

换热器管板与换热管胀接接头的泄漏原因分析及改进

沈 岩

洛阳智达石化工程有限公司 河南 洛阳 471003

【摘要】：换热器属于石油、化工、电力等工业领域的主要传热设备，管板和换热管的胀接接头是保证管程和壳程介质隔离的关键之处，其密封性能直接影响到换热器运行稳定、安全。胀接接头泄漏不但会影响换热效率、造成介质的浪费，严重时还会引起安全事故、经济损失。本文结合工业实际运行经验，从材料匹配不合理、胀接工艺不规范、结构设计有缺陷、工况条件影响、维护管理不到位等几个方面对胀接接头泄漏原因进行了详细的分析，并且根据不同的原因提出了相应的改进措施，给出质量控制要点，为换热器胀接接头的设计、制造、安装、维护提供技术支持，减少泄漏故障，延长换热器使用寿命，保证工业生产的连续稳定。

【关键词】：换热器；管板；换热管；胀接接头；泄漏原因；改进措施

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.023

引言

管板与换热管的连接是管壳式换热器的关键部分，胀接是一种常见的连接方法，利用外力使换热管管端产生塑性变形，与管板管孔紧密接触，形成密封面和承载面，达到管程和壳程流体隔离的目的。相比焊接连接，胀接施工简单，对材料的损伤小，便于以后的检修更换，适合在中低压、中低温环境下使用。但是由于材料、工艺、工况、维护等因素的影响，在实际运行中会出现胀接接头泄漏的问题，成为换热器故障的一个主要部位。胀接接头泄漏会使得管程和壳程的介质相互窜流，影响换热效果，使宝贵的工艺介质浪费；如果介质是易燃易爆、腐蚀性较强的物质，还可能会引起火灾、爆炸、设备腐蚀等安全事故，危及生产安全和操作人员人身安全，而且还会增加设备的维修费用以及停机造成的损失。因此，深入剖析胀接接头泄漏的根本原因，探寻科学有效的改良办法，强化胀接接头质量管控，对于改善换热器运行可靠性，保证工业生产连续稳定有着十分重要的工程实际意义。本文结合多年的工业实践经验，对胀接接头的泄漏原因进行系统的分析，并提出相应的改进措施，给工程技术人员提供一定的参考。

1 换热器管板与换热管胀接接头泄漏原因分析

1.1 材料因素

材料性能是否匹配、质量好坏，直接决定了胀接接头的密封性能以及耐久性，如果材料选择不合理或者材料本身存在缺陷，都是造成胀接接头泄漏的原因。

材料硬度匹配不合理属于最常见的一种问题。胀接的基本原理就是利用换热管的塑性变形和管板紧密贴合，所以换热管材料的硬度应小于管板材料的硬度，才能使胀接时换热管有充分的塑性变形，而不发生管板变形，保证接头贴合紧密。如果换热管的硬度大于管板，胀接时管板就会被挤压而产生塑性变形，造成管孔变大，不能形成足够的接触压力，接头间隙增大，引起泄漏。制冷设备厂使用 6061 铝合金管与 304 不锈钢管板

胀接后，由于铝管硬度大于不锈钢管板，胀接后铝管塑性变形不够，密封面贴合不严密，部分产品在运行 3 个月后就出现了泄漏。

材料自身存在的质量缺陷也会引起泄漏。若换热管或者管板材料有裂纹、夹渣、气孔等内部缺陷，在胀接时这些缺陷会被扩大，从而形成泄漏通道；如果材料的耐腐蚀性不够，在腐蚀性的介质中接触后会出现腐蚀现象，破坏密封面的完整性，使介质发生泄漏。另外材料的化学成分不均匀、力学性能波动大，会造成胀接时变形不均，接触压力分布不均，局部存在应力集中现象，长期使用易发生缝隙腐蚀，导致泄漏。

1.2 胀接工艺因素

1.2.1 胀接参数选择不合适

胀接参数包括胀接压力、胀接长度、胀度等，其选择要结合材料性能、管板和换热管的规格来定。胀接压力不够，换热管塑性变形不够，和管板贴合不好，接头有间隙，介质容易从间隙处泄漏；胀接压力过大，换热管会过度地产生塑性变形，出现管壁变薄、开裂等状况，破坏密封面的完整性，还会引起管板管孔变形，影响接头的承载能力和密封性能。胀度控制不合理也会对密封效果造成影响，贴胀胀度宜控制在 1%~3%，强度胀度要根据材料和结构来确定，胀度过小不能保证密封，胀度过大容易造成接头应力过大，易产生疲劳损伤。

1.2.2 胀接工艺操作不合理

胀接前没有对管板管孔和换热管管端做充分的清理，管孔内壁及管端表面有油污、铁锈、氧化皮等杂质，造成两者接触不良形成漏点；管端倒角、修磨不平整，会造成胀接时应力集中，容易产生裂纹。胀接过程中，胀头插入深度不够，胀接速度太快或者太慢，都会造成胀接长度不足，接触压力分布不均，局部产生未胀合现象，这是漏点。另外，胀接顺序不当会引起管板受力不均、变形过大，造成整个胀接质量不好，很多接头同时有漏。

