

# 新材料在大型铝电解槽节能降碳技术中的应用与展望

马军义 李昌林 侯光辉 李冬生 曹永峰

(中铝郑州有色金属研究院有限公司, 河南 郑州 450041)

**[摘要]** 新材料的应用对电解铝生产的节能降碳及提质增效具有至关重要的意义,本文重点介绍近年来金属材料、涂覆材料、陶瓷材料、炭素材料、耐火材料等新材料在大型铝电解槽节能降碳技术中的应用概况。金属材料在电解槽中的应用主要有低阻阳极钢爪、高导阴极钢棒、超强耐磨打壳锤头等,涂覆材料的应用主要有槽盖板热反射保温涂料、阳极与钢爪抗氧化涂料等,陶瓷材料主要应用有 TiB<sub>2</sub> 陶瓷阴极以及陶瓷基惰性阳极等;炭素材料主要应用有石墨质或石墨化阴极碳块等;耐火材料方面则主要有新型防渗保温材料、新型碳化硅/碳复合材料等。国内各电解铝生产企业在不断优化生产操作工艺的同时,越来越重视新材料在节能增效技术中的应用。同时指出,目前新材料的应用仍需系统性研究。

**[关键词]** 钢爪;保温涂料;惰性阳极;阴极碳块;陶瓷材料;涂覆材料;耐火材料

**[中图分类号]** TF821

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 2097-2423(2024)02-0041-05

**DOI:**10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.007

## 0 前言

自1886年美国的霍尔和法国的埃鲁特发明冰晶石-氧化铝熔盐电解法生产原铝,至今已有近140年的历史。作为现代电解铝工业的理论基础,该法至今仍是冶炼铝的最佳方法,但冶炼铝的电解槽结构却已经发生了很大的变化。20世纪50年代,我国在抚顺铝厂投产了首批60 kA自焙电解槽,70年代自主开发了135 kA预焙电解槽,90年代自主开发出当时亚洲最大的280 kA预焙电解槽,2014年中铝研发的全球首条600 kA超大容量预焙电解槽生产线成功投产。经过多年的努力,我国电解铝产业发展取得了举世瞩目的成就,产业技术水平日益提高,

产业规模不断扩大,具有自主创新能力的电解铝产业体系正在形成。2022年我国电解铝产量达到4 021.4万t,居世界首位。但作为传统的耗能大户,中国铝工业在资源、能源和环保方面也面临着越来越大的压力,电耗、碳排放已成为影响中国电解铝工业可持续发展的关键因素,在今后相当长的一段时期内,节能降耗与低碳绿色电解将是中国电解铝技术发展的主旋律<sup>[1-2]</sup>。

国际铝协数据<sup>[3]</sup>显示,2021年我国铝液综合交流电耗为13 448 kW·h/t-Al,国外电解铝平均铝液综合交流电耗为15 233 kW·h/t-Al,较我国高1 785 kW·h/t-Al。目前,海德鲁、彼斯涅、俄铝等企业均开展了电解铝深度节能减碳技术的研究,海德鲁的Hydro's HAL4e Ultra技术,实现直流电耗11 800 kW·h/t-Al、电流效率94.5%~95.5%;彼斯涅的APXe技术,实现了直流电耗11 800 kW·h/t-Al、平均电流效率95.9%;俄铝的RA-550技术,实现了直流电耗11 910 kW·h/t-Al、电流效率95.82%<sup>[4]</sup>。上述电解铝关键技术数据表明,我国整体铝电解技术已领先国外铝电解平均水平,但与国外顶尖先进技术经济指标相比仍有一定差距。

原有电解槽生产系列受原设计水平、筑炉材料、设备装置、整体技术水平和生产原材料等因素所限,主要技术指标及吨铝能耗仍有较大的提升空间,而仅

**[收稿日期]** 2023-10-08

**[作者简介]** 马军义(1972—),男,河南禹州人,工程师,硕士,主要从事有色金属合金冶炼与熔铸工作。

**[引用格式]** 马军义,李昌林,侯光辉,等.新材料在大型铝电解槽节能降碳技术中的应用与展望[J].绿色矿冶,2024,40(2):41-45,72.

MA Junyi, LI Changlin, HOU Guanghui, et al. Application and prospect of new materials in energy saving- carbon reducing technology of large aluminum electrolysis cell [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(2): 41-45, 72.

