

化工设备焊接过程中的热裂纹形成机理及预防措施

虎军明

宁夏英力特化工股份有限公司 宁夏 石嘴山 753600

摘要：化工设备焊接因服役环境苛刻，对焊接质量要求极高，而热裂纹是焊接过程中常见的缺陷之一。本文系统分析化工设备焊接热裂纹的形成机理，包括结晶裂纹、液化裂纹、多边化裂纹等类型的产生机制，探讨合金元素、结晶组织及力学因素对裂纹形成的影响。从冶金控制、工艺调整及结构设计三方面提出预防措施，为提升化工设备焊接可靠性提供理论参考。

关键词：化工设备；焊接过程中；热裂纹；形成机理；预防措施

引言：化工设备多涉及易燃易爆、高温高压介质，其焊接接头的完整性直接关系设备安全运行。焊接过程中，热裂纹作为典型的高温脆性断裂缺陷，易导致设备泄漏、结构失效，甚至引发安全事故。随着化工装备向大型化、复杂化发展，焊接热裂纹的控制已成为工程关键难题。本文聚焦化工设备焊接特点，深入剖析热裂纹在结晶、液化、多边化等阶段的形成机理，结合影响因素分析，从材料、工艺及结构设计层面提出系统性预防策略，为保障化工设备焊接质量提供理论与实践指导。

1 化工设备焊接概述

1.1 化工设备焊接特点

化工设备焊接具有显著的特殊性：其一，服役环境严苛，常需承受高温、高压、强腐蚀或交变载荷，要求焊缝具备优异的力学性能与耐蚀性；其二，设备结构复杂，多包含厚壁容器、管板接头、异种材料焊接等场景，焊接工艺难度大；其三，介质多为易燃易爆或有毒物质，对焊接接头的密封性与完整性要求极高，任何微小缺陷都可能引发安全事故；其四，设备大型化趋势下，焊接工作量大且精度要求严格，需兼顾效率与质量的平衡。这些特点使得化工设备焊接成为兼具技术性与安全性的系统工程。

1.2 焊接热裂纹对化工设备的影响

焊接热裂纹对化工设备的危害贯穿全生命周期：在制造阶段，热裂纹直接导致焊接接头强度下降，可能引发应力集中，使设备在水压试验或试运行阶段即出现泄漏；在服役阶段，裂纹会在介质腐蚀与动态载荷作用下加速扩展，导致设备耐压能力降低，甚至引发介质泄漏、爆炸等重大事故；从经济性看，热裂纹需通过返修处理，增加制造成本与工期，若设备投入使用后因裂纹失效，还可能造成停产损失与环境危害^[1]。

2 焊接热裂纹形成机理

2.1 结晶裂纹形成机理

结晶裂纹主要产生于焊缝金属凝固后期，是化工设备焊接中最常见的热裂纹类型。焊接过程中，熔池金属在冷却结晶时，低熔点共晶物（如FeS-Fe共晶，熔点仅985℃）被排挤到晶界形成液态薄膜。随着晶粒不断生长，液态薄膜逐渐被拉伸成薄片状。当焊缝金属凝固收缩产生的拉应力超过液态薄膜的强度，或拉伸应变超过其塑性变形能力时，就会在晶界处引发开裂。同时，焊接过程中熔池的快速冷却导致焊缝组织不均匀，柱状晶粗大且取向一致，进一步削弱了晶界结合力，为裂纹扩展提供路径。

2.2 液化裂纹形成机理

液化裂纹产生于焊接热影响区（HAZ）或多层焊的层间金属，是由于局部金属在焊接热循环作用下发生局部熔化而形成。在焊接高温下，母材或焊缝中的低熔点共晶相、杂质（如硼、硅、磷等形成的低熔点化合物）以及晶界处的偏析元素，会在远低于母材熔点的温度下发生液化。随后，焊接应力使这些液化层承受拉伸作用，当应力超过液化层的强度时，便形成裂纹。此外，热影响区晶粒粗大、晶界强度降低，也为液化裂纹的产生创造了条件。

