

中国交通运输协会团体标准

轨道交通车辆用 6XXX 铝合金材料 晶间腐蚀测试方法

Testing method for intergranular corrosion of 6XXX aluminum alloys
in rail transit vehicles

（征求意见稿）

编制说明

2022-09

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、孙晓红、高军、王大臣、吴志明、王宇、龚兰芳、黄晖、魏午、卢刚、高新宇。

二、制订标准的必要性和意义

由于轨道交通车辆用铝合金化学性质相对活泼，而氧化膜在接近中性的溶液中极易发生破裂造成严重的腐蚀，7XXX 铝合金耐蚀性的提高已引起人们的广泛关注，而 6XXX 铝合金方面尚未形成完善的国家和行业标准指导实践。对 6XXX 铝合金进行腐蚀行为的研究和标准的制定，具有重要的意义。

晶间腐蚀是指铝合金内、外部溶质元素的不一致性与微观组织分布的不均匀性而诱发的电化学局部腐蚀，其腐蚀一般会沿着表面晶粒边界或者是近表面部位晶界附近向合金内部深处延伸。由于铝合金晶界被破坏会导致其界面结合力的降低，从而容易诱发沿晶腐蚀开裂，致使设备提前失效，是一种危险性较大的腐蚀现象。纯铝是不会发生晶间腐蚀的，因为晶间腐蚀是一种由组织电化学不均匀性引起的局部腐蚀，沿着金属晶粒间的分界面内部扩展。这种腐蚀会使晶粒间失去结合力，金属强度完全丧失，而金属表面却无任何的变化，从而导致设备突发性破坏。热处理不当是产生晶间腐蚀的主要原因，合金化元素或者金属间化合物沿晶界沉淀析出，相对于晶粒是阳极而构成腐蚀电池，会加速晶间腐蚀。

铝合金是轨道交通中常用的材料，而其腐蚀性能与力学性能的良好匹配是轨道安全的保障之一，因此其腐蚀性能的研究非常重要。要保证铝合金的有效使用，在这方面尚

有大量工作亟需开展，编制组认为要在以下几个方面开展进一步的工作。首先要保证各个牌号合金的安全使用，须对每个应用牌号的合金进行具体的研究。再者实际腐蚀介质是各种各样的，而已有的研究则主要集中于 NaCl 溶液中，因此要针对不同的腐蚀介质进行研究。然后从微观结构入手，通过不同的热处理状态，改变合金的组织结构，研究不同微观结构（如析出强化相）对其腐蚀性能影响的机制，为合金力学性能与腐蚀性能的良好匹配提供合理的加工依据。最后必须对合金的组织结构、腐蚀性能及腐蚀后的力学性能进行系统的分析评价，为合金的合理使用提供科学依据。

精确评价 6XXX 铝合金晶间腐蚀性能的前提是判定腐蚀类型为沿晶界的腐蚀。通过金相显微镜、扫描电镜及电子背散射衍射表征手段综合判定的最大晶间腐蚀深度，评定其腐蚀等级。现有晶间腐蚀方法“GB/T 7998-2005 铝合金晶间腐蚀测定方法”的评定等级较为宽泛，实际应用于 6XXX 铝合金的晶间腐蚀性能的测定会引起同一等级下晶间腐蚀深度结果差异较大的问题，本标准结合 6XXX 铝合金晶间腐蚀的实验数据，进一步细化适用于 6XXX 铝合金晶间腐蚀的评定等级，形成准确评价轨道交通用铝合金的抗晶间腐蚀性能的标准方法。

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。

四、制订标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系

本技术规范编制的目的是可以用于指导我国各地的轨道交通车辆用铝合金材料腐蚀性能测试，适用于轨道交通车辆 6XXX 铝合金（如 6063/6005A/6082），其构件主要用于交通车辆车体的主承力结构，包括底架横梁、框架，托臂，管路等，形成快速准确评价 6XXX 铝合金材料晶间腐蚀性能的测试方法。

基本原则是：在两个国家标准 GB/T 36174 《金属和合金的腐蚀 固溶热处理铝合金

的耐晶间腐蚀性的测定》和 GB/T 7998-2005 《铝合金晶间腐蚀测定方法》的基础上，细化适用于 6XXX 铝合金晶间腐蚀的评定等级，形成准确评价轨道交通用铝合金的抗晶间腐蚀性能的标准方法。

本规程编制过程中，查阅了下列规范、标准：。

GB/T 19501 微束分析 电子背散射衍射分析方法通则

GB/T 36174 金属和合金的腐蚀 固溶热处理铝合金的耐晶间腐蚀性的测定

GB/T 6682 分析实验室用水规格和试验方法

GB/T 7998 铝合金晶间腐蚀测定方法

JJF 1914 金相显微镜校准规范

JJF 1916 扫描电子显微镜校准规范

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

本部分规定了轨道交通车辆用 6×××（如 6008/6005A/6060/6082）铝合金产品的晶间腐蚀测试方法的适用范围，指出了本标准的使用对象和适用情形。

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多次出现的专业名称和术语的定义，包括：晶间腐蚀、深度法、电子背散射衍射及二次电子像。

4. 方法概述

本部分概述了 6××× 铝合金晶间腐蚀评价方法的实施过程，包括晶间腐蚀试验的实施、晶间腐蚀的特征、晶间腐蚀结果的显微观察和晶间腐蚀的评价等内容。

5. 试剂

本部分列出了本标准中使用的溶剂，包括：适用于 6××× 铝合金晶间腐蚀的腐蚀介质、无水乙醇、氢氧化钠溶液及硝酸。

6. 仪器设备

本部分列出了本标准中使用的仪器设备的校准要求和使用参数，包括：金相（光学）显微镜的校准要求和晶间腐蚀结果观察的放大倍数；扫描电子显微镜的校准要求；晶间腐蚀后试样清洗用超声波清洗机的工作频率。

