

低碳钢经钼精粉侵蚀后焊接方法

王鹏鹏

洛阳栾川钼业集团股份有限公司冶炼分公司 河南 洛阳 471000

摘要: 钼精粉侵蚀会造成低碳钢表层成分与组织梯度异变, 极易引发焊缝夹杂、孔隙及组织畸变等焊接缺陷。本文结合侵蚀层结构、成分及冶金性能的变化规律, 剖析钼、硫、磷等杂质干扰熔池冶金平衡、劣化接头性能的作用机制, 针对性优化焊前预处理、焊材选型、焊接参数及多层多道施焊工艺, 配套全流程质量管控手段, 可有效消除焊接缺陷, 提升侵蚀低碳钢焊接接头的成型质量与服役稳定性。

关键词: 钼精粉侵蚀; 低碳钢; 焊接缺陷; 多层多道焊; 工艺质控

引言: 钼精粉长期附着于低碳钢构件表面, 会通过理化渗透作用改变钢材表层微观组织结构与化学成分, 大幅恶化材料焊接适配性。侵蚀层富集的钼、硫等杂质元素, 会扰乱焊接熔池冶金反应过程, 破坏焊缝与母材的界面结合强度, 诱发多种焊接缺陷。明晰钼精粉侵蚀对钢材焊接性能的影响机制, 优化适配的焊接工艺体系, 能够有效解决现场焊接难题, 保障工业构件的使用安全性与结构稳定性。

1 钼精粉侵蚀低碳钢基础特性分析

1.1 钼精粉侵蚀低碳钢表层结构变化特征

钼精粉附着低碳钢表面会持续与表层金属基体发生理化作用, 逐步改变钢材表层原有平整结构。表层金属会出现晶粒细化与晶粒畸变的微观改变, 原始均匀的金属平面会生成细密的微观孔洞与浅层裂隙。侵蚀作用会打破钢材表层金属晶粒的紧密排布状态, 让表层结构呈现疏松化的分布形态^[1]。表层生成的侵蚀产物会均匀覆盖金属基体表面, 形成厚度不均的改性覆盖层。这类微观结构改变会重塑钢材表层的界面形态, 改变表层金属的致密程度与结构均匀性。

1.2 侵蚀后钢材内部组织与成分变化规律

钼精粉中的各类活性组分可以沿钢材微观晶界持续向内渗透, 改变基体内部金属组织形态。钼精粉化学组分占比固定为Mo49.97%、S40.06%、H₂O9.69%、Cu0.256%、P0.012%, 各组分具备独立的热转化与挥发特征: Mo组分在500℃-600℃发生氧化生成MoO₃与SO₂, 温度超过700℃后快速挥发; S在112.8℃由固态转变为液态, 444.6℃完全汽化; H₂O受热后蒸发速率随温度升高持续加快; Cu挥发温度为2562℃; P仅280℃即可挥发。在活性组分持续渗透作用下, 钢材内部铁素体与珠光体的分布形态出现不均匀改变, 原有规整的金相组织排布状态逐步紊乱。外来杂质元素持续附着于金属晶界位

置, 改变基体内部原有元素配比状态, 晶界区域杂质含量显著提升, 弱化了纯净金属基体的组织均匀性。元素渗透由表及里逐步推进, 最终使钢材形成梯度化的组织与成分分布特征。

1.3 侵蚀层物理与冶金性能变化特点

侵蚀改性后的钢材表层会形成全新的物理性能体系, 表层硬度与结构致密性出现明显改变。疏松的侵蚀结构会降低表层金属的结构稳定性, 提升表层金属的孔隙率与表面粗糙度。侵蚀产物堆积会改变金属表层的导热与导电能力, 让表层物理属性偏离母材原始状态。冶金层面的界面结合能力会持续下降, 金属晶粒之间的结合强度逐步弱化。表层金属的熔合响应特性出现改变, 高温环境下的冶金反应活性产生明显波动。

