

金属结构件焊接的变形控制方法分析

李玉莲

长春汽车职业技术大学

DOI:10.12238/jpm.v6i1.7646

[摘要] 金属结构件焊接过程中的变形控制是确保焊接质量和结构稳定性的重要环节。由于焊接过程中产生的热应力和不均匀冷却，金属结构件容易发生变形，从而影响整体尺寸精度和功能性。为了有效控制焊接变形，需要从设计、工艺和后处理三个方面入手。文章首先分析了金属结构件焊接变形的原因，然后从锤击焊缝区法、加热法及机械拉伸法等方面论述了金属结构件焊接的变形控制方法方法，旨在提升金属结构件焊接的稳固性和质量，助力金属行业的健康可持续发展。

[关键词] 金属结构；焊接；变形控制；机械

Analysis of the deformation control method for the welding of metal structural parts

Li Yu lian

Changchun Automobile Vocational and Technical University

[Abstract] Deformation control in the welding process of metal structural parts is an important link to ensure the welding quality and structural stability. Due to the thermal stress and uneven cooling generated during the welding process, the metal structures are prone to deformation, thus affecting the overall dimensional accuracy and functionality. In order to control welding deformation, design, process and post-processing. The paper first analyzes the causes of welding deformation of metal structural parts, and then discusses the deformation control method of metal structural parts welding from the aspects of hammer welding area method, heating method and mechanical stretching method, aiming to improve the stability and quality of metal structural parts welding, and help the healthy and sustainable development of metal industry.

[Key words] metal structure; welding; deformation control; mechanical

引言

在当今工业制造领域，金属结构件的广泛应用为各类机械装备、建筑设施及交通工具的构建提供了坚实的基础。然而，金属结构件在焊接过程中易受高温影响，产生热应力与残余应力，进而导致结构变形，这不仅影响产品的外观质量，更关乎其使用性能与安全性。因此，“金属结构件焊接的变形控制”成为了制造业中一个至关重要的技术课题。

焊接变形不仅增加了后续加工的复杂性与成本，还可能因尺寸精度不达标而引发装配困难，甚至导致整个结构的失效。有效控制焊接变形，不仅能够提升产品质量，延长使用寿命，还能优化生产流程，提高整体制造效率。随着材料科学、焊接工艺及计算机辅助技术的不断进步，研究者与工程师们正不断探索更为高效、精准的变形控制方法，如优化焊接顺序、采用预热与层间温度控制、实施反变形技术等。

一、金属结构件焊接应力和焊接变形原因

（一）金属结构件焊接应力产生原因

1. 热胀冷缩不均匀

在焊接时，焊缝区域被局部加热到很高的温度，而周围的金属温度相对较低。例如，在焊接一块钢板时，焊缝处的温度可能达到材料的熔点附近，而距离焊缝几厘米远的区域温度可能还接近室温。焊缝区域受热膨胀，由于受到周围较冷金属的约束，不能自由膨胀。这种不均匀的膨胀就会在金属内部产生应力。就像把一个金属棒的一端固定，另一端加热，加热端想要膨胀但受到固定端的限制，就会在棒内部产生应力。焊接结束后，焊缝区域开始冷却。冷却时，焊缝金属收缩，而周围的金属由于温度降低得慢，收缩程度相对较小。例如，对于一个T形焊接结构，焊缝冷却收缩时，会拉着与之相连的金属部件一起收缩，但是这些部件由于自身的温度和结构约束，不能完全按照焊缝的收缩量变形，从而产生焊接应力^[1]。

2. 金属材料的相变

对于一些金属材料，在焊接过程中可能会发生相变。例如，碳钢在冷却过程中，奥氏体转变为马氏体时，会发生体积膨胀。如果这种相变发生在焊缝及其附近区域，而周围的金属没有发生相变或者相变程度不同，就会因为体积变化的差异而产生应

力。以含碳量较高的钢为例，当焊缝快速冷却时，焊缝中的奥氏体迅速转变为马氏体，马氏体比容较大，会产生膨胀力，而周围的金属可能仍然处于奥氏体状态或者转变较慢，这种不同步的相变就会在结构内部产生应力。