7. 制样

本部分编制原则是：参考GB/T 7998《铝合金晶间腐蚀测定方法》中的取样和试样预处理方法，并进一步完善。

本部分规范了6×××铝合金产品进行晶间腐蚀试验前的取样和试样预处理方法等内容。本部分重点列举了试样类型、尺寸及数量，分别绘制了管材试样示意图；棒材或线材试样示意图；板材、带材、型材及锻件试样示意图。对取样后试样表面粗糙度、表面油污处理方法（乙醇清洗、氢氧化钠浸泡、硝酸清洗、蒸馏水清洗）、非腐蚀试验表面的处理方法（松香包覆）进行规定。

8. 晶间腐蚀试验

本部分规范了6×××铝合金晶间腐蚀试验的试样放置方法、试样腐蚀环境以及腐蚀后试样的清洗方法。对标GB/T 7998《铝合金晶间腐蚀测定方法》，列出试样放置示例图。并进一步完善适用于不同化学成分的6×××铝合金的腐蚀环境设置（常规腐蚀和加速腐蚀）、晶间腐蚀后试样表面的处理方法。

9. 晶间腐蚀结果测定

本部分规范了6×××铝合金晶间腐蚀试验后的腐蚀深度的测定方法，包括腐蚀试样截面的切取方法、金相试样的制样及清洗方法、深度法的观察结果。对标GB/T 7998《铝合金晶间腐蚀测定方法》，进一步完善了以下内容：当金相显微镜的观察结果出现晶间腐蚀不易分辨的情况下，扫描电子显微镜下二次电子像和背散射电子衍射观察和标定晶间腐蚀深度的方法，并给出了相应的示例照片。

10. 腐蚀评级

本部分规定了6×××铝合金晶间腐蚀的评级，对标GB/T 7998《铝合金晶间腐蚀测定方法》，结合实验数据进一步细化了原标准中2级和3级的评定等级，适用于6×××铝合金晶间腐蚀的准确评价。

11. 试验报告

本部分规定了6×××铝合金晶间腐蚀评价的试验报告，列出了试验报告应包含的主体内容。

（二）实验论证

将样品沿垂直轧制方向切开，对切取的横截面进行打磨抛光，用金相显微镜 OLYSIM basic 观察后拍金相照片并测量腐蚀深度。

图 1 为 12h 晶间腐蚀的金相照片，由图上的标注可知 12h 腐蚀坑的深度为 $30.22\mu\text{m}$ ，没有出现明显的晶间腐蚀现象。

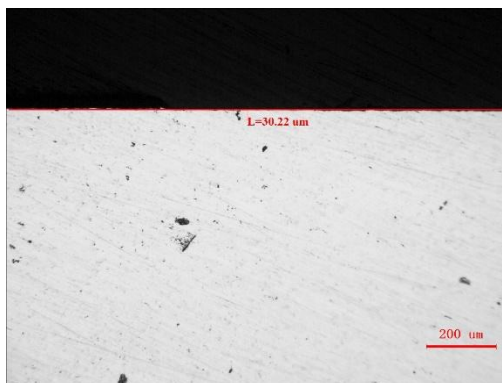


图 1 35°C12h 腐蚀深度

图 2 为 24h 晶间腐蚀的金相照片，由图上的标注可知 24h 腐蚀坑的深度为 $32.33\mu\text{m}$ ，也暂时没有出现明显的晶间腐蚀现象。

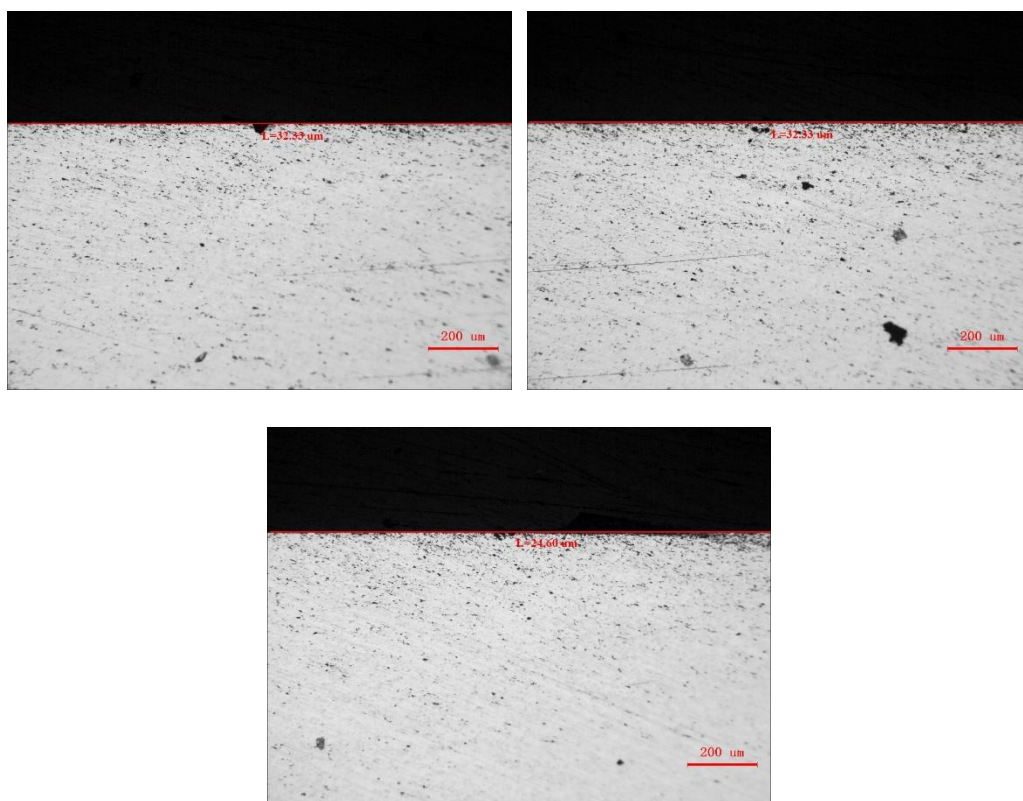


图 2 35°C24h 腐蚀深度

图 3 为 36h 晶间腐蚀的金相照片，由图上的标注可知 36h 腐蚀坑的深度为 $19.68\mu\text{m}$ ，比起 12h，24h 的腐蚀坑深度要低是因为选取的横截面具有随机性，也能发现 36h 也暂

