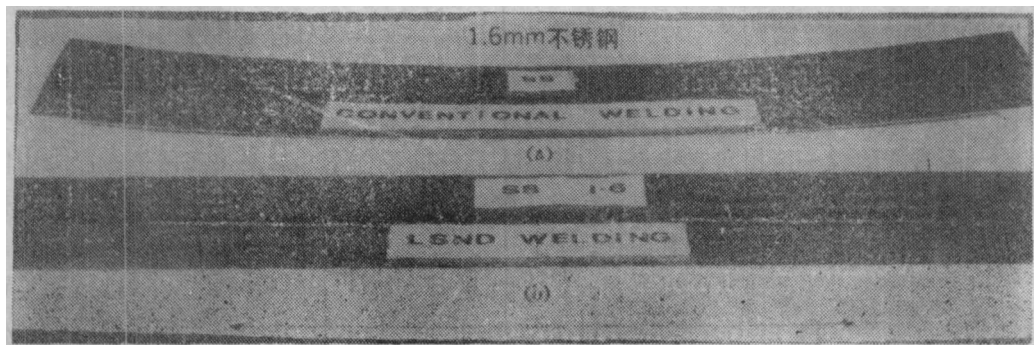


图 3 采用普通焊接法 (a) 与采用 LSND 焊接法 (b) 的对比

片。图4是在试件上测得的 $h$ 和 $f$ 值的对比。在采用LSND焊接法时,完全无变形的实测结果: $h=0$ , $f=0$ ,清楚地展示了该项新技术的优越性。

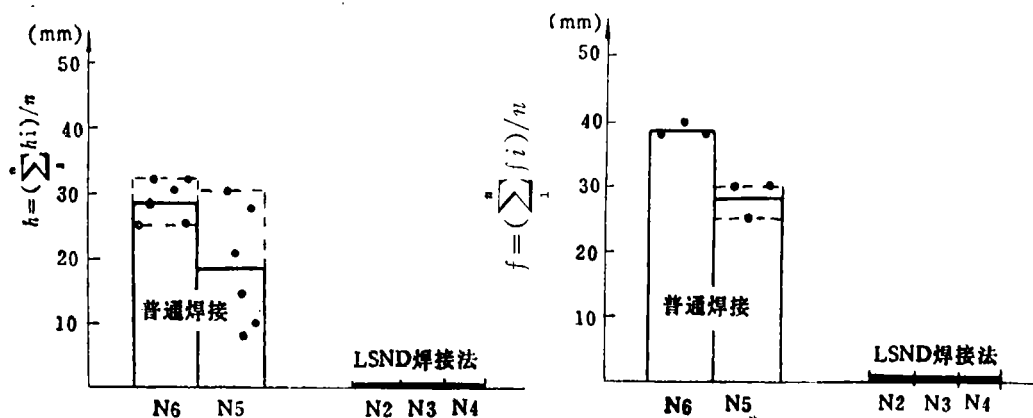


图4 在不锈钢试件上测量焊后失稳变形的对比

### 4.3 残余应力场的测量结果和分析

焊接残余应力和由此而引起的薄壁构件的失稳变形的根本原因是由于在焊缝区产生了不协调压缩塑性变形 $\epsilon_x^p$ 。因此,实施LSND焊接法的主要目标是:在焊接过程中对 $\epsilon_x^p$ 的产生和发展进行实时的积极控制。图5a为对厚度1.5mm的LF6铝合金试件 $\epsilon_x^p$ 的测试结果的对比。曲线1为普通焊接法所导致的 $\epsilon_x^p$ 分布状态,曲线2为在相同条件下采用LSND焊接法的结果。在图5b上给出了相对应的残余应力分布曲线。很明显,从工程应用的角度来评价,曲线2所表示的无论是 $\epsilon_x^p$ 或是 $\sigma_{max}$ 值都是可以忽略不计的。

