

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.01.027

不锈钢薄板焊接变形影响因素与控制方法

成威, 廖秋慧

(上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620)

摘要:针对目前不锈钢薄板在焊接时,存在的焊接结构件变形、焊接质量差、使用性能低等缺点,为进一步改善薄板焊接加工工艺,对焊接变形影响因素进行分析,重点从输入热源、焊缝尺寸、初始粗糙度、板厚和焊接装配等因素出发阐述了对焊接变形的影响。提出在焊接时需要通过进一步畸化焊接温度场、增强焊接结构件刚度、设计施加辅助热源或冷源、夹具约束或者旋转挤压等组合装置来达到控制薄板的挠曲变形的目的。最后提出有限元仿真技术在焊接中的应用将会更加科学地分析和预测焊接变形。

关键词:焊接;不锈钢薄板;温度场;输入热源

中图分类号: TG457.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2015)01-0107-04

Influence Factors and Control Methods of Welding Deformation of Stainless Steel Sheet

CHENG Wei, LIAO Qiuhui

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: At present, there are shortcomings of welded structure deformation, poor welding quality and low performance in the welding of stainless steel sheet. In order to further improve sheet metal welding process, welding deformation factors were reviewed in the article. After a brief introduction of common plate deformation, the impact of welding deformation from input heat, weld size, initial roughness, thickness, welding assembly and other factors were focus described. And further distortion of welding temperature field or enhancement of welding structure stiffness were presented in the article, an auxiliary source of heat or cold, fixtures constraints, the device of rotating extrusion were designed to reach sheet deflection control purpose. The article notes that the application of finite element simulation technology in the welding will more scientifically analyze and predict welding deformation.

Key words: welding; stainless steel sheet; temperature field; input heat

近年来,随着不锈钢薄板的广泛应用,薄板不锈钢的焊接变得尤为重要。薄板不锈钢焊接变形,严重影响焊接质量和使用性,其具有复杂性、多样性,常见的变形主要与横向收缩、纵向收缩、弯曲变形、翘曲等有关。薄板焊接过程中需要考虑薄板的材料、几何形状和尺寸及约束条件等因素的影响,同时还要将焊接的工艺和焊接的参数列入到影响因素范围之内。具体地说,薄板所能抵抗失稳变形的阻力和其所能承受的临界载荷主要与所选薄板自身的材料、几何形状等设计

相关量相对应,而焊接所产生失稳的残余应力则与焊接所采用的方法和参数有密不可分的关系。总体而言,选用合理的设计和制造相关量将会显著减小或消除薄板不锈钢焊接变形。

1 焊接变形的影响因素

1.1 输入热源对于焊接变形的影响^[1]

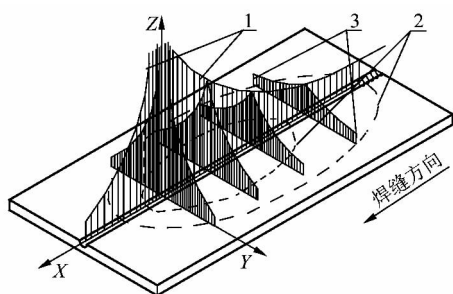
在焊接过程中,受到局部高温热源的影响,焊缝区被急剧加热,并局部熔化。该区域材料被加热,使焊接区扩展,而周围温度相对较低区域对焊接区产生约束,

收稿日期:2014-06-01;修回日期:2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51275283);上海工程技术大学研究生科研创新项目:不锈钢薄板焊接变形的数值模拟(14KY0516)

作者简介:成威(1990),男,山东淄博人,硕士研究生,主要研究方向为材料加工工程。E-mail:1933525831@qq.com

从而产生弹性热应力,材料的屈服应力极限在温度升高后急剧下降,导致热弹性应力超过屈服极限,形成热压缩。冷却时,焊缝区材料收缩受到周围区域不均匀温度场的影响,产生不均匀的收缩变形,焊接区呈现拉伸残余应力,相邻区域承受压缩残余应力^[2]。另外明瑞云等人给出了热源在焊缝移动时薄板焊件纵向收缩变形的焊接温度场分布图见图1。可以看出焊接时结束端的温度明显高于开始端的温度,开始端的变形小,而结束端的变形大。由此可知,选择合适焊接的方向对于实现焊接温度场的均匀分布,控制焊接变形至关重要。