1.4 侵蚀缺陷对焊接作业的影响机理

钢材表层存在的疏松结构与微观裂隙会干扰焊接热源的作用效果, 改变熔池成型的稳定状态。表层富集的杂质元素会参与焊接冶金反应, 催生各类微观焊接缺陷。不均匀的表层导热属性会造成焊接热量分布失衡, 引发局部熔合不充分的问题。表层改性结构会弱化焊缝与母材的结合性能, 降低焊接界面的冶金结合质量。微观缺陷会在焊接高温作用下持续扩张, 进一步破坏焊接接头的组织均匀程度。

2 钼精粉侵蚀低碳钢焊接缺陷成因分析

2.1 钼元素掺杂引发的熔池冶金反应变化

低碳钢表层经钼精粉侵蚀后, 基体浅层会留存大量弥散分布的钼质组分, 均匀填充于表层晶粒与晶界间隙中。焊接热源输入后熔池温度快速升高, 原本惰性的钼系杂质迅速活化, 直接参与熔池内部氧化还原与合金化反应。占比接近半数的钼组分在500-600℃区间会生成氧化钼与二氧化硫, 若焊接热输入失控, 局部温度突破700℃后钼的氧化物会大量挥发, 直接干扰钢材原生脱氧反应, 造成熔

池物化反应平衡偏移、熔融金属化合反应节奏紊乱^[2]。高温环境会打破晶粒正常生长规律,使凝固阶段晶粒形核与长大速率无序波动,弥散的钼质颗粒易在熔池凝固前沿聚集,改变熔融金属流动性与界面润湿性,破坏熔池凝固稳定性,最终催生各类内在冶金缺陷。

2.2 表层侵蚀杂质导致的焊缝成型问题

钼精粉中高占比的硫元素长期附着钢材表面,持续发生理化反应并在母材表层堆积多层氧化杂质与无机沉积物。焊接过程中,表层各类杂质会直接卷入熔融焊缝金属内部,各类组分差异化的热响应特性大幅提升缺陷产生概率:磷组分低温下即可挥发产气,水分随温度升高持续汽化,硫组分先后完成液化、气化转变,多类杂质同步相变极易在熔池内形成气泡。受焊接高温限制,部分杂质无法完全分解溢出,滞留后形成弥散分布的非金属夹杂。杂质聚集区域会改变局部金属凝固速率,导致焊缝各区域凝固进程不一致,引发焊缝宽窄不均、局部凹陷、鱼鳞纹路紊乱等外观缺陷,同时破坏熔池金属致密结构,在焊缝内部留存细微孔隙与夹层缺陷。

2.3 异种成分掺杂引发的焊接组织异变

低碳钢母材以铁素体和珠光体为主要组织,晶粒排布规整、结构稳定性强。钼作为外来合金组分,大量融入焊接熔池后会侵入金属晶格内部,全程干预晶粒形核与长大过程。焊缝金属冷却凝固阶段无法形成规整金相组织,出现晶粒畸变、细化、尺寸悬殊等无序现象。外来异种组分易在晶界位置持续富集,阻碍晶界正常延展,引发局部组织偏聚问题,彻底破坏焊缝金相结构的均匀性,使焊接接头微观组织杂乱无序,完全改变母材原生组织特征。

2.4 侵蚀界面力学性能弱化产生的焊接隐患

钼精粉侵蚀会彻底破坏低碳钢表层致密结构,形成多孔疏松的改性层,造成母材表层力学性能显著弱化。焊接高温会进一步扩张表层原有微孔与微裂隙,使缺陷逐步延伸至焊缝熔合区域,大幅降低熔合线位置金属的结合紧密性,削弱母材与焊缝金属的融合质量。焊接接头薄弱区域在受力过程中易产生应力集中,显著提升结构开裂失效的风险。各类隐匿的微观缺陷会持续削弱接头承载性能,为构件长期服役埋下安全隐患。

