

DOI: 10.11951/j.issn.1005-0299.20170322

## 铝电解槽用可调控性冷捣糊材料研究

江海霞<sup>1</sup>, 阎峰云<sup>1,2</sup>, 杨飞<sup>1</sup>, 缪欢<sup>1</sup>, 王庆祝<sup>3</sup>

(1. 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室(兰州理工大学), 兰州 730050; 2. 有色金属合金及加工教育部重点实验室(兰州理工大学), 兰州 730050; 3. 贵州康格力炭素材料有限公司, 贵阳 550017)

**摘要:** 为降低铝电解槽阴极整体成型用侧部冷捣糊电导率, 提高电流效率, 研究添加红柱石后焙烧温度、添加量对冷捣糊显微结构、导电性能及力学性能的影响。以红柱石为添加剂, 电煅煤、石墨为骨料制备冷捣糊料, 在 20 MPa 下保压 5 min 后进行焙烧。采用场发射扫描电子显微镜、X 射线衍射仪对焙烧后试样显微结构进行分析, 利用电子式热膨胀仪、高温炭素电阻仪、耐驰抗折弯仪对焙烧后试样性能进行了考察。结果表明: 添加红柱石的冷捣糊试样在高温烧结后生成莫来石针状结构和 SiO<sub>2</sub> 液相, 能够填充骨料间的部分孔隙, 使试样的致密度提高, 孔隙率下降; 添加红柱石的冷捣糊焙烧体的电阻率和膨胀率相对未添加红柱石试样明显增加, 且随着红柱石含量的增加而增大。红柱石含量为 8% 的冷捣糊综合性能最佳, 烧结体的体积变化最小, 稳定性最佳, 电阻率明显提高, 抗折强度相对减少, 有望在铝电解槽阴极整体成型过程中得到应用。

**关键词:** 铝电解槽; 红柱石; 冷捣糊; 整体筑炉; 炭素材料

中图分类号: TF82 文献标志码: A 文章编号: 1005-0299(2018)02-0063-06

## Study on controllable cold ramming paste for aluminum electrolysis cell

JIANG Haixia<sup>1</sup>, YAN Fengyun<sup>1,2</sup>, YANG Fei<sup>1</sup>, MIAO Huan<sup>1</sup>, WANG Qingzhu<sup>3</sup>

(1. Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals (Lanzhou University of Technology), Lanzhou 730050, China; 2. Laboratory of Non-Ferrous Metal Alloys and Processing, Ministry of Education (Lanzhou University of Technology), Lanzhou 730050, China; 3. Guizhou Kanggeli Carbon Material Co., Ltd, Guiyang 550017, China)

**Abstract:** In order to decrease the electrical conductivity and improve the current efficiency of the side wall of the aluminum electrolytic cell cathode, we study the effect of calcination temperature and adding amount of andalusite on the microstructure, electrical conductivity and mechanical properties of cold ramming paste. With andalusite as additive, the cold ramming paste was prepared by electric calcined coal and graphite as aggregate, and the roasting was carried out under pressure of 20 MPa for 5 min. The microstructure of sample after baking were studied by using field emission scanning electron microscope and D8ADVANCE x-ray diffraction. The properties of the sample after baking were studied by using DIL402PC electronic watt shrinkage apparatus, carbon resistance meter at high temperature and NETZSCH bending strength tester. The results showed that adding andalusite could produce mullite needle structure and SiO<sub>2</sub> liquid phase after sintering at high temperature which could fill some pores between aggregates and thus increase the density of the sample and decrease the porosity. The electrical resistivity and expansion rate of baked-samples were significantly increased without adding samples, while they were increased as the andalusite content was increased. The comprehensive properties were best when the addition content of andalusite was 8%. The volume change of baked-samples was minimum and the stability is best. The resistivity was increased and the bending strength was decreased. It is expected that this research can be applied in the monolithic lining process of aluminum electrolytic cell cathode.

**Keywords:** aluminum reduction cell; andalusite; cold ramming paste; monolithic lining; carbon material

收稿日期: 2017-10-20.

网络出版日期: 2017-12-14.

作者简介: 江海霞(1992—),女,硕士研究生;

阎峰云(1962—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 阎峰云, E-mail: yanfy\_2005@139.com.

