

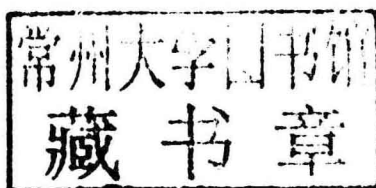
有色金属先进材料及其 制备技术学术研讨会论文集

罗洪杰 吴林丽 主编



有色金属先进材料及其 制备技术学术研讨会论文集

罗洪杰 吴林丽 主编



东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 罗洪杰 吴林丽 2016

图书在版编目 (CIP) 数据

有色金属先进材料及其制备技术学术研讨会论文集 /
罗洪杰, 吴林丽主编. — 沈阳: 东北大学出版社,
2016. 12

ISBN 978-7-5517-1521-8

I. ①有… II. ①罗… ②吴… III. ①有色金属—金属材料—学术会议—文集 IV. ①TG146-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 323716 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83683655(总编室) 83687331(营销部)

传真: 024-83687332(总编室) 83680180(营销部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 210mm×285mm

印 张: 16.25

字 数: 500 千字

出版时间: 2016 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2016 年 12 月第 1 次印刷

组稿编辑: 罗 鑫

责任编辑: 李 佳

封面设计: 潘正一

责任校对: 梦 彤

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1521-8

定 价: 78.00 元

汇丰机械

HUIFENG MACHINERY

公司简介

沈阳汇丰机械有限公司（沈阳市汇丰机械厂）成立于八十年代初期，地处于沈阳经济技术开发区，是生产电解铝设备的专业厂家。

生产的自动码垛机获得了辽宁高新科技、专利产品金奖，现有产品专利12项，自动化专利2项，充分体现低碳、环保、节能减排、生态人文的趋势，属世界高新技术产品，现已转化生产，尤其符合国家发改委产业目录中装备工业机器人设备开发项目，现已批准立项在沈阳经济技术开发区装备制造产业园扩建。

我厂占地面积5万余平方米，固定资产6,000余万，（现有厂房2万余平方米，二期正在扩建中）年产值过亿元，员工260余人。企业下设机加车间、铆焊车间、组装车间、铸造车间，良好的工作环境，先进的生产设备和优质的多样化产品，为我们在激烈的市场竞争中立于不败之地营造了广阔的发展空间。公司拥有一批优秀的专业员工，科技人员占到全厂人数的30%，生产设备、工装配套精良、检测手段完善，采用先进Solidworks三维立体设计软件。

“汇丰”品牌的铝锭铸造机、大扁锭铸造机、真空抬包、敞口抬包、抬包拖车、阳极搬运车、阳极转运站、阳极浇注站、抬包倾翻器、抬包清理机、吸铝管清理机、抬包预热站等系列产品，被国家技术监督局评为放心品牌，还多次荣获沈阳市“诚信单位”、“纳税先进企业”及“守合同，重信用企业”称号。

汇丰公司本着“人品打造精品，精品贡献用户”的原则，以科技为先导，以质量为本，以管理为主的企业风貌，建设产业化，多元化，国际化的一流企业，近年来汇丰公司与印度Balco公司、哈萨克斯坦、伊朗、阿塞拜疆、挪威、法国等国家铝行业公司开展了深入广泛的国际经济技术贸易合作，为供需双方提供了广阔的发展空间。

董事长李红霞携全体员工真诚与用户合作，互利互惠，共同发展，愿与国内外新老客户共创辉煌未来！

沈阳汇丰机械有限公司

SHEN YANG HUI FENG MACHINERY Co, Ltd.

地址：沈阳经济技术开发区黔灵湖街18号

电话/传真：024-62245916 62245936

邮箱：25747753@163.com

邮编：110141

网站：www.hfjx.com.cn

前 言

东北大学、内蒙古蒙东铝及新材料工业技术研究院和教育部材料先进制备技术工程研究中心于 2016 年 5 月 27—29 日在东北大学联合召开了“有色金属先进材料及其制备技术学术研讨会”，大会共征集到 50 篇论文，我们现将其结集出版，取名为《有色金属先进材料及其制备技术学术研讨会论文集》。本书内容涉及铝电解惰性阳极材料、多孔金属材料、气敏材料、纤维材料、铝合金及其复合材料、先进电池材料、高温防护涂层、金属材料、生物材料、层状复合材料等的开发、应用，以及废金属、废渣的回收利用等。这些论文反映了国内相关材料领域的发展动态和研究进展，对从事材料研究、开发和生产的科技工作者具有一定的参考价值。

本书的出版得到了沈阳城顺达工业技术有限公司、沈阳汇丰机械厂、沈阳鑫博公司、沈阳博瑞达公司的资金支持，我们对此表示衷心的感谢。

鉴于时间仓促和编者水平所限，书中存在疏漏和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2016 年 12 月

目 录

惰性阳极铝电解研究进展	姚广春, 刘宜汉, 张志刚 (1)
泡沫铝材料改善高铁列车性能	姚广春 (7)
泡沫铝材料提高汽车与电梯安全性	姚广春 (13)
泡沫铝材料提高军事装备性能	姚广春, 罗洪杰, 曹卓坤 (17)
气敏材料的发展及研究热点的思考	张磊, 焦万丽 (22)
涤纶纤维表面化学镀镍活化方法及工艺的研究	高嵩, 王桂林 (26)
烧结温度对粉煤灰增强铝基复合材料组织及性能的影响	杨文静, 吴林丽, 姚广春, 等 (32)
废旧钕铁硼火法回收研究进展	华中胜, 唐泽韬, 刘欢 (38)
高速列车用铝合金接头冲击韧性的研究	季凯, 张静, 徐玉松 (43)
先进电池材料与器件研究	尉海军 (48)
动态冲击下泡沫铝填充金属管的变形及吸能特性	刘欢, 姚广春, 罗洪杰, 等 (54)
含钕铝合金的制备方法与应用	陈晓, 刘宜汉, 姚广春, 等 (58)
新材料是推动技术进步的主要动力	刘海石 (63)
激光在多孔金属材料中的应用	张敏, 陈长军 (66)
泡沫铝的制备工艺及应用	洪玉鹏, 戴志伟, 马俊杰, 等 (72)
CoCrAlSiY 高温防护涂层性能研究	张淑婷, 杜开平, 史记 (78)
铝及合金中杂质铁的有害作用及去除方法研究进展	中华, 刘爱娟, 杨卫东 (83)
保温材料的种类与检测方法概述	张剑红 (89)
TiO ₂ 掺杂对 NiFe ₂ O ₄ 结构及晶粒生长动力学影响	杜金晶, 刘宜汉, 姚广春 (93)
秸秆-聚丙烯酸高吸水材料制备工艺及其性能研究	杨连威, 王瑞杰 (98)
基于粉末挤压成型的泡沫铝发泡行为影响因素分析	郭志强 (102)
稀土上转换发光纳米探针的制备及其应用	牛永芳, 于永丽, 刘海霞 (107)
中国铜冶炼行业的发展与挑战	李兵 (117)
气雾化高硅铁粉性能分析	康伟, 廖相巍, 贾吉祥, 等 (122)
注浆成型法制备铝电解测温热电偶 NiFe ₂ O ₄ 陶瓷保护套管的研究	张志刚, 何其乐, 崇磊 (126)
中厚板超声波探伤不合格问题简析	李廷刚 (131)
渗流铸造法制造泡沫镁合金技术半工业化实验	刘宜汉, 姚广春, 张晓明, 等 (134)
油页岩灰渣中提取氧化铝和白炭黑技术研究	刘宜汉, 韩剑, 程晓旭, 等 (139)
铝基复合材料在汽车领域的应用研究进展	忻加坤, 曹卓坤 (145)
镁钙合金制备的研究进展	舒辉, 吴林丽, 罗洪杰 (149)
泡沫铝夹芯板研究现状及分析	林皓, 徐建荣, 罗洪杰, 等 (154)