2.3 多边化裂纹形成机理

多边化裂纹形成于焊缝金属高温固态阶段，是在晶粒内部晶格缺陷聚集和重新排列过程中产生的。焊接过程中，焊缝金属在高温下存在大量的位错、空位等晶格缺陷。当焊缝冷却时，这些缺陷会在一定温度区间（约0.5-0.7倍熔点温度）发生聚集和重新排列，形成亚晶界，即多边化结构。由于亚晶界处存在应力集中，且其原子排列不规则、结合力较弱，在焊接残余应力或外部载荷作用下，亚晶界处的应力超过其强度，就会引发裂纹。

多边化裂纹通常垂直于焊缝轴线，裂纹表面无明显氧化特征，其形成与焊接冷却速度、晶粒尺寸以及合金元素含量密切相关，对化工设备的疲劳性能和长期稳定性产生不利影响。

2.4 高温低塑性裂纹形成机理

高温低塑性裂纹主要出现在焊缝金属和近缝区，形成于固相线温度附近的高温低塑性区间。在此温度范围内，金属处于部分固态、部分液态的两相状态，晶界存在少量未完全凝固的液相，晶粒之间的结合力较弱，塑性显著降低。焊接过程中，熔池金属的凝固收缩和热膨胀不均产生较大的拉伸应力，当该应力超过金属在此高温低塑性状态下的抗拉强度时，裂纹便沿晶界萌生和扩展。此外，合金元素的偏析会进一步降低晶界的高温塑性，加剧裂纹敏感性。

2.5 再热裂纹形成机理

再热裂纹是在焊后热处理或高温服役过程中产生的，主要发生在含有沉淀强化元素（如铬、钼、钒等）的低合金钢焊接接头中。焊接过程中，热影响区粗晶部位存在大量的位错和残余应力。当接头再次加热到一定温度区间（通常为500-700℃）时，位错开始运动并聚集在晶界，形成应力集中。同时，合金元素的碳化物在晶界析出，导致晶界弱化。在焊接残余应力和热应力的共同作用下，晶界处的应力超过其强度，从而引发裂纹。再热裂纹具有延迟性，不易在焊接完成后立即发现，但一旦出现，会严重降低化工设备在高温工况下的使用寿命和安全性，尤其是对长期承受高温高压的压力容器构成重大威胁。

3 影响焊接热裂纹形成的因素

3.1 合金元素的影响

合金元素对焊接热裂纹形成具有关键作用。硫、磷等杂质元素易与铁形成低熔点共晶物，分布于晶界，降低晶界强度与塑性，显著提升热裂纹敏感性；碳元素会增加淬硬倾向，加剧组织应力，同时促进碳化物析出，弱化晶界；而锰元素能与硫形成高熔点硫化锰，减少低熔点共晶物，降低裂纹敏感性；钛、铌等强碳化物形成元素，可固定碳元素，细化晶粒，改善焊缝组织性能。合理控制合金元素成分与配比，是抑制热裂纹产生的重要途径^[2]。

3.2 一次结晶组织的影响

焊缝一次结晶组织形态直接影响热裂纹敏感性。粗大的柱状晶组织因晶界面积小、杂质易偏析，导致晶界强度下降，在应力作用下裂纹易沿晶界扩展；而细小均匀的等轴晶组织具有更高的晶界结合力与塑性，能有效

阻碍裂纹延伸。此外，结晶方向一致的柱状晶易形成脆弱面，增大裂纹扩展几率。通过调整焊接工艺或添加变质剂细化晶粒，可优化一次结晶组织，提升焊缝抗裂性能。

3.3 力学因素的影响

力学因素是热裂纹形成的直接诱因。焊接过程中，熔池金属凝固收缩、热膨胀不均产生的焊接残余应力，以及设备服役时承受的外部载荷，共同作用于焊缝及热影响区。当拉应力超过金属高温下的强度或塑性极限时，裂纹便会萌生与扩展。结构刚性越大、拘束度越高，焊接应力越难释放，热裂纹风险越高；不均匀的温度场导致局部应力集中，也会加剧裂纹敏感性。因此，控制应力状态是预防热裂纹的关键环节。