期刊网址: [http://hit.alljournals.cn/mst\\_cn/ch/index.aspx](http://hit.alljournals.cn/mst_cn/ch/index.aspx)

目前铝电解槽通常采用高温煅烧的炭砖砌炉,炭素糊料主要填充炭块之间、炭块与侧壁间、以及炭块与钢棒之间的缝隙,通过焙烧使铝电解槽阴极

成为一个整体。由于糊料和炭砖收缩率的差异,高温烧结时,粘结处易产生裂纹,铝液、电解质从裂纹处灌入侵蚀,使得裂缝进一步加大,侵蚀更加深入,最终造成铝电解槽的早期破损<sup>[1-2]</sup>。针对上述问题,贵阳铝镁设计院提出了一种基于阴极内衬整体成型的铝电解槽,将铝电解槽侧部糊料和底部糊料分层敷设、捣制,逐层振打成型为一个整体,不需炭砖砌筑,按照一定焙烧制度烘炉后使捣固体获得工艺炭化,最终形成完整的石墨化炉体<sup>[3-4]</sup>。目前国内外对以树脂作为粘结剂的冷捣糊、铝润湿性冷捣糊及石墨含量对冷捣糊性能影响的研究较多,但针对铝电解槽阴极内衬整体成型用冷捣糊的研究还较少。

Kakroudi 等发现红柱石基浇注料在高温下有良好的机械性能和抗热冲击性能<sup>[5]</sup>。Dubreui 等将红柱石基耐火材料应用于有色冶金中,通过与其他铝土矿基材料相比较,发现红柱石作为耐火材料具有更好的抗热震性、在高温下具有良好的抗蠕变性<sup>[6]</sup>。Prigent 等研究发现添加红柱石的氧化铝基耐火材料具有优良的抗钠侵蚀作用<sup>[7]</sup>。大量学者的研究表明,红柱石具有低孔隙度、高温烧结后产生永久性膨胀,此膨胀产生的应力对糊料的烧结具有压力紧实作用,能够弥补其他组分在焙烧过程中产生的收缩效应,从而减少裂纹的产生。尽管国内外学者针对红柱石对耐火浇注料、陶瓷及水泥的性能影响研究已有很多<sup>[8-10]</sup>,但尚未见红柱石添加量对冷捣糊性能影响的研究报道。鉴于上述红柱石的性能特点,本文提出若在铝电解槽内衬整体成型侧壁筑炉时,在不同高度使用添加不同含量红柱石的冷捣糊在炉体内衬捣打成型,内用铝块砌筑在内衬周围,用燃气或焦粉覆盖的方法加热至铝块融化后,加入电解质通电超高温烧结,使电解槽底部至熔盐液面,形成自下而上电阻逐渐增大和抗熔盐腐蚀相——莫来石相逐渐增多的梯度变化,这样既能降低侧部的导电性及上部的熔盐腐蚀,也可增大侧部糊料电阻率及改善其收缩率,从而改善阴极电流分布、降低漏炉风险。

为此,本文将采用红柱石颗粒作为添加剂,针对阴极槽整体筑炉用侧部冷捣糊不导电的要求,设计相关实验配比,考察不同红柱石含量对冷捣糊的性能影响。

## 1 实验

### 1.1 原料及设备

研究发现,石墨在 960 °C 下抗钠侵蚀性最强,其次是电煨煤,石墨化炭块的钠膨胀率为 0.05% ~ 0.15%,无定型炭块的钠膨胀率为 0.6% ~ 1.5%<sup>[11-12]</sup>。

因此,冷捣糊骨料主要选用电煨煤及人造石墨。

主要骨料:电煨煤及人造石墨粉,电煨煤质量分数为 40% ~ 50%,粒径分布为 0 ~ 5 mm。人造石墨粉含碳量为 98%,质量分数为 15% ~ 25%,粒径分布 0 ~ 0.074 mm;粘结剂:改质沥青质量分数 10% ~ 20%;添加剂:红柱石,质量分数 5% ~ 15%,红柱石化学组成如表 1 所示。