泡沫铝夹芯结构冲击动力学研究综述	刘亚栋, 梁小龙, 高国文, 等 (158)
泡沫铝的制备工艺及优化	李伟青, 梁小龙, 张志刚, 等 (162)
石墨烯复合材料概述	卢晓通, 张志刚, 罗洪杰 (166)
铝电解用惰性阳极研究进展综述	张啸, 刘宜汉, 姚广春 (173)
影响泡沫铝孔结构的因素及孔结构对性能的影响	于洋, 曹卓坤, 罗洪杰 (181)
镁基生物植入材料的研究进展	徐春阳, 黄闻战, 林晓初, 等 (186)
铁酸镍基铝电解惰性阳极材料研究进展	赵晓萌, 刘宜汉, 马俊飞, 等 (190)
层状金属复合材料及泡沫铝夹芯结构研究进展	祖国胤 (194)
泡沫镁制备技术的研究进展与应用展望	黄闻战, 徐春阳, 穆永亮, 等 (199)
NiFe ₂ O ₄ 颗粒表面化学镀铜工艺研究	马俊飞, 刘宜汉, 姚广春 (205)
攀研院钒钛新材料所研究工作概述	龙秀丽 (210)
一种高强韧耐磨钢的显微组织与力学性能	李红斌 (213)
激光增材制造用钛合金粉末制备技术	吉海宾, 雷家峰, 祖国胤, 等 (219)
闭孔泡沫铝吸声性能研究	梁李斯 (223)
搅拌铸造法制备铝基复合材料的技术难点及解决方法	吴林丽, 罗天骄, 董志国 (227)
粉末冶金法制备粉煤灰增强铝基复合材料的制坯过程研究	吴林丽, 杨文静, 姚广春 (233)
泡沫铝夹芯结构抗冲击性能研究	梁小龙, 刘亚栋, 高国文, 等 (239)
西部钛业产品研发简述	席锦会 (242)
多孔铝的制备方法研究进展	罗洪杰, 马晓涛, 张晓明 (247)

惰性阳极铝电解研究进展

姚广春, 刘宜汉, 张志刚

(东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 惰性阳极铝电解是发展方向, 镍铁尖晶石基惰性阳极是最可能商业化的。虽然国内外投入巨资, 但都还没有解决镍铁尖晶石基金属陶瓷惰性阳极抗热震性低和脆性大问题。我们研究的耐火材料型镍铁尖晶石基惰性阳极可以满足铝电解需要, 解决了抗热震性低和脆性大的问题。合成这种惰性阳极先烧结合成镍铁尖晶石, 破碎后作为骨料, 骨料颗粒级配, 加入增韧纤维、纳米粉料及金属粉, 压制成型后再经二次烧结惰性阳极制品。惰性阳极与导杆之间采用注铜套扣连接。在铝电解过程中, 由于电解液对惰性阳极湿润性良好, 气膜电阻过电压比碳电极显著减小, 电解电压仅比碳电极电解时高 500mV 左右。此外, 电解过程中, 在惰性阳极周围形成的湍流波动较小, 极距可以降低到 3cm 以下, 降低电耗。

关键词: 铝电解; 耐火材料型镍铁尖晶石惰性阳极; 粒度级配; 纤维增韧; 纳米粉增韧; 抗热震性; 润湿性; 过电压

Research progress of Inert anode aluminum electrolysis

YAO Guang-Chun, LIU Yi-Han, ZHANG Zhi-Gang

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YAO Guang-Chun, E-mail: gcyao@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Inert anode is the development direction of aluminum electrolysis. NiFe_2O_4 inert anode is the most likely to be commercialized. It is invested heavily in domestic and foreign but the problems of low thermal shock resistance and brittleness of NiFe_2O_4 based cermet inert anode have not been solved. Refractory type nickel ferric spinel based inert anode in our study can meet the requirements of aluminum electrolysis and the problems of low thermal shock resistance and brittleness have been solved. During the preparation process, the first was the NiFe_2O_4 sintering synthesis. And NiFe_2O_4 were broken into aggregate. Aggregate sized gradation, with toughened fiber, nanometer powder and metal powder. After compaction, inert anode products were obtained after second sintering. Metal thread connection is adopted between the inert anode and the guide rod. In the process of aluminum electrolysis, owing of good wettability of electrolyte on anode, the over voltage generated by gas film resistance was significantly reduced than the carbon electrode and the electrolysis voltage was only about 500mV higher than that of carbon electrode. In addition, in the electrolysis process, the turbulent fluctuation formed around the inert anode was relatively slight. Distance can be reduced to below 3cm, with lower power consumption.

Key words: Aluminium electrolysis; Refractory type nickel ferric spinel based inert anode; Particle size distribution; Fibre toughening; Nano powder toughening; Thermal shock resistance; Wetting property; Over voltage

收稿日期: 2016-03-01

作者简介: 姚广春(1947—), 男, 辽宁省沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师。

1 引言

在碳素阳极铝电解过程中,生产每吨铝要排放1.5吨左右的 CO_2 气体、50kg左右沥青烟气和一定数量的氟碳气体,严重污染环境。

因此,国内外近几十年来都在研究惰性阳极铝电解技术,采用惰性阳极后,阳极产物为氧气,不再产生沥青烟气和氟碳气体等有害气体,也有利于节省电能。

根据国内外对惰性阳极的研究结果,电解腐蚀速率最低、最可能在铝电解中进行商业化应用的是镍铁尖晶石基惰性阳极。

“十五”期间,在美国铝业公司和国内中铝公司资金的支持下,研究了镍铁尖晶石金属陶瓷惰性阳极制造方法^[2],然而不能克服陶瓷材料固有的缺点——抗热震性低、断裂韧性低。这些弱点导致镍铁尖晶石基金属陶瓷型惰性阳极无法在铝电解工业中使用。

笔者开发了耐火材料型镍铁尖晶石基惰性阳极制备技术,研究了其性能和在铝电解过程中的行为。惰性阳极制造技术为先烧结合成镍铁尖晶石,破碎后作为骨料,骨料颗粒级配,加入增韧纤维、纳米粉料及金属粉,压制成型后再经二次烧结惰性阳极制品。惰性阳极与导杆之间采用注铜套扣连接。在铝电解过程中,由于电解液对惰性阳极湿润性良好,气膜电阻过电压比碳电极显著减小,电解电压仅比碳电极电解时高500mV左右。此外,电解过程中,在惰性阳极周围形成的湍流波动较小,极距可以降低到3cm以下,降低电耗。

