

锌铝镁涂层钢研究现状与发展趋势

薛兴隆, 路 璐, 宋文钟

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 锌铝镁涂层钢作为一种革命性的金属防护材料, 凭借其卓越的耐腐蚀性能、自我修复能力和良好的加工性能, 已成为传统镀锌材料的升级替代品。文章系统综述了锌铝镁涂层钢的国内外研究现状、市场分析、技术进展与发展趋势。首先, 重点分析了锌铝镁涂层的成分设计与性能优化、耐腐蚀机理与寿命预测模型、焊接与加工技术突破、环保型表面处理技术等关键技术进展。其次, 探讨了锌铝镁涂层钢在光伏、汽车、建筑等领域的应用现状, 并针对行业面临的技术标准不统一、成本压力等挑战, 提出了未来向高强度轻量化、环保化、智能化方向的发展趋势。最后, 对我国锌铝镁涂层钢产业的健康发展提出了建议。

关键词: 锌铝镁涂层钢; 耐腐蚀性能; 成分设计; 生命周期评估; 标准化

中图分类号: TG174.4

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2026)02-0026-05

Research Status and Development Trends of Zn - Al - Mg Coated Steel

Xue Xinglong, Lu Lu, Song Wenzhong

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: As a kind of revolutionary metal protection material, the Zn - Al - Mg coated steel has become the upgraded substitute of traditional zinc - plating material due to its excellent corrosion resistance, self - repairing capability and good processing performance. In this paper, it is systematically overviewed the research status, market analysis, technological progress and development trends of Zn - Al - Mg coated steel at home and abroad. Firstly, it is emphatically analyzed the progress of such key technologies as the composition design, performance optimization, mechanism of corrosion resistance, life model, technological breakthrough of welding and processing as well as environment friendly surface treatment technologies. Secondly, the application status of Zn - Al - Mg coated steel in such fields as photovoltaic industry, automobile and construction is discussed as well as future development trends towards high strength, light weight, environmental protection and intelligentization are proposed aiming at such challenges facing by the industry as non - uniform technical standards and cost pressure. Finally, the suggestions on healthy development of Zn - Al - Mg coated steel industry in our country are put forward.

Key words: Zn - Al - Mg coated steel; corrosion resistance; composition design; life cycle assessment; standardization

锌铝镁涂层钢是在传统镀锌钢板的基础上, 通过在镀层中添加特定比例的铝和镁元素形成的三元

合金镀层系统。根据欧标 EN—10346—2015《冷成型用连续热镀涂层钢扁平产品—交货技术条件》的

定义, 锌铝镁镀层是以锌为主体成分, 同时含有 1.5% ~ 8% 的铝和镁(其中镁含量不低于 0.2%) 的三元合金镀层。这种独特的成分设计使锌铝镁涂层钢在耐腐蚀性能(达传统镀锌材料的 5 ~ 20 倍)、自我修复能力和机械强度等方面均显著优于传统镀锌钢材^[1-3]。

锌铝镁涂层钢的发展历程可追溯至 20 世纪末, 日本制铁在这一领域实现商业化突破。中国虽然起步较晚, 但近年来发展迅速, 2016 年酒钢成功生产出国内第一卷锌铝镁合金镀层钢板, 实现了我国钢铁产品在高耐蚀领域“零”的突破。随着全球对基础设施耐久性要求的提高以及环保法规的日益严格, 锌铝镁涂层钢正逐渐取代传统镀锌钢材, 在建筑、汽车、光伏发电、高速公路护栏等多个领域获得广泛应用^[4-5]。

本文基于国内外最新研究进展和市场数据, 系统梳理锌铝镁涂层钢的技术特点、市场现状、应用领域和发展趋势, 以期对相关从业者 and 研究人员提供参考。

1 市场与产业分析

1.1 全球市场规模与区域格局

全球锌铝镁涂层钢市场呈现快速增长态势。据统计, 2023 年全球锌铝镁涂层钢市场销售额达到 28.67 亿美元, 预计 2030 年将达到 59.57 亿美元, 年复合增长率为 6.0% (2024—2030 年)。这种增长主要来自于基础设施建设、新能源行业发展和传统产业升级的需求。

从区域格局看, 欧洲、日韩和中国是三大主要生产 and 消费区域。欧洲和日韩企业凭借技术先发优势, 在全球高端市场占据主导地位, 而中国企业则后来居上, 正在迅速扩大市场份额。从产品类型看, 锌铝镁涂层钢可分为低铝、中铝和高铝三大类, 其中低铝锌铝镁镀层钢目前市场份额最大, 约占 43%。

