

异种金属焊接界面组织演变及力学性能研究

何军

遵义生态环境产业研究院有限公司, 红花岗区深溪镇高新产业开发区, 563005;

摘要: 异种金属在焊接过程中受热循环与冶金反应的共同驱动, 界面经历溶解、扩散与再析出, 形成成分梯度与反应层, 随后的冷却诱发应力重排与组织转变, 进而决定接头的强度与韧性。为避免经验试错占据主导, 需要以机理为核心建立可验证的描述, 把元素迁移、相变动力学与塑性响应纳入统一框架。本文围绕界面组织演变与力学性能关联展开, 提出多场耦合的建模思路与可执行的控制策略, 并以工艺窗口与结构冗余的协同方式降低失效风险。

关键词: 异种金属焊接; 界面组织; 扩散反应; 力学性能; 工艺窗口

DOI: 10.69979/3060-8767.25.06.059

引言

异种金属焊接通过跨品类材料的连接实现结构与功能的一体化, 兼顾强度、耐蚀与轻量需求。由于熔池成分与固相基体在热力与冶金层面差异显著, 界面会出现反应层增厚与脆性相生成, 残余应力与微裂纹在冷却阶段可能累积, 导致强韧性与稳定性下降。单一的经验参数很难覆盖复杂材料组合与接头几何, 系统化研究需要把热源行为、元素扩散、相变路径与力学响应整合为一条因果链, 并在分析层与控制层建立双向映射。围绕这一目标, 本文以组织演变机制为起点, 以性能表征与失效模式为约束, 提出多尺度模型与工艺控制的协同方法, 使设计、焊接与服役在同一逻辑下获得一致的可验证结果。

1 界面冶金特征与扩散机制

1.1 扩散控制与反应层生成

异种金属接触后在焊接热循环中形成高梯度温度场与化学势差, 扩散通量沿法向与切向同时建立, 靠近熔合线的溶解与再沉积交替发生, 反应层在局部达到连续。反应速率受温度与成分共同调节, 温度提升缩短扩散路径, 成分差增大驱动力, 二者与停留时间一道决定层厚。若晶格间隙可供小半径元素快速穿越, 则早期便形成细薄过渡带, 随后较大原子通过空位或错位辅助扩散使层内产生次级梯度。界面附近的热弹塑耦合导致体积变化与应变不均, 反应层在拉压交替下经历裂纹萌生与钝化的竞争过程, 细小而连续的第二相网络易于形成脆性通道, 粗大而孤立的颗粒则对裂纹传播构成转折^[1]。为降低失稳概率, 应让扩散方向与强度分布尽量平缓, 通过调节线能量与焊道行进速度控制峰值温度与冷却

速率, 使反应层趋向薄而均质。若在基体表面预先构建微米级过渡层, 可通过固溶与沉淀的先后次序重排扩散路径, 减小尖锐的成分跃迁, 从而降低界面处的局部应力集中。对于热导率差异显著的材料组合, 热流在厚度方向与宽度方向的分配不同, 界面处等温线弯曲, 扩散前沿呈现不规则波形, 这提示几何与热源轨迹需要协同设计, 使反应层在宏观上保持连续并避免成网。在界面能的驱动下, 反应层形貌受曲率影响, 凸起部位局部化学势更高而溶解更快, 凹陷部位更易沉积, 时间推移呈趋平趋势。可通过分段能量输入与缩短驻留抑制层厚波动, 并以多道微摆动均化热流。对于中等固溶度的体系, 还可利用偏析的可逆性, 通过短时复热促使早期形成的高硬相发生回溶, 再以缓慢冷却诱导细弥散析出, 使层内强度与韧性取得平衡。扩散通道在晶界与晶内之间存在效率差异, 高温阶段晶界贡献更高, 低温阶段晶内扩散占比上升, 因此窗口的选择要兼顾层厚控制与强度均衡, 避免在单一机制上过度依赖。

1.2 晶体学取向与相变对组织的影响

晶粒取向差带来界面错配, 位错与孪生在热循环中频繁产生与湮灭, 取向关系决定形核位置与生长速度。若两侧基体的组织呈强约束, 晶界迁移受限, 细晶环带在近缝区逐步显现, 细晶提高初始屈服但也可能与脆性相叠加而削弱延性。相变路径受冷却速率与合金元素控制, 快速冷却偏向形成高硬相, 缓慢冷却有利于生成韧性较好的混合组织, 二者的比例决定位移承载方式^[2]。界面区域的应力场在几何不连续处出现峰值, 裂纹萌生依赖微观弱区而非平均强度, 因此组织均质化与取向协调成为关键。通过提高形核密度并限制长大速度, 可获得细小而分散的第二相, 配合适中的位错密度, 使滑移

