

# Anti-deformation analysis in the manufacturing process of pressure vessels

Shensheng Luo

China National Petroleum Sixth Construction Co., Ltd., Guilin, Guangxi, 541000, China

## Abstract

Pressure vessels are widely used in industrial production, and their performance and safety are crucial to the production process. As an important industrial equipment, the pressure vessel carries the extreme conditions such as the pressure and temperature in the production process, and its structure and performance are directly related to the production safety. This paper analyzes the main types of deformation during pressure vessel manufacturing, such as welding deformation, machining deformation and heat treatment deformation, and discusses the reasons. In view of these problems, a number of anti-deformation measures are put forward, including the selection of welding sequence and method, stress control in the cutting process, uniform heating and cooling, etc., including the optimization of the overall structural design, to reduce the deformation risk by improving the stiffness and reasonable selection.

## Keywords

pressure vessel; manufacturing process; Anti-deformation; Effective measures

## 压力容器制造过程中的防变形分析

骆参升

中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·广西 桂林 541000

## 摘要

压力容器在工业生产中广泛应用,其性能和安全性对生产过程至关重要。压力容器作为重要的工业设备,承载着生产过程中的压力和温度等极端条件,其结构和性能直接关系到生产安全。本文分析了压力容器制造过程中变形的主要类型,如焊接变形、机械加工变形和热处理变形,并探讨了其原因。针对这些问题,重点研究提出了多项防变形措施,包括焊接顺序与方法的选择、切削过程中的应力控制、均匀加热与冷却等,还包括整体结构设计优化,通过提高刚度和合理选型,减少变形风险。

## 关键词

压力容器; 制造过程; 防变形; 有效措施

## 1 引言

压力容器在制造过程中,常常会遭遇不同类型的变形问题,导致产品质量下降,甚至发生事故。如何有效防控变形问题,成为压力容器制造领域的关键课题,文章将对此重点研究,旨在减少变形风险,确保压力容器的稳定性和安全性。

## 2 压力容器变形问题的危害

压力容器在现代工业生产中扮演着重要的角色,广泛应用于石油化工、电力、冶金、天然气等行业。其主要作用是承受高压或低压环境下的液体或气体,确保化学反应、物料储存和运输等过程中安全、高效的进行。例如,在石油化工厂,压力容器用于储存和反应化学品,在发电厂中,用于

热交换、蒸汽生成等关键环节,这些容器往往涉及到高温、高压条件下的操作,因此其结构安全性至关重要。

压力容器在制造和使用过程中,容易出现变形问题,导致严重的安全隐患。首先,变形会影响容器的结构强度。由于焊接、机械加工等工艺过程中的不当操作,压力容器会发生局部或整体的形变,如弯曲、变扭或膨胀,这会使其承受的应力分布不均,从而影响容器的承压能力。一旦发生极端变形,容器就会无法承受内部的压力,进而导致爆裂或泄漏,产生重大安全事故。其次,变形还会影响压力容器的密封性。容器的密封性能,对于防止气体或液体泄漏至关重要,任何形变都会破坏密封面,导致泄漏。这不仅会造成物料浪费,还会对环境造成污染,甚至引发火灾或爆炸等二次灾害。最后,压力容器的变形,还会影响其长期稳定运行。变形导致应力集中,会引发疲劳裂纹的形成,进而加剧材料老化和破裂风险,这对设备的维护和使用寿命提出了更高要求,增加了维护成本和安全隐患。因此,确保压力容器在制造过程

【作者简介】骆参升(1999-),男,中国广西防城人,本科,助理级工程师,从事化工设备制造、钢结构制造研究。

中避免变形问题的发生,是保障生产安全的必要措施,也是维护环境安全和经济效益的重要手段。

### 3 压力容器制造过程中变形问题的类型及原因

压力容器在制造过程中,变形是一个常见的问题,主要表现为焊接变形、机械加工变形和热处理变形,这些变形会影响容器的结构稳定性和安全性。具体而言:(1)焊接变形。焊接变形由焊接过程中产生的热应力引起。由于焊接区域的金属加热至高温,再冷却时收缩,导致焊接接头区域和邻近区域的应力不均匀分布。尤其是在厚壁压力容器的焊接过程中,局部加热会使金属膨胀,焊缝两侧的冷却速率不同,造成拉应力和压应力的变化,从而导致变形<sup>[1]</sup>。不同的焊接方法,如手工电弧焊、气体保护焊等,在热输入和冷却速度上有所不同,因此会对变形程度产生影响。例如,气体保护焊由于其较小的热输入,变形较轻,而手工电弧焊由于热输入较大,易造成较严重的变形。(2)机械加工变形。在机械加工过程中,如切削、铣削等操作,工件的应力状态会发生变化。切削过程中,由于刀具与工件接触,产生了局部高温和切削力,这些因素会导致工件发生微小的形变,尤其是对薄壁压力容器来说,更易产生变形。工件形状与刚度的关系密切相关,较薄的工件在加工时容易受到变形,而厚壁工件则较为稳定。工件的支撑方式和夹具设计,也对加工过程中的变形程度有重要影响,不合理的支撑容易导致工件变形。(3)热处理变形。热处理过程中的变形,通常由加热和冷却过程中的温度梯度造成。在加热阶段,由于金属材料内部的温度分布不均匀,温度差异导致膨胀不一致,从而引发应力。而在冷却过程中,外部温度较低时,工件表面会迅速冷却,而内层温度较高,导致金属表面收缩速率较快,进而产生收缩变形。温度梯度对变形的影响特别显著,尤其是在大型压力容器的热处理过程中,较大的温差会导致显著的形变。因此,合理的加热与冷却方案,对于控制热处理变形至关重要。