1.2 中国产业发展现状

中国作为全球最大的钢铁生产和消费国, 锌铝镁涂层钢市场发展迅猛。在 2017 年之前, 中国市场主要由国外企业主导, 国产化程度较低。但近年来, 随着宝钢、酒钢、首钢等国内企业持续投入研发, 中国锌铝镁涂层钢的生产规模不断扩大, 国产化率显著提升。

光伏行业的爆发式增长为锌铝镁涂层钢提供了广阔市场空间。2023 年中国光伏新增装机

216.3 GW, 同比增长 148.12%。锌铝镁涂层钢因其耐腐蚀性大幅提升(中铝系锌铝镁镀层耐蚀性达纯锌镀层的 3 ~ 10 倍), 可满足光伏支架 25 年设计使用寿命要求, 已成为光伏支架领域的首选材料。

更值得关注的是, 中国企业在国际标准制定中话语权提升。由酒钢主导制定的 ISO 8353:2024《商品级、冲压级和结构级用连续热浸镀锌铝镁合金镀层钢板及钢带》国际标准发布, 标志着中国企业在锌铝镁涂层钢领域取得了重要突破^[6]。

1.3 产业链结构与竞争态势

锌铝镁涂层钢的产业链包括上游原材料供应(锌、铝、镁等金属的开采和冶炼)、中游涂层钢生产和下游应用三个主要环节。下游应用极为广泛, 涵盖建筑、汽车、家电、光伏、高速公路护栏等多个领域。

全球市场竞争格局高度集中, 前四大厂商占据约 60% 的市场份额, 主要参与者包括日本制铁、塔塔钢铁、奥钢联和萨尔茨吉特等国际巨头, 以及中国的宝钢、首钢、酒钢等企业(如表 1 和表 2 所示)。市场竞争正从单纯的价格竞争转向技术、品牌、标准等多元化竞争维度。

2 技术进展与创新

2.1 成分设计与性能优化

锌铝镁涂层的技术核心在于其合金成分设计和微观结构控制。目前商业化的锌铝镁镀层产品已发展出多种成分体系: 低铝锌铝镁(铝含量 1% ~ 3%)、中铝锌铝镁(铝含量 5% ~ 11%) 和高铝锌铝镁(铝含量 55%)。每种体系有不同性能特点, 如中铝锌铝镁在耐腐蚀性和加工性能间实现良好平衡, 成为光伏支架和高速公路护栏、汽车制造、家用电器、仓储货架、制冷与暖通设备等户外应用的首选。

最新研究表明, 在镀层中添加微量合金元素可进一步改善性能。酒钢创新性地利用铝、镁和稀土元素, 形成了具有独立知识产权的锌铝镁合金镀层产品及生产技术。添加稀土可细化镀层组织, 提高耐腐蚀性能。此外, 通过控制硅、锆等元素含量, 可影响镀层凝固过程, 减少表面缺陷, 提高产品质量一致性^[8]。

镀层性能优化不仅在于成分调整, 还涉及工艺参数精细控制。首钢研究人员通过研究锌铝镁镀层凝固行为, 发现厚规格镀层表面“圆点缺陷”的形成机制, 由此开发了镀层分段冷却控制工艺, 显著降低了表面缺陷发生率^[9]。

表 1 国外主要锌铝镁涂层钢生产企业及其产品特点^[7]

公司名称	产品特点	核心技术优势	主要应用领域
日本制铁 (Nippon Steel)	低铝(如 Zn - 0.2% Al - 0.5% Mg) 到中高铝(如 Zn - 11% Al - 3% Mg - Si) 的多种产品	1. 技术先驱:率先实现锌铝镁钢板商业化生产,技术积累深厚 2. 全景覆盖:不同品牌产品针对性强,耐腐蚀性最高达传统镀锌板的 20 倍 3. 强大的研发能力:在全球拥有大量相关专利	建筑、高速公路护栏、汽车、电力设备、家电等
塔塔钢铁 (Tata Steel)	低铝成分体系:铝含量约 1% ~ 2%,镁含量约 1% ~ 2%	1. 欧洲最早的开发之一:在欧洲市场拥有先发优势 2. 均衡的性能:宣传称其耐腐蚀性是传统纯锌镀层的 4 倍以上,在耐腐蚀性和加工性能之间取得良好平衡	建筑行业和部分家电内板
奥钢联 (voestalpine)	低铝成分体系:铝含量约 2%,镁含量约 1.5%	1. 专注于高表面要求:产品以优异的表面质量著称,尤其适合作为彩涂基板和使用在高端家电、汽车部件上 2. 面向汽车产业:是欧洲以汽车用钢为主攻方向的锌铝镁产品生产商之一	汽车、家电、建筑等领域
萨尔茨吉特 (Salzgitter)	低铝成分体系:铝含量约 1.5%,镁含量约 1.5%	1. 高质量标准:产品实物质量好,表面质量可达 O5 标准(汽车外板标准) 2. 材料覆盖广:产品涵盖从碳素结构钢到双相钢等多个钢种,满足多样化需求	彩涂基板、家电和汽车等高表面用途

