

钢结构构件裂纹开裂的影响因素浅析

张逢祥 景玛鏊 张贤军 舒 磊

宁波舟山港股份有限公司北仑矿石码头分公司 浙江 宁波 315800

摘 要: 钢结构构件裂纹的产生与扩展受多重因素共同驱动,材料自身属性、加工工艺、外部荷载及服役环境均在不同层面发挥着致裂作用。本文围绕钢材内部组织结构、化学成分与力学性能对裂纹萌生的内在制约展开分析,探讨焊接作业、冷热加工及构件成型等制造环节引入的结构损伤,剖析静态荷载累积、动态荷载反复作用及应力分布失衡对裂纹发展的外部驱动机制,重点分析腐蚀与荷载耦合作用对裂纹加速扩展的叠加效应,同时梳理温度交变、长期老化等环境因素的辅助影响。各因素彼此交织、协同作用,尤其是腐蚀-力学耦合效应大幅提升了钢结构开裂风险,共同决定钢结构构件的裂纹演化路径与开裂规律。

关键词: 钢结构构件; 裂纹开裂; 焊接残余应力; 疲劳损伤; 腐蚀耦合

引言: 钢结构构件在服役过程中出现裂纹开裂,往往并非单一因素所致,而是材料属性、制造工艺、荷载状态与环境条件等多重变量交织作用的结果。钢材内部组织的不均匀性、焊接热输入引发的残余应力、循环荷载带来的疲劳累积,以及腐蚀介质与力学荷载的耦合侵蚀作用,均可在不同阶段催生或加速裂纹的萌生与扩展。厘清各因素的致裂机理与耦合关系,对把握钢结构构件的开裂规律、精准防控结构损伤具有实际参考价值。

1 材料自身属性对钢结构构件裂纹的影响

1.1 钢材内部组织结构的影响

钢材内部微观组织结构的均匀程度与形态特征,直接决定钢结构构件抵抗裂纹萌生与扩展的基础能力。金属晶粒的大小、排布方式以及内部组织的致密性,都会改变钢材整体的结构稳定性^[1]。晶粒尺寸较为粗大的钢材,内部晶界分布密度较低,晶体结合的紧密性有所下降,内部应力容易在局部区域积聚,逐步破坏金属内部的结合平衡。晶粒细化程度较高的钢材,晶界分布更为密集,能够有效分散内部集中的应力,延缓细微损伤的产生。钢材内部若存在夹杂、偏析等不均质组织,会让局部区域的结构连续性遭到破坏,形成天然的薄弱区域。外界荷载作用下,薄弱区域会率先产生微观损伤。

1.2 钢材化学成分的影响

各类化学元素的占比与融合状态,深刻影响钢材的基体韧性与结构稳定性,间接调控裂纹产生的难易程度。钢材基础冶炼过程中留存的各类微量元素,会与铁基体形成不同的化合组织,改变金属基体的结合特性。碳元素含量的波动,会改变钢材基体的硬度与塑性水平,碳元素占比偏高会让钢材塑性出现衰减,基体脆性有所提升,结构受外力作用时更易出现开裂现象。硫磷

等杂质元素的无序分布,会破坏钢材基体组织的均匀性,弱化金属原子间的结合强度。

1.3 材料力学性能的影响

钢材本身具备的力学性能指标,是制约钢结构构件裂纹产生和发展的关键内在条件。塑性与韧性表现优异的钢材,受力过程中可以通过自身形变消耗外部施加的能量,缓冲应力集中带来的结构损伤,抑制微观裂纹的生成。塑性与韧性指标偏弱的钢材,形变耐受能力较差,承受外力作用时无法通过有效形变释放应力。钢材抗拉强度与抗压强度的匹配程度,也会影响结构受力的稳定性,强度匹配失衡会造成构件受力状态不均,局部应力超出材料耐受极限后便会产生开裂问题。材料抗疲劳性能的差异,同样会改变构件长期受力后的结构状态,抗疲劳性能较弱的钢材,在持续受力作用下会逐步积累内部损伤,最终引发结构裂纹问题。

2 加工制作工艺对钢结构构件裂纹的影响

2.1 焊接工艺作业的影响

焊接作业是钢结构构件成型的核心工序,作业过程中的各项工艺把控状态会直接改变构件局部组织结构与受力状态,催生各类裂纹缺陷^[2]。焊接热源会对钢材基体形成集中热输入,造成焊缝区域与周边基材产生不均匀温升与冷却变化,让构件局部产生不均匀的体积伸缩。温度变化引发的形变无法自由释放时,构件内部会留存残余应力,这类应力会长期作用于焊缝及热影响区域,逐步破坏钢材基体的结构平衡。焊接过程中的热输入量把控不当,会造成焊缝金属晶粒出现异常长大,弱化焊缝区域的韧性指标。焊接层间处理不到位或熔合状态不佳,会让焊缝内部留存细微孔隙与未熔合缺陷,这类细微缺陷会在构件后续受力过程中持续拓展延伸,逐步演