时没有出现明显的晶间腐蚀现象。

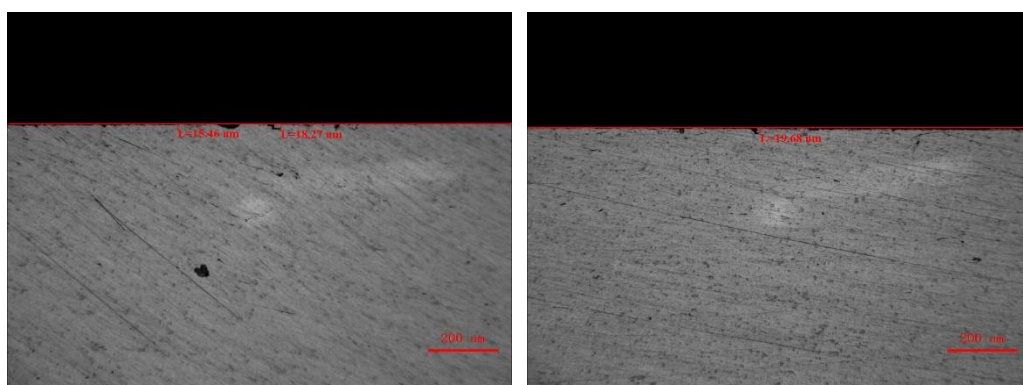


图 3 35°C36h 腐蚀深度

图 4 为 48h 晶间腐蚀的金相照片，由图上的标注可知 48h 腐蚀坑的深度为 50.6μm，由第一张图可看出一些晶间腐蚀的现象，腐蚀坑沿着晶界向里扩展。

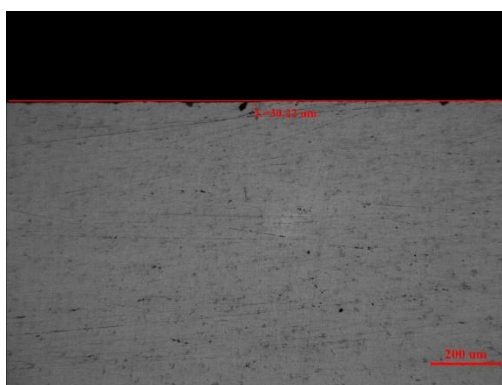
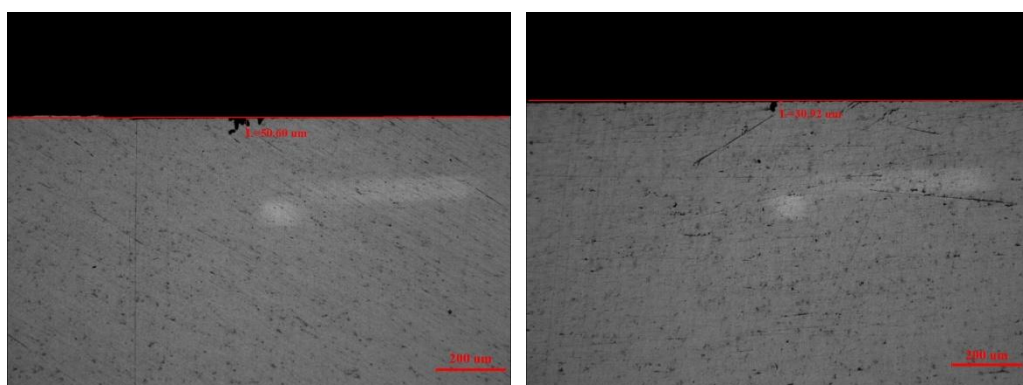


图 4 35°C48h 腐蚀深度

图 5 为 60h 晶间腐蚀的金相照片，由图上的标注可知 60h 腐蚀坑的深度为 202.39μm，可以明显看见晶间腐蚀的坑形状。

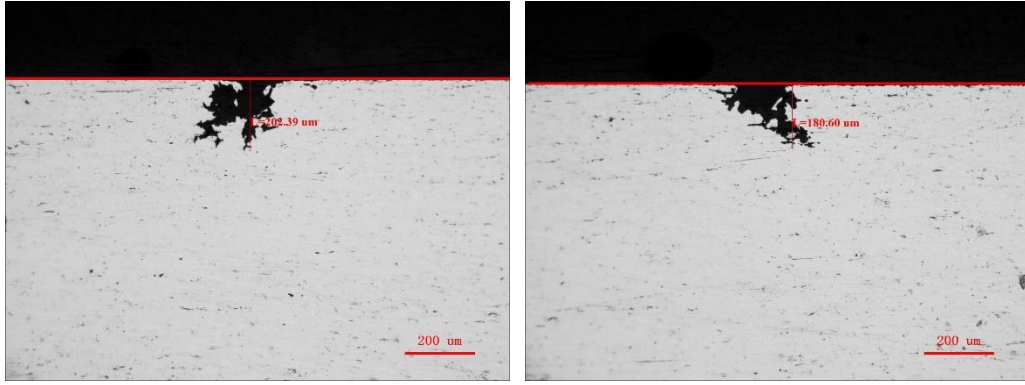


图 5 35°C60h 腐蚀深度

选取最大晶间腐蚀深度处做 SEM 和 EBSD，不同时间 SEM 图及分析内容如下。

图 6 为 24h 晶间腐蚀的 SEM 照片，由图片可以看出腐蚀的深度不深，整个表面腐蚀的程度也不是很明显，只有少量的几个小坑，第二张图的坑持续向内扩展，可以看出纹路为晶粒的边界。