实验设备:采用场发射扫描电子显微镜观察表面微观组织和断面形貌;用德国耐驰 Bending Strength Tester 401 抗折弯仪测量试样抗折强度,弯矩为 30 mm;用 AG-10TA 万能试验机测试耐压强度;GDT-II 炭素高温电阻率测试仪测量电阻率;用 DIL4029C 电子膨胀仪测量热膨胀系数;通过测定尺寸法分析体积密度;用 D8-Advance X 射线衍射仪(XRD)检测物相变化。

表 1 红柱石矿粉化学成分(质量分数/%)

Table 1 The chemical composition of andalusite power( wt.%)

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	K <sub>2</sub> O
53.00	44.01	1.02	0.49	0.22	0.14	0.14

### 1.2 试样制备

首先将骨料(电煨无烟煤等)破碎筛分至 10 mm 以下,混捏锅预热至 55 ~ 80 °C,称量一定质量的骨料,倒入 NH-5 型混捏锅中混捏 20 ~ 30 min,其次,向混匀的骨料中加入不同配比的红柱石混捏 30 ~ 45 min,然后,将混捏好的糊料倾倒入,采用机械成型法在 XH-300kN 型压样机上压制成型,机械压力为 20 MPa,保压时间 5 min,试样尺寸为  $\Phi 35$  mm × 35 mm。最后,测量样品的质量和体积,将试样放入刚玉坩埚中用石墨粉覆盖,氩气保护气氛下在管式炉内按照一定焙烧制度进行焙烧。大量研究表明,红柱石开始莫来石化温度为 1 300 °C 左右,因此,本文将试样分别焙烧至 1 300、1 350、1 400 °C 并检测冷捣糊焙烧后的相关性能<sup>[5-7]</sup>。焙烧制度为:室温 ~ 250 °C 用时 2 h; 250 ~ 650 °C 升温速率(15 ± 5) °C/min; 650 ~ 950 °C 升温速率 100 °C/h; 950 ~ 1 300 °C, 950 ~ 1 350 °C, 950 ~ 1 400 °C 升温速率均为 3 °C/min,保温 3 h。焙烧完成后,测量焙烧后试样的体积与质量,并按照相关标准检测焙烧后试样的性能。

## 2 结果与分析

### 2.1 显微形貌及物相分析

对添加红柱石的试样进行 XRD 分析发现(图 1)随着烧结温度的升高,红柱石逐渐减少。在 1 300 °C 时,红柱石已经开始莫来石化,但红柱石的

残留仍有很多; 1 350 °C 时 红柱石进一步莫来石化, 红柱石的残留量较少; 高温烧结到 1 400 °C 时红柱石几乎完全莫来石化, 烧结产物已基本是莫来石相。莫来石含量的提高, 有利于增大侧部糊料电阻率及改善其收缩率, 从而改善阴极电流分布、降低漏炉风险。因此, 主要分析 1 400 °C 下焙烧试样的性能。

观察图 2(a) 发现, 冷捣糊焙烧后的炭化产物为

层带状结构, 各层之间有序地结合在一起, 形成了板状的炭质层, 说明冷捣糊经高温焙烧后石墨化度较高。试样中焦化产物与骨料界面结合性较差, 焦化产物不能有效填充骨料颗粒间的空隙, 使骨料颗粒从基体中容易拔出。这是因为粘结剂的配比较低, 焙烧过程中产生的焦化产物不能有效渗透至骨料颗粒间, 使产品的空度增加, 降低了试样结构的致密程度。

