

工业炉高压容器压力管道检验中的裂纹问题研究

王智慧 陈 静 丁振媛 (东营市特种设备检验研究院, 山东 东营 257000)

摘 要: 在工业发展中, 高压容器压力管道中的压力管道起到连接炉体各部件和装置的重要作用。这些管道主要承担输送高温、高压工作介质的任务, 如天然气、氧气、水蒸汽、高温烟气等。然而, 在它的长期运行中, 裂纹问题常常会出现, 可能由介质腐蚀、温度变化或设计制造缺陷等多种因素引起。裂纹问题的存在可能会导致严重的安全隐患, 因此, 对压力管道进行有效地检测和管理是非常有必要的。本文希望在研究工业炉高压容器压力管道检验中的裂纹问题, 探讨裂纹问题的成因及可能的应对措施。通过对裂纹问题进行深入分析, 可以为工业炉高压容器压力管道的安全运行提供重要参考, 有助于预防事故的发生, 保障生产安全和设备稳定运行。

关键词: 工业炉; 高压容器; 压力管道; 裂纹问题

工业炉高压容器是现代工业中的重要设备, 承担着承压工作介质的传递和储存任务。其中, 压力管道作为高压容器的重要组成部分, 其安全性直接关系到整个设备的安全运行。然而, 在长期运行和高压力的作用下, 压力管道往往会出现裂纹问题, 这不仅会影响设备的正常运行, 还可能导致严重的安全事故。

1 工业炉高压容器压力管道的作用

1.1 输送介质

工业高炉中的压力管道起到连接炉体各部件和装置的重要作用。这些管道主要承担输送高温、高压工作介质的任务, 如天然气、氧气、水蒸汽、高温烟气等。具体在运行过程中, 需要消耗大量天然气等燃气参与反应生成所需的高温。这些燃气从外部气化系统发生后, 首先进入一系列减压调节装置, 稳定控制到一定压力, 然后通过专门的输气管道送入高炉、转炉、电炉等高温反应器, 提供反应所需的热量。同时, 生成的高温烟气和余热, 也需要通过独立管路系统回收利用, 为发电系统及其他加热工序提供能量。可以看出, 这些压力管道构成了工业炉各部件和系统之间物质流动的通道, 保证反应系统的稳定供应。其可靠性和密封性对介质输送非常重要。一旦管道发生泄漏或供应中断, 会严重扰乱反应炉的正常状态, 直接影响企业生产质量。只有确保压力管道系统高效、可靠、长期稳定运行, 才能保证整个工业炉的安全生产。这需要全过程管控管道的设计、制作、安装和运行质量, 特别要加强管道关键部位的维护与检测, 确保管道系统的长期可靠运转。

1.2 保持介质压力

在工作介质输送的过程中, 压力管道内部充满高压气体或液体。如果管道强度不足, 长时间承受高压

荷载, 极易发生破裂或爆炸。所以, 压力管道在输送过程中要可靠地保持稳定的内部压力, 使介质处于最适宜的流动状态。这需要管道所用材料和组装工艺能够承受设计压力; 同时, 管道的强度也要充分考虑安全冗余。在输送系统运行过程中, 还需要压力表和释压阀来监测和调节管道内压, 防止超压问题发生。只有准确控制好管道内的介质压力, 使其稳定在最佳工作范围, 介质才能安全、有效地到达目的地, 完成燃烧反应等功能, 满足运行工业炉容器的加热、熔炼需要。

2 工业炉高压容器压力管道检验中的裂纹问题

2.1 介质的腐蚀

工业炉管道长期输送的高温烟气、矿物熔渣等介质, 含有大量二氧化硫、氯化氢等强腐蚀性物质。这些腐蚀介质与管道金属材料不断发生化学或电化学反应, 是导致管道内壁严重腐蚀、产生裂纹的主要原因。在腐蚀作用下, 金属管道的强度和弹性急剧下降, 内壁大面积损伤削弱了管道抵抗内压的能力。同时, 严重腐蚀也使金属管道变得脆性, 很容易在烟气流体的动荡影响下产生冲击疲劳断裂。即便是表面无明显腐蚀迹象的管道, 内部也可能已在强腐蚀介质的侵蚀下出现隐蔽裂纹。这类隐蔽性微小裂纹常以极快的速度扩展蔓延, 很难被传统的无损检测手段及时准确检测出来, 直接导致运行中的管道突发断裂事故。例如, 某钢铁联合企业的工业炉烟气输送管道, 在运行 8 年后发生爆炸性破裂事故。事后对断口进行检测分析, 发现断裂位置处管道内壁已遭受严重蚀害, 管壁厚度大面积锈蚀至剩余 1—2 毫米, 完全丧失承压能力。同时发现管道内壁和金属晶粒边界存在大量微观应力腐蚀裂纹, 这是导致管道猝然断裂的根本原因。由此可

