

承压特种设备检验的裂纹问题分析

林晓龙

内蒙古自治区特种设备检验研究院通辽分院 内蒙古 通辽 028000

摘要: 本文深入探讨了承压特种设备检验中裂纹问题的分类、特征、产生机理、检测技术、修复与预防策略。通过对裂纹类型、物理与力学特征、材料因素、工艺因素、运行因素的分析,阐述了裂纹产生的根源。介绍了无损检测技术、新兴检测技术及其对比选择,提出了裂纹修复技术和预防措施,为承压特种设备的安全运行提供理论支持和实践指导。

关键词: 承压特种设备; 裂纹; 检测技术; 修复技术; 预防措施

引言: 承压特种设备广泛应用于工业生产中,其安全性至关重要。裂纹作为常见的缺陷形式,严重影响设备的正常运行,甚至可能引发重大安全事故。深入研究承压特种设备检验中的裂纹问题,掌握裂纹的分类、特征、产生机理、检测方法、修复与预防策略,对于保障设备安全运行具有重要意义。

1 裂纹的分类与基本特征

1.1 裂纹类型划分

依据成因,裂纹可分为疲劳裂纹、应力腐蚀裂纹、氢致裂纹等多种类型。疲劳裂纹主要是由于材料在承受交变载荷作用下,经过一定循环次数后产生。在长期的循环加载过程中,材料内部微观结构逐渐发生变化,局部区域萌生微小裂纹,随着循环次数增加,裂纹不断扩展,最终可能导致材料断裂^[1]。应力腐蚀裂纹则是在特定腐蚀介质与拉伸应力共同作用下产生的。某些金属材料在特定介质中,如不锈钢在含氯离子的溶液里,即使所受应力远低于材料的屈服强度,也可能因应力腐蚀而出现裂纹。氢致裂纹是由于氢原子进入材料内部,在局部聚集形成较高的氢压,促使裂纹萌生与扩展,像高强度钢在酸洗、电镀等过程中,若氢原子渗入就易引发此类裂纹。从形态角度来看,裂纹可分为表面裂纹、埋藏裂纹、穿透裂纹等。表面裂纹顾名思义,是出现在材料表面的裂纹,这类裂纹相对容易被检测到。其产生可能与材料表面加工损伤、环境侵蚀等因素有关。埋藏裂纹则位于材料内部,检测难度较大。它的形成往往与材料内部的夹杂、气孔等缺陷有关,在后续加工或服役过程中,受应力作用而发展为裂纹。穿透裂纹是贯穿整个材料厚度的裂纹,对材料结构完整性破坏最为严重,一旦出现,可能直接导致结构丧失承载能力。

1.2 裂纹的物理与力学特征

裂纹的微观特征包括晶界开裂和解理面等情况。晶

界开裂是指裂纹沿着晶粒边界扩展,这是因为晶界处原子排列不规则,原子间结合力相对较弱,在受力或其他因素影响下,容易成为裂纹扩展的路径。解理面则是材料在特定晶体学平面上发生脆性断裂形成的光滑平面,常见于一些体心立方金属材料中。在宏观特征方面,裂纹具有长度、深度、走向和分布规律等特性。裂纹长度直接反映了其在材料表面或内部扩展的范围,较长的裂纹对材料性能影响更为显著。深度体现了裂纹向材料内部侵入的程度,埋藏裂纹和穿透裂纹的深度是评估其危害程度的重要指标。裂纹走向关乎其对材料力学性能的影响方向,不同走向的裂纹在受力时对材料承载能力的削弱方式不同。而裂纹的分布规律,如均匀分布或集中分布,也会影响材料整体性能,集中分布的裂纹更容易引发材料局部破坏,进而导致整体失效。

2 裂纹产生机理分析

2.1 材料因素

金属材料的微观组织缺陷在裂纹产生中扮演着重要角色。夹杂物作为材料中不连续的异质相,其与基体材料的力学性能和物理性能存在差异。在受力时,夹杂物周围易产生应力集中,成为裂纹萌生的潜在位置。偏析现象,即合金元素在材料中分布不均匀,会导致材料局部化学成分和性能的不一致。例如,在钢铁材料中,碳元素的偏析可能使局部区域硬度和脆性增加,降低材料的韧性,从而促使裂纹的产生。晶粒度同样对裂纹产生有影响,细小的晶粒由于晶界面积大,能有效阻碍裂纹扩展;而粗大晶粒晶界相对较少,裂纹更容易在晶界间传播。材料性能退化也是引发裂纹的关键因素^[2]。蠕变是材料在长时间的高温 and 恒定应力作用下,缓慢产生塑性变形的现象。随着时间推移,材料内部微观结构发生变化,空洞在晶界处形成并逐渐聚集长大,最终连接形成裂纹。疲劳则是在交变载荷作用下,材料内部微观结构

损伤不断累积的过程。经过一定循环次数后,材料局部出现滑移带,进而发展为微裂纹。脆化现象,如低温脆化、回火脆化等,会使材料的韧性大幅降低,在受到较小外力时就容易产生裂纹。

