

建筑装饰用铝合金板力学性能与耐候性协同提升研究

王晓冬

吉祥新材料股份有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8870

[摘要] 建筑装饰用铝合金板凭借重量轻、装饰性强、易加工等优势，广泛应用于现代建筑外立面、室内装饰等领域，其力学性能与耐候性直接决定装饰效果的持久性、结构安全性及使用寿命。当前，传统建筑装饰铝合金板普遍存在“力学性能与耐候性难以协同兼顾”的痛点—强化力学性能易导致耐候性下降，提升耐候性又会削弱其强度、刚度等力学指标，无法满足建筑装饰对材料“安全耐用+长效美观”的双重需求。本文基于铝合金材料改性与表面处理技术，系统分析建筑装饰用铝合金板的力学性能与耐候性的核心影响因素，揭示二者协同提升的内在机制，提出“合金成分优化+表面复合改性+工艺参数调控”的协同提升方案，通过试验验证与工程实例应用，证实方案的可行性与有效性，为建筑装饰用铝合金板的高性能化研发、生产及应用提供理论支撑与实践参考。

[关键词] 绿色低碳设计；铝塑复合板；生产应用；工艺设计；节能减排

Research on Synergistic Enhancement of Mechanical Properties and Weather Resistance of Aluminum Alloy Panels for Building Decoration

Wang Xiaodong

Jixiang New Materials Co., Ltd.

[Abstract] Aluminum alloy panels for building decoration, renowned for their lightweight weight, high decorative appeal, and ease of processing, are widely used in modern architectural facades and interior decoration. Their mechanical properties and weather resistance directly determine the durability of decorative effects, structural safety, and service life. Currently, traditional aluminum alloy panels for building decoration face a common challenge: the difficulty in simultaneously optimizing mechanical performance and weather resistance—enhancing mechanical properties often compromises weather resistance, while improving weather resistance may weaken mechanical indicators such as strength and stiffness, failing to meet the dual requirements of "safety, durability, and long-term aesthetics." This study systematically analyzes the core factors influencing the mechanical properties and weather resistance of aluminum alloy panels for building decoration through material modification and surface treatment technologies. It elucidates the underlying mechanisms for synergistic improvement and proposes an integrated approach combining "alloy composition optimization, surface composite modification, and process parameter control." Experimental validation and engineering applications confirm the feasibility and effectiveness of this approach, providing theoretical support and practical guidance for the high-performance development, production, and application of aluminum alloy panels in building decoration.

[Key words] Green and low-carbon design; Aluminum-plastic composite panel; Production application; Process design; Energy conservation and emission reduction

一、绪论

1.1 研究背景

铝合金板是现代建筑装饰的主流材料之一，其性能需同时满足力学承载与长效耐候的双重要求。然而，传统铝合金板常面临强化力学性能导致耐候性下降，或提升耐候性削弱力学性能的“此消彼长”难题。因此，开展二者协同提升研究具有重

要现实意义。

国外研究起步较早，已通过微合金化、纳米复合涂层等技术及完善的标准体系，实现了性能的协同提升。国内研究则多集中于单一性能优化，协同性研究相对不足，且存在成本高、工艺复杂等问题。因此，亟需开发低成本、易实施且适配不同场景的协同提升方案。

1.2 研究内容

本文研究内容包括：(1) 梳理铝板类型、场景与性能要求；(2) 分析力学性能与耐候性的核心影响因素及矛盾机理；(3) 提出“合金成分优化+表面复合改性+工艺参数调控”的协同提升方案；(4) 通过试验验证方案效果；(5) 结合工程实例评估其实际应用价值。

二、建筑装饰用铝合金板力学性能与耐候性的影响因素及现存问题

2.1 力学性能的主要影响因素

建筑装饰铝合金板力学性能主要受合金成分、加工工艺与微观结构影响。合金元素可通过强化作用提升板材强度与硬度，含量过高则会降低塑性韧性。轧制、热处理、冷轧等加工工艺能优化材质性能，工艺参数不合理易造成晶粒粗大、内应力超标，引发变形开裂。同时，晶粒大小、相组成及内部缺陷等微观结构，直接决定板材强度与韧性，结构缺陷过多会大幅降低力学性能，易发生断裂损坏。