1—沿纵向的温度场;2—等温线;3—沿横向的温度场

图1 焊接温度场

Figure 1 Welding temperature field

焊件冷却后温度场的不均匀分布造成在焊缝及附近形成拉应力,远离焊缝区域形成压应力,薄板材料所能承受的临界失稳应力相对于所产生的残余应力较小时,薄板焊件就会产生变形,见图2。佐藤邦彦^[3]等人在焊接接头的强度与设计中的试验与理论阐明了压缩残余应力与焊接热输入的关系,根据公式^[4]

$$\sigma_{R2} = \alpha \cdot \sigma_s \cdot \frac{Q}{bt}$$

式中: σ_s 是材料的屈服应力, α 是与材料相关的常数, b 是板宽, t 是板厚。压缩残余应力 σ_{R2} 与焊接输入的热源能量 Q 成正比。输入的热源能量 Q 的计算公式^[5]如下

$$Q = I \cdot U / v$$

式中: I 为焊接电流, U 为电弧电压, v 为焊接速度。结构件变形度与焊接电流、电弧电压成正比,与焊接速度成反比。

薄板不锈钢焊接对于热源的输入非常敏感,合理控制输入热源能量的大小对于焊件质量有重要意义。输入较大的热源能量会造成较大的收缩变形,反之,输入较小的热源能量会造成较小的收缩变形。因此在保证焊缝形成良好情况下,选用尽可能小的输入热源。

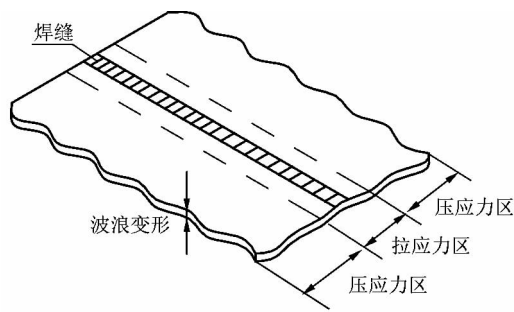


图2 薄板焊接变形

Figure 2 Welding deformation of thin plate

1.2 焊缝尺寸对焊接变形的影响

焦馥杰^[6]等人阐述了纵向挠曲变形与总纵向收缩应力的关系,对于不锈钢薄板焊接来说,焊缝的面积尺寸与焊件的挠曲变形有着密不可分的关系,具体而言其薄板纵向上的挠曲变形和整体的纵向收缩应力存在一定函数关系。根据公式

$$P_L = \sigma_L A_w$$

式中: P_L 为总纵向收缩应力, σ_L 为纵向收缩应力, A_w 为焊缝金属断面面积。

纵向弯曲挠度 f 计算公式为

$$f = \frac{P_L b l^2}{8 E J}$$

式中: b 为纵向焊缝距焊板中心的距离, l 为焊板的长度, E 为弹性模量, J 为焊板截面惯性矩。

通常假定焊板材料、焊板长度及焊接方式为一定值,纵向收缩应力 σ_L 为一常数,此时纵向的挠曲变形与总纵向收缩应力 P_L 和焊缝金属断面面积 A_w 成正比。

另外,焊缝在结构中的位置对于不锈钢薄板焊接变形也会产生影响。不对称的安排会导致焊件的弯曲变形,焊件截面中性轴越接近焊缝,相对而言弯曲变形越小;反之,焊件截面中性轴离焊缝越远,相对而言弯曲变形越大^[7]。