通过扩大槽型、提高电流等措施提升综合技术能耗指标,其潜力十分有限<sup>[5-6]</sup>。材料行业是一个国家工业体系的基础,新材料的发展应用对传统产业技术的升级换代有着不可替代的作用。我国基础材料的快速发展,也将为铝电解技术的发展提高提供坚实材料支撑。我国铝电解生产技术要迈向更高台阶,除了要对生产工艺进行更深入的研究外,围绕大型铝电解槽技术工业化过程的核心技术难题,对铝电解槽用新材料进行深度开发和广泛应用也更为重要。

新材料的应用对电解铝生产的低碳、低耗及提质运行有着至关重要的意义,本文重点介绍近年来新材料在大型铝电解槽节能降碳技术中的应用概况。

## 1 金属材料在铝电解槽中的应用

### 1.1 低阻阳极钢爪

阳极钢爪是电解导电杆与阳极之间的重要连接构件,在电解铝的实际应用中,不仅要求阳极钢爪具有良好的导电性,还要求具有一定的承重能力及抗变形强度。在保证阳极钢爪必要的抗变形力学性能的基础上,降低其电阻率,可降低其空耗电压,达到节电的效果。汪艳芳等<sup>[7-9]</sup>研究的低阻阳极钢爪通过添加微量有益合金元素、改变原有钢爪整体结构等措施,不仅屈服强度、弹性模量等力学性能优于

普通铸造钢爪,延长了阳极钢爪修复周期,而且其电阻率较普通钢爪材料降低 17% ~ 30%,导电性能提高约 17%,阳极钢爪压降由目前企业在用的 76.6 mV 降低至 33.9 mV,节电降耗效果明显。

### 1.2 高导电阴极钢棒

大型铝电解槽磁场对铝液波动及电解质-铝液界面有很大影响,而铝液的波动及电解质-铝液界面变形又会影响电解槽内磁流体的稳定性,导致电解槽生产运行稳定性降低,电压摆幅增加,从而导致电解过程必须在较高的极距条件下进行,能耗增加,影响正常生产。

采用高导电阴极钢棒可以大幅降低槽电压,同时提高电解槽运行稳定性。王俊伟等<sup>[10-11]</sup>研究了阴极导电钢棒对铝液波动、电解质-铝液界面变形及电解槽内磁流体稳定性的影响,指出通过改善钢棒材料本身的电导率,可以在提高电流效率、降低能耗的同时,减弱铝液波动及电解质-铝液界面的变形,提高电解槽运行的平稳性。通过改善阴极导电钢棒的导电性能,无需改变现有筑炉工艺,对现有其他技术条件不会产生影响。电解槽采用新型高导电钢棒(表 1),炉底压降比普通钢棒电解槽降低 36.55 mV,平均电压比全厂同期降低 0.052 V,吨铝节电 149.3 kW·h<sup>[12]</sup>。

表 1 某新型钢棒与普通钢棒基材样品电阻率测试结果

样品	截面积/mm <sup>2</sup>	测量长度/mm	电压/( $\times 10^{-3}$ V)	电导率/( $\times 10^{-3}$ $\Omega \cdot m$ )
新型钢棒试样	5.040 $\times$ 5.024	113.1	2.31	10.34
普通钢棒试样	5.038 $\times$ 5.210	112.9	2.31	4.03

### 1.3 超强耐磨打壳锤头

目前传统铝电解打壳锤头采用普通碳钢制作,耐磨性差,使用寿命短,仅为 6 ~ 8 个月。频繁更换打壳锤头不仅造成钢铁材料的大量消耗,而且增加了工人劳动强度,造成吨铝成本的增加。

针对铝电解打壳锤头耐磨性差、使用寿命短的问题,采用等离子熔覆的方法,2019 年 9 月,中铝某研究院研发的铝电解超强耐磨打壳锤头(图 1 ~ 图 3)被中国有色工业协会鉴定为达到世界先进水平(鉴定证书号:201941YS0135),通过在普通锤头表面熔覆耐熔盐蚀、耐磨、抗氧化镍基合金层,有效延长了打壳锤头的使用周期,解决了因打壳锤头使用寿命短造成的锤头消耗大、人工费用高、铝液铁含量高的问题。该技术先后在遵义铝业、包头铝业、连城分公司、山西新材料、山西中润、中铝铝业推广应

用。铝电解超强耐磨打壳锤头使用寿命由原来的 6 个月提升至 48 个月,使锤头在电解铝中的成本由 3.55 元/t 降低至 0.91 元/t,降幅达 74.37%。该技术适用范围广,可在全国电解铝企业不同规格电解槽推广应用。