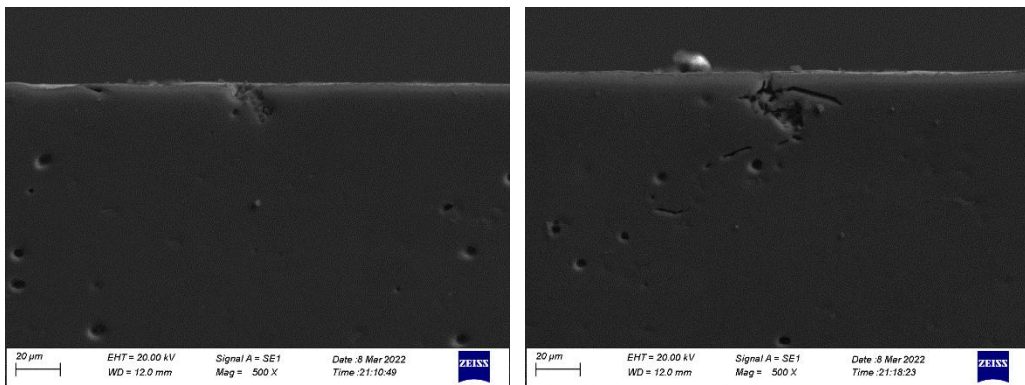


图 6 35°C24hSEM

图 7 为 36h 晶间腐蚀的 SEM 照片，从照片可以看出腐蚀深度也不深，但是宽度变大，坑的表面表现出凹凸不平的晶粒状。

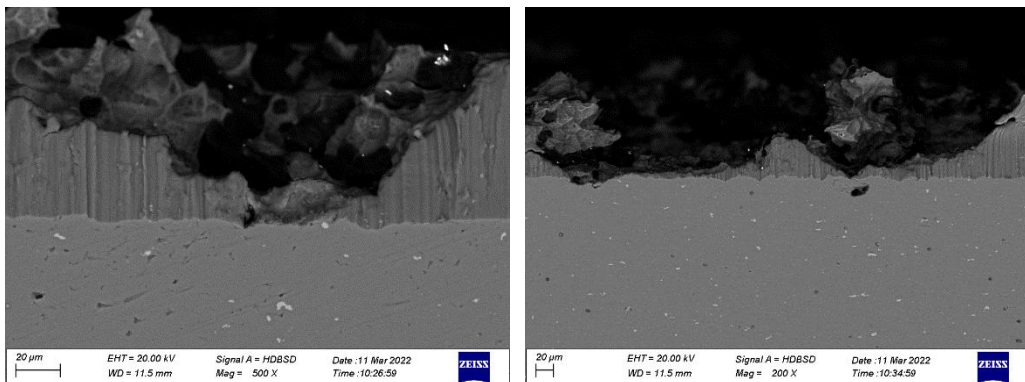


图 7 35°C36hSEM

图 8 为 48h 晶间腐蚀的 SEM 照片，由于横截面的随机性，并没有看出明显的腐蚀坑。

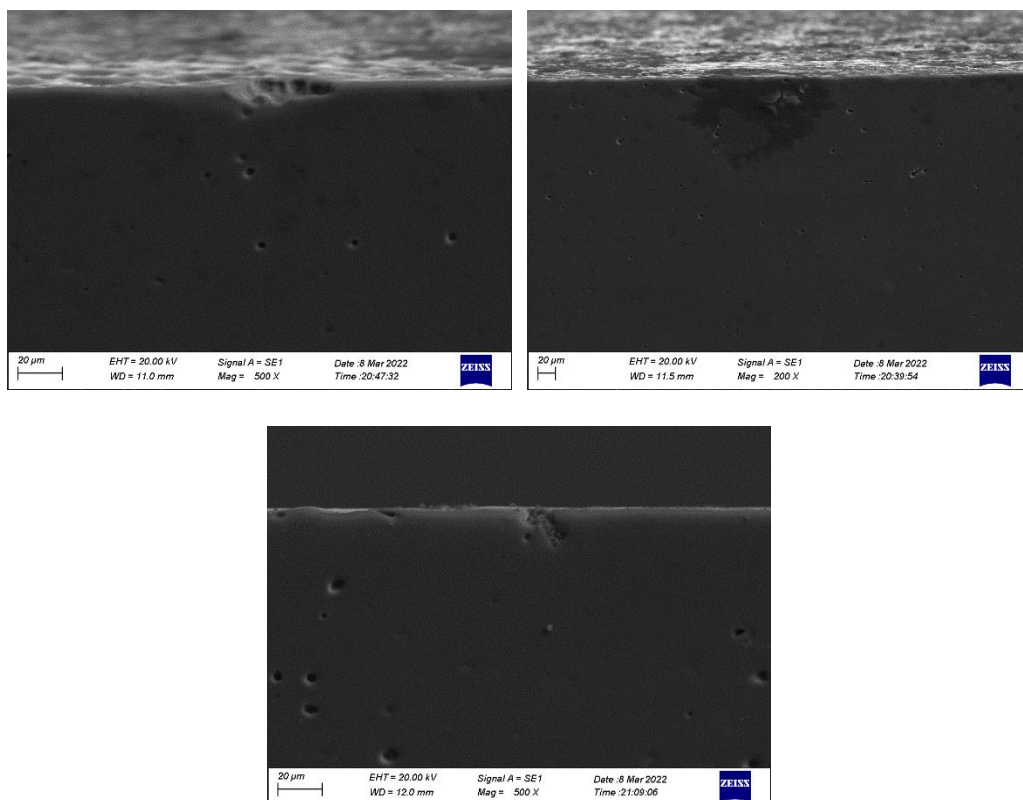


图 8 35°C48hSEM

图 9 为 60h 晶间腐蚀的 SEM 照片，在 60h 的腐蚀时间下，表面出现了较大的凹坑，在 500 倍的倍率下可以看出腐蚀后的表面状态。