2.2 工艺因素

制造工艺缺陷是裂纹产生的常见诱因。焊接残余应力在焊接过程中不可避免地产生,焊接时局部区域经历快速的加热和冷却过程,导致材料热胀冷缩不均匀,从而形成较高的残余应力。当残余应力与工作应力叠加超过材料的屈服强度时,就可能引发裂纹。热处理不当同样会影响材料性能,比如淬火温度过高或冷却速度过快,可能导致材料内部产生过大的内应力,形成淬火裂纹。加工损伤也会促使裂纹产生。冷加工硬化是金属材料在冷加工过程中,由于位错密度增加,导致材料强度和硬度提高,而塑性和韧性下降。这种加工硬化状态的材料在后续使用中,若受到外力作用,容易在硬化区域产生裂纹。表面划痕作为材料表面的局部损伤,会破坏材料表面的完整性,在划痕处形成应力集中,为裂纹的萌生创造条件。

2.3 运行因素

交变载荷与疲劳损伤密切相关。在实际运行中,许多结构承受着交变载荷,如桥梁承受车辆的反复作用,机械零件在运转过程中承受周期性应力。这种交变载荷使得材料内部微观结构不断发生变化,微观缺陷逐渐积累,最终形成疲劳裂纹。随着载荷循环次数增加,裂纹不断扩展,直至材料失效。介质腐蚀与应力腐蚀耦合作用对裂纹产生影响巨大。在腐蚀介质环境中,材料表面发生化学反应,形成腐蚀产物,削弱了材料的承载能力。当材料同时承受拉伸应力时,应力与腐蚀相互促进,加速裂纹的萌生与扩展。例如,在化工设备中,金属材料在含腐蚀性介质的环境下,应力腐蚀开裂的风险显著增加。温度梯度与热应力也是导致裂纹产生的运行因素。在温度变化剧烈的情况下,材料内部不同部位由于热胀冷缩程度不同,会产生温度梯度,进而形成热应力。当热应力超过材料的承受能力时,就可能引发裂纹。像一些在高温环境下工作的设备,启动和停机过程中,温度的急剧变化容易使材料产生热应力裂纹。

3 裂纹检测技术与方法

3.1 无损检测技术

无损检测技术对保障材料与结构的安全至关重要,不同检测方法各有其独特之处。表面检测中,磁粉检测适用于铁磁性材料。基于铁磁性材料表面及近表面裂纹会形成漏磁场,吸引施加的磁粉,进而清晰显示裂纹位

置与形状。该方法对表面开口裂纹检测灵敏度颇高,操作便捷、成本较低,在铁磁性材料工件的表面检测中广泛应用。渗透检测依据毛细作用原理,将含色染料或荧光剂的渗透液涂覆在工件表面,渗透液渗入裂纹^[3]。经清洗、显像,裂纹中的渗透液被吸附显现,可检测出各种非多孔性材料表面开口的细微裂纹,涵盖金属、陶瓷、塑料等多种材质。针对埋藏裂纹检测,超声检测是向材料发射超声波,利用超声波在材料内部传播遇裂纹等缺陷时发生的反射、折射和散射特性,通过接收并分析反射波来判断裂纹的存在、位置、大小与形状。其对内部缺陷检测灵敏度高,可检测较厚工件,且对人体无危害。射线检测借助射线(如X射线、 γ 射线)穿透材料,因裂纹等缺陷与材料基体对射线吸收程度不同,在成像板或胶片上形成不同灰度影像以识别裂纹。此方法能直观呈现缺陷形状、尺寸和位置,检测结果可长期留存,但射线对人体有伤害,需严格防护。电磁检测里,涡流检测通过靠近导电材料的通交流电线圈,使材料表面产生感应涡流。若材料存在裂纹,涡流分布改变,引发检测线圈阻抗变化,以此方法检测裂纹,对导电材料表面及近表面裂纹检测效果好、速度快。漏磁检测主要针对铁磁性材料,材料被磁化后,表面和近表面裂纹处磁力线畸变形成漏磁场,通过检测漏磁场发现裂纹,常用于管道、板材等铁磁性材料检测。

3.2 检测技术对比与选择

不同检测技术在检测灵敏度、适用范围与局限性上存在差异。磁粉检测和渗透检测对表面裂纹检测灵敏度高,但只能检测表面开口裂纹,无法检测埋藏裂纹。超声检测对内部缺陷检测灵敏度高,适用于多种材料,但对形状复杂的工件检测难度较大。射线检测检测结果直观,但成本高、有辐射危害。涡流检测和漏磁检测对导电和铁磁性材料表面及近表面裂纹检测效果好,但对深层缺陷检测能力有限。基于这些特点,多技术联合检测策略应运而生。例如,对于大型金属结构件,先用磁粉检测或渗透检测对表面进行初步检测,再用超声检测或射线检测对内部进行探伤,综合多种技术的检测结果,能更全面、准确地评估结构的裂纹情况。

