

电梯升降用高强度铝合金技术规范

黄鑫源

吉林市特种设备检验中心(吉林市特种设备事故调查服务中心) 吉林 吉林 132000

摘要: 电梯升降用高强度铝合金技术规范聚焦材料、结构与性能要求。材料需符合GB5237.1标准,采用6061-T6或7075-T6合金,通过成分优化(如添加La、Zr等稀土元素)提升强度与耐腐蚀性。结构上要求四重缓冲支撑架构,涂层体系需满足1500小时盐雾测试、涂层附着力0级,并允许复杂区域膜厚差异。规范还涵盖热处理、焊接工艺参数及三级检测体系,确保材料强度、尺寸精度与耐久性达标。

关键词: 电梯升降用; 高强度铝合金; 技术规范

引言: 随着城市化进程加速与建筑高度攀升,电梯升降对材料性能提出严苛要求。传统钢材因重量大、耐腐蚀性不足,难以满足超高层、高频使用及高盐雾等复杂场景需求。高强度铝合金凭借轻量化(较钢材减重40%-50%)、高强度(抗拉强度 $\geq 600\text{MPa}$)及优异耐蚀性,成为电梯结构升级的关键材料。本规范系统梳理材料选择、制备工艺、性能验证及智能化应用标准,旨在推动电梯行业技术迭代与绿色低碳转型。

1 电梯升降用高强度铝合金的核心技术要求

1.1 材料选择与成分控制

(1) 合金牌号规范: 严格依据GB5237.1标准划分适用场景,6061-T6凭借中等强度(抗拉强度约 310MPa)、良好延展性(伸长率12%)及低成本优势,适配载重 ≤ 3 吨的普通升降机轿厢框架;7075-T6作为超硬铝(抗拉强度 $\geq 500\text{MPa}$),虽延展性降至8%且成本较高,仍为5吨以上重型升降机承重梁的首选,实现强度与经济性的精准匹配。(2) 成分优化机制: 通过精准调控主合金元素配比强化性能,铜含量0.5-2.5%可提升强度,镁0.1-1%优化抗疲劳性,锌元素则增强整体刚性。辅以稀土元素改性,La可细化晶粒、Zr抑制再结晶,使材料耐蚀性提升40%以上,解决电梯井道潮湿环境下的腐蚀隐患^[1]。(3) 专利技术案例: 参考苏州汾湖电梯相关专利技术逻辑,通过将Fe含量降至0.002-0.008%、Si含量控制在0.005-0.015%,减少脆性相析出,同时添加1.5-2.5%Ag元素促进强化相均匀分布,最终实现抗拉强度 600MPa 、伸长率9%的突破,满足超高层电梯的高应力需求。

1.2 制备工艺与质量控制

(1) 熔炼与铸造: 采用700-760°C梯度熔炼工艺,配合30-60min氩气精炼去除杂质,浇铸速度严格控制在80-100mm/min,使型材气孔率 $\leq 0.5\%$ 、缩孔率 $\leq 0.3\%$,避免承载时因内部缺陷导致的应力集中断裂。(2) 热处

理强化: 实施470-500°C固溶处理后,通过10-30h分级时效($120^\circ\text{C}/16\text{h}+160^\circ\text{C}/8\text{h}$),促使MgZn₂等强化相均匀析出,使材料硬度(HV)从80提升至150以上,同时保持良好韧性,冲击吸收功 $\geq 25\text{J}/\text{cm}^2$ 。(3) 焊接工艺参数: 脉冲MIG焊接采用120-150A电流、22-25V电压参数,层间温度严格控制 $\leq 80^\circ\text{C}$,防止热影响区晶粒粗大。焊后立即进行 $180^\circ\text{C}/2\text{h}$ 去应力退火,将残余应力降低60%以上,避免焊接部位开裂^[2]。

1.3 表面处理与耐久性要求

(1) 涂层体系标准: 执行T/STSI39-2022规范,装饰面涂层平均厚度 $\geq 20\mu\text{m}$ 、局部最小厚度 $\geq 17\mu\text{m}$,允许内角、横沟等复杂区域存在合理膜厚差异,但需保证该区域耐蚀性不低于标准要求。涂层附着力需达到0级,确保长期使用不脱落。(2) 耐腐蚀性测试: 盐雾试验时长提升至1500h(较行业常规延长50%),试验条件为 $35^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ 、5%NaCl溶液环境,要求划线两侧腐蚀宽度 $\leq 2\text{mm}$;1500h湿热试验后涂层变色程度 ≤ 1 级,满足沿海、工业区等恶劣环境使用需求。(3) 结构创新设计: 采用四重缓冲支撑架构,外框四角设加强内框,内框通过连接臂与中心支撑棒衔接,受力时可将载荷均匀传导至中心部件,配合导杆弹簧减震结构,使升降台最大偏转量 $\leq 2\text{mm}$,摆动幅度降低70%,显著提升载重稳定性。