图1 金属结构件焊接变形示意图

(二) 金属结构件焊接变形产生的原因

1. 热效应相关原因

在焊接过程中，焊缝区域被强烈加热，温度远高于周围金属。例如，采用电弧焊焊接一块薄板时，电弧作用下焊缝处温度可迅速升高到熔点附近，而周围区域温度相对较低。这种不均匀的加热导致焊缝及其附近金属膨胀程度不同。冷却时，焊缝金属先冷却收缩，周围金属冷却相对较慢，收缩量不同。就像一块长方形的金属板，中间焊缝处快速冷却收缩，会拉着周边的金属，从而引起变形。如果焊接时热输入量过大，会使更多的金属受热膨胀和收缩。例如，在焊接厚板时，若焊接电流过大、焊接速度过慢，会导致焊缝处输入过多热量。大量的热量使焊缝及其周围金属膨胀范围更大，冷却时收缩量也更大，进而增加了焊接变形的可能性^[2]。

2. 焊接顺序不合理

当焊接结构不对称时，如果焊接顺序不当，会产生较大变形。例如，对于一个T形结构，先焊接一侧的焊缝，会使这一侧的金属受热膨胀，而另一侧相对较冷。在冷却过程中，先焊接一侧的收缩会拉动整个结构向这一侧变形。如果不按照合理的顺序进行多道焊缝的焊接，如在一个有多个短焊缝组成的结构中，随意焊接，会导致局部热量集中，使结构发生扭曲变形。在焊接有约束条件的结构时，焊接顺序很关键。例如，在一个框架结构中，若先焊接内部的焊缝，后焊接外部的焊缝，内部焊缝产生的变形会受到外部结构的拘束，可能导致内部焊缝处产生较大的残余应力，同时外部结构也会因内部焊缝的变形趋势而发生变形^[3]。

3. 金属材料自身特性

不同的金属材料具有不同的热膨胀系数。例如，铝的热膨胀系数比钢大得多。在相同的焊接热输入条件下，铝结构件比钢结构件更容易产生较大的变形。当焊接由不同材料组成的复合结构时，由于材料热膨胀系数的差异，在焊接过程中会产生不均匀的变形。比如，在钢-铝复合结构的焊接中，焊接时

的热循环会使钢和铝因热膨胀系数不同而产生相对变形。

材料的屈服强度影响其抵抗变形的能力。如果材料的屈服强度较低，在焊接热应力作用下更容易发生塑性变形。例如，一些软质的铝合金，其屈服强度相对较低，焊接时即使较小的热应力也可能使其产生明显的变形^[4]。

(三) 钢结构件变形的矫正方法

1. 机械矫正法

压力机矫正法主要是利用压力机提供的强大压力，对钢结构件的变形部位施加反向的力，使其恢复到原来的形状。例如，对于一块在焊接后发生弯曲变形的钢板，如果弯曲程度较小，可以将钢板放置在压力机工作台上，在弯曲的凸起部位施加压力。压力的大小和作用点需要根据变形的具体情况确定。一般来说，先施加较小的压力，观察变形的矫正情况，逐步增加压力直到变形得到满意的矫正。

千斤顶可以产生较大的顶推力，通过合适的支撑和顶推结构，对钢结构件的变形部分进行矫正。比如，在矫正一根发生弯曲变形的钢梁时，可以将钢梁放置在合适的支撑上，在弯曲的内侧使用千斤顶顶推。如果钢梁的弯曲是由于局部受力不均造成的，千斤顶的顶推可以使钢梁的纤维重新分布，恢复到正常的形状。在操作过程中，要注意千斤顶的顶推方向和着力点，确保矫正效果^[5]。

辊压矫正将变形的钢结构件通过一组或多组轧辊，轧辊对构件施加压力，使构件在通过轧辊的过程中逐渐被矫正。例如，对于一些薄板钢结构件的波浪变形，可以将薄板送入辊压机中。薄板在轧辊的挤压下，其高低不平的部分会被逐渐压平。轧辊的间距和压力可以根据薄板的厚度和变形程度进行调整。

