

动态控制的低应力无变形焊接新技术*

关桥 张崇显 郭德伦

(北京航空工艺研究所)

摘要 在成功地研究并开发了薄壁构件低应力无变形焊接新技术的基础上,把靠预置温度场静态控制焊接应力与变形的方法发展到动态控制法。这一新构思所形成的动态控制焊接应力与变形的新技术的原理在于:不再依赖预置温度场,而是直接利用电弧在薄壁构件上所形成的焊接温度场,建立一个特殊构造的热源跟随电弧,构成“热源-热源”多源系统,在熔池后的高温焊缝区产生强烈的局部急冷拉伸作用,控制和补偿焊接时产生的压缩塑性变形,达到薄壁构件低应力无变形的焊接效果。

关键词 动态控制焊接变形;残余应力;无变形焊接法

0序言

随着工业经济技术的迅猛发展,薄壁焊接结构的应用日趋广泛。但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等角度来看,薄壁构件在焊后产生的残余应力和失稳压曲变形却成为导致产品质量不稳定的主要问题,使薄壁结构在工程应用中受到很大限制。因此,控制和防止薄壁构件的焊接残余应力和变形始终是焊接工程中的重要课题之一。

由北京航空工艺研究所首先研究开发的薄壁构件低应力无变形(LSND-Low Stress Non-Distortion)焊接方法,在薄板焊接过程中利用特定的预置温度场,同时采取相应措施防止工件在焊接温度场与预置温度场共同作用下的瞬态失稳变形,保证有效的“温差拉伸效应”跟随焊接热源,可定量地控制焊缝纵向压缩塑性应变,改变焊后的残余应力场使之重新分布。采用常规的焊接方法和焊接规范,即可达到低应力无变形的焊接效果^[1]。

LSND焊接法由于受所设置的预置温度场和专用夹具的限制,目前只适于在直线焊缝上的静态控制,而动态控制的LSND焊接法则可克服其“静态”控制方面的局限性。这种方法采用可跟随焊接热源移动的热源装置,形成一个热源-热源多源系统,在焊接区产

* 国家自然科学基金资助项目,并已申报国家专利(申请号:93101690.8)

参加该项研究工作的还有曹阳、吴谦等。

生局部可控的准定常状态温度场和相应的准定常状态热弹塑性应力-应变场,达到薄壁结构动态控制的低应力无变形焊接效果^[2]。这种方法取消了费时、耗资的焊后矫形等“消极”处理工序,不仅适用于直线焊缝,对于非直线、非规则焊缝也有适用性,在优化结构设计、提高产品质量和改造现行工艺等方面具有明显的技术经济效益和良好的实际应用前景。

1 动态控制低应力无变形焊接法原理

在常规的焊接过程中,由于受焊接热源局部加热,焊件内的温度分布是不均匀的,并随着焊接过程的进行发生变化,因此,在焊缝及其附近的母材区内产生复杂的应力和变形。焊缝及其附近产生过较大压缩塑性变形的区域内产生了残余拉应力,而在远离焊缝处则产生残余压应力。对于薄壁结构,如果该残余压应力超过构件失稳的临界应力,就会产生失稳压曲变形。

如果在电弧后适当部位,设置一个能对焊缝局部产生急冷作用的热潭,与焊接电弧构成一个多源(热源-热潭)系统,形成一个畸变的温度场。在这种情况下,虽然焊缝一开始同常规焊一样在焊缝区产生压缩塑性变形,但在随后的冷却过程中,由于热潭的急冷作用,一方面使高温焊缝的热量向后部热潭传导,减少了向两侧传导的热量,使高温区变窄,控制了压缩塑性变形区的扩展。另一方面,热潭部位的焊缝受冷急剧收缩,产生很强的拉伸作用,使仍处于高温状态焊缝区的压缩塑性变形量得到补偿。从而在焊接完成后,残余拉应力区和残余拉应力幅值都得到控制,甚至在焊缝中心会出现残余压应力,相应焊缝两侧的残余压应力也降到很低的水平,控制了薄壁构件的翘曲失稳变形,达到低应力无变形的焊接效果。

