

承压类特种设备检验中裂纹分析及预防

孙磊

临沂市特种设备检验研究院 山东 临沂 276000

【摘要】：在各种因素的影响下，锅炉压力容器压力管道（承压类特种设备，以下简称承压设备）检验中经常发现裂纹，当裂纹扩展达到设备失效点时，承压设备将破裂，各类高温、高压、易爆、有毒介质泄漏，对人的生命和财产安全构成严重威胁。因此，承压类特种设备相关管理、作业人员尤其检验人员应更加重视检查、检验中发现的裂纹问题，汇总研究裂纹形成机理，并在设备各环节进行有效预防。

【关键词】：承压类特种设备；裂纹；预防

引言

如果承压类特种设备在运行中因裂纹类损失模式而产生失效，其破坏性巨大且较其他损伤模式产生的失效迅速、难以挽回。如2015年某管道操作引发“液击”导致存在焊接缺陷的管道焊接接头断裂，造成重大生产安全责任事故；2016年某锅炉高压主蒸汽管道的“一体焊接式长径喷嘴”裂爆，导致发生一起重大高压蒸汽管道裂爆事故。事故种种威胁人的生命和财产安全，我们需要从事故中汲取教训，认真总结并有效预防。

1、承压类特种设备裂纹大致分类（金属设备）

1.1 按特种设备相关环节分类

裂纹是指部件表面或内部的完整性或连续性被破坏的一种现象，是断裂的前期。跟裂纹相关的承压类特种设备环节大致分为四个环节：一为生产环节：包含锅炉压力容器压力管道的设计、制造、安装、改造、修理；二为使用环节：指使用单位各项使用管理；三为检验检测环节：指各承压类特种设备的年度检验（外部检验）、定期检验（内部检验）、基于风险评估的设备检验（RBI-Risk based inspection）、合于使用评价等；四为断裂失效分析环节：主要指断裂后的分析研究，包括事故分析、实验分析等。其中生产、使用环节为裂纹源头，其形成和扩展基本在此、真正的预防也在此；检验检测环节主要为发现裂纹类及其他损伤，排除安全隐患；断裂为裂纹的后期，是裂纹全面分析的实践基础。

1.2 按裂纹起源起源分类

按裂纹起源起源大致分为制造裂纹、使用裂纹或扩展裂纹。一、制造裂纹是在承压类设备制造过程或其原材料制造过程阶段产生的，分为铸造裂纹（冷裂纹、热裂纹）、锻造裂纹（过烧裂纹、冷裂纹、热脆裂纹、折叠、皮下气泡）、焊接裂纹（冷裂纹、热裂纹、消除应力裂纹也称再热裂纹、延迟裂纹、晶间腐蚀等）、热处理裂纹（淬火龟裂纹、淬火

直裂纹、过热裂纹等）、加工裂纹（磨削裂纹等）。二、使用裂纹是承压类设备在服役过程中因不同工况环境敏感性或超工况运行等原因造成的初始形成裂纹，可参考GB/T30579-2014《承压设备损伤模式识别》，其中裂纹相关分为环境开裂（主要各类应力腐蚀开裂）、材质劣化裂纹（如石墨化、再热裂纹等）、机械损伤裂纹（疲劳裂纹等）。三、扩展裂纹是在制造阶段形成而未被发现，设备进入使用阶段后，由使用工况作用进而扩展的裂纹，例如某省市场监督管理系统对电站锅炉大排查大整治过程中，由检验机构对阀门阀体进行检测，发现大量阀体外表面裂纹，某单位电站锅炉主蒸汽管道及连接母管中十个高龄阀体九个开裂，修理单位打磨至16mm左右仍未见消除，裂纹源基本是铸造类阀体的疏松、气孔等或锻造阀体与接管焊接缺欠等，加上长时间的高温、高压、管道温差应力、开停车温差疲劳等共同造成此类裂纹。