2. 火焰矫正法

点状加热矫正法利用火焰对钢结构件的局部进行加热，加热点的金属受热膨胀，冷却后收缩，从而对变形进行矫正。例如，在矫正一个角变形的钢结构件时，可以在变形角的边缘进行点状加热。加热点的大小、间距和加热温度都需要根据变形的程度来确定。一般加热点直径为10-30mm，间距为50-100mm。加热后，让其自然冷却，由于加热点金属的收缩，会使角变形得到矫正。

火焰沿着一条线对钢结构件进行加热，加热线的金属受热膨胀和冷却收缩，产生的变形力可以矫正构件的整体变形。比如，对于一根发生弯曲变形的钢管，可以沿着钢管弯曲的外侧进行线状加热。加热线的长度、宽度和加热速度都要根据钢管的直径、壁厚和弯曲程度来调整。线状加热后，钢管弯曲外侧的金属收缩，使钢管的弯曲变形得到矫正^[6]。

3. 三角形加热矫正

将火焰加热区域做成三角形，三角形加热区的金属在加热和冷却过程中产生收缩变形，这种变形可以用来矫正复杂的钢结构件变形。例如，在矫正一个扭曲变形的钢结构框架时，可以在框架的适当部位进行三角形加热。三角形的大小、位置和加热顺序都要根据框架的具体结构和变形情况来确定。通过多个三角形加热区的收缩作用，使框架的扭曲变形得到矫正。

二、金属结构件焊接的变形控制方法研究

(一) 锤击焊缝区法

锤击焊缝区法的原理基于金属的塑性变形特性。当焊缝金属在焊接后处于高温状态时，立即对焊缝区进行锤击。锤击产

生的冲击力会使焊缝金属产生微小的塑性变形。从应力的角度来看,焊接过程中焊缝及其附近区域会产生拉应力,锤击焊缝区能够使焊缝金属发生延展,从而降低拉应力的峰值。这种应力的重新分布有助于减少焊接变形的产生。在实际操作中,有诸多要点需要注意。首先是锤击的时机,必须在焊缝金属处于合适的高温区间进行锤击。如果锤击过早,焊缝金属还未充分凝固,锤击可能会破坏焊缝的成型,导致焊缝出现缺陷;而若锤击过晚,焊缝金属温度降低,塑性变差,锤击将难以达到预期的效果,无法有效调整应力和控制变形。一般来说,对于常见的碳钢和低合金钢焊接,在焊缝冷却到暗红色时开始锤击较为合适。

锤击的力度也至关重要。力度过小,无法使焊缝金属产生足够的塑性变形来调整应力,对控制变形的作用微乎其微;力度过大,则可能导致焊缝表面出现凹坑、裂纹等缺陷,损害焊缝的质量。操作人员需要根据焊缝的材料、厚度以及焊接工艺等因素,通过经验和试验来确定合适的锤击力度。锤击的方式也有讲究。应采用均匀、有规律的锤击方式,避免局部过度锤击。可以从焊缝的一端开始,按照一定的顺序向另一端锤击,确保整个焊缝区都能得到适当的处理。在锤击过程中,还可以结合焊缝的形状和走向进行调整,例如对于弯曲的焊缝,在弯曲处适当增加锤击的次数和力度,以更好地控制变形。锤击焊缝区法在金属构件焊接变形控制中,如果运用得当,可以在不增加过多成本和设备的情况下,有效地减少焊接变形,提高焊接结构的质量和精度^[7]。

(二) 加热法

加热法主要包括预加热和随焊加热。预加热是在焊接之前对焊件进行整体或局部加热。对于一些厚板结构件或刚性较大的构件,预加热能够降低焊接区域与周围金属的温度差。例如,在寒冷环境下焊接厚钢板时,预加热可使钢板温度升高,减小焊接时的热应力。预加热的温度根据材料的种类和焊件的厚度而定,如对于某些低合金高强度钢,预加热温度可能在 100 - 150 °C 左右。随焊加热则是在焊接过程中同步进行加热。这种方法可以有效地减少焊接变形。例如,在焊接长直焊缝时,采用随焊加热装置在焊缝前方一定距离处对焊件进行加热。这样一来,焊缝及其周围金属的温度梯度减小,热应力分布更加均匀,从而控制了焊接变形。随焊加热的关键在于确定合适的加热位置、加热温度和加热速度。加热位置通常在焊缝前方一定的距离,这个距离需要根据焊接速度、焊件材料和厚度等因素进行调整。