2.2 耐候性的主要影响因素

建筑装饰铝合金板耐候性受表面状态、涂层性能、合金化学稳定性共同影响。板面粗糙度、清洁度及致密氧化膜，决定涂层结合强度与防腐能力。涂层是耐候核心，氟碳、聚酯、阳极氧化膜性能与成本各有优劣，涂层厚度、均匀度及附着力不足会大幅降低防护效果。合金成分与微观结构影响稳定性，添加耐蚀元素可改善防腐，有害元素及结构缺陷则会加剧板材腐蚀老化。

2.3 现存核心问题及成因分析

结合上述影响因素分析，当前建筑装饰用铝合金板在力学性能与耐候性方面的核心问题是“难以协同兼顾”。具体表现为：传统板力学性能不足；耐候性差，易出现涂层脱落、腐蚀；且强化一方常导致另一方性能显著下降。根源在于合金成分设计、表面处理工艺及加工工艺之间缺乏协同优化。

三、建筑装饰用铝合金板力学性能与耐候性协同提升方案

3.1 合金成分优化：构建力学与耐候协同的合金体系

合金成分优化是协同提升的基础，通过合理添加强化元素与耐腐蚀元素，优化合金成分比例，实现力学性能与耐候性的协同提升，具体优化措施如下：

3.1.1 核心合金元素选型与配比：以6061铝合金为基础，优化合金成分配比：添加Mg (0.8%~1.2%)、Si (0.4%~0.8%)作为主要强化元素，形成Mg₂Si强化相，提升材料的抗拉强度与抗弯刚度；添加Mn (0.15%~0.35%)细化晶粒，提升材料的韧性与抗冲击性；添加Cr (0.04%~0.10%)、Zr (0.05%~0.15%)作为耐腐蚀元素，提升合金的化学稳定性，减少氧化腐蚀与电偶腐蚀；控制Cu含量≤0.15%，避免加剧腐蚀；优化Al含量≥97.5%，确保材料的加工性与经济性。优化后的合金抗拉强度可达280~320MPa，抗冲击性≥12J，同时耐腐蚀性较传统6061铝合金提升40%以上。

3.1.2 微观结构调控：通过优化熔炼与铸造工艺，调控铝合金的微观结构，实现力学性能与耐候性的协同。熔炼温度控制在720~750℃，采用惰性气体保护熔炼，减少氧化夹杂；铸造过程中采用半连续铸造工艺，冷却速度控制在10~15℃/min，细化晶粒，使晶粒尺寸控制在5~10μm；铸造后进行均匀化处理(480~500℃，保温6~8h)，消除内应力，优化强化相分布，提升材料的力学性能与化学稳定性。

3.2 表面复合改性：构建“阳极氧化+纳米复合涂层”双重防护体系

采用“阳极氧化+纳米复合涂层”双重防护体系：预处理：碱洗除油、酸蚀形成Ra=1.0~1.4μm的粗糙表面；阳极氧化：采用硫酸阳极氧化，形成15~20μm致密氧化膜，增强结合力与耐蚀性；纳米复合涂层：在氧化膜上涂覆添加了纳米SiO₂(2%~5%)和TiO₂(1%~3%)的氟碳树脂涂层，厚度20~30μm。纳米粒子可提升涂层硬度、耐磨及抗紫外线性能。

3.3 工艺参数协同调控：实现加工与表面处理的协同优化。为避免加工工艺与表面处理工艺相互制约，需对力学性能强化工艺与表面复合改性工艺进行协同调控，优化工艺参数，确保二者协同提升，具体措施如下：