4 预防焊接热裂纹的措施

4.1 冶金控制措施

4.1.1 控制有害杂质含量

硫、磷等有害杂质易与铁形成低熔点共晶物，聚集于晶界削弱强度，显著提升热裂纹敏感性。预防时需严格把控母材与焊材质量，通过精炼工艺降低杂质，要求硫含量 $\leq 0.035\%$ 、磷含量 $\leq 0.040\%$ 。同时选用低硫磷的碱性焊条或优质焊丝，添加锰元素与硫结合成高熔点硫化锰，促进杂质排出，减少晶界缺陷，降低裂纹风险。

4.1.2 改善焊缝结晶组织

粗大柱状晶易引发杂质偏析与晶界弱化，而细小等轴晶能增强抗裂性。可添加钛、铌、钒等变质剂，其形成的化合物充当异质晶核，促进等轴晶生长。同时优化焊接工艺，采用小线能量、高焊速加快熔池冷却，细化晶粒；运用脉冲焊接技术，通过电流变化搅拌熔池，打乱柱状晶生长方向，改善结晶组织，提升焊缝抗裂性能。

4.1.3 限制稀释率

过高稀释率会使母材杂质过多融入焊缝，破坏成分平衡，加剧热裂纹倾向。可通过匹配焊材与母材成分、调整坡口设计（如采用窄坡口）、控制焊接电流与电弧长度，减少母材熔入量。选用合金含量高于母材的焊材，确保稀释后焊缝成分达标，避免因成分改变导致热裂纹，保障焊接接头质量。

4.2 工艺控制措施

4.2.1 预热和缓冷

预热与缓冷是预防焊接热裂纹的重要手段。焊接前对工件预热，能有效降低焊缝与母材间的温差，减缓冷却速度，从而减少因热胀冷缩产生的焊接应力；同时，预热有助于氢原子扩散逸出，降低氢致裂纹与热裂纹协同作用的风险。针对高碳钢、合金钢等材料，需依据其碳当量与合金成分，将预热温度精准控制在100-350℃。

焊后通过石棉布包裹、置于退火炉等缓冷措施，延长高温停留时间，促使焊缝金属均匀收缩，避免组织转变不均引发的应力集中，显著提升接头抗热裂性能。

4.2.2 控制焊缝形状

合理调控焊缝形状可有效抑制热裂纹。焊缝成形系数（宽度与计算厚度之比）需维持在1.3-2.0区间，过小的成形系数会导致焊缝窄而深，使低熔点杂质在焊缝中心聚集，形成脆弱面。实际焊接中，通过精确调节焊接电流、电弧电压与焊枪角度，可避免咬边、驼峰等缺陷，确保焊缝表面平滑过渡，减少应力集中点。此外，采用多层多道焊工艺，能细化晶粒组织，打乱柱状晶生长方向，使杂质分布更均匀，增强焊缝整体抗裂能力，保障化工设备焊接质量。

4.2.3 采用较小焊接线能量

降低焊接线能量是预防热裂纹的核心工艺。较小的线能量意味着焊缝热输入减少，可加快熔池冷却速度，细化晶粒组织，抑制低熔点共晶物在晶界偏析。实际操作中，可通过降低焊接电流、提高焊接速度、减小电弧电压实现。例如，针对厚壁化工设备，采用窄间隙焊接技术，配合小电流、高焊速工艺，既能缩小热影响区范围，降低接头软化程度，又能避免因过热导致的晶粒粗大与组织恶化，从根源上削弱热裂纹产生的驱动力，提升焊接接头的可靠性与稳定性。