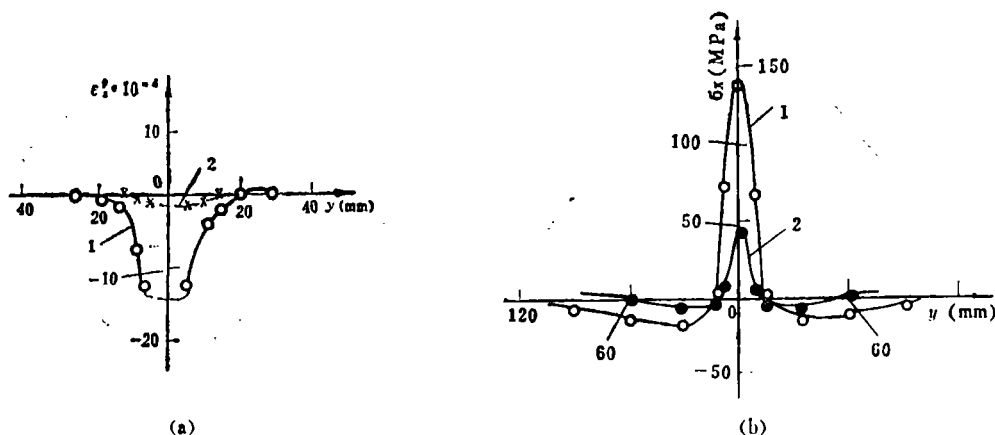


图5 在铝合金试件上 $\epsilon_x^p$ (a)和 $\sigma_x$ (b)的测量结果

图5b上的曲线2也正是采用前面所述的实施LSND焊接法方案I获得的结果。从图上可以看出,其最终的残余拉应力峰值仅为普通焊接法所得残余应力峰值的1/3。

从分析厚度1.62mm的不锈钢试件上测得的残余应力分布曲线可知,由LSND方案Ⅰ所获得的残余应力场重新分布的特征是:拉一压相间隔。由于在加热区出现了新的压缩塑性变形区,相应地产生了新的残余拉应力区。该拉应力的峰值远低于原来焊缝中心的峰值拉应力。这种在低应力水平条件下的拉一压相间的特殊应力场,保证了工件焊后的平直状态,不再有失稳变形。

## 5 低应力无变形焊接法的应用

把低应力无变形焊接法应用于直线纵向对接焊缝(板件对接或筒体对接)时,只需要对现有的纵向焊缝夹具进行不复杂的技术改造即可达到目的。这种改造包括提供所需要的预置温度场和装备双支点加压系统。对于纵缝对接夹具的专业制造厂家来说,则可以直接将此技术引入新一代“低应力无变形纵缝焊接夹具”的设计进行批量生产,提供给用户,取代传统的纵向焊缝夹具。

作为一种解决薄壁构件焊接应力与变形问题的新技术途径,低应力无变形焊接法具有明显的技术经济优越性,展示了在工业应用中的广阔前景。如果在产品结构的设计阶段就能考虑选用LSND焊接法来制造,那就不但可以取得节约原材料、减轻结构重量(选用更薄的板材而不必担心其焊接失稳变形)的直接效益,而且能使焊接生产流程更加合理,革除焊后矫形工序,对于降低成本、改善劳动条件的效果也是明显的。

LSND焊接法可以与现有的各种熔化焊方法相配合,如气体保护焊、埋弧焊、等离子弧焊或高能束流焊接法等。采用LSND焊接法可以用机械方式进行自动化焊接,也可以用手工法进行焊接。

## 6 结 论

(1) 采用低应力无变形焊接新技术制造薄壁构件,可以在焊接过程中积极地控制应力与变形的形成和发展;焊后工件无变形,平整如初,不再需要焊后矫形工序。

(2) 特定的预置温度场和双支点加压系统二者相辅相成,是实现低应力无变形焊接法的必要和充分条件。

(3) 所研制的低应力无变形焊接装置已应用于飞行器薄壁构件的生产,显示了明显的技术经济效果。

(1990年9月1日收到修改稿)

## 参 考 文 献

- 1 Бурак Я И и др. Автоматическая Сварка, 1979(5);15~19
- 2 关桥, 郭德伦等. 薄壁构件低应力无变形焊接法及设备. 中国专利, N 87100959, 1987.
- 3 关桥, Brown K W, 郭德伦等. 薄壁构件的低应力无变形焊接方法及设备. 国际专利申请号№PCT/GB88/00136, 1988.
- 4 Guan Q, Leggatt R H and Brown K W. Low Stress Non—Distortion (LSND) TIG Welding of Thin—Walled Structural Elements. Research Report, The Welding Institute, UK, 1988. 374
- 5 关桥. 释放法测定焊接残余应力. 北京机械, 1981 (9):29~32

LOW STRESS NON—DISTORTION (LSND) WELDING—A NEW  
TECHNIQUE FOR THIN MATERIALS

*Research Professor Guan Qiao, Engineer Guo Deluen, Engineer Li Congqing  
(Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute)*

## Abstract

Low Stress Non—Distortion (LSND) welding is a new technique for in-process active control of welding stress and distortion during the manufacturing of thin walled structural elements. The method involves creating a specific uneven temperature distribution on the workpiece. Restraining forces are applied to the workpiece in order to prevent the out—of—plane buckling which is caused by both the heating and welding operation. Therefore, an induced “stretching effect” which follows the welding heat source, controls quantitatively the formation of incompatible compressive plastic strain and thermal stress or, alternatively, redistributes the residual stress field across the workpiece. In this way, the low stress non-distortion results can be achieved using the same parameters as in the conventional welding methods.

**Key words**    Welding    Stress    Temperature field