

球罐现场组对焊接变形控制技术研究

梁存化

中石化南京工程有限公司 江苏 南京 210049

【摘要】：球罐作为一种重要的压力容器，广泛应用于石油、化工等领域。在球罐的现场组对焊接过程中，焊接变形是影响球罐质量和安全性能的关键因素。本文深入研究球罐现场组对焊接变形的产生原因，从球罐半成品质量控制、组装工艺优化以及焊接工艺改进等多方面详细阐述控制焊接变形的技术措施，并结合实际案例分析措施的有效性，旨在为提高球罐现场组对焊接质量提供理论与实践参考。

【关键词】：球罐；现场组对；焊接变形；控制技术

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.023

引言

球罐因其承压能力强、占地面积小、储存效率高等优点，在工业生产中承担着储存各类气体、液体介质的重要任务。然而，球罐的现场组对焊接过程复杂，焊接过程中产生的不均匀温度场会使焊件产生复杂的应力应变，进而导致焊接变形。焊接变形不仅影响球罐的外观尺寸精度，降低球罐的承载能力，还可能在球罐运行过程中引发安全隐患。因此，有效控制球罐现场组对焊接变形对于保障球罐质量和安全运行具有重要意义。

1 球罐现场组对焊接变形产生的原因

1.1 球壳板自身因素

球壳板在制造过程中，由于加工工艺、模具精度等原因，可能导致球壳板的实际曲率与设计曲率存在偏差。当这些曲率偏差较大的球壳板在现场组对时，会在组装过程中产生附加应力，焊接时在焊接热应力的共同作用下，加剧焊接变形的产生。球壳板的直径、弦长、对角线等几何尺寸若不符合设计要求，在组对时会出现错边、间隙不均匀等问题。这些组对缺陷会改变焊接接头的受力状态，使焊接过程中应力分布不均匀，从而引发焊接变形。例如，错边量过大时，焊缝两侧的拘束条件不同，焊接过程中更容易产生角变形。

1.2 组装工艺因素

球罐的组装顺序对焊接变形有显著影响。若组装顺序不当，可能导致球罐在组装过程中就产生较大的初始应力，焊接时这些初始应力与焊接热应力叠加，使焊接变形难以控制。例如，在温带与赤道带组装时，如果先组装一侧的温带板，而未及时进行对称组装和调整，会使球罐整体受力不均，增加焊接变形的风险。球罐组装过程中，各部件的定位精度至关重要。如果支柱垂直度偏差过大、球壳板之间的间隙不均匀或棱角度超标，会导致焊接时焊缝的拘束度不一致，从而产生焊接变形。如间隙过大时，焊接填充金属增多，焊接热输入增大，容易引起较大的收缩变形。

1.3 焊接工艺因素

1.3.1 焊接热输入过大

焊接热输入是影响焊接变形的关键因素之一。当焊接电流过大、焊接速度过慢或焊接层数过多时，会使焊接区域吸收过多的热量，导致焊缝及热影响区金属的膨胀和收缩不均匀，从而产生较大的焊接变形。例如，在厚板焊接时，若不控制好焊接热输入，容易出现严重的角变形和波浪变形。

1.3.2 焊接顺序不当

合理的焊接顺序可以使焊接过程中产生的应力相互抵消或减小，反之则会加剧应力集中，导致焊接变形增大。例如，在球罐的环缝和纵缝焊接时，如果先焊接所有的纵缝再焊接环缝，会使球罐在纵缝方向产生较大的收缩应力，进而引起球罐的整体变形。

1.3.3 焊接方法选择不合适

不同的焊接方法具有不同的热输入特性和电弧力，对焊接变形的影响也不同。例如，手工电弧焊的热输入相对较大，且操作过程中人为因素影响较大，焊接变形较难控制；而气体保护焊的热输入相对集中，焊接变形相对较小。如果在球罐焊接时选择了不适合球壳板材质和厚度的焊接方法，可能会导致焊接变形超出允许范围。