这种惰性阳极成型时的内应力小,具有较好的热稳定性、抗热震性和断裂韧性,又适于制造大块惰性阳极制品,可以满足铝电解工艺的要求,代表铝电解工艺的发展方向。

2 耐火材料型镍铁尖晶石基惰性阳极制造技术

我们研究的技术路线为,以氧化镍、氧化铁粉末为原料,加入促进烧结剂(氧化锰、氧化钒等)在1000℃以下烧结合成尖晶石块体,将尖晶石块体破碎成各种粒度料作为骨料,按照粗、中、细不同组成配料,细粉料中含有一定比例的纳米粉,再加入金属粉和增韧纤维,压制成型,经二次烧结合成惰性阳极制品。图1为镍铁尖晶石基惰性阳极制备

工艺流程图^[1-3]。

2.1 镍铁尖晶石骨料的合成

以氧化镍、氧化铁为原料,按照NiO过量15%的质量比例配料,在球磨罐内进行湿式球磨,使各组元混合分布均匀,研磨成粉末状后向其中加入5%的聚乙烯醇,做黏结剂,混合均匀后,造粒。将造粒后的料在压模内加压成型,然后压坯进行烧结。在镍铁尖晶石骨料配料过程中,添加促进镍铁尖晶石烧结剂^[1-3]。

添加 MnO_2 后材料的综合性能良好,材料的密度增加,电导率提高,抗腐蚀性增强,抗弯强度和抗热震性得到很好改善。添加 V_2O_5 可以显著提高镍铁尖晶石的耐腐蚀性,还能够改善金属相与陶瓷相间的润湿性,使金属银能够沿着陶瓷颗粒的轮廓分布,形成联通的网状结构。

将合成后的镍铁尖晶石破碎,筛分成不同粒度的颗粒料,作为制造惰性阳极制品的各种粒级的骨料。

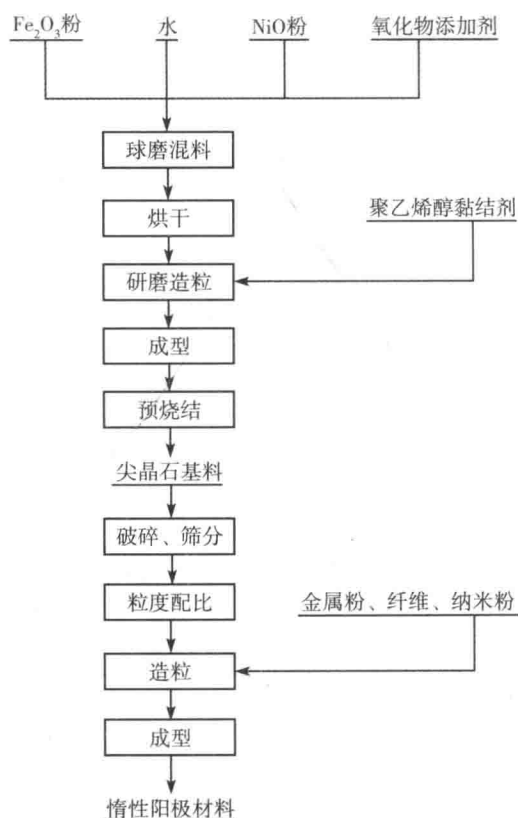


图1 镍铁尖晶石基惰性阳极制备工艺流程图

2.2 骨料颗粒配料

为了使原料颗粒在坯体中尽可能紧密堆积,取得最大填充密度,要采用不同粒度级别的骨料配

比。即采用大颗粒料、中颗粒料和小颗粒(细粉料)配合起来使用。

大颗粒在坯体结构中起骨架作用,适当增加大颗粒的尺寸和提高大颗粒的使用比例可以提高产品的热稳定性和抗热震性能。小颗粒粉料的作用是填充颗粒间的空隙,在一定范围内增加小颗粒粉料的用量,可以提高产品的密度和机械强度,粉料一般在配料中占 40%~70%。粉料中一部分采用纳米粉,有利于提高制品的抗热震性和韧性。

合适的配料比为:大颗粒料 35%~45%,中颗粒料 15%~25%,细粉料(其中纳米级料占 20%) 35%~45%。

2.3 纤维增韧

为了进一步提高镍铁尖晶石基惰性阳极制品的抗热震性和断裂韧性,通过研究添加 SiC 纤维、碳纤维、氧化锆纤维等对镍铁尖晶石基惰性阳极性能的影响^[4,5],发现添加氧化锆纤维,能够显著提高镍铁尖晶石基惰性阳极的抗冲击性能和抗热震性能。

图 2 为氧化锆纤维添加量对试样抗热震性的影响,当纤维质量分数从 0 增加到 3% 时,材料的抗热震性显著提高,但当纤维量超过 3% 时,抗热震性降低。添加氧化锆纤维对抗折强度的影响也呈现这样的规律,添加 3% 氧化锆纤维时抗折强度较高。一般在耐火材料型镍铁尖晶石基惰性阳极中添加 3% 左右氧化锆纤维。

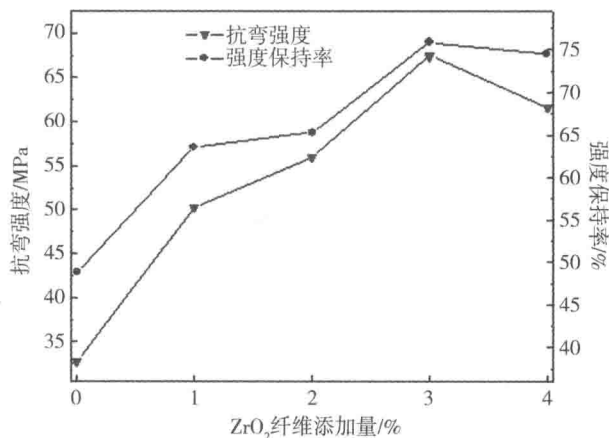


图 2 ZrO_2 纤维添加量对试样抗热震性的影响

2.4 纳米粉增韧

在制备耐火材料型镍铁尖晶石基惰性阳极中添加 NiFe_2O_4 纳米粉试验结果表明,随着添加量的增加,惰性阳极试样的抗弯强度先上升后降低,在

30% 时达到最大值 42.47 MPa^[6]。

试样的断裂韧性也呈现这样规律,未添加 NiFe_2O_4 纳米粉的试样的断裂韧性值仅有 $1.46 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,随着 NiFe_2O_4 纳米粉添加量的增加,断裂韧性值逐步上升,在 30% 时达到最大值 $3.12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,是不添加 NiFe_2O_4 纳米粉试样的 2.14 倍。实验结果说明,添加一些 NiFe_2O_4 纳米粉可以提高惰性阳极的韧性和强度。

