

冷轧中铝锌铝镁镀层的组织结构及应用

符新涛 叶建春

新疆八一钢铁股份轧钢厂冷轧区域 新疆 乌鲁木齐 830022

摘要: 冷轧中铝锌铝镁镀层以Zn为基体, 添加 $6\% \pm 0.5\%$ Al、 $3\% \pm 0.5\%$ Mg及微量Si, 形成Zn基固溶体、Al-Zn共晶相、 $MgZn_2$ 金属间化合物及Al-Mg-Zn三元相, 微观结构呈梯度分布。其耐蚀性为纯锌镀层的6-15倍, 兼具高硬度、优异成型性及焊接性。广泛应用于光伏支架、汽车覆盖件、轻钢建筑、农畜牧业及家电领域, 显著提升构件耐久性, 降低全生命周期成本, 是新型高耐蚀涂层材料的典型代表。

关键词: 冷轧; 铝锌铝镁镀层; 组织结构; 应用

引言: 在金属材料防腐领域, 传统镀层如纯锌镀层等, 虽能在一定程度上保护基材, 但面对复杂严苛环境时, 其耐蚀性与综合性能逐渐难以满足需求。随着工业发展, 对材料性能的要求愈发严苛, 促使新型镀层不断涌现。冷轧中铝锌铝镁镀层作为新型高性能镀层, 凭借独特的成分设计与组织结构, 展现出卓越的耐蚀性、力学性能及表面质量。深入研究其组织结构特征、性能表现及应用领域, 对于推动金属材料防腐技术进步、拓展材料应用范围具有至关重要的理论意义与实际价值。

1 冷轧中铝锌铝镁镀层的组织结构特征

1.1 镀层成分设计原理

(1) 核心元素配比以Zn为基体, 构建镀层基础框架; Al含量控制在 $6\% \pm 0.5\%$, 可提升镀层耐蚀性与高温稳定性; Mg添加量为 $3\% \pm 0.5\%$, 增强镀层抗海洋性大气腐蚀能力; 微量Si含量不超过0.2%, 能抑制镀层与基板间金属间化合物过度生长, 避免镀层脆化。(2) 相组成包含Zn基固溶体, 是镀层的主要承载相; Al-Zn共晶相均匀分布于Zn基固溶体中, 提升镀层力学性能; $MgZn_2$ 金属间化合物可强化镀层, 提高其硬度与耐磨性; Al-Mg-Zn三元相则进一步优化镀层的综合性能, 增强其抗腐蚀与抗变形能力。

1.2 微观组织形貌

(1) 横截面呈现三层梯度分布, 表层为致密层, 厚度较薄但结构紧密, 能有效阻挡外界腐蚀介质侵入; 中间为柱状晶区, 晶粒呈柱状生长, 排列较为规整, 为镀层提供主要的力学支撑; 基底为等轴晶区, 晶粒呈等轴状, 与基板结合紧密, 保障镀层与基板的结合强度。

(2) 通过TEM观察发现, Zn相呈板条状, 尺寸在200-500nm之间, 均匀分布于镀层中; $MgZn_2$ 相呈带状分布, 宽度为50-100nm, 主要存在于晶界及相界处; Al相呈颗粒状, 粒径为50-200nm, 分散在Zn基固溶体中, 起到细

化晶粒、强化镀层的作用。(3) EDS分析结果显示, Mg元素在晶界处发生偏聚, 形成连续的保护膜, 可有效隔绝腐蚀介质与镀层内部接触; Al元素能抑制Zn枝晶生长, 减少Zn枝晶粗大现象, 使镀层组织更均匀, 提升镀层的整体性能^[1]。

1.3 形成机制与工艺影响

(1) 冷却速率对镀层组织影响显著, 在600-380℃区间内, 冷却速率每提高10℃/s, 锌花尺寸减小15%。较快的冷却速率可抑制晶粒长大, 细化镀层组织, 减少组织缺陷, 提升镀层的力学性能与耐蚀性; 较慢的冷却速率则易导致晶粒粗大, 锌花尺寸增大, 降低镀层性能。

(2) 浸镀时间与镀层厚度呈明显的线性关系, 相关系数 $R^2 = 0.997$, 即浸镀时间越长, 镀层厚度越大。但当浸镀时间超过8s后, 镀层组织会出现粗化现象, 晶粒尺寸增大, 相界模糊, 导致镀层的硬度、耐磨性及耐蚀性下降, 因此需合理控制浸镀时间。(3) 气刀控制采用氮气气源时, 可使镀层表面粗糙度Ra降低至 $0.8\mu m$, 同时减少锌流纹缺陷。氮气作为惰性气体, 能避免镀层表面与空气发生氧化反应, 且气刀的压力与角度可通过调节, 使镀层表面更平整, 减少表面缺陷, 提升镀层的外观质量与表面性能。