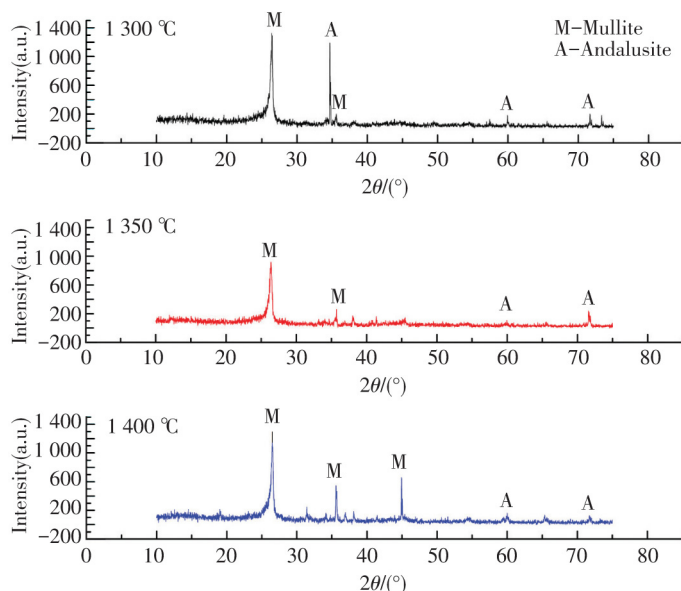


图 1 不同温度下试样 XRD 谱图

Fig.1 XRD patterns of samples at different temperatures

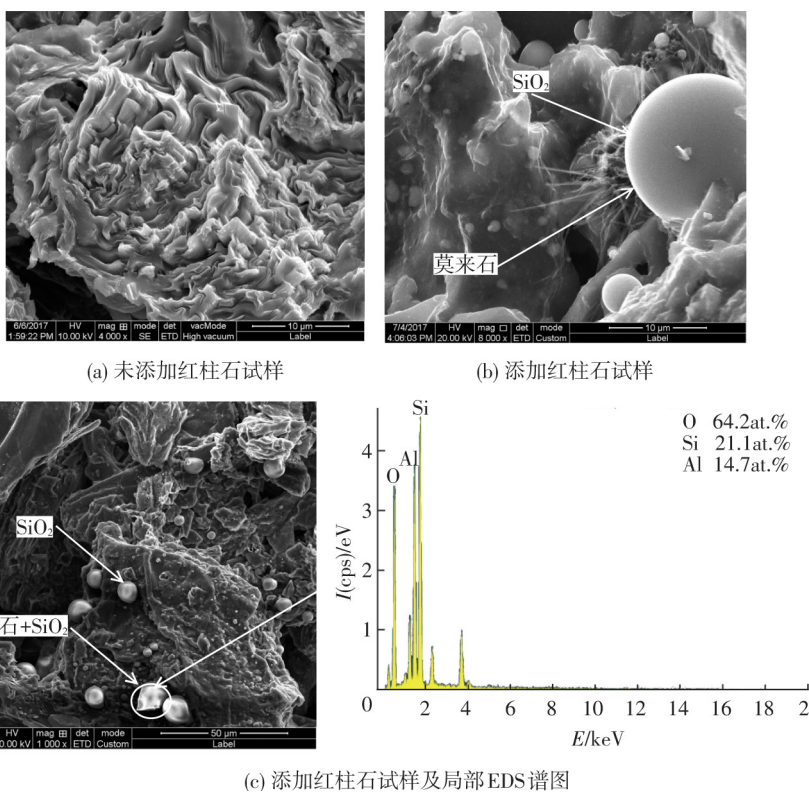


图 2 冷捣糊焙烧体微观形貌及元素分析

Fig.2 Micro-morphology and elemental analysis of cold ramming paste after baking: (a) sample without addition of andalusite; (b) sample with addition of andalusite; (c) sample with addition of andalusite and its local EDS

观察图 2(b) 发现, 添加红柱石的试样在高温烧结后生成莫来石针状结构和 SiO<sub>2</sub> 液相, 填充了骨料间的部分孔隙. 而液相的生成有利于促进烧结的进行, 使试样的致密度提高, 孔隙率下降. 红柱石莫来石化反应主要发生在颗粒的边缘处及空隙间, 生成的莫来石为针状细晶和球状物. 在针状莫来石顶部和周围, 有 SiO<sub>2</sub> 球生成. 图 2(c) 为添加红柱石试样的高倍图像, 观察发现在图中圆形区域有 SiO<sub>2</sub> 球生成, 且球的边缘有尖角状莫来石生成. 对图 2(c) 中的圆形区域 EDS 检测可以看出, 圆球处元素主要为 Al、Si、O 等. 这是因为红柱石在高温烧结下发生莫来石化反应, 生成莫来石 (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) 和石英相 (SiO<sub>2</sub>) [13-16]. 通过计算原子比与莫来石及 SiO<sub>2</sub> 混合物相符合. 反应式为



其中  $\Delta V_1$  为红柱石莫来石化反应时所产生的永久性体积膨胀.