1.2.3 胀接后检验不严

胀接完毕后没有按照标准对拉脱试验、密封性检测进行检查,不能及时发现未胀合、胀接过头、裂纹等缺陷,在运行中会逐渐发展,最终造成接头泄漏。强度胀接头必须按照标准进行拉脱试验,保证拉脱力满足要求,密封性能需要通过气密性或者水压试验来检验,如果缺少检验环节,会造成不合格接头投入使用。

1.3 结构设计因素

管板厚度不够会造成胀接时管板刚度不够,出现过变形,管孔变大,接头接触压力降低,管板上管孔排得太密,就会使相邻管孔之间壁厚过小,胀接时应力集中严重,容易产生裂纹。由于管孔加工精度不够,内壁粗糙度超标、尺寸偏差大等,都会造成换热管和管板之间的密封不好,从而产生间隙泄漏。采用开槽强度胀时,槽型设计不合理,槽深、槽宽不符合要求,或者管板厚度大于38mm、换热管外径大于14mm时没有设置足够的槽,会导致胀接接头承载能力降低、密封性差。换热管管端没有做合理的倒角处理,胀接时容易产生应力集中;换热管壁厚不均,胀接时变形不一致,接触压力分布不均,局部存在密封薄弱部位。另外胀接长度设计不合理,如强度胀的最小胀接长度不满足标准要求或者分段胀接时重叠长度不够,会造成接头密封面积小,容易造成泄漏。

1.4 工况条件因素

换热器运行时温度变化较大,频繁启动或者工况改变都会使管板与换热管热胀冷缩产生热应力。热应力长期反复作用会造成胀接接头产生疲劳损伤,接触压力逐渐降低,贴合面出现间隙,从而引起泄漏。工作温度过高或者过低都会对材料的力学性能造成影响,高温会使材料软化,接头的承载能力下降,低温会使材料脆性增大,容易出现裂纹。从研究结果可知工作温度对胀接接头有明显影响,不同的温度下接头的拉脱应力以及密封性会存在较大差别。运行中管程、壳程压力波动大,造成胀接接头接触压力呈周期性变化,长期反复作用下接头会因塑性变形累积而使贴合面间隙增大。当压力超过接头的密封压力时,介质就会从间隙处泄漏。另外,压力过高会造成接头应力大于材料的屈服强度,造成永久变形,破坏密封面。如果运行介质含有腐蚀性成分,就会使换热管与管板的接触部位受到腐蚀影响,出现电化学腐蚀、点蚀或者缝隙腐蚀等情况,从而造成密封面受损并形成泄漏通道。含有 Cl^- 、 H_2S 、 CO_2 等腐蚀性成分的介质,会加快接头腐蚀速度,缝隙腐蚀是其最常出现的形式,在换热管和管板之间存在贴合空隙时最容易发生,进而形成泄漏通道,造成接头损坏。当介质中存在杂质的时候,杂质就会在接头的贴合面上沉积,进而造成密封面的磨损,同时也会影响到接头的贴合程度,从而导致漏油。

2 换热器管板与换热管胀接接头泄漏改进措施

2.1 优化材料选择,保障材料质量

根据胀接工艺要求,选用换热管材料硬度低于管板材料硬度的组合,一般换热管硬度应比管板硬度低10到20HB,保证胀接时换热管可以有足够大的塑性变形,管板不产生过大的变形。当有应力腐蚀倾向的时候,不可以使用管端局部热处理来降低换热管的硬度,因为这样会削弱材料的耐腐蚀性。选用符合国家现行标准的管板和换热管材料,进场时必须进行严格的材料质量检验,检查材料的化学成分、力学性能、外观质量及内部缺陷,严禁使用有裂纹、夹渣、气孔等缺陷的材料。对腐蚀性工况选用耐腐蚀性能好的材料,不锈钢、镍合金、钛合金等,含 H_2S 工况选用耐硫化物腐蚀的材质,海水冷却场合用钛合金或者B30铜镍合金,从源头上提高接头的抗腐蚀能力。胀接前,对管板、换热管表面清理干净,除掉油污、铁锈、氧化皮等杂物,保证表面干净、干燥;换热管管端倒角、修磨,防止应力集中;根据材料性能,对需要时做退火处理,减小材料硬度,增加塑性,利于胀接变形。

2.2 规范胀接工艺,提高施工质量

2.2.1 改善胀接参数

根据管板和换热管的材料、尺寸规格,利用胀接工艺试验来确定合适的胀接压力、胀接长度、胀度等参数。贴胀胀度控制在1%~3%,强度胀胀度按材料及结构确定,必要时进行试验。胀接压力要均匀稳定,不能有压力过大或者不足的情况出现,胀接速度控制在合理范围内,保证变形均匀。