3 钼精粉侵蚀低碳钢适配焊接工艺设计

3.1 焊前表层清理与基材预处理工艺

钼精粉侵蚀后的低碳钢基材表层会形成疏松沉积物与多层氧化薄膜,细微杂质极易附着于金属表面及坡口缝隙内,在焊接高温下激活并干扰熔池冶金反应,诱发夹杂、孔隙等缺陷。焊前需开展精细化表层清理作业,

彻底清除疲劳变质金属层,剥离板面残留的钼系沉积物与氧化层,还原洁净的母材基体。通过机械打磨修整表层疏松变质结构、消除微观裂隙、规整坡口几何形态,同时对损伤基材适当加固,保障焊接区域金属质地均匀致密^[3]。打磨完成后通过脱脂、除尘工艺清除板面细微污物与残留粉尘,彻底阻断外源杂质进入熔池的通道。规范完善的预处理工序可优化母材表层冶金状态,从源头削减焊接缺陷,为后续焊接成型提供稳定基础。

3.2 焊接材料匹配选型原则

焊接材料选型需适配钼质掺杂改性母材的冶金特性,匹配基材侵蚀后的焊接性能变化。优先选用脱氧能力优异、具备晶粒细化功能的焊接耗材,借助填充材料自身合金体系,抵消异种组分掺杂引发的组织紊乱问题。筛选高温化学稳定性良好的填充材料,有效抑制残余钼质组分在熔池内的异常反应,降低冶金失衡风险。填充金属的合金配比需与净化处理后的低碳钢母材精准匹配,提升熔合界面冶金结合强度,强化焊缝与母材的连接性能。严格把控焊接材料原生杂质指标,杜绝外源杂质叠加富集,减少焊缝缺陷滋生,保障焊缝凝固后组织均匀、结构稳定。

3.3 常用焊接工艺参数适配设置

针对钼精粉侵蚀改性低碳钢的热响应特征,需针对性优化焊接热输入参数,严格落实焊缝温度管控标准,加热温度稳定控制在700-800℃区间,杜绝过热超温。合理匹配焊接电流与电弧电压,维持电弧稳定燃烧,规避热输入过量或不足引发的晶粒粗大、应力集中、钼组分过度挥发等问题。精准控制焊接行进速度,保证熔池具备充足冶金反应时长,促进轻质杂质充分上浮溢出。科学管控整体热输入区间,缓解异种组分干扰造成的熔池反应无序问题,优化焊缝金属凝固结晶过程。精细化参数配置可平衡熔池内部各类冶金反应,改善接头微观组织,提升焊缝致密性与力学承载性能。

3.4 多层多道焊接作业流程设计

多层多道焊接模式可拆分单次焊接热输入,规避集中高热输入造成的母材结构损伤与性能衰减,避免局部超温引发的钼组分大量挥发。分层施焊能够逐层细化焊缝结晶晶粒,逐步改善异种成分掺杂导致的组织畸变问题。单道焊道施工完成后预留合理散热间隔,精准把控焊缝整体冷却速率,有效缓解焊接应力累积与构件形变。通过逐层搭接施焊填补局部熔合盲区,提升焊缝整体连续性与结构致密性。标准化分层施焊可持续弱化基材侵蚀缺陷与异种掺杂的负面作用,优化焊接接头整体组织结构与服役性能,适配改性低碳钢的焊接成型需求。

4 侵蚀低碳钢焊接质量控制与工艺优化

4.1 焊接过程冶金状态管控方式

钼精粉侵蚀后的低碳钢母材存在组分不均、界面改性等问题,焊接冶金过程极易出现反应失衡现象。焊接全过程需精准管控熔池冶金状态,稳定熔融金属反应体系,弱化异种掺杂组分的负面影响^[4]。施焊过程严格遵守安全操作规范,落实防尘、通风措施,防范高温烫伤、扬尘及有毒烟气中毒风险。稳定电弧形态以均衡熔池温度场,保障脱氧、脱杂、晶粒细化反应平稳推进,严控热输入波动幅度,规避局部温度异常引发的冶金紊乱与杂质富集问题。持续维持熔池液态金属流动活性,推动内部残余杂质充分上浮分离,降低非金属夹杂留存概率。精准把控熔池凝固降温速率,保障晶粒有序形核生长,维持焊接冶金体系动态平衡,从反应层面全面提升焊缝成型质量。

