

焊接结构件焊接变形控制措施

王 劳

呼伦贝尔技师学院 内蒙古 呼伦贝尔 022150

摘要：随着制造业向高精度、高性能方向迅猛发展，焊接结构件在航空航天、船舶制造、桥梁建设等众多领域的应用愈发广泛。本文聚焦于焊接结构件焊接变形控制措施。首先介绍了焊接变形的多种类型，包括纵向、横向收缩变形，角、弯曲、扭曲及波浪变形等。接着分析了影响焊接变形的因素，涵盖焊接工艺参数、方法、焊件材质与结构以及装配和焊接顺序。最后从优化焊接结构设计、选择合适焊接工艺、采用反变形法、利用刚性固定法以及进行焊前预热和焊后热处理等方面，详细阐述了控制焊接变形的有效措施，旨在为减少焊接结构件变形提供参考。

关键词：焊接结构件；焊接变形；控制措施

引言：在焊接结构件的生产制造过程中，焊接变形是一个普遍存在且亟待解决的问题。焊接变形不仅会影响结构件的尺寸精度和外观质量，降低其装配精度，严重时还会使结构件的承载能力下降，影响结构的安全性和可靠性，增加后续校正的工作量和成本，甚至可能导致产品报废。随着工业技术的不断发展，对焊接结构件的质量要求日益提高，有效控制焊接变形成为保证焊接质量的关键环节。因此，深入研究焊接变形的类型、影响因素及控制措施具有重要的现实意义。

1 焊接变形的类型

1.1 纵向收缩变形

纵向收缩变形指焊接时，焊缝及其附近金属在沿焊缝长度方向上产生的收缩现象。这是由于焊接加热使焊缝及周边金属膨胀，冷却时收缩不均导致。例如，在长直焊缝的焊接中，沿焊缝纵向会出现明显的缩短。纵向收缩变形会使构件长度尺寸变小，影响构件的整体长度精度，在一些对长度要求严格的构件制造中需重点控制。

1.2 横向收缩变形

横向收缩变形是焊缝金属在垂直于焊缝长度方向上的收缩。焊接过程中，焊缝区域受热熔化，冷却凝固时体积缩小，从而在横向产生收缩力。像T形接头的焊接，在垂直于焊缝方向上构件会发生缩短。这种变形会影响构件的宽度、高度等尺寸精度，对装配精度产生不利影响，需采取相应措施加以控制。

1.3 角变形

角变形常见于对接接头、T形接头等焊缝不对称的结构中。焊接时，焊缝上下部分金属收缩不均匀，上部金属收缩量大，下部收缩量小，导致构件绕焊缝轴线发生转动，形成角变形。例如，V形坡口对接焊后，焊件会产生明显的角变形。角变形会改变构件的形状和角度，影

响构件的装配和正常使用，需在设计和焊接过程中加以预防。

1.4 弯曲变形

弯曲变形是构件在焊接后沿某个方向发生的弯曲。当焊缝在构件上的分布不对称，或者焊接顺序不合理时，会产生不均匀的收缩应力，使构件发生弯曲。比如，在梁的焊接中，如果焊缝集中在一侧，梁就会向焊缝一侧弯曲。弯曲变形会破坏构件的直线度，影响构件的安装和使用性能，需要采取有效措施进行矫正和控制。

1.5 扭曲变形

扭曲变形是构件焊接后绕其自身轴线发生一定角度的扭转。这通常是由于焊接顺序不当、焊件装夹不牢固或者焊缝分布不合理，导致各部分收缩不均匀，产生扭矩，从而使构件发生扭曲。例如，在箱形结构的焊接中，若焊接顺序不合理，就容易出现扭曲变形。扭曲变形会严重影响构件的装配精度和使用性能，矫正难度较大。

1.6 波浪变形

波浪变形一般发生在薄板焊接结构中。由于薄板的刚性较小，在焊接应力作用下，薄板局部区域会产生失稳现象，从而形成波浪状的变形。比如在薄板对接焊或搭接焊时，容易出现波浪变形。波浪变形会破坏薄板的平整度，影响构件的外观质量和后续加工，需要通过合理的焊接工艺和防变形措施来控制^[1]。

2 焊接变形的影响因素

2.1 焊接工艺参数

焊接工艺参数对焊接变形影响显著。焊接电流大小直接关联热输入，电流过大，热输入增加，焊件受热区域扩大，冷却收缩时变形也更大；电流过小则易产生未焊透等缺陷。电弧电压影响焊缝熔宽与熔深，电压不当会使焊缝形状改变，进而引发变形。焊接速度过快，焊

件受热不均匀，残余应力分布复杂，变形难以控制；速度过慢，热输入集中，变形也会增大。此外，焊接热输入量综合体现各参数作用，合理控制它是减小变形的关键，需根据焊件材质、厚度等精准调整参数。