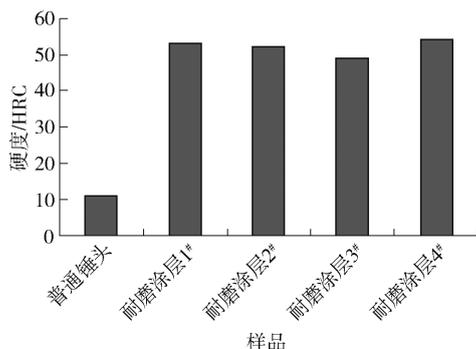


图 1 普通锤头与新型锤头的硬度对比

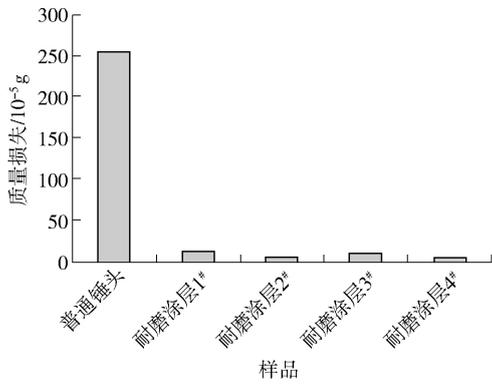


图2 普通锤头与新型锤头的耐磨性对比

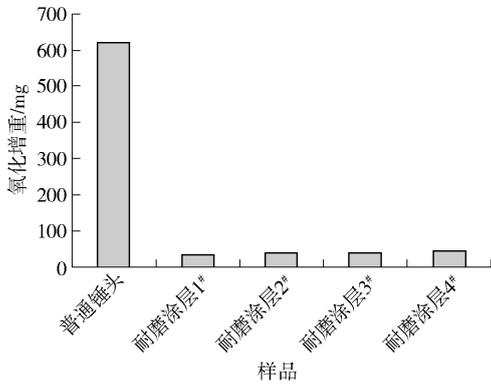


图3 普通锤头与新型锤头的抗氧化性对比

## 2 涂覆材料在大型铝电解槽中的应用

### 2.1 槽盖板热反射保温涂料

现有电解槽能量利用率约为50%，另外50%能量则通过电解槽散失掉，其中通过槽盖板散失的热量约为300 mV，占电解槽散热1.85 V的15%以上。因此，采取保温隔热措施，减少槽盖板持续散热，对铝电解槽的节能减排具有推动作用和实际意义。

针对以上问题，中铝某研究院开发出了铝电解槽盖板保温涂料，将自主研发的高性能热反射保温涂层材料涂覆于槽盖板内侧，在不影响槽盖板使用前提下，达到降低槽盖板散热的目的。该涂料于2021年在某企业进行上槽实验应用，效果表明该技术不仅可以实现槽盖板保温、隔热、绝缘、耐高温等性能，而且能提高槽内烟气温度(表2)，与铝电解节能、余热利用等技术配合使用，可以达到铝电解企业节能降耗的目的，具有广阔的应用前景。

表2 有无涂料纯铝板保温性能测试结果

样品	稳定温度/℃	稳定温度用时/min
纯铝板	64.4	30
涂料纯铝板	52.8	43

### 2.2 阳极与阳极钢爪多功能抗氧化涂料

在铝电解的实际生产过程中，预焙阳极的中上部与全部阳极钢爪都暴露在大气中，由于它们在使用周期中一直处于200~400℃条件下，往往产生氧化损耗，造成不必要的浪费。

为提高铝电解预焙阳极与钢爪抗氧化性，中铝某研究院研发出了铝电解多功能抗氧化涂料，该涂料与阳极表面的润湿性好，干燥速度快，结合强度高。该涂料于2022年在某企业上槽应用，效果表明该多功能涂料可显著提高阳极和钢爪的抗氧化效果。阳极应用抗氧化涂料后，残极尺寸更为规整，残极厚度明显增加，可延长阳极的换极周期；钢爪应用抗氧化涂料后，外观尺寸基本保持不变，应用在产能30万t/a的电解铝企业，可创造经济效益1354万元/a。湖南某材料科技有限公司使用纳米陶瓷基高温防氧化材料，采用喷涂成型的方式在电解铝预焙阳极上应用，阳极更换周期延长1d，阳极毛耗降低10.5 kg/t-Al<sup>[13]</sup>。