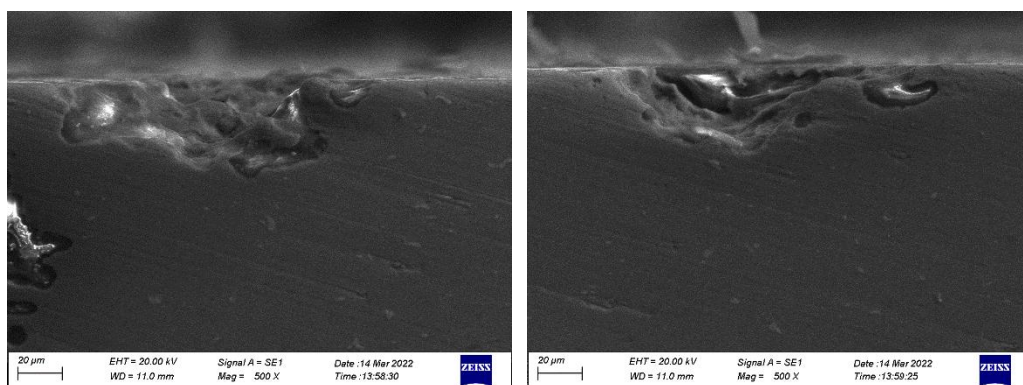


图 9 35°C60hSEM

图 10 为 72h 晶间腐蚀的 SEM 照片，在 72h 的腐蚀时间下，表面出现了非常多的大型凹坑，有一些坑在 500 倍的倍率下只可看清一部分，说明腐蚀已经十分明显，图 10 可以清晰的看出腐蚀过后的表面，呈现蜂窝状表面状态，既向内扩展也向四周扩展。

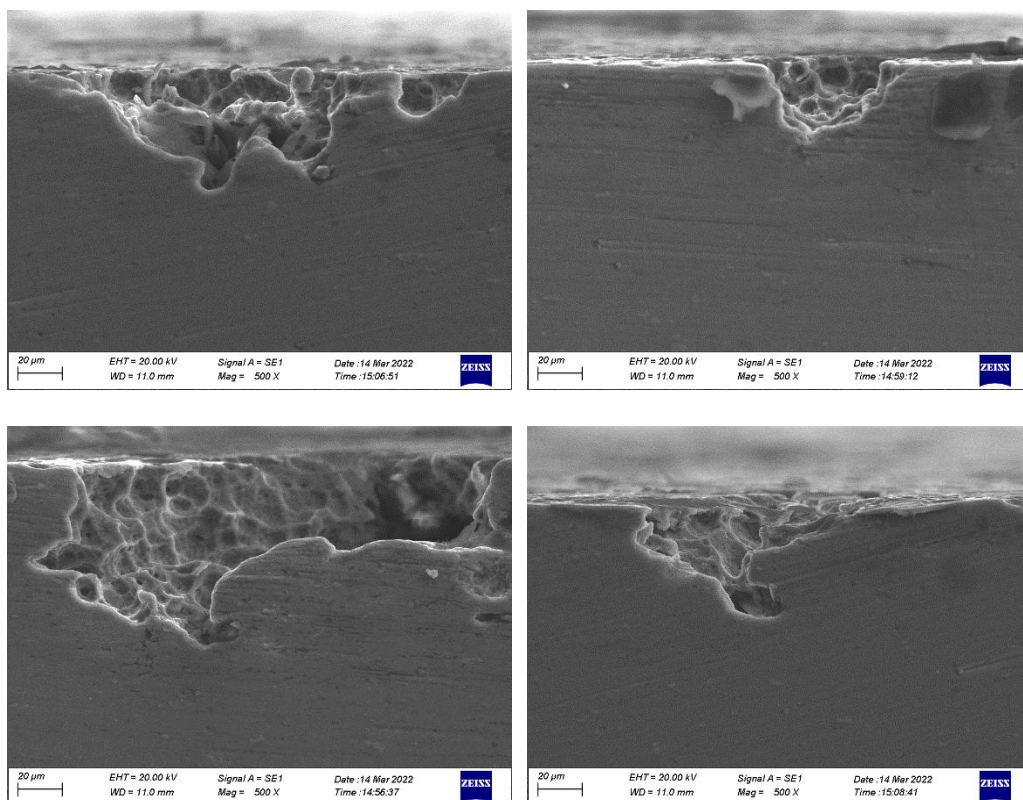


图 10 35°C72hSEM

不同时间腐蚀后晶间腐蚀深度的 EBSD 如图 11-图 12 所示。

图 11 为 24h 晶间腐蚀在 100 倍倍率 1.5 步长下的 EBSD 照片，左图是它的表面形貌，右图是微观组织，可以看出并没有很明显的晶间腐蚀现象，只是在边缘进行腐蚀，没有向内深入。