### 2.2 红柱石的添加对冷捣糊收缩率及电阻率的影响

冷捣糊经焙烧后, 其中的莫来石转化过程产生了永久性的体积膨胀, 弥补了其他炭素材料和粘结剂焙烧过程的部分收缩, 使得烧结体致密化程度提高. 但焙烧体并非是完全稳定的状态, 烧结体在 600 K 以下的温度测试结果 (图 3) 证明了其仍具有微收缩特征. 所测数据实质是焙烧体中各组分相互作用的结果. 由图 3 可以看出, 350 ~ 425 K 时收缩率明显, 425 ~ 523 K 时收缩率趋于平缓, 523 ~ 573 K 时收缩率增大, 试样均呈微收缩趋势. 红柱石添加量 8% 的试样膨胀率较未添加试样提高约 0.04%, 添加量 5% 试样膨胀率提高约 0.03%, 添加量 11% 试样膨胀率提高约 0.01%. 红柱石添加量为 8% 时, 烧结体的收缩率变化最小, 稳定性最佳.

本实验参考有色行业标准 (YS/T63.2-2006), 运用双桥法测定试样电阻率, 采用  $\Phi 35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$  圆柱试样, 通过测量两探头间的电压, 调节电流, 得出电阻率. 从图 4 可以看出, 试样电阻率随着温度升高整体呈下降趋势. 其中, 红柱石添加量为 11% 的试样电阻率  $\geq 80 \mu\Omega \cdot \text{m}$ , 红柱石添加量为 5% 的试样电阻率  $\geq 59 \mu\Omega \cdot \text{m}$ , 红柱石添加量为 8% 的试样电阻率  $\geq 69 \mu\Omega \cdot \text{m}$ , 远大于未添加红柱石试样电阻率 ( $\geq 58 \mu\Omega \cdot \text{m}$ ). 这是因为红柱石高温烧结生成莫来石相和 SiO<sub>2</sub> 玻璃相, 在试样内与石墨形成石墨与莫来石交错网络中, 莫来石相与 SiO<sub>2</sub> 玻璃相在导电网络中成为绝缘点, 导电网络遭到破坏, 试样电阻率提高 [17-18]. 因此, 红柱石添加量为 11% 试样的电阻率大于其他含量试样电阻率. 添加量为

5% 的试样由于红柱石含量较低, 转化为莫来石的数量不多, 或转化为莫来石化的晶体发育不完全, 因此, 电阻率升高不明显.

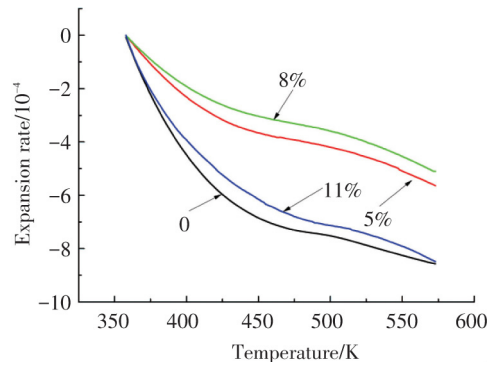


图 3 不同含量红柱石制备冷捣糊焙烧体的膨胀/收缩曲线  
Fig.3 Expansion/shrinkage curves of cold ramming paste after baking with different contents of andalusite

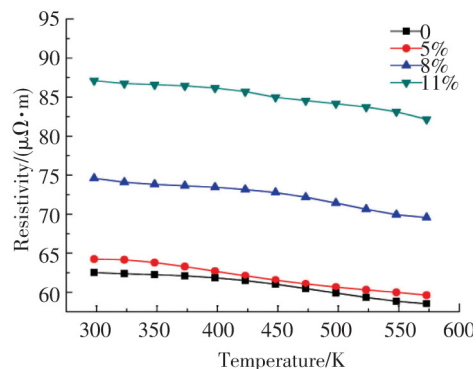


图 4 不同含量红柱石制备冷捣糊的电阻率曲线  
Fig.4 Electrical resistivity curves of cold ramming pastes after baking with different contents of andalusite