## 3 陶瓷材料在大型铝电解槽中的应用

### 3.1 陶瓷基阴极

目前通行铝电解工艺中，阴极炭块上一定高度的铝液既可以抵御高温电解质对碳阴极的侵蚀，还有着充当实际阴极的作用。由于铝液与碳阴极不浸润，为保证铝液在电解槽底部分布均匀，企业往往要保留250 mm左右高度的铝液层。在电解周期内一直保持的铝液层，会消耗大量的热能；另外，由于电解槽磁场力作用，铝液层会带动熔融电解质层产生一定幅度的波动，为防止电解阴阳极短路故障，实际生产中不得不增大极距，被动提高槽电压，造成电能空耗。寻找与铝液具有良好润湿性，并能适用电解要求，具有良好导电性、抗高温熔盐腐蚀、高温稳定性能的阴极材料就成为电解铝企业的迫切需求。

TiB<sub>2</sub>是一种具有特殊物理与化学性能的陶瓷，其熔点高、耐磨性强、化学稳定性好并具有优良的导电性与加工性能，同时与铝液有较好的润湿性，是用作电解阴极的理想材料<sup>[14-15]</sup>，但由于TiB<sub>2</sub>阴极制造成本过高，目前TiB<sub>2</sub>在电解铝大型槽的研究与应用主要是作为炭质阴极的涂层方面。云铝润鑫在300 kA电解槽上采用Ti-C涂层技术，取得良好节能效果，不仅可减少槽底沉淀，改善槽底工作状态，降低槽底压降，有利于电解槽的稳定运行，同时直接起到节能增效的作用<sup>[16]</sup>。

### 3.2 陶瓷基惰性阳极

传统铝电解生产采用自消耗碳阳极进行生产,阳极使用周期大约为一个月,碳阳极的消耗不仅会产生大量有害气体,还会由于极距的变化造成生产工艺的波动,并且更换阳极时的高温环境对于人员操作比较恶劣,而惰性阳极使用周期可达一年以上,因此基于惰性阳极材料的新型铝电解技术成了当前铝工业的重点研究对象,也是未来铝工业发展的必经之路<sup>[17]</sup>。

中南大学对以铁酸镍基金属陶瓷为代表的惰性阳极的致密化烧结、阳极腐蚀机理等方面进行了大量系统的深入研究,并取得很大进展。近十年以来,中南大学和中国铝业股份有限公司分别开展了20 kA的40 kA级金属陶瓷惰性阳极的半工业化电解试验,并取得突破,2015年中铝郑州研究院开展了40 kA铝电解金属陶瓷阳极工业化试验,阳极平稳运行6个月以上;2022年在某电解铝企业220 kA电解槽上进行工业化试验,因整体技术问题未取得突破。目前国内对陶瓷基惰性阳极的研究仍以实验室以及40 kA以下试验为主,尚未有工业化试验成功报道。

## 4 炭素材料在大型铝电解槽中的应用

采用高石墨质或石墨化阴极碳块代替常规的无烟煤基或低石墨质底部碳块,能降低炉底压降,改善电解槽工艺状况,提高电流效率,降低电耗和延长电解槽寿命。

某企业采用全石墨质阴极技术,电解槽在低电压下运行,炉膛规整,运行平稳,炉底压降降低了75.5 mV,平均电压降低了66 mV,电流效率提高了0.4%,直流电耗降低了271 kW·h/t-Al,节能效果非常显著<sup>[18-20]</sup>。

某企业对比了采用石墨化阴极的电解槽和50%石墨质阴极的电解槽的长期生产运行指标,结果表明,在管理水平相同、工艺条件接近的条件下,石墨化阴极电解槽的电流效率提高1.46%,直流电耗降低近360 kW·h/t-Al。主要原因是,槽电压相同时,石墨化阴极电解槽平均极距高约1.2 mm,抗干扰能力更强<sup>[21]</sup>。

## 5 耐火材料在大型铝电解槽中的应用

在传统铝电解槽底部,阴极碳块之下是耐火砖层、氧化铝层和保温层。干式防渗保温材料兼具耐火

与防渗功能。防渗料铺在保温层上,夯实后可将阴极碳块直接安放在上面,取代耐火砖层和氧化铝层。由于防渗料为整体非刚性铺设,不存在耐火砖缝之类的缺陷,能够防止某一位置上的显著渗漏,同时能够吸收垂直方向上的部分阴极膨胀动力,减缓阴极上抬程度。另外,干式防渗料的保温性能优于耐火砖,可确保电解槽保持热平衡的稳定。最为重要的一点,防渗料所具有的化学活性,能够与渗透的电解质发生化学反应,生成致密的物料层,阻止电解质继续向下渗漏。同时,近年来部分电解铝企业使用高强浇注料替代耐火砖和保温砖进行试验,高强浇注料的特点是与钢棒接触好、对电解槽侧下部保温效果优,可有效防止渗铝、漏铝的发生。

