

汽车用金属材料及防腐技术发展趋势

王洛浩

广东省深圳市坪山区比亚迪汽车工业有限公司，广东深圳，518118；

摘要：本文系统梳理了汽车用金属材料及防腐技术的发展现状与未来趋势，分析了主流金属材料（如高强度钢、铝合金、镁合金、钛合金）的性能特点和应用场景，并指出结合轻量化与环保需求，材料多元化与复合化是未来核心方向，分析了从传统防腐技术（如镀锌、涂层）到新兴技术（如纳米涂层、自修复涂层）的技术演进，强调智能化、绿色化与多功能化是防腐技术发展重点，结合全球市场动态与政策导向后提出跨学科研发、标准体系完善及产业链协同是推动技术突破的关键路径，研究显示汽车工业应对轻量化、电动化与全球化挑战时，材料创新与防腐技术升级正成为核心驱动力。

关键词：汽车金属材料方面；防腐技术是关键且与轻量化概念相关；纳米涂层；自修复涂层都是防腐技术中的重要部分

DOI：10.69979/3041-0673.26.01.037

引言

汽车工业的发展同金属材料以及防腐技术有着紧密的联系，金属材料是汽车结构的基础，整车的安全性、轻量化程度和使用寿命都会直接被其性能所影响，不过金属腐蚀这一问题长期让汽车行业头疼，它会使汽车性能下降，造成巨大的经济损失，行业统计表明全球每年汽车因腐蚀遭受的直接损失超过千亿元，隐性风险更是难以估算，新能源汽车的发展对材料耐电化学腐蚀的性能有了更高的要求，轻量化的目标促使高强度、低密度的金属材料被广泛运用，全球汽车产业面临着严格的碳排放法规，消费者对汽车寿命也有了更高的期待，这就使得金属材料与防腐技术协同创新成为行业突破的关键，本文打算系统地分析汽车用金属材料以及防腐技术的发展趋势，为行业的研发和应用提供支持与参考。

1 汽车用金属材料发展现状与趋势

1.1 主流金属材料性能与应用特征

在汽车金属材料里高强度钢占主导地位，其在车身的应用比例超过60%，第一代高强度钢像强度在600MPa的DP600被用于安全件，第二代热成型钢22MnB5强度达到1500MPa且能使碰撞安全性能提升30%，第三代先进高强度钢(AHSS)实现了强度和延性的平衡且伸长率在25%、应用比例为45%、能让车身减重18%且刚度提高22%。

铝合金轻量化的关键在于其 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 的密度，在汽车方面，覆盖件应用率为30%，全铝车身能减重40%，锻造铝合金控制臂可减重55%且疲劳寿命提升20%，像“臻晶”这种免热处理的铝合金，强度达350MPa，延伸率为12%，生产周期缩短40%，能耗降低60%，2023年

其市场规模为1054亿，预计到2030年将达到1395亿。

镁合金是密度为 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 的最轻金属，其应用扩展到座椅框架时能使重量减轻32%但成本会增加15%，镁合金存在耐蚀性差（盐雾腐蚀率是铝合金的5倍）、高温性能会衰减（ 150°C 时强度降低60%）的瓶颈，怎么解决？可以采用微弧氧化（盐雾寿命达500小时）、稀土合金化（后使用温度能到 250°C ）。

钛合金能耐 600°C 高温且被用于排气系统，可减重35%且寿命超10年，但成本高达50万/吨且用量不足0.5kg；特种金属里，铍青铜用于高压连接器，金属基复合材料能使硬度提升3倍且被用于刹车盘。

1.2 材料技术发展的核心趋势

1.2.1 轻量化导向下的多材料混合架构

汽车对强度、韧性、耐蚀性和成本有多元需求而单一材料满足不了这些需求，多材料混合车身就成了必然选择，典型钢铝混合结构里关键安全区用高强度钢、覆盖件和非承力部件用铝合金且再用碳纤维(CFRP)局部优化，就像极氪009后车身“纤晶”铝型材和热成型钢焊接后车身扭转刚度达 $36450\text{N}\cdot\text{m}/^\circ$ ，比传统钢车身强11%且重量还减轻23%，混合架构设计的难点是异质材料连接但自冲铆接(SPR)、搅拌摩擦焊(FSW)等新工艺能让钢-铝、铝-塑连接强度达到母材80%。