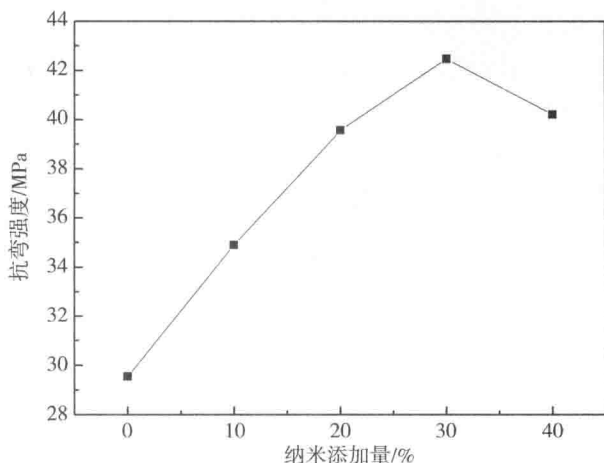


图 3 纳米粉添加量对阳极试样抗弯强度的影响

2.5 黏结剂增韧

采用纳米高岭土做黏结剂,将添加不同量黏结剂的惰性阳极试样从室温直接放进 960℃ 的炉中,待温度再次升高至 960℃ 后,恒温 10min,然后将试样取出,放置空气中自然冷却至室温,测量阳极试样的剩余抗折强度,采用强度剩余率来表征惰性阳极材料的抗热震性能。无添加剂试样的强度剩余率为 70%,黏结剂添加量分别为 8wt% 和 10wt% 时,试样的强度剩余率分别为 94% 和 95%。添加 8% 左右黏结剂惰性阳极试样的抗折强度也较高^[7]。

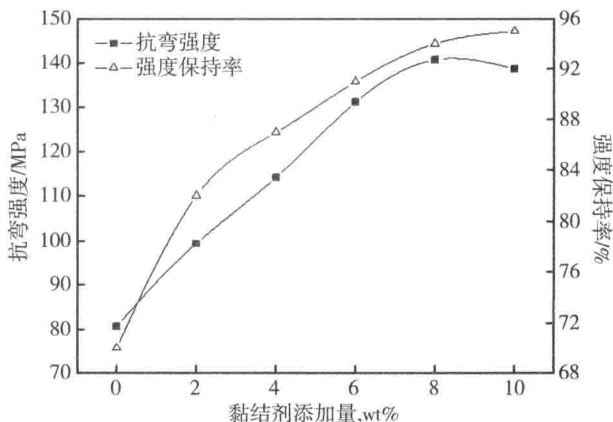


图 4 黏结剂添加量对试样抗热震性的影响

3 镍铁尖晶石基惰性阳极电化学性质

3.1 电解液对惰性阳极的润湿性

由图 5 和图 6 可以看出, 电解液对碳阳极润湿角很大($102^{\circ} \sim 112^{\circ}$), 而对 NiFe_2O_4 基惰性阳极的润湿角较小, 最开始为 76.9° , 比炭素阳极的初始润湿角小得多。随着时间的延长, 电解质熔滴在阳极表面铺展开来, 润湿角会迅速减小, 到 140s 时接触角为 23.4° 。另外可以看出, 添加 1.0wt% MnO_2 、2.5wt% TiO_2 和 0.5wt% V_2O_5 后 NiFe_2O_4 惰性阳极的初始润湿角分别为 56.86° 、 52.98° 和 51.93° , 随着电解质的迅速铺展, 润湿角急剧减小, 经过 50s 左右的时间就能铺展开, 达到 15° 以下^[8]。

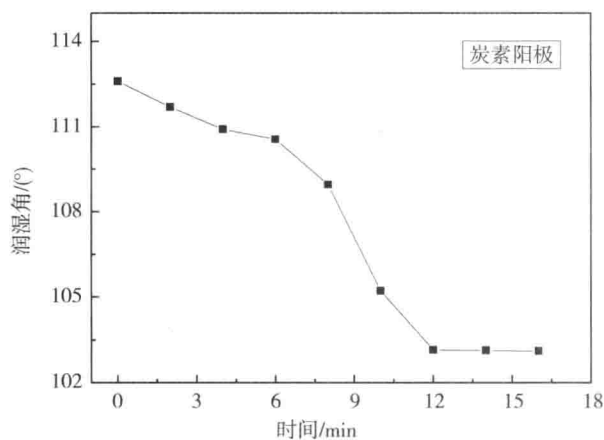


图 5 炭素阳极润湿角随时间的变化

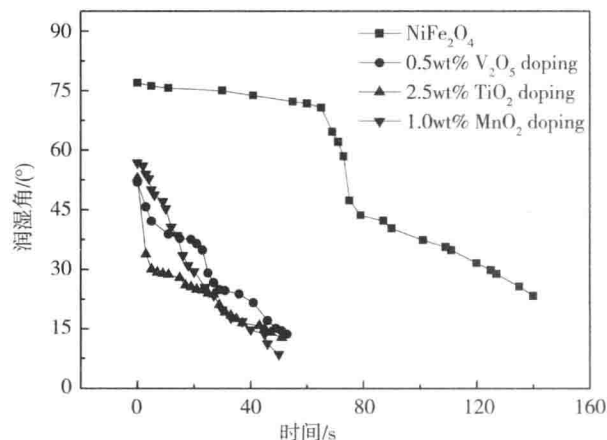


图 6 不同惰性阳极润湿角随时间的变化

3.2 电解过程阳极下气膜比较

在电解过程中, 由于电解液对炭素阳极润湿不良, 低电流密度电解时, 炭素阳极底部气泡从形核到合并长大并逸出的过程持续时间较长, 约 102s,

从阳极底部脱离时的气泡尺寸较大, 气泡尺寸与电流密度的关系, 如图 7 所示, 达到 10~12.5mm。

气泡在 NiFe_2O_4 基惰性阳极表面上形核、长大到逸出, 逗留的时间比在碳阳极短, 这一过程大约需要 79s。在同样电流密度下气泡尺寸为 2.5~4.0mm, 脱离时直径约为 4mm。这是由于电解液对惰性阳极湿润性好, 气泡容易逸出(见图 8)。

3.3 惰性阳极过电压

试验测得 NiFe_2O_4 基惰性阳极的反电动势比炭素阳极要高出约 0.88~0.94V, 由图 9 可以看出, 在 $0.6\text{A}/\text{cm}^2 \sim 1.2\text{A}/\text{cm}^2$ 电流密度范围内, NiFe_2O_4 基惰性阳极的阳极过电压比炭素阳极的小 0.087~0.13V。引入添加剂后, NiFe_2O_4 阳极过电压均比无添加时的阳极过电压略低, 这主要是添加剂改善了电解液与阳极间的润湿性所致。