3.3 新兴检测技术

相控阵超声检测(PAUT)通过控制多个超声换能器的激发时间和相位,实现超声波束的灵活聚焦和扫描。相比传统超声检测,它可对复杂形状和结构的工件进行更高效、精确的检测,可实现对裂纹的定量分析,在航空航天、石油化工等领域应用前景广阔。激光超声检测(LUT)利用高能量激光脉冲在材料表面产生超声

信号,通过检测超声信号来识别裂纹。该技术无需耦合剂,检测速度快,可对高温、高压等恶劣环境下的材料进行检测,适用于一些特殊场合,如核电站设备检测。声发射检测(AE)是监测材料在受力过程中内部缺陷发生、发展时产生的弹性波信号。当材料内部有裂纹萌生或扩展时,会释放出声发射信号,通过布置多个传感器接收信号,可对裂纹源进行定位和分析。能实时监测材料内部缺陷的动态变化,在大型结构的在线监测中具有独特优势。

4 裂纹修复与预防策略

4.1 裂纹修复技术

裂纹修复技术对维持材料与结构的性能及安全极为关键,不同类型裂纹对应多种修复手段。表面修复时,打磨是基础且常用方法。材料表面出现轻微裂纹,利用砂轮、砂纸等打磨工具处理裂纹部位,逐步去除裂纹及周边受损材料层,直至表面平整,裂纹消失。此方法操作简单、成本低,适用于较浅、对材料性能影响小的裂纹。堆焊则借助焊接技术,在裂纹处堆积填充金属材料。先清理裂纹,确保无杂质,再选合适焊接材料与工艺参数,层层堆焊填充金属,使其与母材牢固结合,能修复较深表面裂纹,显著增强修复部位强度^[4]。对于埋藏裂纹,补焊较为常见。补焊侧重内部埋藏裂纹,实施前通过无损检测精准定位裂纹位置与形状。接着对裂纹部位预处理,如开坡口,以保障焊接质量。选用适配焊接工艺与材料,填满裂纹并与母材良好融合,实现埋藏裂纹修复。复合材料贴补利用高强度、高韧性复合材料,像碳纤维复合材料等。先清洁、处理材料表面,保证贴补面平整干净,再用专用胶粘剂将预制复合材料贴片牢固粘贴在裂纹处。复合材料能分担部分载荷,阻止裂纹扩展,尤其适用于不宜焊接修复的材料或结构。裂纹止裂与减缓技术致力于阻止裂纹快速扩展或降低其扩展速度。比如在裂纹尖端钻孔,改变应力集中状态实现止裂;也可采用局部强化方式,如在裂纹周边区域进行表面硬化处理,增强材料抵抗裂纹扩展能力。

4.2 预防措施

材料选择与优化是预防裂纹产生的重要环节。选用高韧性材料,在受力时能吸收更多能量,不易产生裂

纹。例如,一些高强度合金钢具有良好的韧性,在承受较大载荷时,能有效避免裂纹的萌生和扩展。抗腐蚀合金则针对在腐蚀环境中使用的材料,通过合金化设计,提高材料的抗腐蚀性能,减少因介质腐蚀与应力腐蚀耦合作用导致的裂纹产生。制造工艺改进对预防裂纹意义重大。低应力焊接技术通过优化焊接参数,如焊接电流、电压、焊接速度等,以及采用合理的焊接顺序,减少焊接过程中产生的残余应力,降低因焊接残余应力引发裂纹的风险。热处理优化同样关键,通过精确控制热处理的温度、时间和冷却速度等工艺参数,改善材料的组织结构和性能,消除加工过程中产生的内应力,避免因热处理不当产生裂纹。运行监控与维护策略是预防裂纹的重要防线。定期检测利用各种无损检测技术,按照规定的时间间隔对材料和结构进行全面检查,及时发现潜在裂纹并采取相应措施。应力监测则通过在关键部位安装应力传感器,实时监测材料在运行过程中的应力状态,一旦发现应力异常,及时调整运行参数或采取加固措施,防止因应力过大导致裂纹产生。

结束语

承压特种设备检验中的裂纹问题是一个复杂且关键的研究领域,涉及到材料科学、力学、制造工艺、运行环境等多个方面。通过对裂纹的分类、特征、产生机理、检测技术、修复与预防策略的深入研究,可以更好地理解和应对裂纹问题,保障承压特种设备的安全运行。未来,随着新材料、新工艺、新检测技术的不断发展,有望在裂纹的预防和控制方面取得更大的突破,为工业生产的安全和稳定提供更可靠的保障。

参考文献

- [1]黄晓昕.承压特种设备检验的裂纹问题分析[J].现代制造技术与装备,2023,59(12):158-160+164.
- [2]王永可.承压类特种设备形成裂纹的问题研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(01):19-21.
- [3]张东升.承压特种设备常见裂纹检验方法[J].中国质量监管,2024,(03):90-91.
- [4]吴祖利.对于承压特种设备检验检测中裂纹问题的思考[J].化学工程与装备,2022,(11):266-267.