1.2.2 低碳转型驱动再生材料应用

全球“双碳”目标之下，汽车产业链正加快低碳材料体系的构建，由于原生铝生产能耗是再生铝的20倍且再生铝碳排放减少95%，其在汽车用铝里的占比从2015年的25%提高到2023年的42%，而宝武镁业构建起“开采-冶炼-回收-再生”的闭环产业链，镁合金废料回收率超90%且太阳能电解镁生产线能耗降低30%，欧

盟《报废汽车指令》(ELV)规定2025年材料回收率要达到95%，这推动再生镁、再生钢的应用，预计2030年再生金属在汽车用金属材料里所占比例将超60%。

1.2.3 功能集成化催生新材料研发

汽车智能化促使金属材料朝着功能化转型，导电导热一体化材料成为热点，石墨烯改性铜合金，其导电率达58MS/m，热导率超400W/(m·K)，适用于新能源车电机绕组与电池热管理，形状记忆合金如镍钛合金可用于碰撞吸能结构，车身部件在事故后能自修复，使维修成本降低30%，抗菌金属材料如含银离子不锈钢应用于内饰件，其表面细菌存活率相比普通材料降低90%。

2 汽车防腐技术发展现状与趋势

2.1 传统防腐技术的优化与瓶颈

2.1.1 表面涂层技术的持续改进

汽车防腐的基础工艺是阴极电泳涂装，电场起作用时树脂颗粒会均匀沉积在金属表面从而形成15-20 μ m的致密漆膜，某德系车企的最新工艺用的是高固体分电泳涂料，漆膜厚度均匀性达到95%且盐雾测试寿命超1000小时，热镀锌钢板的镀层结构从纯锌层(GI)升级成锌铁合金层(GA)、锌铝镁合金层(ZM)，锌铝镁镀层的耐蚀性比纯锌镀层高3-5倍且在沿海地区能用15年，空腔注蜡工艺把120-150 $^{\circ}$ C的液态蜡注入车身封闭腔体形成50-100 μ m的保护膜，某美系车企测试表明这工艺能让车身内腔腐蚀速率降低80%。

2.1.2 化学转化膜技术的环保转型

铝合金的阳极氧化工艺从硫酸体系朝着草酸、磷酸体系优化，在脉冲电流控制下，氧化膜孔隙率降低30%且封孔质量提高40%，铬酸盐转化膜有环境危害，不过无铬转化技术有了突破，锆盐转化膜能形成ZrO₂-Zr(OH)₄复合膜层，其耐中性盐雾时间达200小时且已应用于某国产新能源汽车电池托盘，但传统防腐技术还面临两大挑战，涂层体系厚度和重量存在矛盾，即涂层增厚耐蚀性会提升而车身重量却会增加，并且复杂结构件涂层完整性难以保证，锐角、焊缝等区域容易形成涂层薄弱点。

2.2 新兴防腐技术的突破与应用

2.2.1 纳米涂层技术的革命性进展

在涂料里添加微胶囊或者纳米颗粒，自修复涂层就能对细微划痕自主修复，一汽奔腾悦意03用的“纳米陶瓷自修复涂层”，涂层一破损，微胶囊里包裹的修复剂(含硅烷偶联剂与缓蚀剂)就自动释放，跟金属表面起化学反应，新的保护膜就形成了，实验室数据表明，这种涂层做2400小时中性盐雾实验，基材不会锈蚀，修复效率在85%，而超疏水涂层靠纳米级粗糙度设计(像二氧化硅颗粒阵列)，能让水滴接触角超150 $^{\circ}$ ，滚动