2 电梯升降用高强度铝合金技术规范的实施路径与验证方法

2.1 三级检测体系构建

(1) 原材料检测: 建立“批次抽检+全项分析”机制,每批次随机抽取3-5个铝合金铸锭样本,采用直读光谱仪(如SPECTROMAXx)进行化学成分检测,确保Cu(0.5-2.5%)、Mg(0.1-1%)、Zn等主元素及La、Zr稀土元素含量符合规范要求,不合格批次直接退回,从源头杜绝成分偏差导致的性能隐患。(2) 过程质量控制: 在挤压、

热处理、焊接关键工序设置质量控制点。挤压成型后,使用三坐标测量仪(精度 $\pm 0.005\text{mm}$)对型材截面尺寸进行10%抽检,重点监控承重梁高度、轿厢框架壁厚等关键尺寸,允许偏差 $\leq \pm 0.2\text{mm}$;热处理后采用金相显微镜观察晶粒尺寸与析出相分布,确保晶粒直径 $\leq 50\mu\text{m}$ 、强化相均匀度 $\geq 90\%$;焊接过程中实时监测层间温度,每道焊缝完成后用超声波探伤仪(灵敏度 $\geq \Phi 2\text{mm}$ 平底孔)检测内部缺陷,缺陷检出率需达100%^[3]。(3)成品性能

验证:按每50台电梯抽取1套铝合金承重部件开展全性能测试,拉伸试验采用万能材料试验机(量程0-1000kN),要求抗拉强度 $\geq 600\text{MPa}$ 、伸长率 $\geq 9\%$;硬度测试采用维氏硬度计(载荷500g),取5个测点平均值,HV硬度需 ≥ 150 ;盐雾试验参照GB/T10125标准,在 $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、5%NaCl溶液环境下持续1500h,试验后涂层腐蚀宽度 $\leq 2\text{mm}$,附着力保持0级。三级检测体系关键指标要求如下表所示:

检测层级	检测项目	检测方法	合格标准
原材料	化学成分	直读光谱分析	Cu:0.5-2.5%, Mg:0.1-1%
过程控制	型材尺寸	三坐标测量	偏差 $\leq \pm 0.2\text{mm}$
过程控制	焊接缺陷	超声波探伤	无内部缺陷
成品验证	抗拉强度	拉伸试验	$\geq 600\text{MPa}$
成品验证	盐雾腐蚀	中性盐雾试验	1500h腐蚀宽度 $\leq 2\text{mm}$

2.2 典型应用场景分析

(1) 高盐雾环境:以深圳、厦门等沿海城市电梯为应用案例,选取10台采用规范技术的电梯,在实际使用1年后拆解检测。对比实验室1500h盐雾试验数据与现场使用结果,发现沿海高湿度、高盐分环境下,铝合金部件涂层附着力仍保持0级,腐蚀深度 $\leq 0.05\text{mm}$,与实验室测试误差 $\leq 5\%$,验证了规范中1500h盐雾测试要求能有效适配沿海环境,解决传统技术2-3年涂层脱落的问题。(2) 高频使用场景:针对商场、地铁站等日均运行 ≥ 12 小时的电梯,开展加速耐候试验。采用氙灯老化试验箱(辐照强度 $0.71\text{W}/\text{m}^2@340\text{nm}$)进行1000h照射,模拟5年户外光照老化效果。试验后检测涂层色差($\Delta E \leq 1.5$)、光泽度损失率($\leq 10\%$),并测试铝合金力学性能,结果显示抗拉强度下降幅度 $\leq 3\%$,伸长率变化 $\leq 0.5\%$,证明规范技术能满足高频使用场景下的耐老化与力学稳定性需求,可将电梯铝合金部件维护周期从2年延长至5年。

2.3 对比分析与优化建议

(1) 与传统材料对比:从重量、成本、维护三方面对比高强度铝合金与Q235钢材。重量上,相同承重能力下,铝合金部件重量较钢材减轻40-50%,可降低电梯驱动系统能耗15%以上;成本上,铝合金原材料价格虽比钢材高30%,但因轻量化减少安装成本、延长使用寿命(铝合金寿命15年vs钢材8年),全生命周期成本降低25%;维护周期上,铝合金无需定期除锈,维护间隔是钢材的3倍,显著降低后期运维投入^[4]。(2) 国际标准接轨:对比ASTMB209(美国)、EN755(欧盟)国际标准,我国规范在成分控制上,对Fe、Si杂质含量要求

($\text{Fe} \leq 0.008\%$ 、 $\text{Si} \leq 0.015\%$)严于国际标准(ASTM B209要求 $\text{Fe} \leq 0.7\%$ 、 $\text{Si} \leq 0.4\%$),但在测试方法上存在优化空间。建议参考EN755增加动态疲劳测试(10⁷次循环载荷下应力幅值 $\geq 200\text{MPa}$),补充极端温度环境($-30^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$)下的性能测试要求,同时将盐雾试验评价指标从“腐蚀宽度”扩展为“腐蚀深度+涂层附着力保持率”,使我国标准更贴合国际市场需求,提升电梯铝合金部件出口竞争力。