2 球罐现场组对焊接变形控制技术措施

2.1 球罐半成品质量控制

2.1.1 严格球壳板验收

在球壳板到货后，应依据相关标准（如 GB12337—98）对球壳板的曲率、几何尺寸、球壳板及坡口表面质量进行复验。鉴于球壳板现场复验弦长等几何尺寸困难，且部分球壳板可能存在弹性变形，可采用弧长检测替代弦长检测，以确保焊缝间隙均匀。同时，由于现场验收难度较大，可考虑派专业人员前往制造厂家进行验收，利用厂家齐全的检测手段和高精度的测量器具，及时发现并处理不合格品。此外，要重点加强对球壳板周边几何尺寸和形状的检查，因为球壳板周边的成型状况对

组焊质量影响较大,而其他部位微量的翘曲度超标在组装时可通过弹性调整达到要求。

2.1.2 带支柱赤道板制造控制

对于带支柱赤道板的制造,由于球罐支柱直径较大,与赤道板焊接时易发生曲率超标现象。为控制变形,可采取以下措施:首先,在组焊支柱位置使赤道板产生预变形,以补偿焊接过程中的变形量,保证焊接后其曲率符合要求;其次,严格控制焊接热量输入,采用对称分段退焊法,减少焊接变形;再者,设计专用防变形胎具,并在胎具上施焊;最后,球壳板与支柱焊接后,连同胎具一起进行消除应力热处理,冷却后再拆除胎具。

2.1.3 优化球壳板运输方案

球壳板壁薄、单片面积大、刚性差,在运输过程中易发生变形。因此,在包装运输时应制作专用胎具,用于球壳板的运输和现场存放。每个胎具上最多放置2块球壳板,且板与板之间须用柔性物体加以隔离,以防止球壳板在运输过程中相互碰撞而产生变形。

2.2 优化组装工艺

2.2.1 合理安排组装顺序

制定科学合理的球罐组装顺序是控制焊接变形的重要环节。一般应遵循先赤道带、后温带、再极板的组装顺序。在赤道带组装时,采用2台吊车抬吊带支柱的赤道板,防止吊装变形,并找准径向与周向就位位置、铅垂度。插入不带支柱的赤道板前,控制好相邻带支柱赤道板间上下端的距离,利用带手拉葫芦的拖拉绳和拉杆等机具,调整好最后一块不带支柱的赤道板的就位位置,保证顺利组装成带。温带组装时,如北温带组装,第一块板吊装就位后立即点焊环缝,并用拖拉绳固定防止下坠,直到完成北温带组装后再松开。组装过程中,每块球壳板就位后都要及时调整好间隙、错边量及棱角,除纵缝留出适当长度不点焊外,其余全部点焊且保留卡具,确保组装质量。

2.2.2 提高组装精度

在球罐组装过程中,要严格控制各部件的组装精度。使用高精度的测量仪器,如全站仪、水准仪等,对支柱垂直度、球壳板间隙、棱角等进行测量和调整。对于支柱垂直度,误差应控制在规定范围内,以保证球罐整体的稳定性。球壳板之间的间隙应均匀一致,根据球壳板厚度和焊接工艺要求,合理确定间隙大小,一般控制在2-4mm之间。棱角度的偏差也应符合相关标准,避免因棱角超标而产生较大的焊接应力和变形。同时,在组装过程中,可采用临时支撑、定位工装等辅助工具,确保球壳板在组装过程中的位置准确,减少组装误差。

2.3 改进焊接工艺

2.3.1 控制焊接热输入

根据球壳板的材质、厚度和焊接方法,合理选择焊接参数,严格控制焊接热输入。在保证焊缝质量的前提下,尽量采用较小的焊接电流、较快的焊接速度和较少的焊接层数。例如,对于薄板焊接,可选用较小直径的焊条或焊丝,采用快速焊接技术,减少焊接区域的受热时间和热量吸收。同时,可采用多层多道焊工艺,每层焊缝的厚度不宜过大,以降低焊接热输入的累积效应。在焊接过程中,还可通过实时监测焊接电流、电压和焊接速度等参数,确保焊接热输入符合预定要求。