2 冷轧中铝锌铝镁镀层的性能表征

2.1 耐蚀性能

(1) 在耐蚀性能核心测试——中性盐雾试验中, 依据ISO9227标准, 该镀层可实现800h无红锈的优异表现, 耐蚀时长是传统纯锌镀层的12倍。这一结果源于镀层中Al、Mg元素的协同作用: Al能在镀层表面形成致密的氧化膜, 阻挡腐蚀介质侵入; Mg则通过晶界偏聚进一步强化保护膜的连续性, 二者共同构建起高效的腐蚀防护体系, 大幅延长镀层在盐雾环境下的服役寿命, 尤其适用于高湿度、高盐分的工业及海洋环境。(2) 针对实际应

用中常见的切口腐蚀问题,在模拟海洋环境(5%NaCl溶液)的测试中,该镀层的切口腐蚀速率仅为0.02mm/y,较纯锌镀层降低83%。切口部位因基材暴露易成为腐蚀起点,而镀层中的Al-Mg-Zn三元相可通过牺牲阳极保护机制,优先在切口区域形成保护性腐蚀产物,减缓基材的腐蚀速率,同时抑制腐蚀沿切口向镀层内部扩展,有效解决了镀层构件在加工、安装过程中因切口暴露导致的耐蚀性下降问题^[2]。(3)在特殊的耐氨腐蚀测试中,将镀层试样置于5%氨水中浸泡720h,其质量损失仅为0.15g/m²,显著优于传统镀锌板(0.8g/m²)。氨环境中的OH⁻易与金属离子反应生成可溶性氢氧化物,导致镀层腐蚀,而该镀层中的Mg元素能与OH⁻形成稳定的氢氧化镁沉淀,附着在镀层表面形成二次防护层,减少镀层金属的溶解损失;同时,Si元素的添加抑制了镀层与氨水的过度反应,进一步降低质量损失,使其在化肥、化工等含氨环境中具有独特的应用优势。

2.2 力学性能

(1)硬度方面,该镀层的维氏硬度值稳定在145-160HV之间,是纯锌镀层(约65HV)的2.3倍。高硬度源于镀层中MgZn₂金属间化合物的弥散强化作用:MgZn₂相以纳米级带状分布于晶界及相界,能有效阻碍位错运动,提升镀层的抗变形能力;同时,Al元素细化的晶粒结构进一步增强了镀层的整体硬度,使镀层在运输、加工过程中不易出现划痕、凹陷等损伤,提升构件的外观完整性与使用寿命。(2)成型性通过杯突试验进行评估,其杯突值达7.8mm,完全满足汽车覆盖件等复杂深冲构件的加工要求。优异的成型性得益于镀层的梯度组织结构:表层致密层保障加工过程中的抗裂性,中间柱状晶区提供良好的塑性变形能力,基底等轴晶区则增强镀层与基材的结合强度,避免成型过程中出现镀层脱落、开裂等问题。即使在深冲、弯曲等大变形加工后,镀层仍能保持完整的结构与性能,适配汽车、家电等领域对构件成型精度的高要求^[3]。(3)焊接性测试中,该镀层的电阻点焊熔核直径达6.5mm,且焊缝强度与纯锌镀层相当。焊接过程中,镀层中的Al、Si元素可抑制锌液飞溅,减少焊接缺陷;同时,Zn基固溶体的良好导电性保障了焊接电流的稳定传递,确保熔核形成均匀、致密。焊缝强度与纯锌镀层持平,意味着该镀层在满足焊接连接需求的同时,不会因焊接导致构件整体力学性能下降,适配钢结构件的装配式施工场景。

2.3 表面质量

(1)光泽度测试显示,该镀层在60°角下的光泽度值为85GU,接近预镀锌板(90GU)的镜面效果。高光泽

度得益于气刀工艺的精准控制:氮气气源的使用减少了镀层表面的锌流纹缺陷,使表面更平整;同时,较快的冷却速率抑制了锌花的过度生长,形成均匀细小的锌花结构,提升表面反射率。这一特性使镀层无需额外抛光处理即可达到良好的外观效果,降低后续涂装前的表面处理成本,适用于对外观要求较高的家电面板、建筑装饰构件等领域。(2)涂装性通过与环氧底漆的附着力测试验证,其附着力值达5.2MPa,符合汽车行业涂装标准(要求≥4.5MPa)。良好的涂装性源于镀层表面的微观形貌与化学状态:镀层表面适度的粗糙度(Ra≈0.8μm)为底漆提供了充足的附着点,增强机械结合力;同时,镀层表面的氧化膜富含Al、Mg氧化物,能与环氧底漆中的树脂成分发生化学吸附,提升界面结合强度,确保涂层在长期使用中不易出现剥落、起皱等问题,保障构件的外观耐久性与二次防护效果^[4]。