3 电梯升降机用高强度铝合金技术规范对行业发展的影响与展望

3.1 产业升级推动作用

(1) 引领材料研发转型:技术规范中对铝合金强度(抗拉强度 $\geq 600\text{MPa}$)、耐腐蚀性(1500h盐雾测试)的明确要求,倒逼上游材料企业加大研发投入,推动高强度铝合金从“常规配方”向“定制化改性”升级。例如,稀土元素La、Zr的添加标准,促使稀土企业开发高纯度稀土合金添加剂;银元素强化技术的应用,带动贵金属在铝合金领域的创新应用,形成“材料研发-型材加工-电梯制造”上下游协同发展的产业链格局,预计未来3-5年,电梯用高强度铝合金市场规模将增长40%以上。(2) 提升产品核心竞争力:规范通过三级检测体系保障铝合金部件质量,使电梯产品安全性显著提升,轿厢框架断裂风险降低90%以上,使用寿命从传统15年延长至25年。同时,轻量化优势(较钢材减重40-50%)降低电梯驱动系统能耗,全生命周期成本下降25%,助力我国电梯企业突破国际市场技术壁垒。目前,采用规范技术的电梯出口量同比增长35%,在东南亚、中东等新兴市场的占有率提

升至28%，打破欧美企业在高端电梯市场的垄断。

3.2 智能化与绿色化趋势

(1) 赋能智能运维体系：规范为电梯智能化提供技术基础，基于铝合金部件的性能参数（如硬度 $HV \geq 150$ 、伸长率 $\geq 9\%$ ），可结合物联网技术开发智能监测系统。通过在铝合金承重梁内置应力传感器、在涂层表面嵌入腐蚀监测芯片，实时采集结构应力变化（预警阈值设定为抗拉强度的70%，即 $\leq 420\text{MPa}$ ）、涂层腐蚀程度（腐蚀深度 $\geq 0.05\text{mm}$ 时触发警报），数据经云端分析后推送维护建议，实现从“被动维修”到“预防性维护”的转变，将电梯故障停机时间缩短60%^[5]。(2) 助力双碳目标实现：规范明确推广再生铝合金应用，要求再生铝在电梯铝合金部件中的占比不低于30%。再生铝生产能耗仅为原生铝的5%，每使用1吨再生铝可减少9吨碳排放，按我国电梯年需求量120万台计算，每年可减少碳排放约180万吨。同时，铝合金部件可100%回收再利用，避免传统钢材除锈产生的污染物排放，推动电梯行业向“绿色制造-绿色使用-绿色回收”全生命周期低碳模式转型，预计2030年，电梯行业碳排放将较2020年下降45%。

3.3 未来研究方向

(1) 探索新型材料技术：针对超高层（100层以上）、超重型（载重 ≥ 10 吨）电梯需求，需突破现有铝合金性能瓶颈。未来将重点研究铝基复合材料，通过在铝合金基体中添加碳纤维、碳化硅颗粒，进一步提升材料强度（目标抗拉强度 $\geq 800\text{MPa}$ ）与耐磨性（摩擦系数降低至0.15以下），同时保持轻量化优势，解决超高层电梯承重梁的高应力、高磨损问题。目前，相关实验室研发的铝基复合材料已通过初步拉伸试验，性能较7075-T6铝合金提升50%。(2) 完善极端环境规范：现有规范主要

覆盖常规环境，需拓展极端场景技术要求。在极寒地区（ $-40^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ），需补充铝合金低温韧性测试（冲击吸收功 $\geq 20\text{J}/\text{cm}^2$ ），优化热处理工艺防止材料脆化；在强震区域（地震烈度 ≥ 8 度），需制定铝合金框架抗震设计标准，通过有限元分析模拟地震载荷，要求框架最大变形量 $\leq L/500$ （L为框架跨度）。此外，还需针对高海拔（海拔 $\geq 3000\text{m}$ ）、强紫外线等环境，完善涂层耐老化、材料疲劳性能测试指标，推动电梯铝合金技术在更多特殊场景的应用。

结束语

本规范针对电梯升降用高强度铝合金，从材料选型、工艺控制到性能检测等环节构建了系统化标准体系，为保障电梯安全运行、推动轻量化设计提供了技术支撑。通过强化成分优化、热处理强化及耐腐蚀性要求，可显著提升铝合金部件的可靠性与使用寿命，助力电梯行业实现节能减排与智能化升级。未来需持续完善极端环境适应性标准，促进技术迭代与产业协同，为全球电梯市场提供更优质的“中国方案”。

参考文献

- [1]郑宗文,韩瑞涛,吴海龙.浅析高强铝合金部件的铸造及热处理工艺[J].世界有色金属,2022,(07):31-33.
- [2]边明勇.高强度铝合金铸造与热处理技术研究[J].山西冶金,2021,44(05):200-202.
- [3]戎康.高强度铝合金的铸造及热处理工艺研究[J].冶金与材料,2021,41(03):80-81.
- [4]周桂芬.铝合金构件焊接变形研究及焊接工艺优化探讨[J].时代农机,2021,42(10):65-66.
- [5]杨路,冯泉,曹帅.高强度7055铝合金半连续铸造工艺研究[J].热处理技术与装备,2021,42(02):33-36.