2.2 焊接方法

不同焊接方法产生的焊接变形差异较大。手工电弧焊设备简单、操作灵活，但热输入相对集中且不均匀，易产生较大变形，尤其在厚板焊接时更为明显。气体保护焊中，二氧化碳气体保护焊成本低、效率高，但飞溅较大，热影响区较宽，变形控制难度稍大；氩弧焊焊接质量高、变形小，不过成本较高，多用于对质量要求严格的薄板焊接。埋弧焊热效率高、焊接速度快，熔深大，适合中厚板焊接，且变形相对较小。选择合适的焊接方法，需综合考虑焊件要求、成本和生产效率等因素。

2.3 焊件的材质和结构

焊件材质的物理性能，如线膨胀系数、导热系数等对变形影响突出。线膨胀系数大的材质，受热膨胀和冷却收缩幅度大，变形更明显；导热系数小的材质，热量不易散失，受热区域温度高，变形也较大。焊件结构方面，结构刚度越大，抵抗变形能力越强，变形越小；反之则变形大。结构复杂程度也影响变形，复杂结构焊缝多、拘束度大，应力分布复杂，变形难以预测和控制。此外，焊件的厚度、形状等也会对变形产生不同程度的影响，设计时应充分考虑这些因素。

2.4 装配和焊接顺序

装配顺序不当会使焊件在焊接前就存在较大的初始应力和变形，增加后续焊接变形的控制难度。例如，先装配刚性小的部件，再装配刚性大的部件，可能导致整体结构装配精度下降。焊接顺序对变形影响更为直接，合理的焊接顺序能均衡焊件的受热和收缩，减小变形。如对称结构采用对称焊接顺序，可使焊件受力均匀；长焊缝采用分段退焊法，能减少焊件的纵向收缩变形。而不合理的焊接顺序，会使焊件局部应力集中，产生较大的弯曲、扭曲等变形，因此必须精心规划装配和焊接顺序^[2]。

3 焊接变形的控制措施

3.1 优化焊接结构设计

3.1.1 合理选择焊缝尺寸和坡口形式

焊缝尺寸直接影响焊接热输入和变形程度。尺寸过大，热输入增加，焊件收缩量大，变形也大；尺寸过小则可能无法保证焊接质量。因此要根据焊件的受力情况、材质等合理确定焊缝尺寸。坡口形式的选择也至关重要，合适的坡口能在保证焊透的前提下，减少填充金属量，降低热输入。例如，对于厚板焊接，采用U形坡口

比V形坡口填充金属少，热输入低，变形也更小。同时，要考虑坡口的加工工艺性和成本等因素，综合权衡选择最佳坡口形式。

3.1.2 合理安排焊缝位置

焊缝位置对焊接变形影响显著。应尽量避免焊缝集中布置，因为焊缝集中会使局部热输入过大，收缩应力集中，导致较大的变形。对于对称结构，焊缝应尽量对称分布，这样在焊接时能使焊件受力均匀，减小弯曲和扭曲变形。同时，焊缝位置应避开构件的应力集中区，如截面突变处、孔边等，以防止因焊接应力与工作应力叠加，降低构件的承载能力。此外，还要考虑焊接操作的方便性，确保焊工能够顺利施焊，提高焊接质量。

3.1.3 减少不必要的焊缝

在满足焊件使用要求和结构强度的前提下，应尽量减少焊缝数量和长度。不必要的焊缝不仅会增加焊接工作量，还会增大焊接热输入，导致变形增加。例如，在箱体结构设计中，可以通过合理的板材拼接和折弯工艺，减少内部加强筋的焊缝数量。对于一些非承载部位，可采用螺栓连接、铆接等其他连接方式替代焊接。此外，优化结构设计，采用整体成型工艺，也能有效减少焊缝，降低焊接变形风险，同时提高结构的整体性和可靠性。

3.2 选择合适的焊接工艺

3.2.1 采用低线能量焊接方法

低线能量焊接能有效减少焊接热输入，降低焊件受热区域的温度梯度，从而减小收缩变形。例如，激光焊具有能量密度高、热输入小的特点，能在极小的区域内实现焊接，对周边金属的热影响极小，变形显著低于传统焊接方法。电子束焊同样如此，它在真空环境下进行，能量集中，焊缝窄且深，热影响区小，特别适合对变形要求严格的精密结构焊接。此外，一些先进的复合焊接技术，如激光-电弧复合焊，结合了激光和电弧的优点，既能保证焊接质量，又能进一步降低线能量，有效控制焊接变形。

3.2.2 合理控制焊接参数

焊接参数对变形影响巨大。焊接电流过大，会使热输入增加，焊件受热区域扩大，冷却收缩时变形增大；电流过小则可能产生未熔合等缺陷。电弧电压影响焊缝熔宽和熔深，电压不当会改变焊缝形状，引发变形。焊接速度也需精准把控，速度过快，焊件受热不均，残余应力分布复杂；速度过慢，热输入集中，变形加剧。因此，要根据焊件材质、厚度等因素，通过试验确定最佳焊接参数组合，并在焊接过程中严格监控和调整，确保