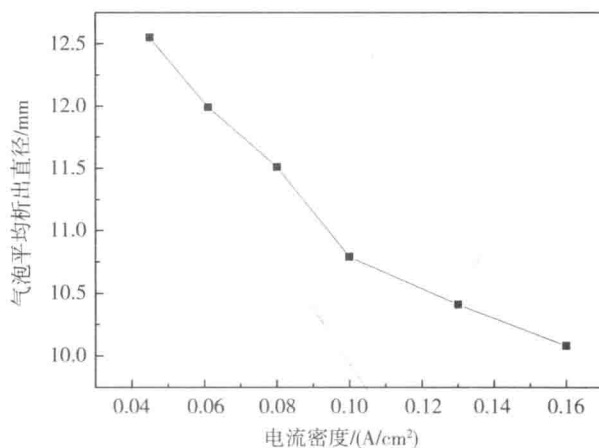


图 7 炭素阳极在不同电流密度下气泡的平均析出直径

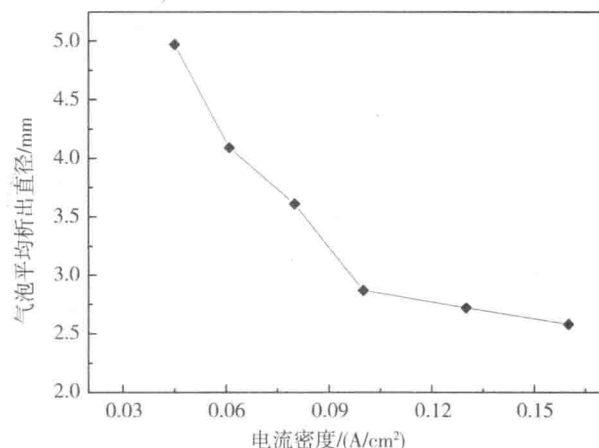


图 8 NiFe_2O_4 基惰性阳极不同电流密度下的气泡平均析出直径

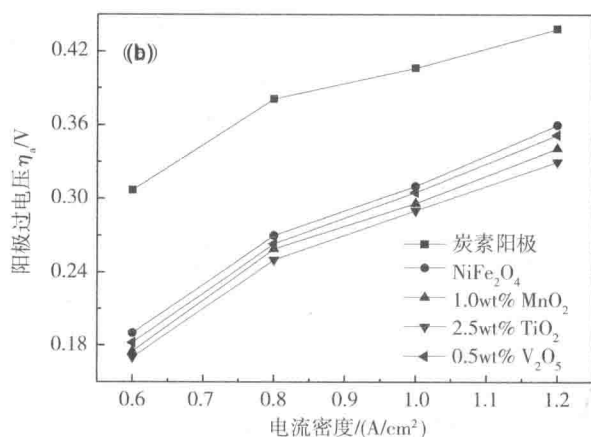


图9 炭素阳极与惰性阳极过电压

3.4 电解电压

电解试验结果表明,当电流密度为0时,惰性阳极初始电压比炭素阳极高1V左右,随着电流密度增大,炭素阳极过电压增大量较大,惰性阳极过电压增大量较小,分解电压差值缩小到500mV左右(图10)。

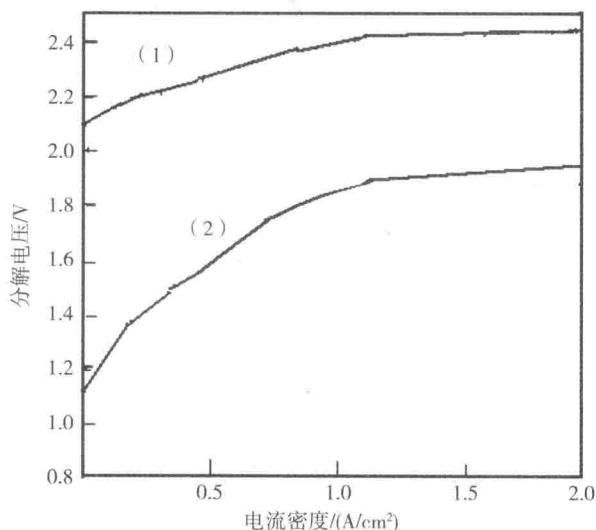


图10 惰性阳极与炭素阳极分解电压

(1)— NiFe_2O_4 惰性阳极; (2)—炭素阳极

4 惰性阳极导杆连接方式

惰性阳极与金属导杆之间的连接比较困难,采用黏结剂黏接、充填 NiFe_2O_4 基料等连接方式都不成功,不适于铝电解。张啸发明了铸铜套扣连接方法,即现在惰性阳极模中铸入耐蚀铜合金,然后钻成螺丝母,再将导杆车成螺纹(图11),将螺杆旋入阳极的螺丝母孔中(图12),连接强度高,导杆与阳极体间电阻率比阳极本体电阻率低。经过10h

电解试验后,阳极与导杆连接很好,适应铝电解工艺。

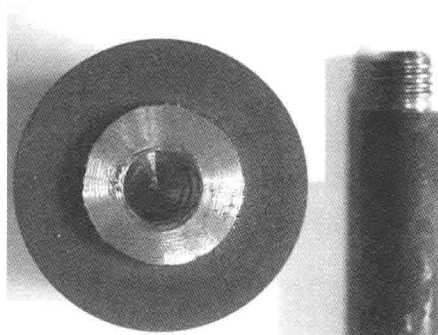


图11 惰性阳极铸铜螺母和套扣导杆



图12 连接导电杆的惰性阳极试样

5 惰性阳极铝电解行为

5.1 与金属陶瓷型惰性阳极比较

将金属陶瓷型 NiFe_2O_4 尖晶石基惰性阳极试样和耐火材料型 NiFe_2O_4 尖晶石基惰性阳极试样进行电解对比试验。电解温度为 960°C , 电解时间为10h。熔盐体系为 $\text{Na}_3\text{AlF}_6-5\%\text{CaF}_2-5\%\text{Al}_2\text{O}_3$, 阳极电流密度为 $0.8\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 阳极浸入深度为2cm。

图13为金属陶瓷型 NiFe_2O_4 尖晶石基惰性阳极试样经4h电解照片,试样表面多处出现裂纹;而耐火材料型 NiFe_2O_4 尖晶石基惰性阳极试样经10h电解后照片见图14,试样没有出现裂纹,抗热震性较好。

5.2 耐火材料型惰性阳极100A电解试验

采用 $\Phi 100\text{mm}$ 圆柱形 NiFe_2O_4 基惰性阳极,电流强度为100A,进行铝电解试验^[6,9]。电解初期的槽电压较高,随后槽电压逐渐降低并保持相对稳定,在6.8~7.3V之间波动,未出现剧烈变化。经