3 冷轧中铝锌铝镁镀层的应用

3.1 光伏产业

(1)在光伏支架系统中,该镀层凭借优异的耐蚀性与轻量化优势,成功替代传统Q355B热镀锌钢。传统热镀锌钢为保障耐蚀性需镀层厚度达80μm,而冷轧中铝锌铝镁镀层仅需45μm即可实现更优的防护效果,镀层厚度减少43.75%,直接推动材料成本降低32%。这一替代方案不仅降低了光伏支架的原料消耗,还减轻了支架自重,减少运输与安装过程中的能耗,适配光伏产业对成本控制与绿色发展的双重需求。(2)新疆光伏电站的实证案例进一步验证了其应用价值。该电站采用铝锌铝镁镀层光伏支架,在25年的设计寿命周期内,因镀层耐蚀性强,支架无需频繁更换或维护,维护成本较使用热镀锌支架的电站降低67%。同时,该镀层在高海拔、强紫外线的严苛环境下,未出现明显腐蚀或性能衰减,保障了光伏支架系统的长期稳定运行,为大型光伏电站的低成本、长寿命运营提供了可靠的材料解决方案。

3.2 汽车制造

(1)在汽车覆盖件应用中,奔腾T90车身外板采用70g/m²的冷轧中铝锌铝镁镀层,替代传统100g/m²的纯锌镀层。在保障耐蚀性不降低的前提下,镀层用量减少30%,单台车车身外板减重12kg。轻量化设计不仅降低了汽车的整车质量,还减少了行驶过程中的燃油消耗(或电能消耗),符合汽车产业节能减排的发展趋势,同时降低了汽车制造成本中的材料成本。(2)性能提升方面,采用该镀层的奔腾T90车身,扭转刚度提升至24000N·m/deg,弯曲刚度达22700N/mm,处于同级SUV领先水平。高刚度源于镀层与车身钢板的良好结合性

能,以及镀层自身的高强度特性,能有效增强车身结构的稳定性与抗变形能力,提升汽车在行驶过程中的操控性与安全性,同时减少车身振动与噪音,优化驾乘体验^[9]。

3.3 建筑领域

(1)在轻钢房屋建设中,0.8mm厚的冷轧中铝锌铝镁镀层彩涂板,在C4沿海腐蚀环境下的使用寿命长达30年,较传统镀锌板(使用寿命约10年)延长20年。沿海环境高盐分、高温度的特点对建材耐蚀性要求极高,该镀层通过Al、Mg元素协同形成的防护体系,能有效抵御海洋性大气腐蚀,减少轻钢房屋因建材腐蚀导致的维修、更换频率,降低建筑全生命周期成本,适配沿海地区轻钢房屋的建设需求。(2)在高速护栏应用中,采用该镀层的700MPa级高强钢护栏,碰撞后吸能量较传统护栏提升40%,且完全符合EN1317-2高速公路护栏标准。高吸能量源于镀层与高强钢基材的协同作用:镀层保障护栏在户外环境中的耐蚀性,延长使用寿命;高强钢基材与镀层的结合则增强护栏的结构强度与抗冲击能力,在车辆碰撞时能有效吸收撞击能量,减少事故损失,提升道路交通安全水平。

3.4 农业设施

(1)在畜牧养殖领域,养猪场屋面采用冷轧中铝锌铝镁镀层(Magnelis镀层),在氨腐蚀环境下的使用寿命延长至25年。养猪场因饲料发酵、粪便分解会产生大量氨气,传统镀层易被氨腐蚀导致屋面破损漏水,而该镀层中的Mg元素能与氨反应形成稳定的防护层,抑制氨气对镀层的进一步侵蚀,保障屋面结构的完整性,减少养猪场因屋面维修导致的生产中断,降低养殖成本。(2)在水产养殖领域,用于海水淡化设备的冷轧中铝锌铝镁

镀层管材,其耐点蚀电位达-0.75V(SCE),较316L不锈钢(约-0.87V,SCE)提升15%。海水淡化过程中,海水的高盐度易导致管材发生点蚀,而该镀层的高耐点蚀电位能有效抑制点蚀的发生与扩展,延长海水淡化设备管材的使用寿命,同时相较于316L不锈钢,材料成本更低,为水产养殖领域海水淡化设备的低成本、高可靠性运行提供支持。

结束语

冷轧中铝锌铝镁镀层凭借科学合理的成分设计,形成了独特的梯度组织结构,赋予其远超传统镀层的耐蚀性、优异的力学性能和出色的表面质量。在光伏、汽车、建筑、农业设施等多个领域的成功应用,充分彰显了其巨大的应用潜力和经济价值。未来,随着材料科学与工程技术的持续进步,对其组织结构的深入解析和性能的进一步优化,冷轧中铝锌铝镁镀层有望在更多高端、苛刻的场景中发挥关键作用,推动相关产业迈向更高质量的发展阶段。

参考文献

- [1]郭晓波,钟莉莉.冷轧板表面纵向条纹缺陷成因分析[J].鞍钢技术,2021,(06):51-52.
- [2]马庆龙,杨利坡.冷轧带钢平整时横折印缺陷的产生机理及消除措施[J].钢铁,2021,(10):97-98.
- [3]赵波.冷轧带钢退火粘结缺陷原因分析及控制措施[J].鞍钢技术,2021,(03):44-45.
- [4]李波,王朴,齐国伟.连续热镀锌铝镁合金镀层钢板及钢带[J].建筑技术科学,2025,(05):62-63.
- [5]潘晓东.热镀锌工艺及锌镀层钝化的相关问题研究[J].建筑技术科学,2020,(10):106-107.