2.2.2 规范胀接作业

胀接前对管板管孔进行清理、修磨,保证管孔内壁光滑、无毛刺,尺寸精度满足要求;将换热管插入到管孔中,使插入深度符合设计要求,间隙控制在合理范围内。胀接时采用合理的胀接顺序,从管板中心向外对称胀接,防止管板受力不均、变形大;胀头插入深度要足够,保证胀接长度满足要求,在胀接过程中随时观察变形情况,及时调整参数。

2.2.3 加强胀接后检验

胀接完毕后,按照标准对它做拉脱试验和密封性检测。拉脱试验选3~4个被检管头,设在几何中心附近,周围配以陪衬管,保证试验结果的准确性,所有有效试件拉脱力的平均值应大于或等于规定值,单个试件的拉脱力应不小于平均值的70%。密封性检测用水压试验或者气密性试验,检验接头有无泄漏,对不合格的接头要及时返修或者更换,严禁不合格接头投入使用。

2.3 改进结构设计,减少应力集中

根据换热器的工况条件,确定管板厚度,保证管板有足够刚度,防止胀接、运行中发生过大变形;合理排布管孔,防止

管孔过密,保证相邻管孔之间有足够壁厚,减小应力集中。提高管孔加工精度,控制内壁粗糙度和尺寸偏差,保证换热管和管板接触严密。采用开槽强度胀时,根据管板厚度、换热管外径合理设计槽型、槽数,管板厚度 $>38\text{mm}$ 、换热管外径 $>14\text{mm}$ 时,至少开两道槽,复合管板应于基层金属上开槽。对换热管管端做合理的倒角处理,减小胀接时的应力集中,保证换热管壁厚均匀,防止胀接时变形不一致。合理确定胀接长度,强度胀的最小胀接长度为管板名义厚度减去 3mm 和 50mm 两者之小者,柔性胀的最小胀接长度为管板名义厚度减去 5mm 和 50mm 两者之小者;分段胀接时,胀接重叠长度不小于 5mm ,保证密封面积足够。对工况恶劣、密封要求高的地方使用胀接和焊接相结合的连接方式,胀接管口做密封用,焊缝做承载用,既可以提高接头的密封性,又可以提高接头的承载能力,减少泄漏的风险。焊接采用氩弧焊,焊缝做渗透检测或者射线检测,保证没有气孔、裂纹等缺陷。

2.4 控制运行工况,减轻接头损伤

防止换热器频繁启停,合理调节工况,减小温度变化幅度,降低热应力对胀接接头的影响。对高温工况用耐晶间腐蚀的材质,如 316L 、 Inconel 625 等代替普通不锈钢,低温工况选择低温韧性好的材料防止材料脆性断裂。严格按照设计压力运行,禁止出现压力大幅度上下波动以及超压状态,设立压力保护装置,立刻排除管程以及壳程内的不凝性气体,保证压力恒

定。定期对压力控制系统进行检查,保证其正常工作,防止由于压力异常造成接头泄漏。对运行介质实施净化处理,除去其中含有的杂质以及腐蚀性组分,从而维持介质的 pH 值处在合适的范围之内,控制介质的硬度以及 Cl^- 含量等指标,进而阻止介质与接头发生腐蚀。对于腐蚀性介质,用电化学保护、化学镀或者涂料防护等手段,大型换热器外加电流阴极保护,小型换热器牺牲阳极保护,管板及换热管表面涂覆环氧树脂、聚氨酯等耐腐蚀涂料,隔绝腐蚀介质与接头接触。

3 结论

换热器管板和换热管胀接接头漏点是由很多因素造成的,主要是由于材料不匹配造成、胀接工艺不正确、结构设计有缺陷、工况条件的影响、维护管理工作不到位等因素所引起的。这些因素互相联系、互相影响,造成胀接接头贴合不好、应力集中、腐蚀损伤等问题,从而造成换热器运行稳定性、安全性受到影响。

为了解决上述引起的泄漏问题,从选择合适的材料、规范胀接管法兰的安装工艺、改善结构设计、控制运行工况、做好设备维护等方面采取相应的改进措施,可以提高胀接接头的密封性和耐久性,减少由于泄漏所造成的故障。另外加强胀接接头质量控制,严格执行国家、行业标准及规范,从设计、制造、安装、运行、维护等各个环节入手,才能从根本上解决胀接接头泄漏问题。

参考文献:

- [1] 吴亚朝,谭万琴,陈蕾,等.换热器非对称管束结构有限元建模与力学响应分析[J/OL].炼油与化工,2026,(01):28-33[2026-04-10].
- [2] 郭瑞.煤化工企业换热器管板与管束失效分析及应对策略[J].冶金设备管理与维修,2025,43(06):5-7.
- [3] 郭瑞.煤化工企业换热器管板与管束失效分析及应对策略[J].冶金设备管理与维修,2025,43(06):5-7.
- [4] 杜立明,孟令民,张欣,等.S31603 不锈钢换热器管板焊接裂纹分析[J].中国特种设备安全,2024,40(12):81-85.
- [5] 曲美霖,李忠星,班妍妍,等.焦化厂换热器管板胀管施工技术研究[J].四川化工,2025,28(02):30-33.