角小于10 $^{\circ}$ ，这样雨水、融雪剂在车身表面附着时间就有效减少了，某自主品牌车型用了之后，底盘部件腐蚀速率降了60%。

2.2.2 智能防腐系统的构建与集成

腐蚀监测技术从离线检测朝着在线智能监测转变，中汽数据开发出车载腐蚀传感器网络，能凭借电化学阻抗谱(EIS)对车身关键部位的腐蚀电位与电流密度予以实时监测，一旦腐蚀速率超出阈值，系统便自动预警并调整防腐策略，动态防护技术把微处理器和电化学调控模块相结合，靠施加反向电流来抑制腐蚀电池的形成，有日系车企测试发现，这技术能让车身焊缝区域的腐蚀寿命延长两倍还多，区块链技术在防腐工艺追溯方面开始得到应用，记录涂层厚度、固化温度等关键参数，从而精准溯源腐蚀失效情况。

2.2.3 绿色防腐工艺的推广与普及

行业达成了用水性涂料替代溶剂型涂料的共识，巴斯夫的BASF Aquatech水性涂料体系VOC含量在30g/L以下，和传统溶剂型涂料相比降低了90%且漆膜硬度、附着力等性能指标比国家标准还高；无磷前处理工艺(像硅烷处理)靠化学吸附形成纳米级保护膜，解决了磷化时总磷排放的问题，有个国产车企的应用实例表明该工艺让废水处理成本降了40%且处理周期短了30%；生物基涂料研发也有了成果，以蓖麻油、松节油做原料的天然树脂涂料耐候性快赶上传统石油基涂料了，5到10年里有望大规模应用。

2.3 防腐技术发展的核心方向

2.3.1 智能化：从被动防护到主动干预

未来“监测-评估-修复”的闭环控制将由防腐技术达成，智能涂层集成MEMS传感器能实时感知环境湿度、盐分浓度等腐蚀因子并通过边缘计算模块动态调整防护策略。腐蚀预测模型以机器学习为基础，依据车辆使用区域的温度、降雨、大气污染物等气候数据提前优化涂层配方与工艺参数，实现防腐方案个性化定制。

2.3.2 绿色化：全生命周期的环境友好

在材料选择以及工艺实施方面，防腐技术向着“零污染、低能耗、高回收”的方向迈进，传统的重金属药剂会被无铬、无镍、无铅的环保型钝化剂全面取代，而且像紫外光固化这样的低温固化技术，能让涂层固化温度从180 $^{\circ}$ C下降到80 $^{\circ}$ C，能耗减少一半还多，涂层回收技术利用溶剂溶解和树脂再生，使得废漆渣回收率超95%，涂装行业固废污染问题从源头上得到解决。

2.3.3 多功能化：涂层性能的跨界融合

汽车的多元化需求靠单一防腐功能的涂层已难以满足，多功能复合涂层成为发展趋向。空心陶瓷微珠添加进隔热防腐一体化涂层，可使车身表面太阳辐射吸收

率降至 30%以下且车内空调负荷降低 15%。新能源汽车电池壳体使用导电防腐涂层,既能阻挡电解液腐蚀又能实现静电屏蔽以防止电磁干扰。抗菌防腐涂层释放银离子或者铜离子,能抑制大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等有害菌滋生从而营造健康的车内环境。

3 行业挑战与未来展望

3.1 关键技术瓶颈与产业痛点

3.1.1 材料性能与成本的平衡难题

镁合金耐蚀性的改良得依靠表面处理工艺的进步,不过复杂的涂层体系会使成本提高 20%-30%,并且碳纤维复合材料强度方面优势明显,但成本高达 50 美元/公斤,是铝合金的 10 倍还多,这限制了其在主流车型的应用,多材料混合车身电化腐蚀的问题还没彻底解决,不同金属间存在电位差,电偶腐蚀风险增大,得开发跨材料协同防腐技术。