表 2 国内主要锌铝镁涂层钢生产企业及其产品特点

企业名称	产品特点	主要应用领域	技术优势
酒钢集团	中铝成分体系(铝含量约 5% ~ 11%)	光伏、高速公路护栏、5G 基站	2016 年产出国内第一卷锌铝镁钢板,主导制定国际标准
宝钢股份	全成分体系(低铝、中铝、高铝)	汽车、家电、建筑	产品系列覆盖广,战略规划完备
河钢唐钢	低铝成分体系,热基锌铝镁产品	光伏、畜牧、彩涂基板	国内首家具备热基锌铝镁产品生产能力
首钢集团	以低铝成分体系为主	建筑结构、高速公路护栏、光伏支架	产品应用覆盖面广

2.2 耐腐蚀机理与寿命预测

锌铝镁涂层钢的卓越耐腐蚀性能源于其独特耐腐蚀机制。研究表明,镁元素通过改变腐蚀产物的化学组成,使其从普通镀锌层中疏松多孔的氧化锌,转变为由氢氧化镁、碱式碳酸锌以及碱式碳酸锌镁(如 $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2 \cdot xMgCO_3$) 组成的致密不溶性胶状物质。

这些富含镁的复合腐蚀产物具有极低的溶解度和良好的稳定性,它们不仅能够有效填充镀层原有的微孔缺陷,形成致密的物理阻隔层,更重要的是,当镀层局部受损(如切口或划伤)暴露基体时,镁离子和锌离子会随电解液迁移并在损伤处富集,原位生成上述致密的复合保护膜。这一过程覆盖了裸露的钢基体,阻断了腐蚀的进一步发生,从而实现了“牺牲阳极保护 + 产物膜层保护”的双重长效防腐机制,即所谓的“自修复”功能。

从电化学角度看,中铝锌铝镁镀层的耐蚀机制源于其多相组织构成的“短路多电极体系”。镀层

中富铝相、富锌相及 $MgZn_2$ 化合物之间存在电位差,形成大量微电池。其核心机制在于富铝相作为微阴极发生极化,形成致密氧化膜,极大增加了阴极反应阻力(提高阴极极化率),从而显著降低了整体腐蚀电流密度。同时,镁元素的优先溶解(阳极极化)释放离子,促进生成低溶解度的碱式碳酸锌镁等产物。这些产物填充镀层微孔并覆盖阴极区,进一步阻断电子传输与介质扩散,实现了“高耐蚀 + 自修复”的协同保护。锌铝镁镀层中存在多元相的电偶效应。镀层中的富铝相、富锌相及镁锌化合物之间存在复杂电化学相互作用,降低了腐蚀电流密度。

为准确预测锌铝镁涂层钢使用寿命,研究人员开发了寿命预测模型。通过大气暴露实验,系统研究锌铝镁镀层在不同腐蚀环境中的行为,建立锌铝镁镀层与纯锌镀层腐蚀速率比值与大气腐蚀强度的函数关系,结合 ISO 9223:2012《金属和合金的腐蚀—大气腐蚀性分类、测定与评估》标准构建大气

寿命预测模型^[10]。

2.3 焊接与加工技术突破

焊接性能是影响锌铝镁涂层钢广泛应用的关键因素。研究表明,锌铝镁镀层高强钢在高频焊过程中容易出现液态金属脆性裂纹。液态金属脆性(LME)裂纹的诱因是“应力+液态金属渗入”的高温协同作用。高频焊接时,锌铝镁镀层中的Zn、Mg元素因低熔点(Zn:419.5℃,Mg:650℃)在高温下熔化为液态金属,沿奥氏体晶界快速润湿、渗透,显著降低晶界结合能,造成晶界弱化。此时,焊接热应力与残余拉应力集中作用于脆化的晶界,触发解理断裂。液态金属与应力形成恶性循环:应力促进液态金属渗入,渗入进一步削弱晶界承载能力,最终导致沿晶LME快速扩展。Mg的高化学活性加剧了形成低熔点共晶相与晶界渗透,使锌铝镁镀层高强钢在焊接时对LME更敏感,因此需严格管控焊接热输入与应力状态。针对此问题,各国企业提出不同解决焊接方案:韩国企业不建议450MPa及以上高强钢级别进行焊接;日本企业建议焊接前去除焊缝区域镀层;欧洲企业推荐激光焊接替代高频焊接。