3.3.1 冷轧与热处理：采用多道次冷轧(总变形量30%~40%)，后续进行时效处理(170~190℃，8~10h)，以提升强度并控制内应力。

3.3.2 表面处理与力学性能协同：控制氧化膜与涂层总厚度≤50μm，以将抗弯刚度、抗冲击性的下降控制在5%以内；并优化固化温度，避免损害基体力学性能。

3.4 不同装饰场景的差异化协同提升方案

结合室外、室内建筑装饰场景的性能要求差异，制定差异化的协同提升方案，确保方案的适配性：

3.4.1 室外装饰用铝合金板：侧重耐候性与力学性能的双重强化，采用优化后的6061-optimized合金，表面采用“阳极氧化+纳米复合氟碳涂层”复合改性工艺，涂层厚度提升至30~35μm，同时优化冷轧与热处理工艺，使抗拉强度≥300MPa，抗冲击性≥12J，中性盐雾试验≥1200h，氙灯老化试验后色差ΔE≤1.5，耐温变性能满足-40℃~80℃循环无开裂、变形，同时满足风荷载标准值不低于1.0kPa、板的最大弯曲变形量不超过L/60的要求，适配室外恶劣环境。

3.4.2 室内装饰用铝合金板：侧重视力学性能与装饰性的协同，采用优化后的6061-optimized合金，表面采用“阳极氧化+聚酯纳米复合涂层”工艺，涂层厚度控制在20~25μm，兼顾耐候性与装饰性；力学性能控制在抗拉强度≥280MPa，抗冲击性≥10J，满足室内安装与使用荷载要求，同时具备良好的耐摩擦性、耐清洁性，色差均匀，适配室内装饰场景。

四、试验验证与结果分析

选取传统6061板(对照组)与优化后6061-optimized板(试验组)，尺寸均为1000mm×500mm×3mm。对照组采用常规聚酯涂层，试验组采用“合金成分优化+阳极氧化+纳米复合涂

层”协同方案。每组3个试样, 试验严格按国标执行。

两组试样的力学性能测试结果如下(平均值): 对照组抗拉强度220MPa, 抗弯刚度 $1800\text{N}\cdot\text{m}^2$, 抗冲击性9J, 弯曲变形量为 $L/55$, 未满足“板的最大弯曲变形量不超过 $L/60$ ”的要求; 试验组抗拉强度310MPa, 抗弯刚度 $2100\text{N}\cdot\text{m}^2$, 抗冲击性12.5J, 弯曲变形量为 $L/65$, 满足相关荷载要求。与对照组相比, 试验组抗拉强度提升40.9%, 抗弯刚度提升16.7%, 抗冲击性提升38.9%, 表明本文提出的协同提升方案可显著提升铝合金板的力学性能, 满足建筑装饰的承载要求, 同时解决了传统铝合金板弯曲变形超标的问题。

两组试样的耐候性测试结果如下: 对照组中性盐雾试验800h后出现明显腐蚀斑点, 腐蚀面积达15%; 氙灯老化1000h后色差 $\Delta E=3.2$, 涂层附着力下降30%; 高低温循环50次后出现轻微开裂。试验组中性盐雾试验1200h后无明显腐蚀, 腐蚀面积 $\leq 1\%$; 氙灯老化1000h后色差 $\Delta E=1.3$, 涂层附着力下降 $\leq 5\%$; 高低温循环50次后无变形、无开裂。与对照组相比, 试验组耐腐蚀性、抗紫外线老化性能、耐温变性能均显著提升, 表明协同提升方案可有效强化铝合金板的耐候性, 解决传统铝合金板易腐蚀、易老化的问题。

试验结果表明, 试验组的力学性能与耐候性均实现同步提升, 未出现“此消彼长”的现象。一方面, 合金成分优化与加工工艺调控, 强化了基体的力学性能; 另一方面, “阳极氧化+纳米复合涂层”复合改性工艺, 在提升耐候性的同时, 未对力学性能造成明显影响, 涂层与基体结合紧密, 可有效保护基体, 避免环境侵蚀导致的力学性能下降, 实现了二者的协同提升。