3.1.2 环境适应性与标准体系缺失

全球不同区域腐蚀环境差别很大,俄罗斯的高湿高盐气候、中东的高温强日照、东南亚的酸雨环境,汽车防腐存在差异化需求,但是当下行业没有统一的腐蚀测试标准,中国的 CA-CAP 测评体系与欧美的、日韩的不同,导致出口车型的防腐设计需重复验证,进而增加研发成本,而且新能源汽车的电池包、电机等电气化部件有独特的腐蚀风险,如电解液泄漏、电偶腐蚀等,现有的防腐技术标准已无法完全涵盖。

3.1.3 跨学科协同与产业生态短板

金属材料研发、表面处理工艺、腐蚀监测技术属于不同的学科领域,当下产学研合作存在“技术孤岛”现象,导致材料性能优化和防腐工艺匹配度不够,高强度钢表面镀层附着问题需要冶金学家和涂装工程师共同攻关,而且纳米涂层规模化制备要依靠精密涂布设备的研发,但国内在高端涂覆装备方面受国外技术限制。

3.2 未来技术突破路径与产业愿景

3.2.1 材料创新:构建轻量化-耐蚀性-功能性协同体系

高强度钢:马氏体时效钢要开发出抗拉强度大于 2000MPa 的靠纳米晶强化和界面调控来提升材料抗应力腐蚀性能。

轻合金:研发密度小于 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ 的镁锂合金并运用表面原子层沉积(ALD)技术制出纳米级氧化铝保护膜,以此解决镁基合金耐蚀性方面的难题。

复合材料:碳纤维-铝合金层合板(CFRP-A1)工程化应用的推进需要开发出适用于异质材料界面的梯度防腐涂层。

3.2.2 技术突破:打造智能化-绿色化-精准化防腐体系

纳米技术深化:开发自修复效率能超过 90%的核壳

结构微胶囊来让涂层损伤得到多次自主修复,研制厚度小于 $5\mu\text{m}$ 的超疏水超亲油双功能涂层以满足底盘部件防污防腐的需求。

工艺创新:数字光处理(DLP)3D打印技术被引入,使复杂结构件的局部精准涂覆得以实现,并且AI算法用于优化涂层配方,将研发周期从 18 个月缩短到 6 个月以内。

标准建设:推动 CA-CAP 测评体系与国际标准(像 ISO16232、GM9540P)的互认并且制定新能源汽车专用的防腐测试规范(电池包盐雾-湿热循环测试标准)。

3.2.3 产业协同:构建全链条创新生态

建立国家级研发平台:高校、企业、检测机构的资源被整合起来开展金属材料腐蚀机理、涂层失效模型等基础研究。

推进绿色制造试点:在汽车产业集群建设“零碳涂装工厂”时,需示范推广光伏发电、废漆渣资源化利用等技术。

加强国际技术合作:中欧汽车防腐联合实验室被组建起来并共同开发涂层体系以适应极端气候,中美清洁能源合作计划被参与其中且推动轻量化材料与防腐技术的协同创新。

4 结论

汽车工业电动化、智能化、全球化变革浪潮下,金属材料与防腐技术迎来前所未有的创新机遇与挑战,其汽车用金属材料发展主线是高强度钢性能优化、轻合金规模化应用、复合材料技术突破,防腐技术变革方向由传统防腐技术绿色化升级、新兴技术工程化应用、智能防腐系统构建所引领,未来行业要朝着“轻量化、低碳化、功能化”目标,深度耦合材料设计与防腐技术,突破单一技术瓶颈,构建全生命周期解决方案,覆盖“材料开发、工艺优化、服役监测、回收再生”,当跨学科研发深入、标准体系完善、产业链协同加强后,汽车用金属材料及防腐技术会给全球汽车产业可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]何毅,徐中浩,陈航宇,等.金属材料防腐技术的研究进展[J].应用化工,2013,42(11):4. DOI:CNKI:SU N: SXHG. 0. 2013-11-039.
- [2]宝江.金属材料热处理工艺及技术发展趋势探讨[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2023(5):413 5-4136. DOI:10.12277/j.issn.1673-7075.2020.05.2 057.
- [3]陆刚.现代汽车涂装防腐技术的应用与发展[J].现代涂料与涂装,2006(4):32-36.