2.3.2 优化焊接顺序

合理的焊接顺序可以有效减小焊接变形。一般遵循先焊接纵向焊缝,后焊接环向焊缝;先焊赤道带,后焊温带、极板;先焊接大坡口面焊缝,后焊接小坡口面焊缝的原则。同时,焊工应均匀分布,并同步焊接,使焊接过程中产生的应力能够均匀分布,相互抵消一部分。例如,在球罐环缝焊接时,安排多名焊工同时从不同位置开始焊接,按照相同的焊接参数和速度进行焊接,可有效减小环缝的焊接变形。对于球壳板焊缝的第一层焊道,应采用分段退步法焊接,以减少焊接应力和变形。

2.3.3 选择合适的焊接方法

根据球罐的材质、板厚和焊接要求,选择合适的焊接方法。对于薄壁球壳板,气体保护焊(如CO₂气体保护焊、氩弧焊)因其热输入集中、焊接速度快、变形小等优点,是较为理想的焊接方法。例如,在不锈钢球罐焊接中,采用氩弧焊可以有效控制焊接变形,保证焊缝的耐腐蚀性。对于厚壁球壳板,可采用埋弧焊等高效焊接方法,但要注意控制焊接热输入和焊接顺序。此外,还可结合使用一些先进的焊接技术,如窄间隙焊接技术、激光焊接技术等,这些技术能够进一步减小焊接热影响区和焊接变形。

2.3.4 采用刚性固定法控制变形

在焊接前,利用工装夹具对球壳板进行刚性固定,限制其在焊接过程中的变形。工装夹具应具有足够的强度和刚度,能够承受焊接过程中产生的应力。例如,在球罐的丁字缝等角变形较大的部位,除用组装卡具控制外,还可加设弧形板进行刚性固定。弧形板安装在离端部100mm以内,且越近越好,一端与球壳板焊接,另一端与龙门板相焊接,并用楔子紧固。通过这种方式,可以有效减小焊接角变形。在焊接完成后,待焊缝冷却到一定温度后,再拆除工装夹具,避免因过早拆除导致焊件反弹变形。

3 实际案例分析

以某石化企业的一台4000m³液化石油气球罐现场组对焊接工程为例,该球罐设计内径为19700mm,设计压力为0.79MPa,材质为16MnR,壁厚为26-29mm。在施工过程中,

严格采用上述焊接变形控制技术措施,通过精细化管理与技术应用,实现了焊接变形的有效控制。

3.1 施工过程关键技术措施实施情况

3.1.1 球罐半成品质量控制

球壳板到货后,依据 GB12337-2014《钢制球形储罐》等相关标准,采用全站仪配合特制弧长检测工装对球壳板曲率进行复验。考虑到现场测量弦长操作复杂,改用弧长检测替代,将实际弧长与理论弧长对比,要求误差控制在 $\leq \pm 3\text{mm}$ 。在带支柱赤道板制造环节,为抵消焊接变形,在组焊前利用液压预变形装置对赤道板支柱焊接部位施加反向变形力,使赤道板产生 5-8mm 的预变形量。焊接过程中,严格控制焊接热输入,采用对称分段退焊法,将焊接电流控制在 180-220A,焊接速度保持在 15-20cm/min,每层焊缝厚度不超过 4mm。焊接完成后,将赤道板连同胎具一起送入热处理炉进行消除应力热处理,热处理温度控制在 580-620℃,保温时间根据板厚确定,冷却至室温后拆除胎具。

3.1.2 组装工艺优化

在组装过程中,采用高精度测量仪器确保组装精度。使用全站仪每隔 5m 测量一次球罐的整体圆度,要求误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内;利用塞尺和钢直尺测量球壳板之间的间隙,保证间隙在 2-3mm 之间;对于错边量,使用焊缝检验尺进行检查,控制在 $\leq 1.5\text{mm}$ 。同时,在球壳板组装过程中,使用临时支撑和定位工装进行辅助。临时支撑采用可调式钢管支架,根据球壳板的曲率和受力情况进行布置,每块球壳板至少设置 3 个支撑点,以防止球壳板在组装过程中发生变形。