2、承压类特种设备检验中常见裂纹分析

2.1 由温度和时间引起的裂纹（多在生产环节）

冷裂纹是指在焊接接头冷却到较低温度时(对于钢来说在MS温度，即奥氏体开始转变为马氏体的温度以下)所产生的焊接裂纹。最主要、最常见的冷裂纹为延迟裂纹(即在焊后延迟一段时间才发生的裂纹，因为氢是最活跃的诱发因素，而氢在金属中扩散、聚集和诱发裂纹需要一定的时间)。冷裂纹的延迟时间不定，由几秒钟到几年不等。焊接接头冷却到较低温度下时产生的焊接裂纹叫冷裂纹。主要发生在重碳钢、高碳钢、低合金高强钢、中合金钢高强钢、马氏体不锈钢的焊接热影响区，一些超高强度钢、钛合金有时也出现在焊缝中。焊接冷裂纹主要分布在焊道下、焊缝根部、焊趾、焊缝表面，具有沿晶及穿晶断裂特征，断口明亮有金属光泽，同热裂纹一样，其断裂条件是：焊接接头局部位置的延性 δ_{min} 不足以承受所发生的应变占的作用，即 $\epsilon \geq \delta_{min}$ 时发生断裂。焊接冷裂纹包括淬硬脆化裂纹、延迟裂纹、低塑性

脆化裂纹。

热裂纹是指在高温下结晶时产生的,而且都是沿晶开裂,所以也称为结晶裂纹。这种裂纹可在显微镜下观察到,具有晶间破坏的特征,在裂纹的断面上多数具有氧化色。热裂纹主要出现在含杂质较多的焊缝中(特别是含硫、磷、碳较多的碳钢焊缝中)和单相奥氏体或某些铝合金焊缝中,有时也产生在热影响区中。有纵向的,也有横向的。焊接热裂纹(welding hot breaking)多产生于接近固相线的高温下,有沿晶界分布的特征,有时也能在低于固相线的温度下沿着“多边化边界”形成。焊接热裂纹通常产生于焊缝金属内,也可能在焊接熔合线邻近的热影响区组织内(母材金属)。按裂纹产生的机理、形态和温度区间不同,焊接热裂纹可分为:凝固裂纹,液化裂纹,多边化裂纹和失塑裂纹四种。

再热裂纹是指一些含铬、钼或钒的耐热钢、高强钢焊接后,为消除焊后残余应力,改善接头金相组织和力学性能,而进行消除应力热处理过程中产生的裂纹。这种裂纹多发生在低合金高强钢、珠光体耐热钢、奥氏体不锈钢、镍基合金等的焊接接头中,特别是热影响区的粗晶区。一些耐热钢和合金的焊接接头在高温服役时见到的开裂现象,也可称为再热裂纹。在消除内应力热处理过程中产生的裂纹又称为消除应力处理裂纹,简称SR裂纹。

2.2 环境开裂(使用环节)

按GB/T30579-2014《承压设备损伤模式识别》第五章共分为13中开裂机理,但汇总起来主要还是应力腐蚀开裂。应力腐蚀开裂是指承受应力的合金在腐蚀性环境中由于裂纹的扩展而发生失效的一种通用术语。

应力腐蚀开裂具有脆性断口形貌,但它也可能发生于韧性高的材料中。发生应力腐蚀开裂的必要条件是要有拉应力(不论是残余应力还是外加应力,或者两者兼而有之)和特定的腐蚀介质存在。裂纹的形成和扩展大致与拉应力方向垂直。这个导致应力腐蚀开裂的应力值,要比没有腐蚀介质存在时材料断裂所需要的应力值小得多。在微观上,穿过晶粒的裂纹称为穿晶裂纹,而沿晶界扩图的裂纹称为沿晶裂纹,当应力腐蚀开裂扩展至其一深度时(此处,承受载荷的材料断面上的应力达到它在空气中的断裂应力),则材料就按正常的裂纹(在韧性材料中,通常是通过显微缺陷的聚合)而断开。因此,由于应力腐蚀开裂而失效的部件的断面,将包含有应力腐蚀开裂的特征区域以及与已微缺陷的聚合相联系的“韧窝”区域。

2.3 材质劣化、机械损伤裂纹(使用环节)