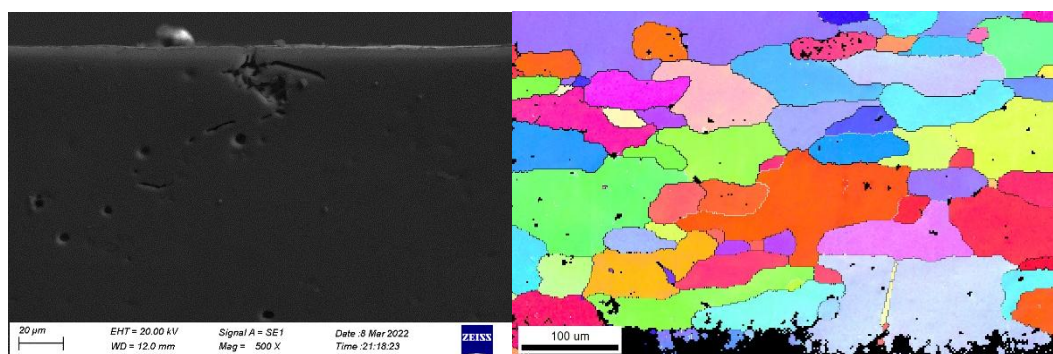


图 11 35°C24hEBSD

图 12 为 72h 晶间腐蚀在 100 倍倍率 1.5 步长下的 EBSD 照片，左图是它的表面形貌，右图是微观组织，可以看出腐蚀有一小部分腐蚀沿着晶界向内扩展，但不是很明显。

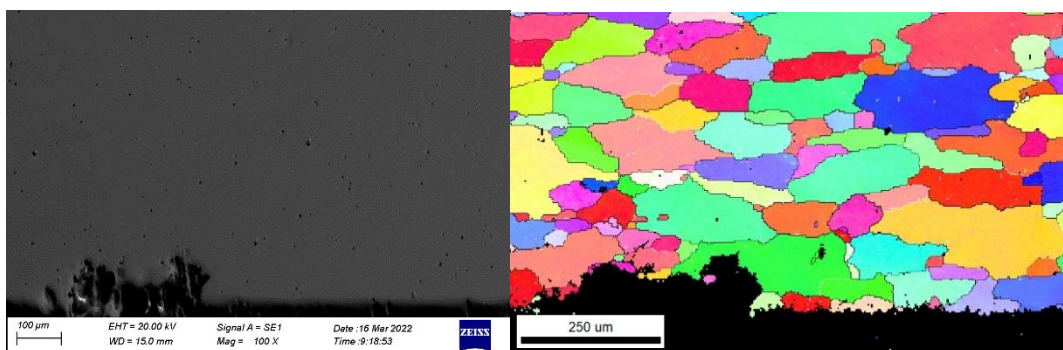


图 12 35°C72hEBSD

图 13 为 50°C 12h 晶间腐蚀的金相照片，由图上的标注可知 12h 腐蚀坑的深度为 101.9μm，相比较 35°C 时的晶间腐蚀，出现了较深的腐蚀坑深度，也有可能是腐蚀的随机性导致的。