## 4 压力容器制造的防变形的措施

### 4.1 焊接变形防控

在压力容器的制造过程中,焊接变形是最常见的变形类型之一。为了防止焊接过程中出现变形问题,必须采取一系列有效的防控措施。具体包括:(1)焊接顺序与方法选择。合理的焊接顺序,可以确保焊接过程中应力的均匀分布,避免因局部加热而引发过大的热应力。常见的焊接顺序方法,包括对称焊接和交替焊接方法。在对称焊接中,焊接操作从容器的两端或两侧开始,逐步向中间进行,这样可以在一定程度上平衡热应力,减少局部变形。在交替焊接法中,焊接操作分阶段进行,每次只焊接局部区域,焊接热量较为分散,避免了热量过度集中导致的热变形。焊接方法的选择,也会影响变形的程度。低热输入的焊接方法,如气体保护焊、埋弧焊等,能够有效减小焊接热应力,相较于高热输入的焊

接方法,如手工电弧焊,能够有效减少变形<sup>[2]</sup>。(2)预热与焊后处理。预热能在焊接前减少焊接区域和母材之间的温差,从而避免热应力的急剧变化。特别是在厚壁压力容器的焊接中,预热可以有效降低焊接过程中由于温差过大导致的裂纹和变形的风险。焊后处理,如应力消除退火,也可以有效减小焊接残余应力,避免因应力集中导致的变形或开裂。通过控制焊后冷却速率,就可以避免因冷却过快引发的塑性变形,同时保持材料的机械性能。(3)使用夹具和支撑装置。在焊接过程中,使用夹具可帮助固定工件,确保工件在焊接过程中保持正确的位置,避免由于焊接热膨胀和冷却收缩造成的变形。支撑装置则可以帮助承受焊接过程中产生的热应力,防止工件弯曲或变形。在焊接厚壁压力容器时,支撑装置尤其重要,它能为工件提供额外的支撑力,使其在焊接过程中不易发生形变。此外,合理的支撑位置和夹具设计,应根据工件形状、焊接顺序以及焊接过程中的热输入进行优化,确保最大限度地减少变形。

### 4.2 机械加工变形防控

机械加工是压力容器制造过程中的重要环节。机械加工变形主要来源于切削过程中产生的应力、加工时的热量积累,以及加工精度的控制。为了有效防控机械加工变形,可以采取下列措施:(1)切削过程中的应力控制。在机械加工中,切削力和切削热是导致变形的主要因素。当刀具与工件接触时,切削力会产生局部应力,尤其是在切削过程中,力的集中作用会导致工件表面产生不均匀的应力分布,进而引发变形。为了有效控制切削应力,就需要合理选择切削参数,如切削速度、进给速度和切削深度等。高切削速度和适当的进给速度,有助于减少切削力,同时降低变形的风险。采用合适的刀具材料和几何形状,也能有效减小切削力,降低应力集中。刀具材料需要具备较高的硬度和耐磨性,以保证加工精度并减少变形。(2)加工过程中的冷却与润滑。切削过程中产生的热量,会导致材料膨胀,还会改变材料的微观结构,从而影响加工精度和工件的形变。为了有效控制加工过程中的温度,应使用冷却液进行冷却。冷却液的作用是降低切削区域的温度,减小热膨胀,并帮助排除加工过程中产生的切屑。合理选择冷却液类型和喷洒方式,就可以提高加工质量,减少变形。此外,润滑也是防控变形的关键,适当的润滑就能减少摩擦,还能有效降低切削力和热量积聚。通过优化冷却与润滑方案,可以有效降低因温度升高所引发的变形问题。(3)精密加工技术应用。精密加工技术能够有效提高加工精度,减少变形风险。在压力容器的制造中,尤其是对于薄壁或复杂形状的工件,精密加工技术显得尤为重要。常用的精密加工技术,包括电火花加工、激光加工、超声波加工等,这些技术能在加工过程中提供更高的控制精度,减少因切削力过大或温度过高引起的变形。此外,还可以通过高精度的测量与控制系统,实时监控工件的加工状态,及时调整加工参数,确保工件在加工过程中保持稳定

