

中国交通运输协会团体标准  
轨道交通车辆用抗应力腐蚀铝合金材料  
过程控制要求  
编制说明

标准编制组

2022年11月

## 一、任务来源、起草单位、协作单位、主要起草人

根据中国交通运输协会发布的“2022 年度第一批团体标准项目立项的公告”（中交协秘字〔2022〕25 号）要求，由中车工业研究院有限公司作为起草单位负责本规程的编制工作。

为了确保标准实用、规范，并具有广泛的适用性和代表性，中车工业研究院有限公司联合了标准研究内容相关的多家单位编制本项标准，包括高校（中南大学、北京工业大学），轨道交通装备主机企业（中车青岛四方机车车辆股份有限公司、中车长春轨道客车股份有限公司、中车唐山机车车辆有限公司、中车株洲电力机车有限公司），以及铝合金材料厂家（广西南南铝加工有限公司、东北轻合金有限责任公司）。

本文件主要的起草人包括：李明高、孙梅玉、陈朝中、章潇慧、邓运来、郭晓斌、孙琳、张仁航、高军、王大臣、吴志明、王宇、卢刚、黄晖、高新宇、魏午、龚兰芳。

## 二、制订标准的必要性和意义

高强铝合金的应力腐蚀开裂问题十分突出，影响其应力腐蚀性能的因素众多，包括铝合金的成分组织、晶粒取向大小、晶界偏析、热处理制度等材料因素和腐蚀液的种类、温度、pH 等环境因素都影响其应力腐蚀性能。

以 7××× 铝合金为例，其主要成分为 Zn、Mg、Cu 和少量 Fe，还有微量的 Zr、Cr、Si、Mn 等金属元素。研究发现高强铝合金的应力腐蚀敏感性取决于 Zn 和 Mg 元素的比例，随着 Zn 和 Mg 含量的增加，7××× 铝合金的应力腐蚀敏感性增加。Mg 元素在晶界的偏聚降低了空位形成能和晶界开裂的临界应力，削弱了晶界强度，增加了应力腐蚀裂纹沿晶界扩展的倾向。同时，Mg 元素增强了对 H 的吸收，在晶界形成 Mg-H 复合体，增加了铝合金应力腐蚀的敏感性，导致其在晶界处更易开裂。

一般情况下，Al-Zn-Mg-Cu 合金在变形过程中容易发生再结晶，后续热处理最终形成再结晶晶界，添加大角度晶界会优先发生腐蚀和裂纹，不利于应用。为了提高 Al-Zn-Mg-Cu 合金的耐再结晶性能，通常加入 Mn、Cr 或 Zr 等合金元素。另一方面，添加 Zr 对 Al-Zn-Mg-Cu 合金的再结晶有较好的抑制作用，但 Mn、Cr 或 Zr 的添加对 Al-Zn-Mg-Cu 合金的再结晶影响不大。7050 和 7075 两种合金具有共同的组成元素，但 7050 合金中 Cr 被 Zr 取代。此外，7050 铝合金中 Si 和 Fe 含量较 7075 低，提高了断裂韧性，Cu 含量较 7075 高，增加了 GP 区稳定性的温度范围，从而提高了合金的强度和抗 SCC 性能。7050 铝合金在整体方面优于 7075 合金，例如，它具有良好的强度、韧性

和抗 SCC 性能。

7050 较好的性能是由于 Zr 存在微观结构的稳定性。Zr 的加入在更大的温度范围内稳定了 GP 区，因此，据报道其力学性能和抗 SCC（SCC 是 Stress Corrosion Cracking 的缩写，即应力腐蚀开裂）性能较高。7050 铝合金淬火敏感性高，很难制造出强度一致的厚型材。研究发现，用 Cr 代替 Zr 可以大幅度降低淬火灵敏度，同时保持 Cr 抑制再结晶的理想效果。

SCC 现象非常复杂，在裂纹的萌生过程中，裂纹的扩展受多种因素的综合影响，如材料的微观组织，包括热处理、杂质含量、制造背景等，以及环境中的腐蚀条件，最后是应力水平。SCC 的危害性对高速列车的整体结构安全可靠性的影响非常大。高速列车的底架牵引梁、缓冲梁、横梁、安装座、底板托架、联轴节、贯通管等均发生过不同程度的应力腐蚀开裂。而高速列车在工厂进行车体表面涂装时，对于车体底部以及型材内部，表面涂装质量较差，而高速列车的线路运行状况是比较恶劣的，这就造成了高速列车车体一些保护不充分的部位容易产生擦伤等缺陷，在较小的外加应力和残余应力的共同作用下，极易发生腐蚀失效，因此需对高速列车的抗应力腐蚀行为及机理进行详细的评估研究。