中铝某研究院研发的新型防渗料能有效地防止电解熔体的渗透,热导率仅为耐火砖的三分之一左右,保温性能好。2016年,在某电解铝企业400 kA系列的30台电解槽上进行了新型防渗料的工业应用,电解槽运行15个月后,试验槽内衬平均温度为536℃,较对比槽温度降低65℃,这是防渗料优越的防渗性能和保温性能的体现。随着槽龄的增加,防渗料的优越性能会产生更加明显的效果。对采用上述新型防渗料的电解槽和采用某企业普通防渗料的电解槽进行了炉底散热测试和计算,两者的平均炉底散热分别为133.3 mV和151.3 mV,前者比后者的炉底散热降低18 mV,槽电压也相差25 mV;采用新型防渗料的电解槽由于炉底温度分布均匀,运行稳定,12个月的电流效率提高0.2%,吨铝直流电耗降低109 kW·h<sup>[22]</sup>。

电解槽侧部材料要具有保温性能,为了保持炉膛一定形状,还需要具有适当的透热性,以便在电解槽侧部内外形成温度梯度区间,既不会导致电解槽侧部变厚,也不使侧部熔融造成漏槽。近年来,具有耐冲刷、抗氧化、绝缘性能优的新型碳化硅/碳复合材料在电解槽侧部得到了应用,多以预制成型或现场施工依靠槽预热烧结成型方式使用。

## 6 结束语

国家产业政策导向明显向以新材料产业为代表的高新技术产业倾斜,陆续出台政策和措施以促进新材料产业的发展,新材料在电解铝中的应用亦是重点研发方向。目前,国内研究机构和企业开发了一些铝电解槽用新型材料,取得良好的应用效果,但新材料应用普及率不高,缺乏系统性研究,不能形成

统一的应用标准,但淘汰低效高耗材料已成为大势所趋,还需要业界同仁不断研究探索,长远规划,配套相应制度规范,开发低成本、高品质铝电解用新型材料。新材料在铝电解行业的不断创新应用,将对我国电解铝技术的发展产生重要的推动作用,进一步巩固我国电解铝技术在国际的领先地位。

### [参考文献]

[1] 王旋,许立松. 电解铝行业碳排放现状和趋势分析[J]. 有色冶金节能,2022,38(4):1-6.

[2] 吴冬至,王云利,董剑雄,等. 浅谈两种新材料在240 kA电解槽上的应用及其效果[C]//2007中国国际铝冶金技术论坛论文集. 北京,中国有色金属学会,北京科技大学,中国铝业公司,2007年中国国际铝冶金技术论坛,2007:229-232.

[3] International Aluminium Institute. primary-aluminium-smelting-energy-intensity [EB/OL]. <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-energy-intensity/>. 2023-09-26.

[4] 赵群,邱竹贤. 现代大型铝电解槽上新材料技术的应用[C]//首届中国国际轻金属冶炼加工与装备会议文集. 北京,中国机械工程学会,2002:28-31.

[5] 吕增旭. 铝电解槽阴极内衬新材料的应用[J]. 河南冶金,2000,41(6):9-11.

[6] 侯金龙,欧朝宇,闫飞,等. 240 kA系列化铝电解槽深度节能改造和电流强化实践[J]. 有色设备,2023,37(4):8-13.

[7] 汪艳芳,张旭贵,李健,等. 低阻高性能阳极钢爪材料开发设计及工业试验[J]. 有色金属(冶炼部分),2021(11):46-53.

[8] 张志强. 改善阳极钢爪性能,提高预焙铝电解槽综合经济效益[J]. 轻金属,2001(12):40-41.

[9] 李姝婷,王日昕,伍永福,等. 电解铝用新型阳极钢爪[J]. 中国有色冶金,2017,46(5):29-33,47.

[10] 王俊伟,周云峰,方斌,等. 降低水平电流减少铝液动态波动铝电解节能技术研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2020(4):26-29.

[11] 谷万铎,温铁军,曹国法. 高导电性阴极钢棒在铝电解槽的应用[J]. 世界有色金属,2013(8):76-77.