### 2.3 抗折强度及断面形貌分析

如图 5 所示随着红柱石的添加, 抗折强度整体呈降低趋势, 但红柱石含量为 8% 的抗折强度要高于 5% 及 11% 试样. 冷捣糊试样经高温烧结后, 未添加红柱石冷捣糊试样抗折强度为 15.34 MPa, 红柱石添加量为 5% 的冷捣糊试样抗折强度为 9.54 MPa, 红柱石添加量为 8% 的冷捣糊试样抗折强度为 9.77 MPa, 红柱石添加量为 11% 的冷捣糊试样抗折强度为 7.13 MPa. 冷捣糊的抗折强度与莫来石化程度、SiO<sub>2</sub> 液相生成量和孔隙率有很大关系. 从图 6(a) 红柱石添加量 5% 的断面形貌可以看出, 红柱石的添加会促进针状莫来石结构的生成, 针状莫来石穿插在试样中, 形成气孔和裂纹等缺陷, 这些缺陷会成为应力集中点, 使材料的抗折强度降低. 从图 6(b) 红柱石添加量 8% 的断面形貌可以看出, 在生成针状莫来石结构的同时, 液相 SiO<sub>2</sub> 的生成量较添加量 5% 的试样多, SiO<sub>2</sub> 液相填充在

莫来石网络结构及骨料间的孔隙,断面中的空隙和裂纹明显降低,试样变得更为致密,样品的抗折强度相对提高。然而, $\text{SiO}_2$ 玻璃相强度通常低于晶体相,因此,试样抗折强度仍低于未添加试样;从图6(c)红柱石添加量11%的断面形貌可以看出,随着红柱石含量的持续增大,生成大量的液相 $\text{SiO}_2$ ,试样中固化液体即 $\text{SiO}_2$ 玻璃相过剩,由于 $\text{SiO}_2$ 玻璃相是一种脆性结构,使得试样的抗折强度下降。有研究表明, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 富液相可以二次莫来石化增强颗粒之间的结合,试样断裂将由沿晶断裂模式变为穿晶断裂,从而提高样品的抗折强度<sup>[19-21]</sup>。因此,后续试验将共同加入红柱石及氧化铝以改善机械性能。

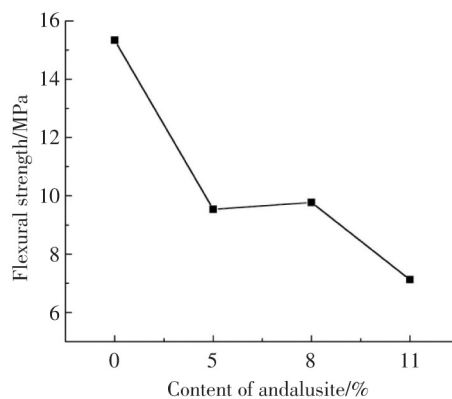


图5 不同含量红柱石制备冷捣糊焙烧体的抗折强度曲线  
Fig.5 Flexural strength curves of cold ramming paste after baking with different content of andalusite

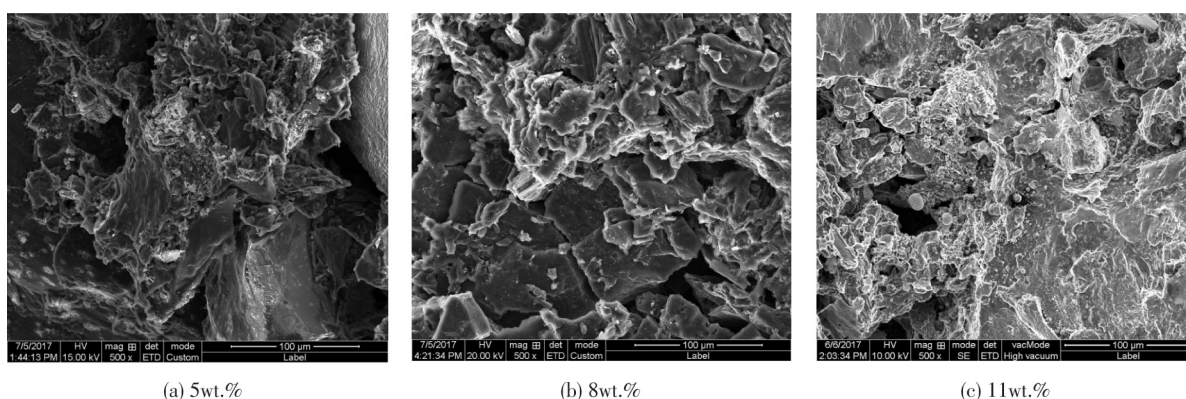


图6 不同含量红柱石制备冷捣糊的断面形貌

Fig.6 Fracture surface morphology of cold ramming paste with different contents of andalusite