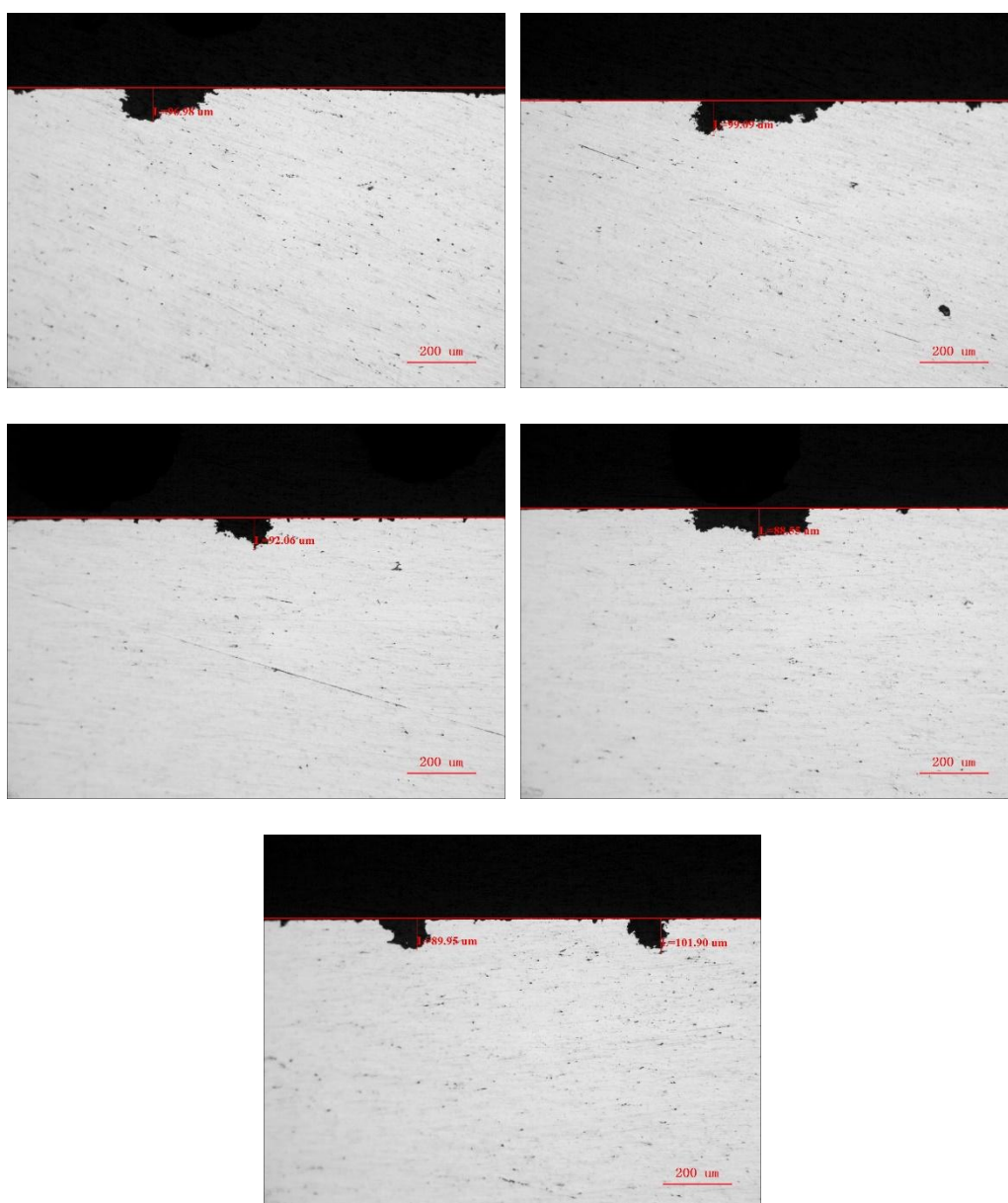


图 13 50°C12h 晶间腐蚀深度

图 14 为 50°C24h 晶间腐蚀的金相照片，由图上的标注可知 24h 腐蚀坑的深度为 59.03 μm ，相比较 35°C 时的晶间腐蚀，没有出现较大的区别。

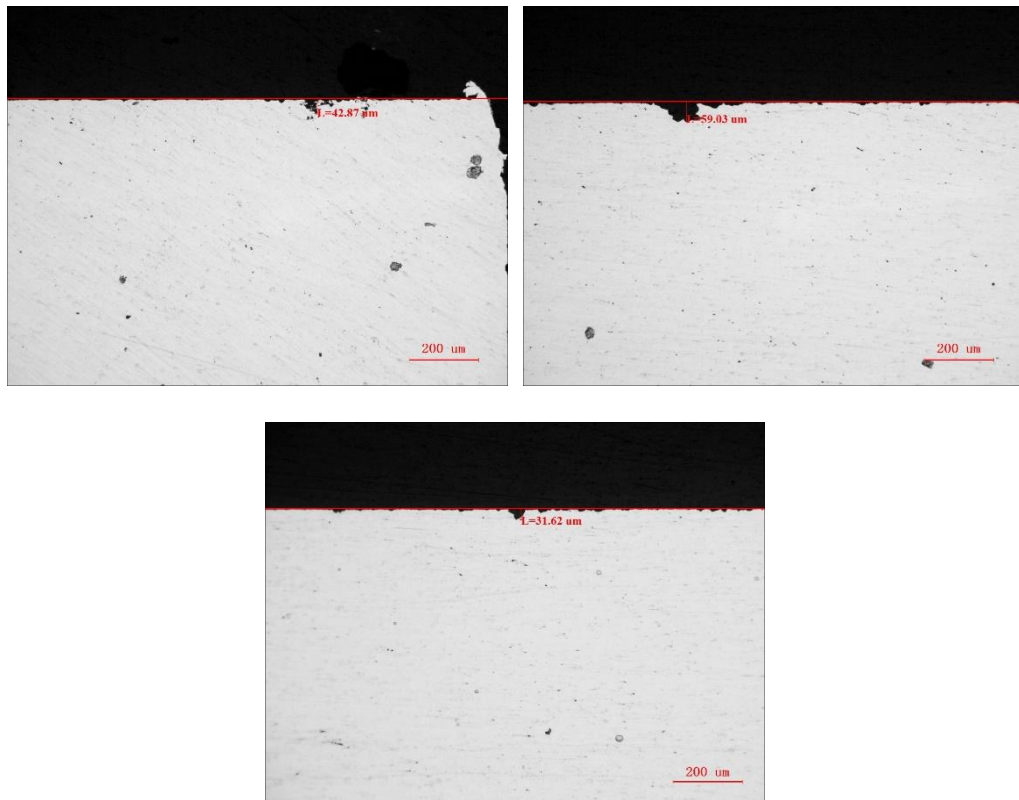


图 14 50°C24h 晶间腐蚀深度

图 15 为 50°C36h 晶间腐蚀的金相照片，由图上的标注可知 24h 腐蚀坑的深度为 86.44 μm ，相比较 35°C 时的晶间腐蚀，同样也没有出现较大的区别。

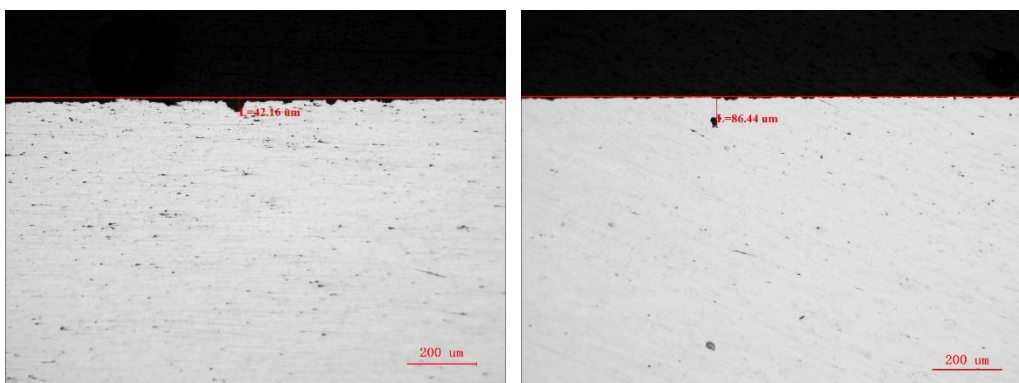


图 15 50°C36h 晶间腐蚀深度

图 16 为 50°C48h 晶间腐蚀的金相照片，由图上的标注可知 48h 腐蚀坑的深度为 115.95 μm ，相比较 35°C 时的晶间腐蚀，深度变深，可能存在腐蚀的随机性。