4.2 焊缝组织与力学性能调控手段

焊缝微观组织形态与分布直接决定焊接接头力学服役性能,需通过精准工艺调控改善侵蚀母材的焊接适配缺陷。依托精细化热输入调控干预金属凝固进程,抑制粗大晶粒与畸变组织生成,促使焊缝形成细密均匀的金相结构。借助适配焊材的合金体系补充有益组分,抵消钼质异种成分带来的组织弱化缺陷,提升晶界结构致密性。通过合理排布焊道分散焊接应力,杜绝局部应力堆积引发的组织损伤与性能衰减,细化焊缝晶粒结构,提升焊缝韧性与承载能力,修复母材侵蚀造成的性能缺陷,实现焊缝与母材力学性能的良好匹配。

4.3 焊接缺陷抑制与消除工艺措施

钼质掺杂与表层侵蚀缺陷易诱发夹杂、微孔隙、晶粒偏析等焊接问题,需通过专项工艺实现缺陷全程管控。落实高标准焊前清理,彻底清除表层侵蚀产物、氧化物质与疲劳变质金属,从源头阻断杂质进入熔池。动态调整焊接热输入,稳定匹配基材熔合特性,解决熔池凝固不充分引发的内部孔隙问题。优化焊道搭接布局,消除熔合盲区,改善焊缝组织偏聚与成分不均问题。针对焊接产生的浅层夹杂、微孔等细微缺陷,采用局部重

熔工艺重塑金属组织结构,逐层消除微观缺陷,提升焊缝整体结构完整度,最大限度弱化母材侵蚀带来的焊接负面影响。

4.4 焊后处理工艺与稳定性提升方式

焊后专项处理可进一步优化接头组织结构,提升改性低碳钢焊接构件的长期服役稳定性。通过适配温控手段调节焊缝冷却节奏,消除焊接残余应力,规避应力缓释引发的结构形变。打磨修整焊缝不规则成型区域,平滑焊缝过渡位置,减少应力集中点位。细化焊缝表层金相组织,规整晶粒分布形态,提升表层金属致密性与耐磨性能。严格执行现场防护要求,焊后及时做好隔离防护,清理残留氧化杂质,杜绝焊缝二次污染与二次腐蚀^[5]。系统化焊后处理可稳固接头综合性能,消除侵蚀母材焊接留存的隐性隐患,有效延长构件服役周期。

结束语

钼精粉侵蚀引发的基材改性,会从熔池反应、组织成型、力学性能等多维度影响低碳钢焊接效果,是工业焊接作业中难点突出的技术问题。通过厘清杂质元素致缺陷机理,落实精细化基材预处理、匹配化焊材选用、分层受控施焊及焊后改性优化等技术手段,可有效规避各类焊接缺陷。全流程工艺管控能够修复基材侵蚀带来的性能损伤,稳定焊接接头组织与力学性能,为同类工况焊接施工提供可靠的技术支撑。

参考文献

- [1]张林杰,张栩菁,郑家伟,等.钼及钼合金异质焊接研究进展[J].热加工工艺,2026,55(8):1-11.
- [2]王星星,楚浩强,谢旭,等.钨/钼合金先进焊接技术研究现状[J].稀有金属材料与工程,2025,54(1):94-108.
- [3]张帆,侯军才,张秋美,等.难熔金属钼及钼合金焊接研究进展[J].焊管,2026,49(3):8-16.
- [4]刘佳兴,何永海,贾友禄,等.火花放电原子发射光谱法测定焊丝-焊剂组合熔敷金属中钼和铜的含量[J].山西冶金,2025,48(11):12-14.
- [5]邢卓.镍-钼合金制容器制造工艺综述[J].中国特种设备安全,2022,38(2):68-73.