新型高性能铝合金的研制以及量产化铝合金材料的性能优化均与化学成分的创新设计密切相关，而新型铝合金的工程化应用同时会孕育新的热处理工艺。但是，一旦确定了工程化应用的合金牌号，要实现高均匀性和高综合性能铝合金的特征微结构，热处理工艺流程起到了决定性的作用。腐蚀环境参数、晶体结构的差异以及热处理工艺等都会影响轨道车辆用高强铝合金的腐蚀过程。环境因素中的氧浓度和湿度是影响 7××× 铝合金的晶间腐蚀行为的重要参数。成分优化设计上，通过引入 Cr、Zr、Yb、Er 和 Ni 等微量元素改变 Al-Zn-Mg 合金的晶体结构提高合金的抗晶间腐蚀性能。热处理制度方面，峰值时效态 Al-Zn-Mg 合金具有较差的抗晶间腐蚀能力，而经 T7X 热处理工艺处理后，Al-Zn-Mg 合金的抗腐蚀性能明显增强，强化固溶处理后的峰时效态 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的抗腐蚀敏感性显著降低。

目前对铝合金腐蚀特性的评价方法主要依据国标或航标，但航空运载工具的工作条件与轨道交通差异明显，其材料指标对轨道交通车辆铝合金材料的指导意义有限，亟需研究轨道交通车辆用抗应力腐蚀铝合金材料的过程控制要求，约束材料的成分设计区间，规范变形及热处理等工艺后材料所需达到的微观组织效果，以指导轨道交通车辆的生产实践，为铝合金材料厂家及主机企业提供可参照执行的标准。

### 三、主要工作过程

本标准通过收集既有应用经验，以及相关研究成果、试验检测结果及使用单位反馈信息，确定标准编制方向。

经中国交通运输协会立项（2022年4月）和大纲审批通过（2022年7月初），根据征求意见稿审查会（2022年8月底）专家意见修改形成了征求意见稿，并通过了中国交通运输协会组织的审查会。目前已经根据审查会上专家提出的意见建议进行了补充、修改。编制组从8月底开始至11月初经过多次数据论证、多轮会议研讨，于11月初完成了此版本标准文本。

### 四、制订标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系

本标准编制的目的是用于规范和指导我国各地的轨道交通车辆用5×××、6×××、7×××等抗应力腐蚀铝合金材料的制备工艺，对于控制其服役过程中发生应力腐蚀失效具有重要意义。通过约束成分设计区间，规范变形及热处理等工艺后材料所需达到的微观组织效果，形成可指导生产实践的标准。基本原则是：在两个国家标准 GB/T 15970.1 和 GB/T 15970.7 的基础上，规范了轨道交通用铝合金关键部件的应力腐蚀性能在制备工艺过程中的控制方法，以期形成可指导生产实践的工艺要求或标准。本标准的编制形式为：轨道交通用铝合金的上游生产企业提供成分、工艺控制优化的铝合金产品；院所高校开展应力腐蚀性能评价及方法研究；中车研究院和中车相关主机企业依据供货要求验证应力腐蚀性能合格性并形成统一评价规范。

本规程编制过程中，查阅了下列规范、标准：

- GB/T 3190 变形铝及铝合金化学成分
- GB/T 3246.1 变形铝及铝合金制品组织检验方法 第1部分：显微组织检验方法
- GB/T 3246.2 变形铝及铝合金制品组织检验方法 第2部分：低倍组织检验方法
- GB/T 7232 金属热处理工艺 术语
- GB/T 7998 铝合金晶间腐蚀测定方法
- GB/T 7999 铝及铝合金光电直读发射光谱分析方法
- GB/T 15970.1 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第1部分：试验方法总则
- GB/T 15970.7 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第7部分：慢应变速率试验
- GB/T 16475 变形铝及铝合金状态代号
- GB/T 17432 变形铝及铝合金化学成分分析取样方法
- GB/T 20975 铝及铝合金化学分析方法
- GB/T 32186 铝及铝合金铸锭纯净度检验方法

TB/T 3260.1 动车组用铝及铝合金 第1部分：基本要求

YS/T 67 变形铝及铝合金圆铸锭

YS/T 591 变形铝及铝合金热处理

YS/T 600 铝及铝合金液态测氢方法 闭路循环法

YS/T 1004 熔融态铝及铝合金

## 五、 主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述

### （一）主要条款

#### 1. 范围

本文件规定了轨道交通车辆用抗应力腐蚀铝合金材料的适用产品分类、制备过程控制、过程控制要求、产品抗应力腐蚀性能过程控制报告的内容。本文件适用于轨道交通车辆用抗应力腐蚀 $5\times\times\times$ 、 $6\times\times\times$ 、 $7\times\times\times$ 铝合金材料。其他系列的铝合金产品也可参考本文件。

#### 2. 规范性引用文件

本部分列出了本标准引用的其他国家、行业、协会等标准。

#### 3. 术语和定义

本部分列出了本标准中出现的专业名称和术语的定义，包括GB/T 7232、GB/T 15970.1界定的术语和定义，以及慢应变速率试验、应力腐蚀敏感性因子。

#### 4. 适用产品分类

本部分列出了板材、型材、锻件的牌号、状态、厚度等信息，并明确了不同材料的取样位置、应力腐蚀敏感性因子。

板材、型材、锻件的牌号、状态、厚度等信息参照参编单位中轨道交通企业的技术要求和规范性文件，列出了常用的产品要求。

应力腐蚀敏感性试验取样位置根据板材厚度（ $t$ ）确定：a)  $t < 6\text{mm}$ ，取样位置由供需双方协商确定；b)  $6 \leq t \leq 12.5\text{mm}$ ，取样位置选板材的表层及中心层；c)  $t > 12.5\text{mm}$ ，取样位置选板材的表层、1/4层、中心层。