[12] 刘凤琴,毛继红,杨宏杰. 铝电解槽侧部用复合材料的开发[J]. 炭素技术,2003,126(3):34-38.

[13] 王博一. 铝电解预焙阳极防氧化涂层保护技术的应用研究[J]. 轻金属,2020(10):21-28.

[14] 任必军,石忠宁,班允刚,等. 300 kA大型电解槽阴极新材料的应用[J]. 材料与冶金学报,2006(4):263-267.

[15] 尤田. 电解铝用反应结合TiB<sub>2</sub>基复合阴极材料的研究[D]. 沈阳:东北大学,2019.

[16] 张志军,王天成,肖述兵. 浅谈铝电解节能降耗措施及节能产品的应用[J]. 有色冶金节能,2008,24(2):21-24,40.

[17] 刘英. 新型铝电解惰性阳极材料研究进展及展望[J]. 铝镁通讯,2016(3):21-26.

[18] 梁贵生,张芬萍,侯光辉,等. 可润湿性硼化钛阴极研究现状[J]. 世界有色金属,2022(24):168-171.

[19] 薛峰平. 全石墨质阴极在300KA电解槽应用实践[J]. 世界有色金属,2022(10):23-25.

[20] 陈永晖. 铝电解槽阴极内衬材料及结构的改进[J]. 中国有色冶金,2008(5):41-43.

[21] 汤伟,李德赞,余龙进,等. 石墨化和50%石墨质阴极铝电解槽指标与磁流体稳定性特征对比分析[J]. 轻金属,2021(12):27-31.

[22] 白卫国,汪艳芳,李昌林. 新型铝电解用干式防渗料的研发和应用[J]. 轻金属,2019(3):29-32.

## Application and Prospect of New Materials in Energy Saving-Carbon Reducing Technology of Large Aluminum Electrolysis Cell

MA Junyi, LI Changlin, HOU Guanghui, LI Dongsheng, CAO Yongfeng  
(Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co. Ltd of CHALCO, Zhengzhou 450041, China)

**Abstract:** The application of new materials is of great significance to the energy saving, carbon reduction and quality improvement of electrolytic aluminum production. This paper focused on the application of new materials such as metal materials, coating materials, ceramic materials, carbon materials and refractory materials in the energy saving and carbon reduction technology of large aluminum reduction cells in

(下转第72页)

## Research Progress on Treatment of Chromium Contaminated Soil by Leaching Method

GUO Bohou, CHEN Ruijie, ZHANG Jiyao, LING Xiaojie, WANG Juan

(College of Biological, Chemical Science and Engineering, Jiaying University, Jiaying 314033, China)

**Abstract:** Heavy metal chromium not only pollutes groundwater after entering the soil, but also accumulates in plants and endangers human health. Leaching technology has the advantages of simple operation, cost saving and remarkable effect. It is a commonly used treatment method for chromium contaminated soil. This paper summarized the current research on the leaching of chromium-contaminated soil, introduced the leaching principle, application and existing problems of various eluents, and analyzed the factors affecting the leaching effect, such as soil properties, eluent properties, eluent pH value, leaching time, liquid-solid ratio and enhancement methods. It was pointed out that the leaching of chromium-contaminated soil has problems such as low efficiency of chromium leaching in cohesive soil, insufficient ecological risk assessment of soil after leaching, and insufficient treatment and resource utilization of leaching wastewater. In the future, it is necessary to strengthen the research on these problems.

**Key words:** chromium pollution; soil leaching; type of eluent; influencing factors

(上接第 45 页)

recent years. The application of metal materials in the electrolytic cell mainly includes low resistance anode steel claw, high conductivity cathode steel rod, super wear-resistant shell hammer, etc. The application of coating materials mainly includes heat reflection insulation coating of the tank cover plate, anode and steel claw oxidation resistance coating, etc. The application of ceramic materials mainly includes ceramic-based cathodes and ceramic-based inert anodes. Carbon materials are mainly used in graphite or graphitized cathode carbon blocks; in terms of refractory materials, there are mainly new anti-seepage and thermal insulation materials, new silicon carbide/carbon composites and so on. While continuously optimizing the production and operation process, domestic electrolytic aluminum production enterprises pay more and more attention to the application of new materials in energy-saving and efficiency-increasing technology. At the same time, it is pointed out that the application of new materials still needs systematic research.

**Key words:** steel claw; thermal insulation coating; inert anode; cathode carbon block; ceramic materials; coating material; refractory materials