2 试验研究与测量结果

2.1 试验研究方法

在探索性试验研究的基础上,设计制造了动态低应力无变形焊接法专用装置^[3],对低碳钢和不锈钢薄板试件进行了系统的焊接工艺研究试验。

试验装置的示意图如图1所示。焊接方法采用不填丝的钨极氩弧焊,热潭的冷却介质选用自来水,水的比汽化热为2256kJ/kg^[4],在常见液体中是最高的(液氮在1个大气压下的比汽化热标准值仅为197.6kJ/kg),而且水的流量控制简单,调节方便。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。热潭中心与热源中心的距离L可调。试件的尺寸均为1mm×100mm×500mm。试件的焊接规范列于表1。用多源系统焊接时,规范参数与普通焊接法的规范参数保持一致,便于定量对比其差别。

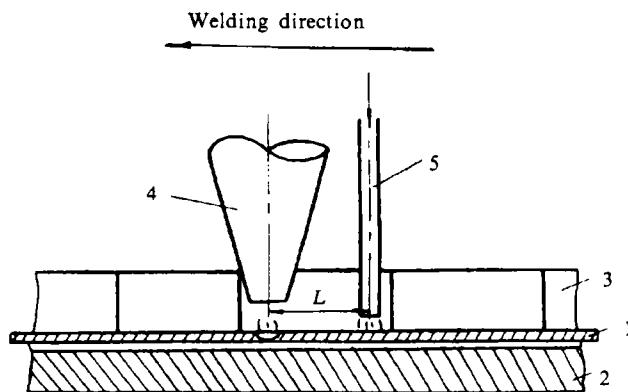


图1 多源焊接系统装置示意图

Fig.1 Schematic diagram showing device of multi-source welding system

1. Workpiece 2. Back bar 3. Clamping 4. Arc 5. Cooling jet

表1 试件焊接规范

Table 1 Parameters of welding

No. of specimen	Base metal	Welding current	Arc voltage	Welding speed	Flow of water	Distance between arc & heat sink
		I (A)	U (V)	V (m/h)	F (ml/min)	L (mm)
A1, A2		50	10	12	/	/
A3, A4	Mild	50	10	12	60	20
A5, A6	Steel	50	10	12	150	20
A7, A8		50	10	12	150	30
S1		55	10	10.8	/	/
S2	SS18-8	55	10	10.8	150	15
S3		55	10	10.8	150	25

2.2 试件焊接热循环过程的测量

在试验过程中,对不锈钢常规焊接和多源系统焊接试件的焊接热循环过程进行测量,焊接规范均采用 $I=55A$, $U=10V$, $V=10.8m/h$, 多源系统焊接时冷却水流量为 $150mL/min$, 热源热潭中心间距 $15mm$ 。试验使用镍铬-镍铝热电偶,记录使用 SC-16 型光线示波器。测量结果如图 2 所示,图中 $y=5mm$ 和 $y=12mm$ 均为热电偶与焊缝中心线的距离。