见,烟气介质对金属管道的腐蚀侵蚀是个潜在的重大安全隐患,必须引起足够重视并采取有效措施进行严密防控。

2.2 温度变化

管道长期处于复杂的热负荷条件下运行,巨大的温差和温度循环是激发管道表面和内部裂纹的重要因素。高温会使金属材料的抗拉强度和屈服强度显著下降。与此同时,管道金属在反复的热胀冷缩温度变化中会产生周期性的拉压载荷。这种机械载荷的循环作用会促使管道内表面原有的微观裂纹快速发展和扩展,在很短的时间内从表面小缺陷迅速演变成贯穿管壁的大裂纹。

可以说,温度疲劳效应是金属管道使用过程中损伤逐步积累的重要过程。温度疲劳导致的微观裂纹可以以极快的速度在管道内蔓延,并最终形成贯通管壁的大裂纹或导致管道断裂。这类温度负荷致损的管道破坏具有隐蔽性和突发性很强的特点,极易导致严重后果。再者,反复的热胀冷缩也会使管道产生永久性的形变,引起管道局部应力集中,加速和加大金属腐蚀性能的下降。

2.3 设计和制造缺陷

管道设计不当和制作工艺存在的诸多问题,都是诱发和加剧管道裂纹扩展的重要原因。设计阶段的结构分析和强度计算不足,很容易出现局部应力超限集中的情况。这类超标应力集中区极易成为裂纹萌生的危险源,在实际运用中往往促发和加速裂纹的生成。另外,焊道和焊接接头也是管道易损易裂区域。焊道本身强度比较差,且焊接过程中非避免地形成了各种缺陷,这些都可演变为裂纹扩展的起点。再次,制作工艺过程中残存的各类微细缺陷,如气孔、夹杂物、表面毛刺等,也可在复杂工作条件下成长为大裂纹,从而激发管道脆性断裂。

可以看出,设计不足引起的局部超限应力,焊道及焊接缺陷,以及制作过程残留的种种微细缺陷,都大大降低了管道本身的抗裂纹安全储备,严重影响了其使用质量。这类质量问题管道一旦在高压、强腐蚀或变态载荷条件下运转,就极易出现失效。具体来说,应力集中区很快成为裂纹源;焊道及周围区域裂纹生长速度远快于管体;各种微细缺陷也在复杂条件下快速发展为大裂纹。可以说,设计和制作中的种种疏漏直接导致管道抗裂纹能力严重不足,必须引起足够重视。

3 压力容器压力管道检验中裂纹问题的应对措施

3.1 定期检测方法

建立完善的压力管道定期检查制度,按照标准规范要求,确定检查周期和检查项目。常规采用目视检查是最基本的方法,工人用肉眼观察管道表面是否有明显的裂纹、坑蚀、变形等情况。渗透检测是在管道表面喷涂渗透液后,从表面是否有液体渗出来判断里面是否有裂纹。磁粉检测则利用磁化管道,磁性粉末会聚集在管道表面裂纹处。而超声波检测是从管道外部发出高频声波,接收传播回来的信号,按照反射判断内部是否有缺陷。这些方法可以找出管道表层的缺陷情况。

对于重要管道的关键节点,如弯头、法兰等,还需要用X射线机从外部进行透射,形成内部投影图,直接观察管道内壁与结构是否有严重腐蚀或裂纹,这样可以探测到表面检查不到的内部缺陷。在检测完成后,还需要对管道采取加压实验。管道两端关闭,从进口端源源不断地向管道内充入水或空气,逐步提升其内部压力,直至达到管道设计工作压力或稍高的测试压力。

加压过程中,沿管道布置多点压力传感器和变形检测设备,实时监测其轴向和环向的应力应变响应,同时对所有接头、弯头等关键部位进行泄漏检查。如果在试验压力下发现明显的泄漏点或变形异常,则表明管道强度和密封性能不合格。

完成各项试验后,管道评定小组应组织资深的无损检测或管道评定专家,对试验过程中的原始数据、检测报告、图像等进行全面的综合分析,结合管道的运行历史数据,根据行业标准规程做出管道质量的最终判断结果,给出评定结论。判定该管道是否可以继续安全输送介质,如果不能满足安全要求,还需指出存在的主要质量问题,如金属损失、应力腐蚀开裂等;如果允许继续运行,应确定下一次检测的期限。对无法继续使用的管道,评定组还需提出后续的处理建议,比如维修、补强、更换的方法和合理期限,作为管道运营企业制定维护方案的技术支撑。这种加压试验检验了管道的整体密封性能,配合检测结果可以更准确地评估管道的实际状态,找出其中可能出现故障的薄弱环节,以便及时预防和消除安全隐患。

3.2 优化设计方法

在设计阶段全面分析管道的力学性能指标,做好温度场及流体力学计算,确定设计安全系数。优化管道结

构形式应考虑采用直径大、壁厚适中的圆管或矩形管，并在必要部位设置强化筋，这样可以提高管道的整体刚度和承压能力。管道材料应选用强度高、塑性好的优质钢材，保证管体和接头具有足够的机械性能。