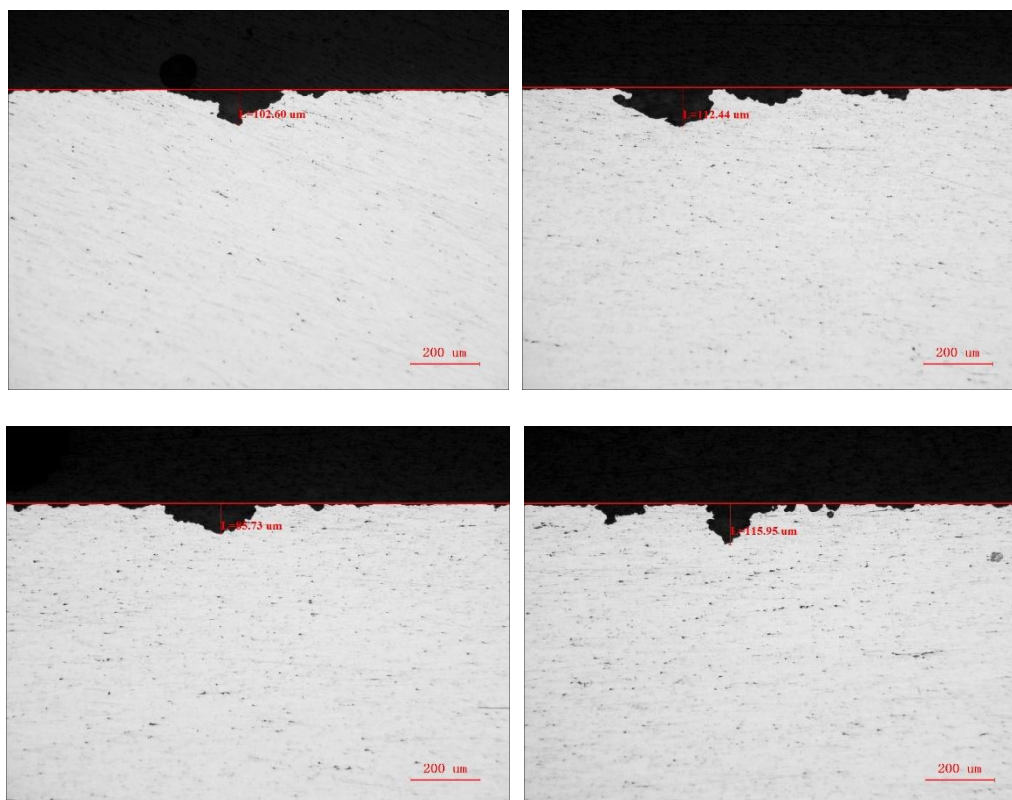


图 16 50°C48h 晶间腐蚀深度
选取 24h 晶间腐蚀样品深度处做 EBSD，如图 17 所示。

图 17 为 50°C24h 晶间腐蚀在 100 倍倍率 1.5 步长下的 EBSD 照片，左图是它的表面形貌，右图是微观组织，可以看出腐蚀过程中腐蚀掉外围的一整个晶粒并继续向内扩展。

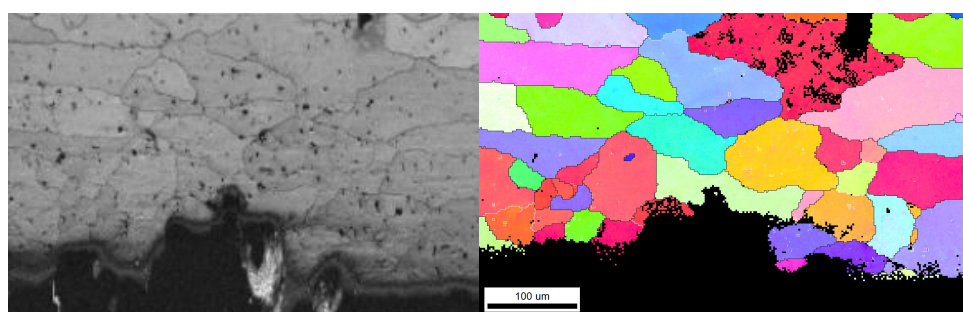


图 17 50°C24h 晶间腐蚀 EBSD

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

针对前期开展的轨道交通车辆用铝合金材料的慢应变速率拉伸应力腐蚀、深度法，恒载荷应力腐蚀、C 环应力腐蚀、腐蚀疲劳等多种应力及环境状态下的腐蚀特征及寿命评价结果，开展了轨道交通车辆用铝合金材料的腐蚀评价方法研究，形成快速准确评价 6××× 铝合金材料晶间腐蚀性能的测试方法。在国家标准 GB/T 7998-2005 《铝合金晶间腐蚀测定方法》的基础上，研究 6××× 铝合金不同表面粗糙度及阳极氧化程度对晶间腐蚀深度的影响，探明能够准确评定腐蚀等级的试验方法；通过金相显微镜、扫描电镜及电子背散射衍射表征手段，综合判定最大晶间腐蚀深度，以准确评定其腐蚀等级，形成精确评价 6××× 铝合金晶间腐蚀性能的组织判据。

综上，建议本标准作为评价轨道交通车辆 6××× 材料晶间腐蚀性能的推荐性标准。

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，与中南大学开展合作研究，该校在铝合金应力腐蚀及工艺控制研究方面具有多年积累，实验室设备先进，团队具有高水平研究能力，在现有研究基础上，可以进一步对 6××× 晶间腐蚀与表面状态的关系，以及焊接接头不同区域的晶间腐蚀性能展开研究和标准制定。

（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 6××× 铝合金晶间腐蚀的特征、横向对比相关轨道交通车辆晶间腐蚀标准及轨道交通车辆晶间腐蚀规律，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 6××× 铝合金材料晶间腐蚀测试的方法及具体要求，指导 6××× 铝合金材料晶间腐蚀测试工作实施，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、车辆生产等环节人员进行技术交流，不断对 6××× 铝合金材料晶间腐蚀测试方法进行改进，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。