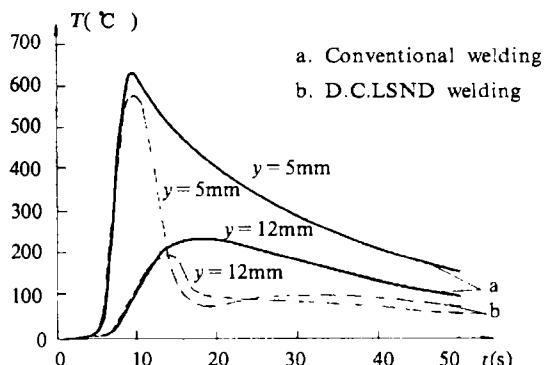
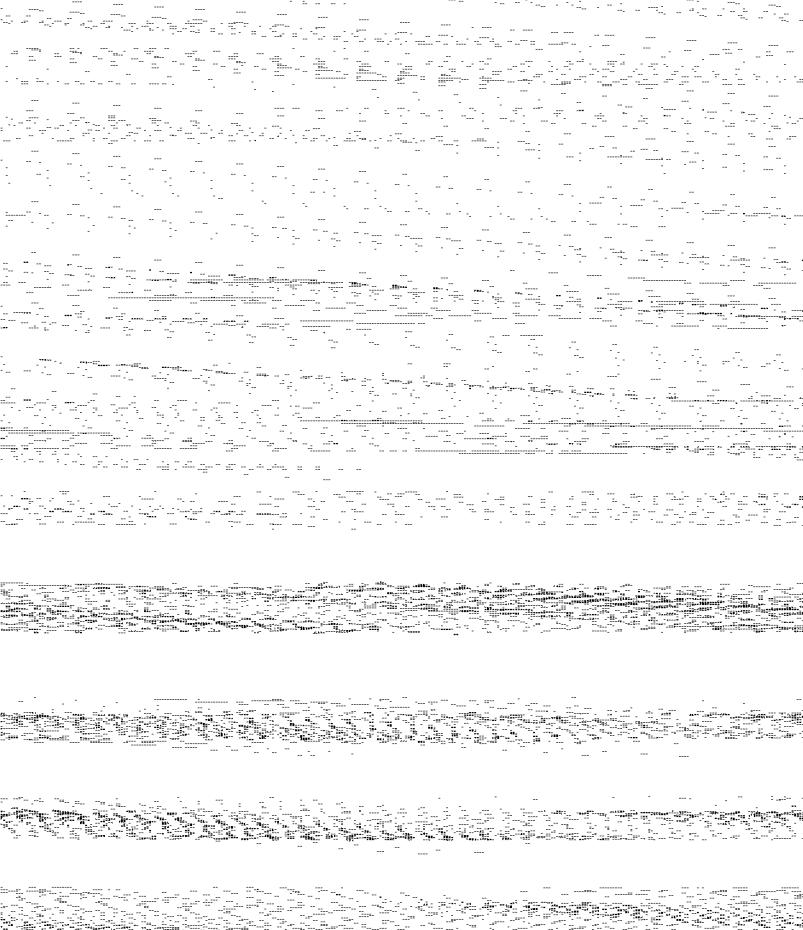


图2 焊接热循环过程比较

Fig.2 Comparison between two welding thermal cycles



2.4 试件焊后残余应力的评定

薄板试件焊后宏观压曲失稳变形主要是由纵向残余压应力引起的,对各组试件的纵向残余应力 σ_{xR} 沿横截面的分布作了测量。

试验采用释放法,用机械应变仪^[5]对试件纵向残余应力分布进行了系统的测量分析。测量结果如图 6、图 7 所示,其中图 6 为不锈钢试件在 3 种不同焊接条件下的纵向残余应力分布,图 7 为 A3 钢试件在 4 种不同焊接条件下的纵向残余应力分布。

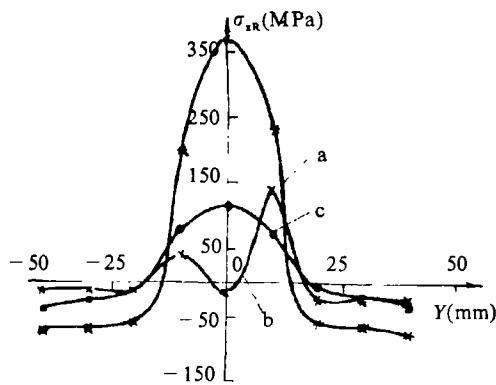


图 6 不锈钢试件焊后纵向残余应力分布对比

Fig.6 Comparison between residual stress distributions in specimens of SS 18-8

- a. Conventional welding
- b. D.C.LSND welding $F = 150\text{ml}/\text{min}$ $L = 15\text{mm}$
- c. D.C.LSND welding $F = 150\text{ml}/\text{min}$ $L = 25\text{mm}$

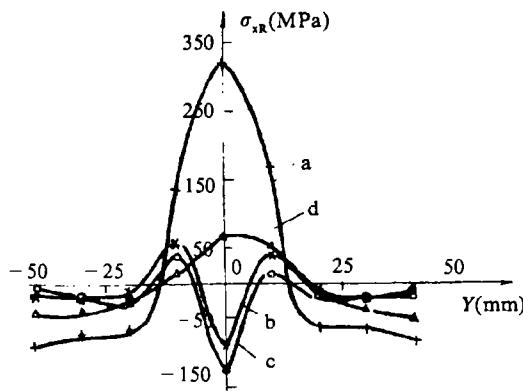


图 7 A3 钢试件焊后纵向残余应力分布对比

Fig.7 Comparison between residual stress distributions in specimens of mild steel