材质劣化裂纹指钢长期在一定的敏感温度下出现金相组织变化,造成材料性能下降,由微观的晶间开裂逐步扩展至宏观的裂纹,主要表现为钢的球化、石墨化、敏化-晶间腐蚀等造成的开裂;机械损伤裂纹主要指疲劳裂纹,疲劳裂纹钢在交变压力作用下,经过一段时间后,在局部高应力区形成微小裂纹,再由微小裂纹逐渐扩展以致断裂。疲劳破坏具有在时间上的突发性,在位置上的局部性及对环境和缺陷的敏感性等特点,故疲劳破坏常不易被及时发现且易于造成事故。应力幅值、平均应力大小和循环次数是影响金属疲劳的三个主要因素。

3、承压类特种设备裂纹预防讨论

3.1 特种设备环节控制预防

第一、生产环节是控制的基础。在目前控制体系逐步完善的环境下,环节控制重在人的管理,任何环节不是看制度全不全,而是人的执行情况如何。大致分为几个方面:设计方面,严控设计“套图”,严控审核流程,控提高设计相关人员专业水平及行业素养;制造方面,提高特种设备制造单位尤其安装、改造及修理单位行业准入门槛,提高其对特种设备的重视程度;监督检验方面,监督检验机构应严控生产单位的质保体系实施,严格执行国家法律、法规、安全技术规范及相关标准要求;监管方面,安全管理部门尤其一线监察部门应具备相关基础知识并对各环节单位进行有效监察。

第二、使用环节是控制的关键。目前落实使用单位主体责任,有效的改变了很多使用单位管理者的观念,特种设备使用管理方面的落实和执行仍有待提高。除了严控《特种设备使用管理规则》的执行外,还建议使用单位管理者重视对管理、操作人员提供有效及时的技术培训,提高操作人员的专业素养,严格按各岗位规章制度执行;

第三、检验检测环节是控制安全保障。检验检测人员除了必须做到持证上岗外,也应了解材料、结构、使用环境影响等方面专业知识,才能有的放矢的进行抽样检验、选用合理有效的检测方法对各类裂纹进行有效排查,也应要有足够的责任心才能在各种恶劣的环境下耐心进行检验检测、才能做到真正的公平、公正,才能做到防患于未然。

3.2 裂纹机理方面控制预防

第一、目前原材料制造水平有所提升,在制造或安装前严格按照相应安全技术规范要求验收、存放、使用管理即可,在制造裂纹方面大多应重视焊接管理,即预防冷裂纹、热裂纹、再热裂纹等。a、冷裂纹预防:焊前按规定要求严

格烘干焊条、焊剂，以减少氢的来源；严格清理坡口及两侧的污物、水分及锈，控制环境温度；选用优质的低氢型焊接材料及其焊接工艺；焊接淬硬性较强的低合金高强度钢时，采用奥氏体不锈钢焊条；正确选择焊接参数、预热、缓冷、后热以及焊后热处理等；选择合理的焊接顺序，减小焊接内应力；适当增加焊接电流，减慢焊接速度，可减慢热影响区冷却速度，防止形成淬硬组织。

b、热裂纹预防：控制焊缝中的有害杂质的含量，即碳、硫、磷的含量，减少熔池中低熔点共晶体的形成；焊缝金属中硫、磷的含量一般小于0.03%。焊丝中的碳质量分数不超过0.12%；重要构件焊接应采用碱性焊条或焊剂；控制焊接参数，适当提高焊缝形状系数，尽量避免得到深而窄的焊缝；采用多层、多道焊，焊前预热和焊后缓冷，正确选用焊接接头形式，合理安排焊接顺序，尽量采用对称施焊；采用收弧板将弧坑引至焊件外面，这样，即使发生弧坑裂纹也不影响焊件本身。

c、再热裂纹预防：控制母材及焊缝金属的化学成分，适当调整对再热裂纹影响大的元素（如铬、钒、硼）的含量。减小接头刚度和应力集中，将焊缝及其与母材交界处打磨光滑。选用高热输入进行焊接。提高预热和后热温度。在焊接过程中采取减小焊接应力的工艺措施，如使用小直径焊条、小焊接参数焊接、焊接时不摆动焊条等。消除应力回火处理时，应避免产生再热裂纹的敏感温度区，敏感温度随钢种而异。