1.3 焊板初始粗糙度和板厚对焊接变形的影响

闫俊霞,刘群山^[8]等人讨论了理想薄板在残余应力作用下初始不平度对于失稳变形的影响,并给出了板件初始不平度对于最终变形的影响曲线图,见图3。但在实际加工生产中不可能制造出理想情况下的不锈钢薄板,其可能存在不同程度的初始挠曲变形或者初始几何缺陷,这些初始表面粗糙度和缺陷会在一定程度上造成薄板焊接的临界失稳变形。对于存在不平整度问题的板材,残余应力的增加,起始阶段板材挠度的增长是相对缓慢的;但在焊接产生的残余应力超过某

一定值时,瞬间板材挠度的增加会相对较快。初始粗糙度相对较大时,板材所能承受的临界载荷值就会在一定程度上降低,产生失稳变形越容易。因此必须严格控制不锈钢薄板焊件的初始表面粗糙度,否则其会大大地影响着焊接抗失稳变形阻力和临界载荷。

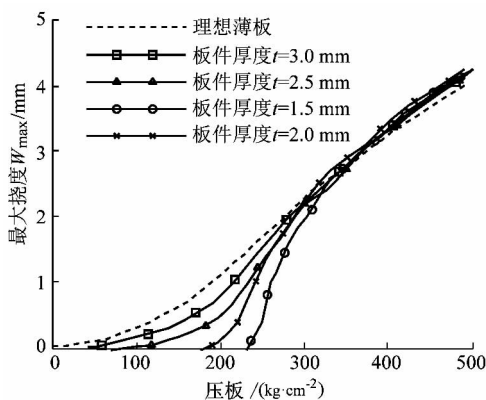


图3 初始缺陷对载荷挠度曲线的影响

Figure 3 Effect of initial imperfections on the load deflection curve

除初始表面粗糙度外,焊板厚度^[9]对于失稳变形也是一个重要的影响因素。焊板厚度越小,其刚度就越小,抵抗弯曲变形的能力就越低,在不锈钢薄板对接焊时,受到高温热源的影响,就更容易发生挠曲变形。相反,焊接厚度越大,刚度就更大,不易变形。因此,焊板的厚度是控制薄板焊接变形困难的原因之一。

1.4 焊件装配对焊接变形的影响

焊接装配时选择合适的焊件装配顺序,避免在总的构件内引起多余的装配应力。由于在不同装配阶段装配体总的刚性化和重心位置的改变,会导致装配后焊件内存在本不应该有的应力。一般而言,处理不好装配焊接顺序,会直接影响焊接的质量。另外,在不锈钢薄板装配过程中有可能产生新的残余应力,如果新的残余应力大于临界变形应力,就会引起焊件变形。因此应该尽可能减少或者避免产生装配应力。

总之,焊接变形影响因素并不是孤立存在的,焊接不规则的形变是多个因素综合作用的结果。这需要从多个角度综合考虑,在生产和设计过程中找到一个更合理的措施,以减小焊接变形。

2 控制焊接变形的工艺措施

在控制焊接变形方面,国内外许多学者通过施加辅助热源或冷源来畸化焊接温度场这一方法来降低应力和控制变形,取得了明显的效果。温鹏、张旭东^[10]等人施加辅助热源或冷源来控制激光焊接薄板变形,得出了控制薄板失稳变形的最佳冷却参数,用单一的