- a. Conventional welding
- b. D.C.LSND welding $F = 60\text{ml}/\text{min}$ $L = 20\text{mm}$
- c. D.C.LSND welding $F = 150\text{ml}/\text{min}$ $L = 20\text{mm}$
- d. D.C.LSND welding $F = 150\text{ml}/\text{min}$ $L = 30\text{mm}$

3 试验研究结果的分析与讨论

3.1 热潭的局部冷却作用

试验在同一焊接规范条件下进行。对不锈钢试件的常规焊接和多源系统焊接的热循环测量结果(图 2)表明:与常规焊相比,用多源系统焊接时,在热源与冷却嘴之间,焊缝冷却速度很快,在冷却点形成一个热潭(温度低谷);另外,在距离焊缝同样远的位置上,如当 $y=12\text{mm}$ 时,用多源系统焊接时热循环的最高温度低于常规焊时的最高温度,这表明,由于热潭的冷却作用,电弧附近焊缝高温区的热量向热潭方向传导,导致焊缝两侧的高温区变窄。多源系统焊接热循环的这两个特点,是实现低应力无变形焊接的根本保障。

3.2 多源系统的低应力无变形焊接效果

由图 4、图 5 所示各组试件的压曲失稳变形情况可以看到:采用多源系统焊接的试件,其宏观失稳变形量大大低于常规焊接的结果,试件在焊后甚至可以达到与焊前同样的平直状态,没有任何失稳变形。图 4 中不锈钢常规焊接的试件 S1 变形量平均值为 10.4mm,而多源系统焊接的试件 S2 变形量仅为 0.8mm。图 5 中 A3 钢常规焊接试件 A1 和多源系统焊接试件 A5 的变形量分别为 30.1mm 和 1.0mm。再从图 6、图 7 所示各组试件的纵向残余应力分布可以看到:常规焊接的试件,残余拉应力峰值达到 300MPa 以上,残余压应力最大值也超过 80MPa(如图 6a 和图 7a);而采用多源系统焊接的试件在焊缝中心产生了残余压应力(如图 6b、图 7b 和图 7c),致使焊缝两侧的残余压应力降低,最大值不超过 25MPa。这表明在薄板试件的焊接过程中,热潭的局部急冷却拉伸作用不仅能控制残余应力水平,而且能使残余应力场成为拉、压应力间隔分布的形态,从而有效地控制焊件的失稳压曲变形。另外,从图 4~图 7 中所示的多源系统焊接条件下各试件的残余应力和变形情况可以看到:在不同的冷却条件下,多源系统对残余应力和变形的控制效果也不同,只有恰当地选择热潭强度(冷却水流量)和热潭位置与焊接条件相匹配,才能达到低应力无变形焊接的最佳结果。

3.3 试件宏观失稳变形和纵向残余应力控制效果对比分析

(1)由图 6b、图 6c 和图 7c、图 7d 所示不锈钢和 A3 钢试件在相同焊接规范、热潭强度和不同的热潭位置焊接时得到的不同的残余应力场可看到:当热潭距热源较近时(图 6b 和图 7c),其残余应力场在焊缝处出现压应力,因此在焊缝两侧的压应力水平也很低;而当热潭距热源较远时(图 6c 和图 7d),残余应力场在焊缝处也明显下降但仍为拉应力,而在焊缝两侧的压应力水平较前者稍大。

测试结果表明,当热潭靠近热源时,由于热潭前方焊缝区温度很高,在热潭周围形成很大的温度梯度,使热潭中心急冷收缩,产生很强的拉伸作用,控制和补偿焊缝高温区产生的压缩塑性变形,甚至产生拉伸塑性变形,从而在残余状态下使焊缝处产生了残余压应力。这种拉压间隔的残余应力场能使焊缝两侧的残余压应力降低到低于试件失稳临界应力水平以下,防止了薄板焊件的失稳变形。如在图 4、图 5 中所示的试件 S2、A5 和 A6,其焊后残余变形量甚小,达到了低应力无变形的焊接效果。而当热潭离开热源的距离较大时,由于热潭周围金属的温度已经降低,由热潭所形成的温度梯度相对也小,所产生的拉伸作用较弱,控制应力变形的效果减弱。如在图 4、图 5 中所示的试件 S3、A7 和 A8 的变形量相对前者较大。