同时，应沿管道长度方向合理设置支座，将管道分段支撑，避免单跨超长产生大变形。支座附近的管壁厚度应适当加大，以减轻应力集中。还可在支座设置补偿装置，吸收温度变化导致的管道伸缩。通过优化管道结构设计，提高其整体刚度，改善抗压强度和稳定性，可以有效减少和消除管道局部应力过度集中情况的发生，降低疲劳断裂风险，提高管道系统的安全性和可靠性。

管道系统中，节点部位如弯头、三通、法兰等的焊接接头最易成为疲劳破坏和裂纹产生的薄弱环节，严重影响管道的安全性和使用寿命。因此，这些关键部位的设计和制作需要格外重视。例如三通节点，需采用轻量化设计理念，补强边缘，避免显著的壁厚变化，减轻结构刚度跳变，科学进行传力设计；在制作过程中，选择性能优良的焊条和材料，严格控制预热、熔化及冷却速率，防止出现热裂纹；同时利用颜色法、扫描法等先进的无损检测技术确保焊缝质量；安装前还要采取补偿应力、局部预载等措施，以消除残余应力。通过严格执行以上标准化的设计、焊接、检测和安装工艺流程，使管道节点质量和性能得以可靠保证，从源头减少疲劳故障的发生概率，提高管道系统的抗压强度和使用寿命。

3.3 加强维护方法

为加强管道的维护保养，应建立健全日常巡视制度。管道运行期间，专职人员应按照预先制定的计划时间表，定期沿线检查管道，重点关注管道的关键部位，如弯头、三通、法兰等，检查是否出现明显的腐蚀坑洞、裂纹等损坏。同时利用测量标志点的位移情况，判断管道是否发生形变。日常巡视还应包括清扫管道表面黏附的各种杂质。对于原油、凝水等易产生沉积的管道，要定期实施停运清洗。工作人员打开管线间隔一定距离设置的人孔，使用手工或机械设备，清除管壁内聚积的各种沉淀物，必要时可使用高压水枪（压力可达 2000BAR）对管壁进行强力冲刷，以彻底清除内壁的污垢。清洗后，可利用涡流、磁粉或超声波等方法进行管壁全面探伤，检查是否存在疏漏、裂缝或缺陷，确保管道壁体的完整性，为后续安全运输创造条件。对于公输管道系统中局部严重腐蚀的管

段，我们可以采用预制高分子复合衬里的方式进行修复加固，使该管段恢复运输能力。例如某原油管道 A 点至 B 点段（长度 3000 米）经检测发现局部严重腐蚀，经评估需采用衬里修复。可以先对该管段进行停运、排空、清洗处理，然后根据实际腐蚀情况，在管道内壁定制制作适配衬里，一般选用耐腐蚀的高分子材料（如特种塑料、玻璃钢等）制作衬里管，使用特殊胶水粘接在局部损坏严重的原管道内壁上，形成一个同心“新管道”，从而彻底解决原管道的腐蚀问题。对承受较高内压或外载荷的管段和节点部位，可通过在它的外部焊接安装薄壁的加强套管或增大截面的补强串，来提高其结构强度，有效消除或控制内部应力集中导致的管壁或焊缝断裂问题。这种外补技术操作简便，可根据实际情况进行局部加固，避免全线停运。对输送强腐蚀介质的管道，则需在设计阶段采用耐腐蚀材料制作衬里层，也可通过后期维修采用内衬的方式提供护蚀。

4 结束语

工业炉高压容器压力管道中裂纹问题的产生有多方面原因，主要包括腐蚀介质的侵蚀、温度疲劳效应以及本身设计制造缺陷等。这些因素导致管道强度下降、产生微裂纹并快速扩展，最终引发破裂事故。为防范这一风险，必须从管道全生命周期着手，采取定期检测、优化设计和加强维护等综合措施，确保输送系统的安全可靠运行。只有管道质量得以有效控制，设计制造与防腐维护等关键环节得以重点加强，才能有效降低高压容器过程中压力管道裂纹故障的发生频率与危害程度。这关乎企业安全生产的大局，需高度重视并采取切实可行的应对策略，从源头上有效防控。

参考文献：

- [1] 江磊,高迎熙.炉水取样分析监测提质节能系统在高压锅炉的应用[J].节能与环保,2023,(06):87-89.
- [2] 任蕴佳,苗庆伟,刘联胜等.喷雾冷却技术在工业炉领域应用的研究综述[J].工业炉,2020,42(04):21-24+30.
- [3] 第十八届中国国际工业炉及热工技术展览会[J].工业炉,2020,42(01):73.
- [4] 刘武军.锅炉容器中压力管道的检验及裂纹的预防[J].设备管理与维修,2020,(04):77-78.
- [5] 韩志扬.锅炉高压容器压力管道检验中的裂纹问题与预防办法[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(12):49-50.