五、工程实例验证

5.1 工程概况

本文选取某位于夏热冬冷地区的商业综合体项目作为工程实例, 该项目总建筑面积 9.2万m^2 , 外立面采用铝合金板装饰, 总面积约 2.5万m^2 , 室内吊顶采用铝合金板装饰, 总面积约 1.8万m^2 。该项目外立面长期承受强紫外线、风雨侵蚀及风荷载作用, 室内吊顶需具备良好的装饰性与耐用性, 原设计采用传统6061铝合金板, 出现过涂层脱落、变形等问题, 影响装饰效果与结构安全。为解决上述问题, 采用本文提出的力学性能与耐候性协同提升方案, 对该项目的铝合金装饰板进行优化升级。

5.2 协同提升方案实施

结合项目的室外、室内装饰场景, 实施差异化的协同提升方案:

1. 室外外立面铝合金板: 采用6061-optimized优化合金, 表面采用“阳极氧化+纳米复合氟碳涂层”复合改性工艺, 涂层厚度 $35\mu\text{m}$, 冷轧总变形量35%, 时效处理参数为 180°C 、保温9h, 板材尺寸为 $1200\text{mm}\times 600\text{mm}\times 3\text{mm}$, 确保抗拉强度 \geq

300MPa, 弯曲变形量不超过 $L/60$, 满足风荷载标准值不低于 1.0kPa 的要求, 适配室外恶劣环境。

2. 室内吊顶铝合金板: 采用6061-optimized优化合金, 表面采用“阳极氧化+聚酯纳米复合涂层”工艺, 涂层厚度 $25\mu\text{m}$, 冷轧总变形量30%, 时效处理参数为 175°C 、保温8h, 板材尺寸为 $1000\text{mm}\times 500\text{mm}\times 2.5\text{mm}$, 确保抗拉强度 $\geq 280\text{MPa}$, 抗冲击性 $\geq 10\text{J}$, 具备良好的装饰性与耐清洁性。

5.3 应用效果评价

与原传统铝合金板相比, 优化后的铝合金板不仅解决了涂层脱落、变形、腐蚀等问题, 还延长了使用寿命, 预计使用寿命可达25年以上, 同时降低了维护成本, 提升了建筑装饰的安全性与美观性, 实现了力学性能与耐候性的协同提升, 验证了本文提出的协同提升方案的可行性与实用性, 同时满足建筑幕墙气密性能等相关标准要求, 适配实际建筑装饰场景。

六、结论

本文聚焦建筑装饰铝合金板力学与耐候性难以协同提升的难题, 提出合金优化、表面复合改性、工艺调控一体化方案。优化6061合金配比, 搭建阳极氧化与纳米复合涂层双重防护, 协同调控冷轧、热处理及涂装参数, 完成基体至表面整体改良。改良板材强度、刚度、抗冲击及耐腐抗老化性能大幅提升, 有效改善传统板材涂层脱落、变形、腐蚀等缺陷, 延长服役周期、降低运维成本, 工程应用价值突出。后续可围绕新型高强耐候合金研发、先进表面改性技术、数字化性能管控及绿色低碳生产工艺展开深入研究, 助力行业高质量发展。

[参考文献]

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部. 铝合金建筑型材(GB/T 5237-2017)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [2]中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑幕墙用铝塑复合板(GB/T 17748-2016)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属和其他无机覆盖层 阳极氧化膜与有机聚合物膜(GB/T 23443-2009)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [4]王健, 李娟. 建筑装饰用6061铝合金板力学性能优化研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(07): 145-148.
- [5]张敏, 刘军. 铝合金板表面纳米复合涂层耐候性研究[J]. 材料保护, 2022, 55(03): 102-106.
- [6]李建光, 赵阳. 建筑装饰铝合金板力学性能与耐候性协同优化[J]. 建筑科学, 2021, 37(08): 167-172.
- [7]陈丽, 王浩. 铝合金板合金成分优化对力学性能与耐腐蚀性的影响[J]. 轻金属, 2020, (11): 67-71.
- [8]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑幕墙气密性能设计指标(GB/T 21086-2007)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.