加热法控制变形的原理在于通过改变焊件的温度场,使焊接过程中的热应力得到合理的分布。当焊件温度均匀升高时,焊接产生的热应力不会集中在焊缝附近,减少了因应力集中导致的变形。同时,加热法还能改善焊缝金属的结晶过程,提高焊缝质量。在运用加热法时,需要精确控制加热参数,并且要根据不同的金属结构件、焊接工艺等进行优化调整,以达到最佳的变形控制效果。

(三) 机械拉伸法

机械拉伸法的基本原理是在焊接前或焊接过程中,对金属结构件施加一个与焊接变形方向相反的机械拉伸力。当进行焊接时,焊接产生的收缩变形会被预先施加的拉伸力部分抵消。从材料力学的角度来看,这是利用了金属材料在弹性范围内的应力 - 应变关系。例如,对于一块薄板金属结构件,在焊接

纵向焊缝之前,沿焊缝方向施加一定的拉伸力,使得薄板处于拉伸状态。焊接过程中产生的收缩应力会与预先存在的拉伸应力相互作用,从而减少最终的变形量。

在实际操作中,有多种方式实现机械拉伸。一种常见的方式是使用专门的拉伸设备,如液压拉伸机。对于大型金属结构件,如钢梁或大型金属框架,可以将拉伸机的夹具固定在结构件的两端,根据结构件的尺寸、材料和焊接工艺要求,设定合适的拉伸力。在焊接过程中,保持拉伸力的稳定,直到焊接完成且结构件冷却到一定温度,以确保焊接变形得到有效控制。另一种方式是利用结构件自身的特点进行机械拉伸。例如,在一些具有可调节连接结构的金属结构中,可以通过拧紧螺栓等方式对结构件的某些部位施加拉力,达到类似的拉伸效果^[8]。

三、总结

金属结构件焊接的变形控制是确保焊接质量与结构稳定性的关键环节。焊接过程中,由于局部高温引起的热应力及不均匀冷却,金属结构件极易发生变形,影响整体尺寸精度与功能实现。有效控制焊接变形,需从设计、工艺与后续处理三方面入手。设计阶段,通过优化结构布局,减少焊缝数量与长度,采用对称或平衡设计,可预先规避变形风险。工艺上,选用合理的焊接顺序、参数与热输入控制,以及预热、层间温度管理等措施,均可有效降低变形量。此外,采用反变形法、刚性固定法等辅助手段,也能有效抑制焊接变形。焊接完成后,必要的矫形处理与残余应力释放,对于提升结构件的长期稳定性至关重要。通过合理的热处理、机械拉伸或振动时效等方法,可进一步减少变形,保证金属结构件的尺寸精度与性能要求。

总之,金属结构件焊接的变形控制是一个系统工程,需综合考虑设计、工艺与后续处理等多方面因素,以实现高效、高质量的焊接作业。

[参考文献]

- [1]赵胜刚.基于固有应变理论的机械结构件焊接变形控制方法[J].制造业自动化,2022,44(1):114-117.
 - [2]蒋佩奇.底盘薄壁结构焊接变形控制及优化研究[D].广西科技大学,2023.
 - [3]张春兰,王旭.钢结构件制作焊接变形的控制与分析[J].工程技术(文摘版),2022(14).
 - [4]姚小彬,刘殿民,赵会伟,等.钢结构用焊接H型钢制作为及焊接变形控制[J].中国金属通报,2021(021):000.
 - [5]蒋兴明.金属结构件组装及焊接的变形控制方法探究[J].2024(5):88-90.D0I:10.12254/j.issn.2096-6539.2024.05.030.
 - [6]罗宝宇,白爱东.金属结构件组装及焊接的变形控制方法探究[J].中国设备工程,2021(20):2.
 - [7]陈波莹.焊接变形控制方法在焊接结构中的应用研究[J].中国机械,2023(032):000.
 - [8]李建辉.建筑工程大型钢结构焊接变形控制技术[J].安装,2023(11):51-54.
- 作者简介:李玉莲,1966年11月16日,女,吉林省,汉,大学本科,副教授,长春汽车职业技术大学,研究方向:焊接冶金。