冷却可消除厚度 1.5 mm 的薄板变形,然而厚度为 0.8 mm 的薄板则需要同时采用夹具和动态冷却才能消除残余变形。郭绍庆、徐文立^[11]等人提出对焊件结构整体预热后,仅仅采用温差拉伸法控制铝合金薄板焊接变形的效果并不是非常明显,然后提出几种控制方法搭配使用的思路,通过实验证明把静态温差拉伸和随焊激冷搭配运用,可以充分发挥 2 类温差拉伸的优点,获得最小的焊接残余变形。郭玉泉、吴江东^[12]等人通过所采用如图 4 所示的焊接夹具来约束 Hastelloy C-276 薄板脉冲激光焊接变形。讨论得出了夹具拘束距离不仅与焊接纵向挠度有关,而且和横向收缩变形有着密不可分的关系。焊接纵向挠曲变形和横向收缩变形同时随着夹具约束距离的增加,有近似呈线性增大的趋势,但对焊接横向上收缩变形产生的影响更明显,当夹具拘束距离从 8 mm 增加大约 2.5 倍,在横向上薄板收缩变形增大近 3.6 倍。张建强、赵海燕^[13]等人在用铝合金薄板分析焊接变形时,采用多种夹具约束来控制薄板的挠曲变形,最终得到最合理的夹具约束参数,可将铝合金薄板的纵向挠度降低到允许的范围之内。李军、杨建国^[14]等人为控制薄板的焊接变形并没有采用整体和局部热处理法,而是选用旋转挤压的方法,旋转挤压法的工作原理见图 5。在焊缝区域利用合适形状的挤压头进行旋转挤压,要求挤压头控制在一定的速度下旋转锤击焊缝,这样在焊缝区就会产生拉伸塑性应变,减小甚至抵消残余压缩塑性应变,能有效地降低焊接残余变形,将焊接残余变形控制在常规焊接允许的 3% 以内。

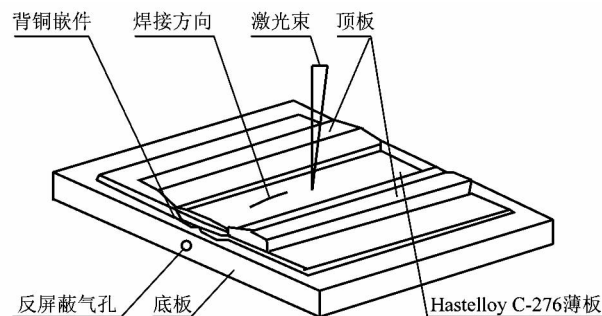
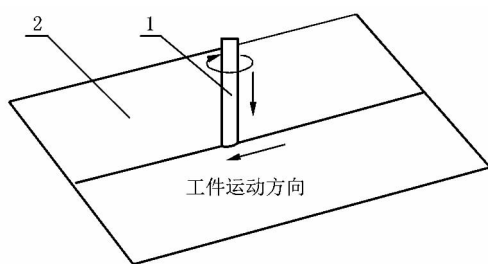


图4 刚性夹具示意图

Figure 4 Schematic diagram of rigid clamp

综上,控制薄板焊件变形必须采取一定的工艺措施来达到减弱或者消除残余变形的目的。焊接温度场引起的残余应力和板件自身的临界失稳应力决定了焊接失稳变形程度的大小。板件材料所能承受的最大抵抗失稳变形力小于由温度场引起的残余应力时,构件就会产生失稳变形。对于薄板失稳变形来说,主要通



1—挤压头;2—焊接工件

图5 旋转挤压方法的工作原理示意图

Figure 5 Schematic diagram of rotary extrusion method

过2个方面来解决:①通过改变分布不均匀的温度场,降低残余应力;②提高焊件结构的刚度,增大临界失稳应力。经常使用的减小或消除残余应力方法可分为3大类,即热处理的方法、机械应变法及振动法。热处理方法,包括整体结构件和局部结构件的热处理。相对于整体热处理,局部热处理在消除应力彻底程度方面相对较差,可以减小残余应力的峰值,但不能完全消除残余应力。机械应变法,包括温差拉伸法、锤击焊缝等。施加一定的拉应力作用在焊接结构,焊缝附近产生拉伸塑性变形,部分抵消了在焊缝及其附近区域的压缩塑性变形,从而可以降低残余应力。对于锤击焊缝来说通常采用的是旋转挤压法,其控制压头在一定速度下锤击焊缝,来达到降低残余应力的目的。总之,为达到消除或者降低残余应力的目的,无论采用哪种工艺方法,应该与实际情况相对应,理论与实际相结合,选用最符合实际又能达到最好效果的工艺措施。