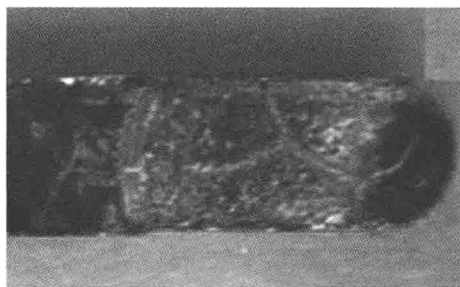


图 13 金属陶瓷型惰性阳极试样电解试验照片

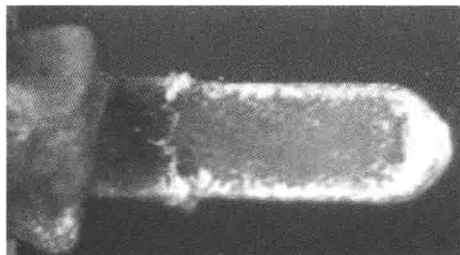


图 14 耐火材料型惰性阳极试样电解试验照片

10h 电解后, 阳极试样(图 14)电解后没有明显变化。电解后的阳极外观尺寸几乎没有变化, 表面平整, 棱角仍然分明, 没有发生开裂、肿胀、表面起层和剥离的现象, 表现出较好的抗热震性和耐熔盐腐蚀性。阳极导杆与阳极本体之间连接牢固, 没有脱落迹象。

6 惰性阳极铝电解能耗分析

6.1 相同极距时分解电压

由图 10 可以看出, 在相同极距时, 虽然 NiFe_2O_4 基惰性阳极的反电动势比炭素阳极的反电动势高 1V 左右, 但是由于惰性阳极与电解液湿润性好, 过电压低, 在电流密度为 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 时, 铝电解的分解电压只比炭素阳极时高 500mV 左右。一般铝电解槽电压为 4.0V 左右, 电能消耗约增加 12%。

6.2 降低极距节能

比较图 7、图 8 可以看出, 由于电解液对 NiFe_2O_4 基惰性阳极湿润性优良, 在阳极底掌上产生的气泡尺寸较小, 为碳阳极的 30%~40%。碳阳极气泡尺寸达到 10~12.5mm, 而气泡在 NiFe_2O_4 基惰性阳极表面上, 在同样电流密度下气泡尺寸为 2.5~4.0mm。而且从气泡形核、长大到逸出, 逗留的时间比在碳阳极短。因此, 气泡使惰性阳极周围的电解液产生湍流波动较小, 电解液湍流波动的深度减小, 因此可以降低极距, 如果极距降低

1cm, 电解质电压降可以降低 500mV 左右, 即可降低电耗 12%左右, 将会与采用炭素阳极时电耗相当。

6.3 其他方面节能

采用惰性阳极铝电解, 每年消耗电极 10mm 左右, 长时间不用更换阳极操作, 只进行打壳、添加氧化铝和补充电解质操作, 因此, 可以减少电解槽热损失, 可以节能 10%~20%。

7 结论

① 添加 MnO_2 , V_2O_5 可以促进镍铁尖晶石的烧结, 可以提高镍铁尖晶石的耐腐蚀性和抗弯强度, 还可以提高金属相与陶瓷相间的润湿性。

② 采用二次烧结合成, 不同颗粒料配料, 制备耐火材料型镍铁尖晶石基惰性阳极可以提高惰性阳极制品的热稳定性、抗热震性。

③ 添加氧化铝纤维、黏结剂、纳米粉有利于提高惰性阳极的抗热震性和抗力冲击性能。

④ 镍铁尖晶石基惰性阳极与导杆间采用铸铜套扣法连接是可行的。

⑤ 铝电解液对镍铁尖晶石基惰性阳极湿润性优良, 过电压较低, 在正常电解相同极距时, 分解电压只比炭素电极高 500mV 左右, 当极距降低 1cm 时, 不增加铝损失, 槽电压可以降低 500mV, 将与炭素电极电解电耗相当。

参考文献

- [1] 刘宜汉. 镍铁尖晶石基惰性阳极制品的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2004.
- [2] 焦万丽. 镍铁尖晶石基金属陶瓷惰性阳极的制备及性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- [3] 席锦会. 两步烧结制备铝电解惰性阳极材料的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- [4] 张淑婷. 纤维增强 NiFe_2O_4 基阳极材料的制备及性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- [5] 华中胜. 纤维/ NiFe_2O_4 复合阳极材料的制备及性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [6] 张志刚. 纳米增韧 NiFe_2O_4 基铝电解惰性阳极的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [7] 马佳. 制备大尺寸耐火材料型铝电解惰性阳极的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [8] 杜金晶. NiFe_2O_4 合成机制与其惰性阳极电化学性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [9] 龙秀丽. NiFe_2O_4 基铝电解惰性阳极熔盐腐蚀行为及力学性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.

泡沫铝材料改善高铁列车性能

姚广春

(东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 我国高铁列车快速发展并已经向国际输出, 然而高铁列车还存在一些瑕疵需要完善, 例如增加防撞结构, 提高安全性; 改进车厢内饰结构, 降低噪声, 提高舒适性; 改进地板结构, 降低振动, 提高舒适性; 用吸声降噪声屏障替换不降噪的假声屏障, 减少噪声对线路两侧居民的侵扰。通过这些改进后, 可以显著提高高铁列车性能, 提高国际竞争力。

关键词: 高铁列车; 车头防撞结构; 车厢间防撞结构; 吸声内饰; 减震地板; 吸声声屏障

Aluminum foam material to improve the performance of high-speed trains

YAO Guang-Chun

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author:

YAO Guang-Chun, E-mail: gcyao@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The high-speed railway has a rapid development in our country, and output in international markets. While, some flaws still exist and should be perfected, for example, increasing the safety by adding anti-collision structure; decreasing the noise and increase the comfort by improve the upholstery in the carriage; decreasing the shake by improve the floor structure; protecting the residents from being bothered by replace the sound barrier with which absorbs sound and reduces noise. By these improvements, the properties of the high-speed railway can be increased remarkably, thus increasing the international competitiveness.

Key words: High-speed trains; Front fender structure; Car collision between structure; Acoustic interior; Damping floor; Absorption of sound barrier

我国高铁列车通过引进创新, 发展很快, 但是在向国际输出方面, 却屡屡出现问题, 泰国高铁最后采用日本高铁, 墨西哥高铁撤约导致我国损失巨

大。这表明: 除了政治和经济因素外, 我国高铁列车的国际竞争力需要提高, 需要改进和完善质量与性能。可以从以下几方面进行完善和改进。

收稿日期: 2016-03-01

作者简介: 姚广春(1947—), 男, 辽宁省沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师。

1 高铁列车安装防撞结构, 提高安全性

1.1 国内外高铁机车头部对比

2011年7月23日, 温州动车追尾撞车事故造成40名乘客死亡, 172人受伤^[1]; 2008年4月28日, 胶济线上两列车相撞, 造成70人死亡, 400多人受伤^[2]。