我国研究人员开发了创新解决方案。首钢通过系统研究焊接过程中锌铝镁镀层LME裂纹发生机制,提出惰性气体保护焊接技术,并开发配套设备,将高强钢焊接LME裂纹开裂率降至近零水平。

我国在高强度高塑性锌铝镁涂层钢开发方面也取得重要突破^[11]。首钢基于“热轧-酸洗-退火”制造流程,综合运用多种强化机制,成功开发出700MPa级热基锌铝镁高强钢,其断后伸长率不低于20%,显著高于欧洲企业开发的同类产品。

2.4 环保型表面处理技术

面对日益严格的环保法规,锌铝镁涂层钢的环保型表面处理技术成为研究热点。环保型表面处理技术是指通过物理、化学或生物方法,采用无毒、无害或低毒、低害的材料与工艺,对金属、非金属等材料表面进行处理,以提高其性能、延长使用寿命并显著减少环境污染的绿色技术,是替代传统高污染表面处理工艺、实现可持续发展的关键路径。传统六价铬(Cr⁶⁺)缓蚀剂因致癌性和毒性被严格限制使用,研究人员正在开发新型环保缓蚀剂替代铬酸盐技术。

研究评估了四种环保型缓蚀剂(OPMG、HT-PABA、BTSA、Ca-Ex)在聚乙烯醇缩丁酚(PVB)涂层中对热镀锌和锌铝镁镀层钢的防护效果。在标准

中性盐雾试验条件下,经72h连续暴露后,BTSA对阴极剥离抑制效率达92%,OPMG对丝状腐蚀抑制效率达92.6%。这些环保缓蚀剂通过不同机制发挥作用,为锌铝镁涂层钢可持续发展提供了技术支撑。

3 应用领域分析

3.1 光伏领域

光伏领域是锌铝镁涂层钢最重要的应用市场之一。根据GB 50797—2012《光伏电站设计规范》要求,光伏支架设计使用年限需达到25年。锌铝镁涂层钢因其耐腐蚀性大幅提升,可满足设计要求,成为光伏支架最佳选择。

与传统铝边框相比,锌铝镁钢边框具有明显优势,一是钢材强度远高于铝合金,更能满足光伏组件大型化趋势;二是其全生命周期碳排放仅为铝合金边框的1/7~1/4,更适应光伏行业绿色低碳发展趋势。

3.2 汽车工业

在汽车工业中,锌铝镁涂层钢应用不断扩大。与现有热镀锌、热镀锌铁合金及电镀锌汽车板相比,宝钢等企业开发的锌铝镁镀层汽车板具有更高耐蚀性及更好成形性,体现在平面耐蚀性、切口耐蚀性、焊点耐蚀性和电泳后膜下扩蚀等方面。宝钢锌铝镁镀层还具有优异成形性能,由于摩擦系数低、镀层磨损少、拉毛缺陷轻等优点,更适合汽车零件加工,为汽车工业轻量化和耐腐蚀性能提升提供了理想材料选择。

3.3 建筑与家电领域

在建筑领域,锌铝镁涂层钢广泛应用于彩涂基板、轻钢结构建筑等。以锌铝镁产品为基板的彩涂板节能和耐蚀性优异,相比热镀锌产品锌耗降低1/3。

在家电领域,海尔、美的等企业已对宝钢、首钢京唐和河钢唐钢的产品进行认证和试用,尤其在空调、洗衣机、微波炉、燃气罩等耐蚀性要求较高的场景,锌铝镁涂层钢显示出巨大替代潜力。

4 挑战与发展趋势

4.1 面临的挑战

锌铝镁涂层钢发展仍面临多方面挑战。技术层面,厚规格锌铝镁镀层易出现表面圆点缺陷;高强钢焊接性能问题尚未完全解决;极端腐蚀环境下长期

耐久性数据不充分。市场层面,主要挑战包括成本压力和标准不统一问题。虽然长期性价比优于传统镀锌钢材,但初始投资成本较高限制其在价格敏感型项目中应用。行业标准不一致导致产品质量参差不齐,增加用户采购难度和风险。为此,2024年6月冶金工业规划研究院启动了系列锌铝镁合金镀层钢板及钢带标准研制工作。