焊接质量的同时控制变形。

3.2.3 选择合理的焊接顺序

合理的焊接顺序能均衡焊件的受热和收缩，减小变形。对于对称结构，应采用对称焊接顺序，使焊件在焊接过程中受力均匀，避免因一侧先焊接导致的不均匀收缩而产生弯曲或扭曲变形。长焊缝焊接时，可采用分段退焊法、跳焊法等。分段退焊法将长焊缝分成若干小段，按一定顺序逆向焊接，能减少焊件的纵向收缩变形；跳焊法则是间隔焊接焊缝，使焊件有自由收缩的余地，降低内应力。此外，先焊接收缩量大的焊缝，再焊接收缩量小的焊缝，也有助于控制整体变形。

3.3 采用反变形法

反变形法是一种基于对焊接变形规律预先掌握，进而对焊件施加与焊接变形方向相反的变形量，以此抵消焊接过程中产生的变形，保证焊件最终尺寸和形状符合要求的有效方法。在实际应用中，首先要通过经验公式、试验分析或数值模拟等手段，准确预测焊件在特定焊接条件下的变形方向和大小。例如，在T形接头焊接时，通常会产生角变形，根据经验可预先将焊件向变形相反方向弯曲一定角度。对于复杂结构，可制作样件进行焊接试验，测量变形数据，为反变形量的设定提供依据。施加反变形的方式多样，对于简单结构，可通过机械压力、液压装置等人工施加；对于大型复杂结构，可设计专门的工装夹具来实现。在操作过程中，要严格控制反变形量的大小，量过小无法有效抵消焊接变形，量过大则会使焊件产生反向变形。同时，还需注意反变形的均匀性，避免因局部反变形量不一致导致新的变形问题，确保焊接后焊件能达到理想的精度要求。

3.4 利用刚性固定法

刚性固定法是通过采用夹具、支撑等装置，增加焊件在焊接过程中的刚性，限制其自由收缩和变形，从而达到控制焊接变形目的的方法。该方法适用于各种形状和尺寸的焊件，尤其对于薄板结构和小型构件效果显著。例如，在薄板对接焊时，可使用马板将薄板固定在平台上，防止焊接过程中薄板产生波浪变形；对于框架结构，可采用定位焊、临时支撑等方式，增强结构的整体刚性，减少焊接变形。在使用刚性固定法时，要根据焊件的形状、材质和焊接工艺等因素，合理设计夹具和支撑结构，确保其具有足够的强度和刚度。同时，要注意固定点的位置和数量，固定点应均匀分布，以有效约束焊件的变形。此外，刚性固定会在焊件内部产生较大的

残余应力，焊接完成后应及时拆除固定装置，并通过热处理等方式消除残余应力，避免影响焊件的使用性能。

3.5 进行焊前预热和焊后热处理

3.5.1 焊前预热

焊前预热是指在焊接前对焊件整体或局部进行加热，使其达到一定温度后再进行焊接。预热能减缓焊件的冷却速度，降低焊接接头区域的温度梯度，减小焊接应力，从而有效控制焊接变形。对于厚度较大、导热性好或拘束度大的焊件，如高碳钢、合金钢等，预热尤为重要。预热温度需根据焊件材质、厚度、结构等因素，通过查阅相关标准或试验确定。预热方式多样，可采用火焰加热、感应加热、电阻加热等。合适的预热能改善焊接接头的性能，提高焊件的抗裂性，为后续焊接过程创造良好条件。

3.5.2 焊后热处理

焊后热处理是在焊接完成后，对焊件进行加热、保温和冷却的操作。其主要目的是消除焊接残余应力，改善焊件的组织结构和力学性能，进一步减小焊接变形。对于一些对性能要求高、易产生裂纹的焊件，如压力容器、大型结构件等，焊后热处理必不可少。常见的焊后热处理方法有退火、正火、淬火和回火等。热处理工艺参数（温度、时间、冷却速度等）需严格把控，以确保达到预期效果。同时，要注意热处理过程中的防护，避免焊件产生氧化、脱碳等缺陷^[3]。

结语

焊接结构件焊接变形控制是一项复杂且关键的工作，贯穿于焊接结构制造的全过程。通过合理设计焊接结构、精准选择焊接工艺、严格把控焊接顺序与方向，以及有效运用刚性固定、反变形法等控制措施，可显著降低焊接变形产生的概率与程度。然而，实际生产中变形因素多样且相互影响，需不断积累经验、持续优化工艺。未来，随着焊接技术的创新发展，如智能焊接设备与先进控制算法的应用，将为焊接变形控制提供更精准、高效的解决方案，推动焊接结构件质量迈向新高度。

参考文献

- [1]薛盛智,袁军民,石一光,谢昊澄.机械焊接结构热变形的控制措施研究[J].南方农机,2020,51(04):10.
- [2]张亚春.焊接结构件焊接变形控制措施研究[J].中国设备工程,2021,(24):111-112.
- [3]朱永政.机械焊接结构热变形的控制措施研究[J].现代盐化工,2022,44(04):59-60.