与孪生的协同更加顺畅。若引入中间层,晶格常数与热膨胀系数的梯度被分段化,错配由集中转为分散,组织演变的路径也从单峰转为多段,裂纹传播需要跨越多种相界与界面,从而提升断裂阻力。界面的缺陷类型包括孔洞、夹杂与未熔合,这些缺陷与应力三轴度耦合,形成损伤热点,组织调控的目标不仅是相比例与尺度,更包括缺陷的空间统计与关闭速度,需要在工艺窗口中获得稳定的重复性。组织梯度的另一杠杆是初始表面状态,微细粗糙度与残余压应力会改变形核偏好,适度的表面能梯度有助于形成弥散第二相而非连续网状相。若一侧基体含有稳定颗粒,这些障碍会抑制异常长大,配合轨迹摆幅与道间间距的调整可调节热流密度,使过渡带宽度处于可控区间。界面错配还可通过取向分布的优化得到缓解,若两侧织构在主滑移系上具有相近取向,跨界滑移的激活阈值更低,位移协调性更好,微裂纹更难沿单一通道扩展。对晶界网络的工程化调整能够增加高角界面比例并引入扭转路径,裂纹传播的成本随之上升,韧性获得提升。

2 多场耦合模型与表征路径

2.1 机理模型与参数同化

多场耦合模型以热传导、熔池流动、溶质扩散与相变动力学为基础,以弹塑本构描述应力与变形,模型目标在于把热源与路径转化为可解释的组织与性能。热场采用温度依赖的物性与时变边界,功率密度沿厚度与宽度分区描述,行进速度与停留在轨迹上连续变化。溶质迁移由对流扩散与相界传输共同决定,界面反应可用等效生成项表示,使反应层厚度在时间轴上可追踪^[3]。力学场以随温屈服与循环硬化刻画多次热载荷后的滞回,体积应变包含热膨胀与相变两部分。参数同化通过现场可测的温度与位移时序进行,先以灵敏度筛选关键参数,再以误差最小化校正,从而减少不可辨识带来的不确定。为平衡精度与速度,可在局部采用细网格并配合降阶,把远场以等效边界表示,保证求解在可接受时长内完成。模型的可信度依赖闭合检验,能量与质量的守恒应在每个时间步获得满足,界面厚度与硬度的预测需要与表征结果保持一致,若偏差出现则返回同化环节并调整对热效率与传输系数的假设。模型还应携带不确定性描述,把关键参数设置为区间或分布,在预测与控制之间引入安全余度。为增强可移植性,可把材料相关子模型与热源几何解耦,构建模块化接口,便于在新组合上快速装配。规模扩大时采用分区并行与任务拆分,把轨迹段与空间块以边界量耦合迭代求解。对于形貌演变与相界推

进,可引入相场思想建立连续描述,再以低维代理替代高维求解,把关键阈值与偏移量作为控制量输出,便于与现场的阀位与速度对接。

2.2 界面表征与性能映射

界面组织的识别需要多尺度表征协同推进,宏观几何与变形来自形貌测量,中观相分布与晶粒信息来自显微技术,微观成分梯度与位错密度来自高分辨方法。为了把组织与性能建立映射,需要把统计特征转化为可用于模型的量,例如相比例、尺度分布与取向参数,并与力学指标进行关联。无损评估提供在役状态下的快速判定,可利用声学或电学响应对反应层连续性与裂纹萌生进行监测,再以校准曲线把信号幅值转化为界面完整度^[4]。表征结果还承担模型校验的职责,不同热输入与路径下获得的层厚与硬度分布构成数据集,模型只有在这些场景中保持一致,才能在未见组合上具有可用的外推能力。为提高重复性,需要建立标准化制样与测量流程,对取向分析与成分分析给出不确定范围,并在统计上区分随机波动与系统偏差,避免把测量噪声误判为工艺效应。最终把表征与模型在统一看板呈现,形成可追溯的组织到性能的映射,使设计者能够基于证据进行工艺选择与窗口优化。为捕捉早期损伤,还需关注亚微米孔隙与微裂纹,这些特征在载荷下有特定演化轨迹,多时刻的对比能够区分萌生与闭合的平衡,并与寿命模型形成闭环。界面粗糙度与层厚波动可用统计矩量化,再与疲劳与冲击指标建立回归,使快速检查与寿命评估贯通。多模态数据的融合能够显著提高判断的稳定性,成分、形貌与声学信号在时间轴上的一致性为异常提供更可靠的证据。数据治理应覆盖取样、清洗与版本管理,确保不同批次与不同设备之间具有可比性,并以标准化报告固化结论,方便复审与复用。为了处理测量不确定,还应给出重复性与再现性的区分,并把误差分量分摊到采集与处理与判读三个环节,形成透明的置信范围。在线校准可用对比块与稳定样建立长期基线,当设备或环境发生漂移时能够及时识别并修正。

3 力学性能与控制策略

3.1 强度与韧性的耦合机理

接头强度与韧性来源于载荷传递路径的完整与稳定,反应层若连续而偏硬,会在拉伸中承担更高应力,塑性在两侧基体内发展,界面处易出现位移不协调而形成微裂纹。若反应层过薄或存在不连续,屈服在界面附近提前发生,裂纹沿弱区扩展,强度下降。韧性的保持依赖裂尖钝化与能量耗散通道,细小而分散的第二相有