日本新干线也曾发生一起撞车事故: 两列车在神户发生追尾, 其中一列第三、第四节车厢脱轨, 没有人员伤亡^[3]。上述事故都损失惨重。

日本采用带缓冲结构的长车头, 车头内装泡沫铝材料, 如图1所示。当撞击时因吸能缓冲, 减少对后边车厢的撞击力。德国西门子防撞列车头部内也是填装泡沫铝吸能材料。

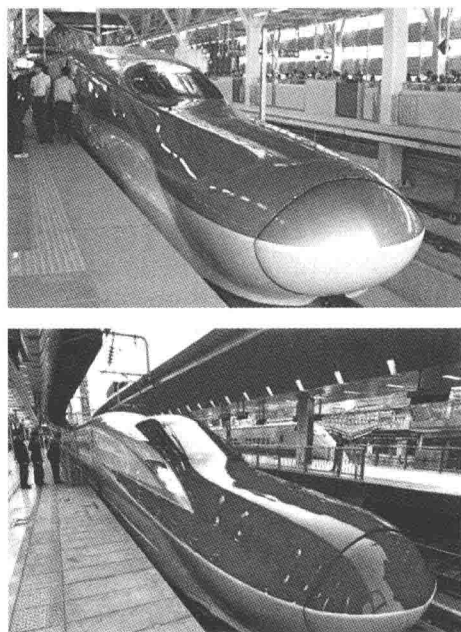


图1 日本新干线机车头

我国列车头短小, 没有吸能防撞装置, 或吸能缓冲能力很低, 如图2所示。青岛四方研制的时速500km列车头为流线型, 虽然减小运行阻力, 但是仍然无防撞结构。

1.2 列车头部吸能缓冲材料选择

日本新干线机车, 德国西门子机车采用泡沫铝材料, 其吸能量为 $(1\sim 2)\times 10^4\text{kJ/m}^3$; 国内有人主张用铝管压溃管, 其吸能量为 $(2\sim 2.5)\times 10^4\text{kJ/m}^3$, 且冲压下溃塌, 没有吸能作用; 还有的场合采用橡塑管材料, 其吸能量为 $(0.3\sim 0.5)\times 10^4\text{kJ/m}^3$ 。

吸能量最高的是充填泡沫铝的铝管吸能柱, 其吸能量达到 $6\times 10^4\text{kJ/m}^3$, 是纯泡沫铝材料的3~6

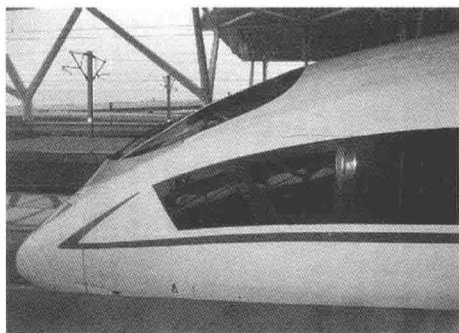
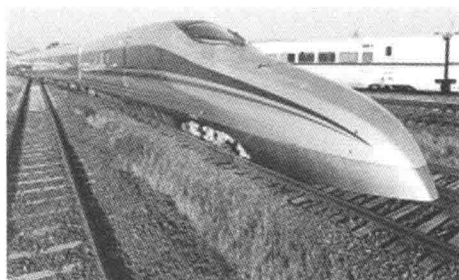


图2 我国高铁机车头

倍, 是橡塑管材料的10倍以上。各种材料的应力-应变曲线见图3^[4]。

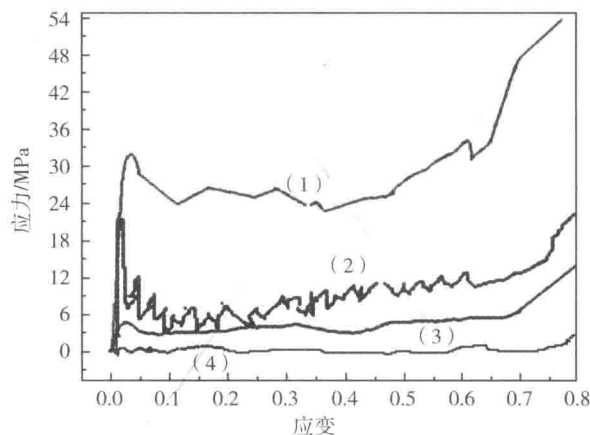


图3 几种材料应力-应变曲线

(1)一泡沫铝/铝管; (2)一压溃铝管; (3)一泡沫铝; (4)一橡塑管

1.3 高铁机车头防撞结构设计

高铁机车头防撞结构设计如图4所示, 将充填泡沫铝的铝管吸能柱沿着列车方向用高强胶粘贴在



图4 高铁机车头防撞结构

一起，并固定在较强的铝合金板上。如果车头安装 10m^3 ，可以吸收 $6\times 10^5\text{kJ}$ 动能。

1.4 车厢之间防撞结构

目前，高铁列车厢之间有的采用软连接，无吸能结构；有的车厢间采用橡塑泡沫管状防撞结构（图 5），吸收撞击动能的能力微乎其微。车厢间撞击动能为

$$E=1/2m_{\text{(后面全部车厢质量)}}\times(v_{\text{后车}}-v_{\text{前车}})$$

式中， $v_{\text{后车}}$ ——后面车厢速度；

$v_{\text{前车}}$ ——前面车厢速度。

由此可知，车厢之间撞击动能很大，越靠近机车头部的车厢遭受撞击动能越大，温州撞车时前面六节车厢被撞拱起。因此，车厢间需要安装缓冲能力较高的防撞结构。

设计的泡沫铝防撞结构如图 6 所示，在车厢端部四周安装充填泡沫铝铝管吸能柱，厚度为 200mm ，用高强胶黏接在车体上。8 节车厢泡沫铝吸能柱总体积为 8m^3 ，吸能量为 $4.8\times 10^5\text{kJ}$ 。

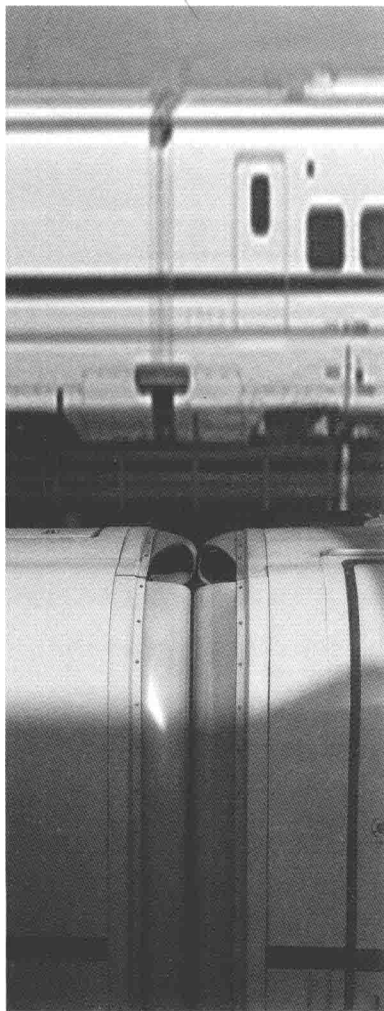


图 5 车厢间软连接和橡塑管防撞结构

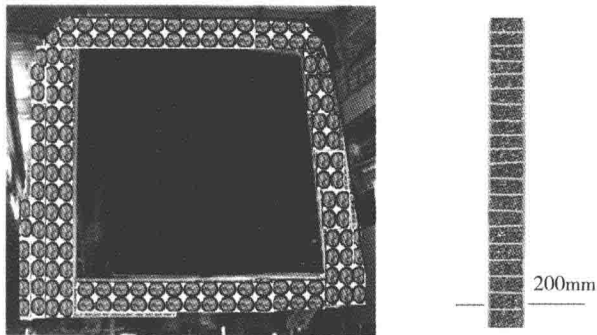


图 6 车厢间泡沫铝防撞结构

1.5 防撞能力估算

车头可以吸收 $6\times 10^5\text{kJ}$ 动能，车厢间可以吸收的总能量为 $4.8\times 10^5\text{kJ}$ ，共可以吸收 $10.8\times 10^5\text{kJ}$ 动能。