### 3 结论

1) 在冷捣糊中添加红柱石可以起到提高材料电阻率和膨胀率的作用,其中红柱石添加量为11%的试样电阻率增大 $22 \mu\Omega \cdot \text{m}$ ,红柱石添加量为8%的试样膨胀率提高0.04%。

2) 红柱石的添加会降低试样的抗折强度,在试样焙烧至 $1400^\circ\text{C}$ 后,红柱石含量8%的试样抗折强度较其他含量试样的抗折强度要高,达到9.77 MPa。

3) 在本文实验条件下,红柱石含量为8%的综合性能最佳,冷捣糊焙烧体膨胀率较未添加试样可提高0.04%,烧结体的体积变化最小,稳定性最佳,电阻率提高至 $71\sim 75 \mu\Omega \cdot \text{m}$ ,有望在铝电解槽阴极整体成型中得到应用。

### 参考文献:

[1] TIAN Lin, ZHOU Yang min, XI Gang, et al. Ecofriendly cold ramming paste for an aluminum electrolysis cell with furan resin as a binder [J].

Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(17): 6018-6024.

DOI: 10.1021/ie202191y

[2] BAZHIN V Y, MAKUSHIN D V, GAGULIN Y N. Contemporary aluminum electrolyzer refractory materials [J]. Refractorie & Industrial Ceramics, 2008, 49(5): 334-335.

DOI: 10.1007/s11148-009-9093-z

[3] 席灿明,曹斌,陈杰.一种铝电解槽阴极结构整体捣固成型方法及其冷捣糊阴极结构[P].中国专利: CN105441978A, 2016-03-30.

XI Canming, CAO Bin, CHEN Jie. A tamping method of aluminum electrolytic cell cathode structure and its cold paste cathode structure [P]. China Patent: CN105441978A, 2016-03-30.

[4] 曹斌,周剑飞,陈杰.基于阴极内衬整体成型的铝电解槽及其整体成型方法[P].中国专利: CN106400053A, 2017-02-15.

CAO Bin, ZHOU Jianfei, CHEN Jie. Aluminum electrolytic cell based on cathode lining and its integral molding method [P]. China Patent: CN106400053A, 2017-02-15.