助于分散应力,合适的取向关系使滑移跨越界面时阻力适中,裂纹弯折与桥接的概率上升。残余应力是决定起裂阈值的关键,冷却阶段形成的拉应力与外载叠加,若三轴度较高,脆性断裂风险上升。为此需要在焊接与后处理阶段控制温度轨迹与约束策略,使残余拉峰降低并把梯度展宽。疲劳性能受微观缺陷与相界分布影响,缺陷尺度与间距决定萌生寿命,相界的强弱决定扩展速率,组织的均质化与过渡层的分段化有助于延长多裂纹相互竞争的阶段,从而提高寿命。耐蚀性能与力学性能存在牵制,反应层中的某些相在腐蚀环境下稳定性不足,需要在耐蚀与强度之间寻找折中,避免在服役条件改变时出现突发退化。在复杂应力路径下,剪切与正应力比例随时间变化,若软硬相间隔排列,局部会出现应变集中带,裂纹沿弱相游走再跨越强相。若反应层被细小孔洞打断,桥接与撕裂会交替出现,承载能力对位移速率更敏感,需要在组织设计中把第二相体积分数与间距控制在稳定范围。断裂行为常呈混合模式,需要把开裂与剪切的耦合放入评估,若界面相比比例与取向形成弯折与桥接的通道,混合模式阈值会提升。可用黏聚区的参数与组织统计建立映射,使结构分析与显微证据对齐,形成从微结构到宏观承载的一致图景。尺寸效应会通过缺口敏感度体现,小尺度区域的应力集中更强,若反应层在几何转角处变厚,局部临界条件会被提前触发,需要在设计中避免尖角与突变的组合。

3.2 组织调控与工艺窗口优化

控制策略以两条主线展开,一条是组织调控,一条是热力与路径的工艺窗口。组织调控关注相比比例、尺度与取向的可控变化,通过中间层、表面活化与预处理改变早期界面反应,借助适度的复热与缓冷抑制脆性相的连续化,使过渡层薄而均匀。若材料组合在晶格常数与热膨胀系数上差距明显,可选用多段中间层,使错配被分散到多个层面,从而降低单一区域的应力集中。工艺窗口的设计需要约束线能量与行进速度的组合,并结合分段轨迹与驻留策略,使峰值温度不过高而冷却不过快,反应层不至于过厚也不至于不连续。约束条件的配置要在成形精度与应力释放之间平衡,适度顺应有利于回缩而不过度放任,使拉峰得到削弱且不引入新的几何偏差。

后处理路径可采用局部回火与均温缓冷,对应力场进行温和重排,同时保持组织的目标特征。为保证可执行,需要把模型与表征形成的证据转化为现场指令,包括关键检查点与容许偏差,并在偏离出现时启用备选轨迹与参数,以防单点异常向全局扩散。现场可以结合在线温度与位移监测设定阈值触发规则,当残余拉峰抬升或层厚波动增加时,自动切换到稳定组合,形成面向风险的自适应执行。控制目标存在多重约束,可用权衡曲线把产量与质量与能耗与寿命进行排序,再在安全边界内选择可执行解,现场以简洁指令与可视化标尺协同完成。人机协同还需要审核表与演练,使窗口切换与回火触发具备清晰条件,降低依赖个体经验的波动。

4 结语

异种金属焊接的界面组织受扩散反应、相变路径与应力演化共同影响,力学性能则取决于反应层的连续性与强弱配比。通过多场耦合模型与标准化表征可把热源与路径与组织和性能建立清晰映射,进而把控制量聚焦在线能量、行进速度与约束策略等可执行变量。配合中间层与后处理的分段化调控,可以在强度、韧性与耐蚀之间获得平衡,使接头在长期服役条件下保持稳定。未来的优先任务是完善参数同化与不确定管理,让模型预测与现场测量形成闭环,并建立跨材料组合的可迁移工艺规则。

参考文献

- [1]张勇斌. 铝/钢异种金属焊接研究现状综述[J]. 有色金属加工, 2025, 54(04): 1-8.
- [2]谭琦,古仲炎,张松文,等. 高温时效 TP347H/12Cr1MoV 异种金属焊接接头 I 型边界、II 型边界研究[J]. 发电设备, 2025, 39(04): 219-223+228. DOI: 10.19806/j.cnki.fdsb.2025.04.002.
- [3]黎海兵,路全彬,黄俊兰,等. 异种金属焊接结构件多轴动态力学性能测试平台设计[J]. 精密成形工程, 2025, 17(03): 31-40.
- [4]赵启宏,张贵锋,畅海丞,等. 镁合金/钢异种金属焊接研究进展[J]. 焊管, 2025, 48(06): 1-10. DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2025.06.001.