当一个动车组时速为 100km/h 时撞击动能为 $20\times 10^5\text{kJ}$ ，可以吸收 50% 以上撞击动能，使列车缓冲。

当时速为 70km/h 以下时，最大撞击动能为 $9.8\times 10^5\text{kJ}$ ，可以全部被吸收。

2 提高车厢内舒适性

2.1 高铁车厢内噪声和振动较大

目前，高铁车厢内噪声较大，CRH380A 型动车组在时速 350km/h ，车厢内噪声为 69 分贝左右，CRH2A 型动车组在 250km/h ，运行时噪声分贝大致相同。

原因 1 是车厢内饰采用平滑的高分子板材，导致声波反射回响，同时防火性能也不好，燃烧时会产生令人窒息的毒气。

原因 2 是采用胶合板制作地板，其隔振与隔声作用很小。

2.2 车厢侧部与顶部内饰设计

车厢侧部与顶部内饰采用泡沫铝吸声板（厚 10mm ，冲孔率 3% ），表面为了美观要粘贴纤维装饰布。在车厢壁内侧安装 20mm 高度龙骨架（留有 20mm 厚的空腔），把泡沫铝吸声板固定其上，可以达到吸声、减少声波回响降噪的目的。泡沫铝吸声板与粘贴纤维装饰布的泡沫铝吸声板如图 7 所示。典型泡沫铝内饰高铁车厢如图 8 所示。

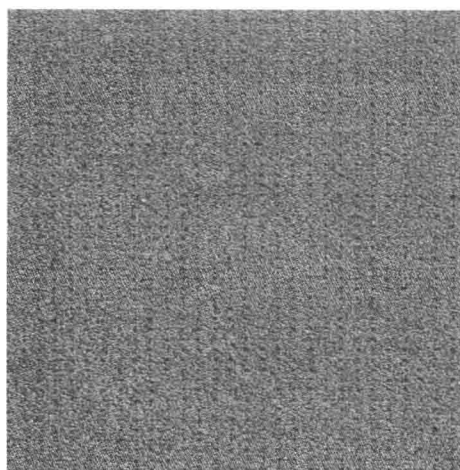


图7 泡沫铝吸声板与粘贴纤维装饰布的泡沫铝吸声板

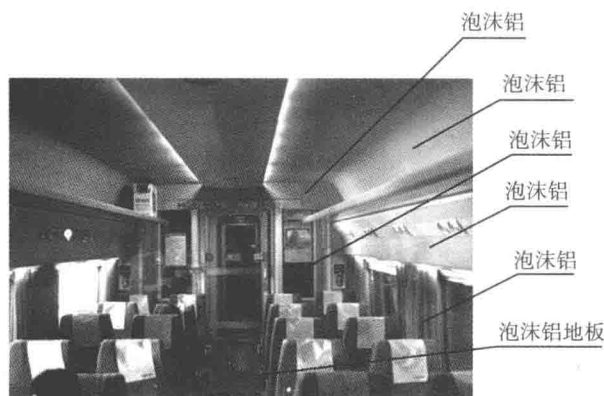


图8 典型的泡沫铝内饰高铁车厢

2.3 隔振与隔声地板的设计

不同厚度的泡沫铝夹芯板隔声量与声波频率关系如图9所示^[5]。20mm厚泡沫铝夹芯地板可隔声20~40分贝，30mm厚泡沫铝夹芯地板可隔声20~45分贝。

高铁列车地板结构为1.2mm铝板/28mm泡沫铝/1.2mm铝板；普通车地板的结构为1.2mm铝板/18mm泡沫铝/1.2mm铝板。采用高强胶黏接，

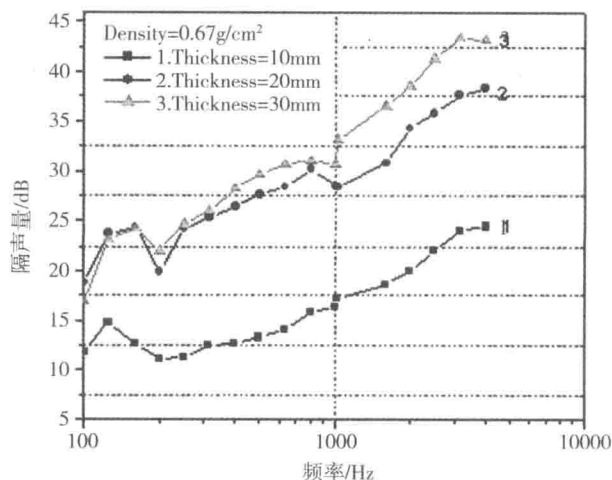


图9 不同厚度泡沫铝夹芯板隔声量与声波频率关系

黏结强度 $>100\text{MPa}$ ，室温固化， $+100^{\circ}\text{C} \geq$ 适用温度 $\geq -100^{\circ}\text{C}$ ，抗弯强度 $>100\text{MPa}$ 。高铁列车地板与普通列车地板样品如图10所示。

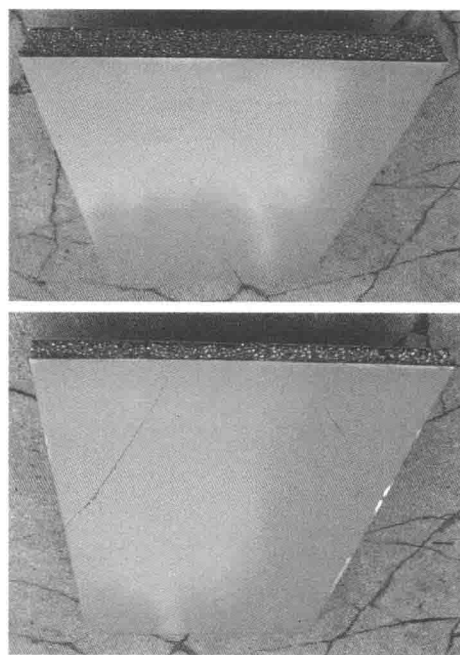


图10 高铁列车地板与普通列车地板样品

3 高铁线路降噪

3.1 高铁线路噪声

高速行驶的车轮与铁轨发生强烈碰撞，形成严重的噪声污染。虽然安装了声屏障，但是不降噪。据测量，在距离铁路线外22米左右的地方夜间噪声高达87.4~98.6分贝，远远超过《城市区域环境噪声标准》的限值。居民对噪声污染问题反映强烈。