应力腐蚀敏感性因子数据来源于试验数据分析及标准（GB/T 15970.7）。

#### 5. 制备过程控制要求

本部分列出了材料制备过程的控制要求，具体分为熔铸过程、铸锭均匀化过程、晶粒组织控制、热处理过程。提出了控制熔铸过程中氢含量、渣含量的工艺手段和具体要求；规定了铸锭均匀化过程中均质炉的温度精度；提出了枝晶消除效果的判断方法及要

求；明确了塑性变形过程中粗晶层厚度的要求；规定了热处理过程中固熔炉、时效炉的温度精度及应采用的工艺控制方法。

## 6. 过程控制要求

本部分列出了材料的化学成分分析方法、合金元素的含量（质量分数）规定；材料组织检测，包括低倍组织检测方法及合格性判定、显微组织检测方法及合格性判定；抗晶间腐蚀性能检测及评价方法，5×××和7×××铝合金材料对标GB/T 7998铝合金晶间腐蚀测定方法，6×××铝合金材料对标交通运输协会团体标准轨道交通车辆用6×××铝合金材料晶间腐蚀测试方法；抗应力腐蚀性能参照GB/T 15970.7中的方法进行评价，测试并计算应力腐蚀敏感因子 $I_{SSRT}$ 对结果进行评价，且应符合标准中表1、表2或表3的要求。针对成分、氢含量、渣含量、均匀化效果、塑性变形过程、热处理过程的控制效果，给出了不同情况下的检验结果判定。

## 7. 产品抗应力腐蚀性能过程控制要求报告

本部分规定了产品抗应力腐蚀性能过程控制要求报告，列出了报告应包含的主体内容。

## 六、重大分歧的处理依据和结果

本标准制订过程中尚未发生过重大意见分歧。

## 七、采用国际标准和国外先进标准的，说明采标程度，以及与国内外同类标准水平的对比情况

本标准未采用国际标准和国外先进标准。

## 八、作为推荐性标准的建议

基于轨道交通车辆用5×××、6×××、7×××铝合金材料成分及微观组织对恒载荷及恒应变应力腐蚀的影响，建立应力腐蚀性能与合金元素及多相组织的关联性规律；规范化学成分控制、熔铸过程、铝合金挤压材均匀化热处理、塑性变形过程、固溶时效等热处理工艺过程控制方法对5×××、6×××、7×××铝合金材料微观组织及应力腐蚀性能的影响，探明提升材料抗应力腐蚀性能的优化工艺方法，提出全工艺过程控制对铝合金制件的应力腐蚀性能合格性的影响。

综上，本标准可用于5×××、6×××、7×××等抗应力腐蚀铝合金材料的制备过程控制，约束成分设计区间，规范变形及热处理等工艺后材料所需达到的微观组织效果，可指导

生产实践，建议作为推荐性标准。

## 九、贯彻标准的措施建议

### （一）保证标准编制内容的适用性

（1）中车是轨道交通装备制造行业的龙头企业，本标准牵头单位及参编单位含中车主型装备制造企业、高校、原材料厂家，为此项标准的编制奠定了良好基础。

（2）标准的编制过程中，做到有的放矢、全面准确，通过系统研究、横向对比、专家咨询等方式，确保标准编制的内容与行业整体应用情况相适应。

（3）此标准编制过程中，汇聚了铝合金材料使用企业、原材料生产企业、研究高校联合开展研究，标准起草人在铝合金应力腐蚀及工艺控制研究等方面具有多年积累，整体上编制组研究能力水平较高。基于现有研究基础，制定了5×××、6×××、7×××等铝合金材料的抗应力腐蚀制备过程控制。

（4）在标准编制过程中将密切关注轨道交通车辆用铝合金应力腐蚀动态，广泛收集、整理、研讨已有的相关国际、国家、地区及行业现有的标准和导则，结合非轨道交通车辆用铝合金材料的过程控制要求、横向对比相关轨道交通车辆领域的要求，认真总结实践经验、吸收科研成果，并广泛征求专家意见。

### （二）采取多项措施贯彻标准

（1）精心组织安排，开展宣贯培训。建议通过交通运输协会、中车集团等层面统一安排，召开标准宣贯会，对涉及的轨道交通等领域相关单位开展标准实施培训和宣贯普及。明确轨道交通车辆用抗应力腐蚀铝合金材料过程控制要求，指导行业使用过程中的典型5×××、6×××、7×××铝合金材料的抗应力腐蚀过程控制，有效推动贯标工作的开展及落实。

（2）定期组织铝合金原材料、铝合金加工、车辆研发、车辆设计、车辆生产等各环节人员进行技术交流，不断对铝合金材料的抗应力腐蚀过程控制要求进行改进，视实际使用情况，不断更新标准内容，保证本标准对工程应用过程的适用性和指导性。

## 十、其他应说明的事项

暂无。