第二、使用中环境开裂主要讨论应力腐蚀开裂的预防：

a、材料预防，合理选择材料，针对零件所受的应力和使用条件选用耐应力腐蚀的材料，这是一个基本原则。如铜对氨的应力腐蚀敏感性很高，因此，接触氨的零件应避免使用铜合金；又如在高浓度氯化物介质中，一般可选用不含镍、铜或仅含微量镍、铜的低碳高铬铁素体不锈钢，或含硅较高的铬镍不锈钢，也可选用镍基和铁-镍基耐蚀合金。

b、应力预防：减少或消除零件中的残余拉应力。残余拉应力是产生应力腐蚀的重要条件。为此，设计上应尽量减小零件上的应力集中。从工艺上说，加热和冷却要均匀，必要时采用退火工艺以消除内应力。或者采用喷丸或表面热处理，使零件表层产生一定的残余压应力对防止应力腐蚀也是有效的。

c、介质：改善介质条件。一方面设法减少或消除促进应力腐蚀开裂的有害化学离子；另一方面，也可以在腐蚀介质中添加缓蚀剂。

参考文献：

- [1] 易志刚 . 锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题 [J]. 当代化工研究 ,2018(9):158-159.
- [2] 蔡政国 . 锅炉压力容器压力管道检验中裂纹问题及预防处理方法分析 [J]. 现代制造技术与装备 ,2017(6):155+157.
- [3] 刘玉鑫 . 锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题 [J]. 中国设备工程 ,2017(1):44-45.
- [4] 余震 . 关于存在裂纹的压力容器疲劳断裂研究 [J]. 化学工程与装备 ,2017(12):187-188.

d、电化学保护：由于金属在介质中只有在一定的电极电位范围内才会产生应力腐蚀，因此采用外加电位的方法，使金属在介质中的电位远离应力腐蚀敏感电位区域，这也是防止应力腐蚀的一种措施，一般采用阴极保护法。不过，对高强度钢和其他氢脆敏感的材料，不能采用这种保护方法。有时采用牺牲阳极法进行电化学保护也是很有效。

第三、使用中其他裂纹主要讨论敏华晶间腐蚀的预防：

(1)控制含碳量，通常控制基本金属和焊条的含碳量在0.08%以下。(2)添加稳定剂，在钢材和焊接材料中加入钛、铌等与碳的亲合力比铬强的元素。(3)进行固溶处理，将焊接接头进行固溶处理，方法是在焊后把焊接接头加热到1050-1100℃，此时碳又重新溶入奥氏体中，然后迅速冷却，稳定了奥氏体组织。另外，也可以进行850~900℃保温2h的稳定化热处理，此时奥氏体晶粒内部的铬逐步扩散到晶界，晶界处的含铬量又重新恢复到大于12%，这样就不会产生晶间腐蚀。(4)采用双相组织，在焊缝中加入铁素体形成元素，如铬、硅、铝、钼等，以使焊缝由原来的奥氏体单相组织转化成奥氏体加铁素体的双相组织。但应该注意的是：焊缝金属中铁素体含量不宜过多，否则也会使焊缝变脆。实践证明焊缝金属中铁素体含量在5-10%时，可有效地减少晶间腐蚀的产生。(5)加快冷却速度因为奥氏体钢含碳量低，不会产生淬硬现象，所以在焊接过程中，可以设法增加焊接接头的冷却速度，如焊件下用铜垫板，或直接浇水冷却。在焊接工艺上，可以采用小电流、大焊速、短弧、多道焊等措施，目的是缩短焊接接头在危险温度区(450~850℃)停留的时间，使其不致形成贫铬区，从而有效的防止了晶间腐蚀的产生。此外，还必须注意焊接次序，即与腐蚀介质接触的焊缝应最后焊接，尽量不使它受重复的焊接热循环作用。

结束语

承压设备各规范、标准对于裂纹的要求比较统一：不允许存在。在各个环节对各类裂纹进行分析，从有效分析到精准预防，才能保证承压设备制造质量和使用过程安全，才能减少锅炉压力容器压力管道中裂纹引发事故的发生，才能保证人的生命和财产安全。