变为贯通性裂纹。

2.2 冷热加工处理的影响

冷热加工处理是钢结构构件矫正与塑形的重要方式,加工过程的温度控制与操作精度会对钢材结构性能产生直接影响。冷加工处理会让钢材基体产生塑性形变,金属晶粒会发生滑移与畸变,晶粒排列规律被打乱,内部晶格结构出现扭曲错位。晶格畸变的持续累积会让钢材局部韧性大幅下降,结构脆性特征显著提升。热加工处理依托高温环境完成构件塑形,温度区间把控不合理会造成钢材基体出现过热或过烧现象,破坏内部组织的均匀状态。高温冷却过程的速率把控失衡,会让加工区域产生不均匀收缩,留存大量残余应变。

2.3 构件成型处理的影响

构件成型处理涵盖切割、打磨、拼装等多项精细化工序,各类工序的操作精度与工艺标准把控,直接影响构件表面及内部结构的完整度。切割工序的高速作业会让构件切口位置产生局部热损伤,造成边缘区域材质硬化,弱化表层结构的抗裂性能。打磨处理力度不均或打磨范围偏差,会破坏构件表层金属的均匀结构,形成深浅不一的表层损伤,细微划痕与损伤会成为裂纹萌发的初始载体。拼装成型过程中的强制对位与挤压调整,会让构件局部承受额外挤压应力与剪切应力,应力会蓄积在构件拼接位置与边角区域。成型工序中的精细化把控缺失,会让构件留存各类隐性结构损伤,后续服役过程中,各类隐性损伤会逐步发育扩张,最终形成形态各异的结构裂纹。

3 外部荷载作用对钢结构构件裂纹的影响

3.1 静态荷载持续作用的影响

钢结构构件承受恒定静态荷载的全过程中,内部金属结构会产生长期性的缓慢形变演化,这类形变变化具备极强的隐匿特征。恒定外力持续施加于构件主体,会让构件内部形成不间断的应力堆积,金属基体始终保持受迫形变状态,微观晶格结构会随时间推进产生缓慢的滑移与错位变化^[3]。钢材基体在长期应力压制下,塑性形变会出现渐进式累积,原本存在的微观结构缺陷会逐步舒展扩张。构件局部区域承受的应力数值不断贴近材料屈服极限时,微观损伤会持续在受力核心区域聚集,彻底打破金属内部结构的平衡状态。长期静态受力会逐步削弱金属原子间的结合强度,让构件内部生成大量细碎的微观裂隙。裂隙会顺着应力分布方向缓慢延伸生长,为宏观开裂问题的出现创造基础条件。

3.2 动态荷载反复作用的影响

动态荷载具备往复波动的作用特征,是诱发钢结构

构件疲劳开裂的重要诱因。波动变化的外力会让构件内部应力数值处于持续升降的变动状态,金属微观结构需要不断适配动态变化的受力形态。反复的受力切换会让构件微观区域交替承受拉伸与压缩作用,晶格结构持续开展形变与复位的往复运动。多次形变交替会让金属基体产生不可逆的疲劳损伤,潜藏在基体内部的微观缺陷会在受力循环中不断舒展、拓展并相互连通。疲劳损伤的持续累积会持续弱化钢材局部结构强度,大幅降低基体抵抗形变破坏的能力。受力循环次数不断增加的过程中,零散分布的微观裂隙会逐步聚拢衔接,形成具备持续延伸能力的结构性裂纹。这类裂纹会持续侵入构件有效承载区域,不断压缩结构安全储备,加速钢结构构件的整体失效进程。

3.3 荷载应力分布状态的影响

构件外形构造与荷载施加方式的匹配程度,直接主导结构内部应力场的分布形态,对裂纹萌生位置和拓展速率产生关键影响。荷载传递路径出现偏移或紊乱时,构件局部区域会形成显著的应力集中现象,局部受力水平远超构件整体的平均受力数值。构件截面突变、受力转折等结构形态变化的位置,都会干扰应力的平稳传递,造成应力大面积聚集。长期处于高应力覆盖范围的金属基体,形变程度会持续加剧,微观结构更容易出现破损与开裂。应力分布不均会让结构损伤呈现区域性聚集发育的特点,高应力覆盖区域会优先萌生微观裂纹。生成后的裂纹会顺着应力梯度差值较大的方向持续延展扩散,不断扩大损伤范围。应力场的紊乱失衡会持续放大结构损伤程度,不断加剧钢结构构件的整体开裂问题。

4 环境与服役条件对钢结构构件裂纹的影响

4.1 温度环境变化的影响

自然环境存在的温度起伏会持续作用于钢结构构件本体,持续改变金属基体的物理属性与内部受力状态。大气温度会随季节与昼夜发生规律性升降波动,钢结构构件会跟随温度变化产生热胀冷缩的物理形变,整体尺寸与内部结构形态随之发生适应性变动^[4]。建筑结构的固定约束体系会限制构件自由伸缩的空间,形变无法完全释放的情况下,内部会持续留存并累积温度应力。低温环境会大幅压缩钢材具备的塑性形变空间,弱化基体韧性储备,提升金属材质固有脆性,让结构应对形变扰动的耐受能力出现明显下滑。反复交替的温度变化会让金属微观结构持续承受拉伸与压缩作用,原本稳定的晶格排布受到持续扰动,内部存在的细微原始缺陷会不断延展发育。长期往复的温度作用会不断叠加结构性损伤,持续消耗钢材基体的稳定性能,让细微裂隙逐步发育扩