(2)图 7b 和图 7c 所示为在低碳钢试件上,以相同的焊接规范、相同的热潭位置和不同的热潭强度焊接时,所得到的不同的残余应力场。在图 7b 所示试件上焊接时的冷却水流量为 60mL/min,在图 7c 所示试件上焊接时的冷却水流量为 150mL/min。对它们进行比较可以看到:当热潭强度较大时,热潭吸收的热量较多,产生的急冷拉伸作用较强,因而在残余状态下焊缝中心的压应力幅值较大,焊缝两侧的应力水平也较低。另一方面,当冷却水的流量大于最佳值以后继续增加,对于残余应力水平进一步降低的效果并不显著。如在图 5 中,对试件 A3、A4 和 A5、A6 的变形量控制的效果差别不大。这是由于,当焊缝

区热量散失与水的蒸发达到平衡后,水流量的进一步增加对焊缝的进一步冷却拉伸作用影响不大。另外,当残余应力水平低于薄板失稳的临界应力值后,残余应力的进一步降低对失稳变形的影响也不大。相反,水流量很大时对焊接电弧的保护会带来不利的影响。因此,热潭强度宜选择其最佳值。

4 动态控制低应力无变形焊接法的应用

动态控制低应力无变形焊接法只需在常规焊炬后安装一特殊结构的冷却装置,组成“热源—热潭”多源焊接系统,用这种多源焊接系统可对各种直线、圆形、环形等焊缝的薄壁结构实施低应力无变形焊接,在长焊缝、不规则焊缝的薄壁结构上更能显示其优越性。这种焊接方法适合于低碳钢、不锈钢、耐热合金和铝及其合金等各种材料。由于热潭的局部急冷作用,多源焊接系统对一些材料可达到改善结晶组织、消除热裂纹的效果^[6]。这种动态控制低应力无变形焊接法效果显著、适用范围广,具有很好的技术经济价值和广泛的应用前景。

5 结 论

(1)跟随焊接热源移动的热潭在焊缝高温区的急冷作用,在热源与热潭之间产生很大的温度梯度,可用于定量地控制焊接过程中的不协调应变。

(2)热源—热潭多源焊接系统在控制并补偿焊接过程中产生的不协调应变的同时,也在焊接过程中动态控制焊接应力的水平,并可将焊缝中的残余拉应力转变为压应力,有效地防止薄板构件的失稳变形,得到低应力无变形的焊接效果。

(3)热潭的强度和它与热源的相对位置是影响焊接应力和变形控制效果的主要参数。用多源系统焊接薄板构件时,必须根据材料的导热特性、焊件尺寸、焊接规范和工装条件等选择适当的热潭强度和位置参数。

(4)本文给出的动态控制低应力无变形焊接法设备简单,操作方便,适用范围广,控制焊接应力和变形效果显著,具有良好的技术经济价值和广泛的应用前景。

(1993年11月12日收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 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, No.87100959, 1987年2月28日.
- 2 关桥.动态控制焊接应力与变形技术基础研究,国家自然科学基金申请书,1990年3月8日.
- 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,国家专利申请号:No.93101690.8, 1993年2月25日.
- 4 W M 罗森诺等.传热学基础手册,北京:科学出版社,1992.
- 5 关桥.释放法测定焊接残余应力,北京机械,1981, (9):29~32
- 6 У И Бирман и др. АС. СССР. 984757, 1982.

New technique for dynamically controlled low stress non-distortion welding

Guan Qiao, Zhang Chongxian and Guo Delun

(Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute)

Abstract A newly developed method for dynamic in process control of welding stress and distortion of thin-walled structural elements is discussed in this paper. The Dynamically Controlled Low Stress Non-Distortion (D.C.LSND) welding process provides a tensile effect created by a local spot intensive cooling of just solidified weld while it is still at the high temperature state. This localized tensile effect following the welding heat source dynamically and quantitatively controls the formation of incompatible compressive plastic strain and thermal stress during the welding process. A new device of multi-source (heat source-heat sink) system have been developed. Experiments show that good results of low residual stress levels and complete freedom from distortion can be achieved. It promises a wide prospect for engineering application of non-distortion welding for thin-walled structures.

Key words non-distortion welding; dynamic control of welding stress and distortion; residual stress