[5] KAKROUDI M G, GAULT C, HUGER M. Effect of

- thermal treatment on damage mechanical behaviour of refractory castables: Comparison between bauxite and andalusite aggregates [J]. *Journal of the European Ceramic Society* 2008 ( 28 ) : 2471–2478.  
DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.03.048
- [6] DUBREUI P , FILARI E , SOBOLEV VM. Use of andalusite refractories in ferrous metallurgy [J]. *Refractories and Industrial Ceramics* ,1999( 40) : 5–6.  
DOI: 10.1007/BF02762295
- [7] PRIGENT P , BOUCHETOU M L , POIRIER J. Andalusite: An amazing refractory raw material with excellent corrosion resistance to sodium vapours [J]. *Ceramics International* , 2011 , 37( 7) : 2287–2296.  
DOI: 10.1016/j.ceramint.2011.03.024
- [8] PRIGENT P ,BOUCHETOU ML ,POIRIER J. Andalusite: An amazing refractory raw material with excellent corrosion resistance to sodium vapours [J]. *Ceramics International* 2011 37( 7) : 2287–2296.  
DOI: 10.1016/j.ceramint.2011.03.024
- [9] RIBEIRO G C , RESENDE W S ,Rodrigues J A ,et al. Thermal shock resistance of a refractory castable containing andalusite aggregate. *Ceramics International* , 2016 42: 19167–19171.  
DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.09.079
- [10] DUBREUIL P ,SOBOLEV V M. Andalusite: a promising material for manufacturing high-quality refractories [J]. *Refractories & Industrial Ceramics* ,1999 ,40( 3 – 4) : 152–158.  
DOI: 10.1007/BF02762372
- [11] SINGH R , DAS K , MISHRA A K , et al. An approach for estimation of cathode voltage drop in an aluminum reduction cell with an inclined carbon block and a copper insert [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals* , 2017 ,70( 7) : 1795–1804.  
DOI: 10.1007/s12666-016-0978-5
- [12] TIAN Lin , XU Fu shun , XIE Gang. A More ecofriendly cold ramming paste for an aluminum electrolysis cell with phenol-formaldehyde resin as binder [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2013: 52: 1750–1755.  
DOI: 10.1021/ie301992m
- [13] SADIK CK , ALBIZANE A. Effect of carbon graphite on the crystallization of andalusite: application to the synthesis of mullite and the improvement of refractory quality [J]. *Materials Sciences and Applications* ,2013 , 4: 337–346.  
DOI: 10.4236/msa.2013.46044
- [14] ZHOU Yangmin ,TIAN Lin ,XIE Gang , et al. A New ecofriendly cold ramming paste for the aluminum electrolysis cell [J]. *Advanced Materials Research* , 2012 , 399–401( 11) : 1208–1213.  
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.399-401.1208
- [15] GHASSEMI KAKROUDI M. Anisotropic behaviour of andalusite particles used as aggregates on refractory castables [J]. *Journal of the European Ceramic Society* , 2009 29 ( 4) : 571–579 .  
DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.07.043
- [16] LI B , HE M , WANG H. Phase transformation of andalusite-mullite and its roles in the microstructure and sinterability of refractory ceramic [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A* , 2017 , 48( 7) : 3188–3192.  
DOI: 10.1007/s11661-017-4092-z
- [17] 张福勤, 黄启忠, 黄伯云. C/C 复合材料石墨化度与导电性能的关系 [J]. *新型炭材料* 2001( 2) : 45–48.  
ZHANG Fuqin , HUANG Qizhong , HUANG Boyun. Relationship between graphitization degree and conductivity of C/C composites [J]. *New Carbon Materials* 2001( 2) : 45–48.  
DOI: 10.3321/j.issn: 1007-8827.2001.02.010
- [18] 朱骏, 薛济来, 陈通. 孔隙结构对铝用碳阴极材料电阻率的影响 [J]. *有色金属( 冶炼部分)* , 2015( 5) : 29–32.  
ZHU Jun , XUE Jilai , CHEN Tong. Effects of porous structures on electrical resistivity of carbon cathodes for aluminum reduction cells [J]. *Nonferrous Metals ( Extractive Metallurgy)* 2015( 5) : 29–32.  
DOI: 10.3969/j.issn.107-7545.2015.05.008
- [19] XU X , LI J , WU J , et al. Preparation and thermal shock resistance of corundum-mullite composite ceramics from andalusite [J]. *Ceramics International* , 2017 , 43( 2) : 1762–1767.  
DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.10.116
- [20] 孔德玉, 杨辉, 王家邦, 等. 莫来石/刚玉复相陶瓷热断裂特性研究 [J]. *硅酸盐通报* 2004 , 23( 5) : 32–35.  
KONG Dexu , YANG Hui , WANG Jiabang. Thermal fracture of mullite/corundum duplex ceramics [J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society* , 2004 , 23 ( 5) : 32–35.  
DOI: 10.3969/j.issn.1001-1625.2004.05.008
- [21] ESMAEIL A , PRAMOD K , EBAD R. Effects of different barium compounds on the corrosion resistance of andalusite-based low-cement castables in contact with molten Al-alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B* 2011( 42) : 901–913.  
DOI: 10.1007/s11663-011-9619-x

(编辑 吕雪梅)

#### 本文引用格式:

江海霞, 阎峰云, 杨飞, 等. 铝电解槽用可调控性冷捣糊材料研究 [J]. *材料科学与工艺* , 2018 , 26( 2) : 63–68. DOI: 10.11951/j.issn.1005-0299.20170322

JIANG Haixia , YAN Fengyun , YANG Fei , et al. Study on controllable cold ramming paste for aluminum electrolysis cell [J]. *Materials Science and Technology* 2018 26( 2) : 63–68. DOI: 10.11951/j.issn.1005-0299.20170322