的形状与尺寸<sup>[3]</sup>。

### 4.3 热处理变形防控

热处理是压力容器制造中的重要工艺过程，通过加热和冷却的方式，改善金属的组织 and 性能。然而，热处理过程中不当的加热或冷却方式，会导致工件发生变形。因此，防控热处理变形，需要关注：（1）均匀加热与冷却控制。在热处理过程中，金属材料的加热和冷却过程，是决定变形程度的关键因素。如果加热或冷却不均匀，材料的不同部分将受到不同程度的热膨胀或收缩，导致内外应力差异，从而引发变形。为了确保热处理过程中变形的最小化，必须严格控制加热和冷却的均匀性。在加热过程中，应确保炉内温度均匀分布。加热时，工件的不同部位，应尽可能同时达到所需温度，避免温度梯度过大。特别是在厚壁压力容器的热处理过程中，均匀加热更为重要，可以采用温控设备，调整加热炉的温度分布，确保工件的各部分均匀加热。在冷却过程中，冷却速率应均匀，避免局部过快冷却，快速冷却会导致局部区域材料收缩过快，从而引发变形和裂纹。具体可以使用定向喷雾、气流冷却或油淬等方式，有效控制冷却速率，减少变形的风险。（2）合理的热处理工艺设计。热处理工艺的合理性，直接关系到温度变化的平衡、应力的释放以及材料性能的提高。在热处理前，需要根据工件的材质、形状和使用要求，选择合适的加热温度、保温时间和冷却方式。设计合理的加热和冷却速率，是防止变形的基础。过快的加热或冷却，会导致热应力的不均匀分布，增加变形风险。针对不同材料和工件形状，可以通过实验或理论计算，确定最佳的加热和冷却速率。在热处理过程中，还可以采取分段加热或分步冷却的方法，以减少工件表面和内部的温差，避免因急剧的温差变化产生变形。热处理工艺的设计，还需考虑到应力的释放。通过控制加热和冷却的过程，使金属内部的应力逐渐释放，避免过大的内应力造成变形。例如，采用退火工艺时，可以在加热过程中保持一定时间，从而让材料中的内应力逐渐放松，并保证冷却时的应力分布均匀。

### 4.4 整体结构设计优化

合理的结构设计，能够有效提高容器的刚度与稳定性，避免在承受压力或外部负荷时发生不必要的形变。具体要关注：（1）提高容器刚度与稳定性。在设计阶段，要考虑容

器在使用过程中可能遇到的各种载荷，包括内部压力、外部机械载荷、温度变化等，这些载荷会导致容器发生变形，甚至引发破裂或泄漏。合理的结构形状设计，有助于均匀分布内部应力。通常，圆柱形和球形容器具有较高的刚度，能有效分散内外压力，减少局部变形。因此，在设计时，应根据容器的使用要求和内部介质的性质，选择合适的形状。增加容器的支撑点，也是提高刚度的有效手段。合理布置支撑结构，可以分担容器承受的压力，减少容器在受力过程中的变形。选用高强度、高刚性的材料，也是提高容器刚度的一种途径。（2）合理的厚度和结构选型。过薄的壁厚，会导致容器在承受高压时产生较大变形，甚至发生破裂；而过厚的壁厚虽然能增加容器的强度，但也会导致制造成本的增加，以及热处理时的温差问题。因此，在设计过程中，需要根据容器的工作条件合理选择壁厚。一般来说，厚度的选择，应基于容器的内外压力差、容器的材质以及使用温度等因素。通过计算应力与变形的关系，可以得出最优的厚度值。在实际设计中，常常需要通过有限元分析等方法对容器进行模拟，评估不同厚度下容器的变形情况，从而确保容器在规定的条件下既能满足强度要求，又能避免过度变形。另外，在压力容器的设计中，应根据容器的具体功能和承受的载荷，选择适当的结构形式。

## 5 结语

总之，通过对压力容器制造过程中变形问题的深入分析可以看出，这是影响其质量和安全性的重要因素。为了解决这一问题，必须在焊接、机械加工和热处理等各个环节采取科学的防控措施。优化设计结构，提高容器刚度与稳定性，合理选择材料和工艺参数，都是防止变形的有效方法。只有从多个方面入手，全面提升压力容器的制造水平，才能确保其在实际应用中的安全性与可靠性。

### 参考文献

- [1] 廖建明. 压力容器制造工艺及其质量控制研究[J]. 工程研究与实用, 2023, 4(2): 40-41.
- [2] 保武蓉. 压力容器制造过程中变形问题的控制对策分析[J]. 机械强度, 2022, 44(2): 409-415.
- [3] 曲道波. 压力容器制造过程中的防变形分析[J]. 石油和化工设备, 2021, 24(07):44-45+48.