4.2.4 注意收弧保护

收弧阶段的妥善处理对防止热裂纹至关重要。焊接结束时，若操作不当，弧坑处易因快速冷却、金属填充不足产生缩孔、气孔及裂纹。可采用多次断续灭弧法，逐步减小电流，使熔池缓慢凝固并填满弧坑；或利用收弧板将弧坑转移至焊件外，焊后切除。同时，精准设置收弧电流与时间参数，确保熔池充分凝固，避免收缩应力引发裂纹。对于高压、高风险化工设备，收弧后立即锤击处理，可有效释放局部应力，进一步增强接头的抗裂性能与安全性。

4.2.5 减少返修次数

减少焊接返修是控制热裂纹的关键环节。返修过程中，焊缝与热影响区多次受热，会加剧组织恶化、晶粒粗化与应力累积，大幅提升热裂纹敏感性。因此，需从源头把控质量，焊接前严格检查母材与焊材质量、规范坡口加工精度；焊接时严格执行工艺参数，利用超声探伤、X射线检测等技术实时监控。若必须返修，需制定专项工艺，严格限制同一部位的返修次数，每次返修后进行全面检测，确保焊接接头满足化工设备长期安全运行的严苛要求。

4.3 结构设计优化措施

4.3.1 增大焊缝成形系数

焊缝成形系数直接影响杂质分布与应力状态，增大成形系数是预防热裂纹的有效设计策略。当焊缝成形系数过小（焊缝窄而深）时，低熔点杂质易在焊缝中心聚集形成脆弱面，在焊接应力作用下极易诱发裂纹。通过增大成形系数至1.3-2.0，可使焊缝宽度增加、厚度减小，促使杂质均匀分散，降低晶界处应力集中。在结构设计阶段，可调整坡口角度与尺寸，采用U形、双V形坡口替代单V形坡口；同时优化焊接工艺，选择合适的焊接电流、电压及焊枪摆动幅度，使焊缝横向熔宽增加，从而改善焊缝内部组织分布，增强抗热裂性能，保障化工设备结构的长期稳定性。

4.3.2 降低接头刚性约束

过高的接头刚性约束会阻碍焊缝自由收缩，导致焊接应力无法释放，显著增加热裂纹风险。在化工设备结构设计中，可通过合理布置焊缝位置、减少交叉焊缝等方式降低刚性。例如，避免在结构转角、应力集中区域布置焊缝；采用分段焊、跳焊等方式，减少焊接过程中的拘束力。此外，设计柔性接头结构，如增加弹性元件、设置膨胀节，可有效吸收焊接变形与运行过程中的热膨胀，降低接头局部应力。对于大型设备，可采用模块化设计，减少整体结构的刚性约束，使焊缝在冷却过程中能自由收缩，从而减少热裂纹产生的力学条件，提升设备焊接结构的可靠性^[3]。

结束语

焊接热裂纹严重威胁化工设备安全运行，通过剖析其形成机理并采取针对性预防措施意义重大。上述从冶金、工艺、结构设计多维度阐述的方法，为解决热裂纹问题提供了系统方案。然而，随着化工设备向大型化、复杂化发展，新材料、新工艺不断涌现，焊接热裂纹控制仍面临挑战。未来需持续深入研究热裂纹形成规律，结合仿真技术优化焊接工艺，开发新型抗裂材料与工艺，构建更完善的焊接质量控制体系，从而为化工设备的安全稳定运行筑牢技术防线。

参考文献

- [1]戴为志.影响钢结构焊接技术进步的几个重要因素[J].电焊机,2020,50(9):207-212.
- [2]宗绮雯,刘兆坤,王玉华,等.对于建筑钢结构高强钢高效焊接技术的思考[J].城市建设理论研究,2019,9(25):127-128.
- [3]史继全,魏宏杰,霍小帅,等.浅谈施工现场钢结构焊接通病与预防[J].焊接技术,2019,48(S2):80-81.