张,逐步形成可以持续拓展的结构性裂纹,加剧构件整体开裂风险。

4.2 腐蚀环境侵蚀的影响

自然服役场景中存在的各类活性介质会持续侵袭钢结构表层结构,通过化学与物理作用逐步破坏金属基体的完整性和力学稳定性。水汽、氧化性物质及各类腐蚀性微粒会持续接触钢材表面,逐步引发金属基体氧化、电离及置换反应,缓慢剥离构件表层完整金属组织,形成深浅分布不均的腐蚀凹陷与创面。腐蚀作用会逐步削减构件有效承载截面,改变结构原有受力传递路径,让局部受力状态趋于复杂且无序。表层形成的腐蚀凹陷会破坏金属结构的连续性,天然的凹陷形态会引导外力向该区域聚集,形成持续性的应力集中现象。腐蚀介质会顺着表层缺陷持续向构件内部渗透,逐步损伤深层金属组织结构,打乱晶格排布的规整性,降低金属原子之间的结合强度,在基体内部生成大量隐蔽的微观损伤。外界荷载产生的力学作用与环境腐蚀产生的化学破坏形成叠加效应,加速微观损伤相互连通,逐步转化为拓展性较强的宏观裂纹,持续降低钢结构构件的结构完整性。

4.3 腐蚀与荷载耦合作用的影响

单一力学荷载或环境腐蚀对钢结构的损伤速度较为平缓,二者形成的腐蚀-荷载耦合作用会产生显著损伤放大效应,是加速裂纹萌生与扩展的关键诱因。腐蚀介质持续侵蚀钢材表面,会形成坑蚀、微观裂隙等结构缺陷,破坏构件应力传递的均匀性,造成局部应力集中,为裂纹发育创造有利条件。同时,构件承受的静态与动态荷载会引发金属晶格形变和微观错位,增大钢材表层孔隙与裂隙开度,为腐蚀介质的渗透与化学反应提供便利条件,形成“腐蚀弱化基体、应力加速损伤”的恶性循环机制。相较于单一损伤因素,耦合作用无明显损伤停滞阶段,微观损伤累积速率显著提升,可大幅缩短裂纹萌生周期、加快宏观裂纹贯通速度。在盐雾、高湿、工业污染等严苛服役环境中,该耦合损伤效应更为显著,极易造成钢结构构件提前开裂、服役性能衰减,是工程中钢结构裂纹防控的重点内容。

4.4 长期服役老化的影响

钢结构构件长期处于自然服役场景中,会在力学作用与环境因素的共同干预下,逐步出现金属基体的老化衰退现象。长期不间断的受力作用会让金属微观结构产生大量不可逆的形变积累,晶格排布的规整程度持续下降,内部组织结构逐步变得松散。钢材冶炼与加工阶段留存的微小原始缺陷,会在长年累月的服役过程中缓慢发育、延展,结构整体致密性持续降低。老化蜕变过程会持续消耗钢材的塑性与韧性储备,形变缓冲能力逐步下降,各类基础力学性能出现持续性衰减。构件拼接节点、受力转折等关键部位,更容易持续累积各类细微结构损伤,损伤密集程度随服役时长不断提升。结构整体承载与抗变形能力持续衰减后,分散的微观损伤会逐步相互贯通,形成具有延伸特性的结构性裂纹^[5]。性能老化带来的结构弱化会持续为裂纹拓展提供条件,不断破坏钢结构构件的受力稳定性与长期服役性能。

结束语

钢结构裂纹是材料先天缺陷、加工工艺损伤、持续荷载作用、复杂环境侵蚀共同作用的产物。材料与制造缺陷为裂纹萌生创造先天薄弱条件,各类荷载持续推动微观裂隙向外延伸扩展,温变、老化持续损耗钢材基体性能,腐蚀-荷载耦合是加速构件提前失效的关键叠加因素。掌握多因素协同致裂及腐蚀耦合演化规律,可为钢结构构件全周期损伤防控提供完善的理论支撑。

参考文献

- [1]叶华文,张超凡,邓加林,等.预应力CFRP布置方式对加固含复合型边裂纹钢结构的疲劳性能影响[J].中国铁道科学,2025,46(2):82-92.
- [2]彭小东.港口集装箱岸桥钢结构开裂的原因分析及修复[J].今日制造与升级,2025(3):182-184.
- [3]朱文俊,王建强,傅思荣,等.基于深度学习的钢结构焊缝裂纹检测研究[J].科技与创新,2024(20):22-26,32.
- [4]王从章,秦中凡.某装配式钢结构建筑中现浇混凝土楼板裂纹产生原因及防治措施分析[J].安徽建筑,2022,29(12):67-68.
- [5]王云鹏,周广振.桥梁钢结构疲劳裂缝检测技术研究分析[J].居业,2026(1):28-30.