3 结论

1) 焊件失稳变形并不是由单一因素造成的,而是由多个因素叠加造成焊件内部残余应力大于临界载荷,从而引起挠曲变形。在薄板的焊接变形分析,应充分考虑到各因素产生的影响,以便采取适当的措施来减小或者消除残余应力。

2) 对于减小或者消除薄板焊接变形所产生的残

余应力,主要从2个方面着手:①通过改变分布不均匀的温度场,降低残余应力;②提高焊件结构的刚度,增大临界失稳应力。然后采取适当的工艺措施可使焊接结构的质量有明显的提高。

3) 随着有限元软件的广泛应用,可以通过焊接模拟仿真的办法,改变各因素的参数,分析对于薄板变形的影响,更加科学地预测焊接变形的变化,进一步通过设计正交试验选出最优的工艺参数,从而大大地改进薄板焊接的质量和使用的性。

参考文献:

- [1] 明瑞云. 薄板焊接变形分析及控制[J]. 焊接技术, 2010(12): 44-46.
- [2] 王能庆, 童彦刚, 邓德安. 热源形状参数对薄板焊接残余应力和变形的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(12): 97-100.
- [3] 佐藤邦彦, 向井喜彦, 野田政男. 焊接接头的强度与设计[M]. 张伟昌, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [4] 闫俊霞, 刘群山. 薄板焊接失稳变形的影响因素[J]. 铸造技术, 2009, 30(1): 80-82.
- [5] 邓德安, 清岛祥一. 焊接顺序对厚板焊接残余应力分布的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 56-58.
- [6] 焦馥杰. 焊接结构分析与基础[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1991.
- [7] 张光云, 张华, 徐建宇, 等. 焊接成形中焊接参数的选取与焊缝尺寸的预测[J]. 焊接技术, 2008(12): 40-42.
- [8] 闫俊霞, 刘群山. 薄板焊接失稳变形的影响因素[J]. 铸造技术, 2009, 30(1): 80-82.
- [9] 王长生, 薛小怀, 楼松年, 等. 薄板焊接变形的影响因素及控制[J]. 焊接技术, 2005(4): 66-68.
- [10] 温鹏, 张旭东, 陈武柱, 等. 薄板激光焊时失稳变形及其控制[J]. 焊接学报, 2006, 27(9): 99-102.
- [11] 郭绍庆, 徐文立, 刘雪松, 等. 温差拉伸控制铝合金薄板的焊接变形[J]. 焊接学报, 1999, 20(1): 35-41.
- [12] 郭玉泉, 吴东江, 马广义, 等. 夹具拘束距离对 Hastelloy C-276 薄板脉冲激光焊接变形的影响[J]. 光学精密仪器, 2012, 20(11): 2466-2470.
- [13] 张建强, 赵海燕, 鹿安理, 等. 夹具约束对铝合金薄板焊接变形的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 12(3): 165-168.
- [14] 李军, 杨建国, 翁路露, 等. 用旋转挤压方法控制薄板的焊接变形[J]. 焊接学报, 2008, 29(11): 25-28.

(上接第106页)

- [4] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning [M]. Cambridge, MA: Addison-Wesley Professional, 1989.
- [5] COLORNI A, DORIGO M, MANIEZZO V. Distributed optimization by ant colonies[C]//Proceeding of the first European Conference on Artificial Life. Paris, France: Elsevier, 1991: 134-142.
- [6] 李晋航, 黄刚, 贾艳. 多模糊信息条件下的物流配送路径规划问题研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 124-131.

- [7] 侯金宝. 智能算法综述[J]. 科技资讯, 2008(8): 81-82.
- [8] 刘宝钺, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [9] 周金波, 樊留群. 基于 eM-Plant 的装配线物料配送仿真与优化[J]. 机电一体化, 2012(6): 17-20.
- [10] JADLOVSKY J, ILKOVIČ J. Material flow modelling in mechatronic manufacturing system[J]. Procedia Engineering, 2013, 48(3): 345-358.