专业人才短缺也是重要挑战。锌铝镁涂层钢作为新材料,其设计、加工和应用需专业知识和经验,目前行业内精通此材料的专业人才严重不足。

4.2 未来发展趋势

如表 3 所示,未来锌铝镁涂层钢发展将呈现多

元化创新趋势。产品技术方面,高强轻量化和环保镀层是主要方向。随着新能源汽车、光伏支架等领域对材料性能要求提高,开发更高强度、轻量化产品成为企业竞争重点。应用领域方面,锌铝镁涂层钢正从传统建筑、家电向新能源、高端装备制造等新兴领域扩展。随着 5G 基站、数据中心等新基础设施建设提速,锌铝镁涂层钢在通信设备外壳、服务器机柜等方面应用不断拓展。生产工艺方面,推动智能化和数字化赋能,实现生产过程精确控制和质量追溯,提高产品一致性和生产效率。可持续发展方面,通过优化镀层成分设计,减少锌等稀缺金属使用量;改进工艺降低能耗和排放,提高资源利用效率。

表 3 锌铝镁涂层钢未来重点发展方向与挑战

发展方向	具体内容	面临的挑战	预期时间
高强轻量化	开发 700 MPa 级以上高强度钢,伸长率 $\geq 20\%$	强度与塑性平衡,焊接裂纹控制	2~3 年
环保镀层	无铬处理、低 VOC 排放技术	成本控制,性能一致性	1~2 年
智能生产	工业 4.0、质量追溯系统	初始投资大,技术集成复杂	3~5 年
新兴应用	新能源汽车、海上光伏	长期耐久性数据缺乏,标准缺失	2~4 年

5 结论与展望

锌铝镁涂层钢作为传统镀锌材料的升级替代品,凭借其卓越耐腐蚀性、自我修复功能和良好加工性能,已成为钢铁材料防腐技术的重要发展方向。全球市场规模持续扩大,中国企业从技术追随者逐步成长为国际标准制定者。

为推动产业健康发展,笔者建议:加强标准体系建设,统一产品标准和方法评价;加大研发投入,突破高强度焊接、表面质量控制等关键技术;促进产学研用深度融合,加速技术创新和成果转化;培育专业人才,提升行业整体技术水平;构建产业生态,推动上下游协同发展。

参 考 文 献

[1] 高永强. 锌铝镁无铬耐指纹液稳定性提升关键技术分析[J]. 化工管理,2025(27):148-151.

[2] 左刚,张艳,胡瑶,等. 锌铝镁单一镀层防腐体系在海上光伏支架中的耐蚀性能研究与应用[J]. 西北水电,2025(4):31-35.

[3] 李银花,黎敏,周林,等. 锌铝镁合金镀层在整车耐久路试中的腐蚀行为[J]. 电镀与涂饰,2025,44(9):111-116.

[4] 李润昌,周纪名,潘明,等. Zn-1.5%Al-1.5%Mg 镀层汽车板质量评价[J]. 轧钢,2025,42(4):143-150.

[5] 张丹丹,张权威. 电感耦合等离子体发射光谱法测定锌铝镁合金镀层钢丝镀层中镁含量[J]. 金属制品,2025,51(4):38-40.

[6] 殷艺. 酒钢“创新驱动+品牌赋能”铸就国际话语权[N]. 中国冶金报,2025-05-10(018).

[7] 建筑用高铝锌铝镁涂镀钢板关键技术与装备[J]. 中国冶金,2025,35(8):194.

[8] 刘润博. 薄规格超薄锌层镀锌铝镁带钢生产实绩[J]. 山西冶金,2024,47(11):184-185,189.

[9] 王业科,刘显军,杨薇,等. 热轧基板连续锌铝镁镀层机组的设计选型[J]. 轧钢,2024,41(3):83-89,97.

[10] 于浩,程子嫣,邵慧敏. 高品质长寿命镀锌铝镁产品研发进展[J]. 鞍钢技术,2025(1):1-9.

[11] 徐诗鑫,陈欣,张芝民,等. 纳米颗粒控制金属相变的机制及在热浸镀锌铝镁钢板中的应用展望[J]. 工业加热,2025,54(3):11-15.