在焊接工艺改进方面,选择了 CO₂气体保护焊作为焊接方法,合理控制焊接热输入,优化焊接顺序,采用刚性固定法控制变形。具体施工参数记录如下表 1 所示。

表 1 施工参数记录

施工环节	控制措施	关键参数或标准
球壳板验收	曲率、几何尺寸复验	弧长误差 $\leq \pm 3\text{mm}$, 周边翘曲度 $\leq 5\text{mm}$
带支柱赤道板制造	预变形、对称分段退焊	预变形量 5-8mm, 焊接电流 180-220A
球壳板运输	专用胎具、柔性隔离	每胎具限放 2 块, 隔离物厚度 $\geq 2\text{cm}$

参考文献:

- [1] 权昌杰.球罐现场安装的质量控制探析[J].全面腐蚀控制,2018(06).
- [2] 王清栋;许少华;王林.薄壁不锈钢球罐组焊关键技术[J].焊接技术,2018(03).
- [3] 房元斌;王勇;张立平;王灿;占小红.不同点固焊形式对焊接变形和残余应力的影响[J].电焊机,2016(09).
- [4] 成威;廖秋慧.不锈钢薄板焊接变形影响因素与控制方法[J].轻工机械,2015(01).
- [5] 曾晓虹;向凯;宋瑞艳.焊接应力和焊接变形控制[J].石油化工设备,2009(02).

赤道带组装	双吊车吊装、间隙调整	间隙 2-3mm, 错边量 $\leq 1.5\text{mm}$
温带组装	点焊固定、拖拉绳辅助	环缝点焊间距 $\leq 300\text{mm}$
焊接工艺	CO ₂ 气体保护焊、多层多道焊	焊接电流 160-200A, 焊接速度 25-35cm/min
刚性固定	弧形板+龙门板	弧形板距端部 $\leq 100\text{mm}$

3.2 焊接变形控制效果分析

通过上述措施的实施,该球罐在焊接完成后,经检测其焊接变形量得到了有效控制。焊缝的角变形控制在 3mm 以内,错边量控制在 1.5mm 以内,符合相关标准要求。为直观体现控制效果,现将焊接变形控制前后数据与标准要求进行对比,如下表 2 所示。

表 2 焊接变形控制效果

检测项目	控制前允许偏差	控制后实际值	国家标准要求
焊缝角变形(mm)	≤ 5	≤ 3	≤ 3.5
错边量(mm)	≤ 2	≤ 1.5	≤ 2
棱角度(mm)	≤ 4	≤ 3	≤ 4

从表 2 数据可知,采用本文所述控制技术措施后,球罐焊接变形的各项指标不仅满足企业内控标准,且优于国家标准要求。此外,球罐整体圆度误差控制在 $\pm 15\text{mm}$,远低于 GB12337-2014 中 $\pm 25\text{mm}$ 的要求,保证了球罐的结构稳定性和承压性能。通过经济效益测算,因焊接变形控制有效减少了返修成本,缩短工期 7 天,直接节约成本约 28 万元,同时球罐整体质量的显著提高,为后续的安全运行奠定了坚实基础。

4 结论

球罐现场组对焊接变形的控制是一个系统工程,涉及球罐半成品质量控制、组装工艺优化以及焊接工艺改进等多个方面。通过严格控制球壳板质量、合理安排组装顺序、提高组装精度、优化焊接参数和焊接顺序、选择合适的焊接方法以及采用刚性固定法等措施,可以有效减小焊接变形,提高球罐的焊接质量和安全性能。在实际工程中,应根据球罐的具体情况,综合运用各种控制技术措施,并结合实际经验不断优化和完善,以确保球罐现场组对焊接工作的顺利进行,满足工业生产对球罐质量和安全的要求。未来,随着焊接技术的不断发展,还需进一步探索和应用新的焊接变形控制技术,为球罐制造行业的发展提供更有力的技术支持。