

工业固废赤泥在水泥制备中的应用研究进展

郝 勇, 信翔宇, 黄永波, 段广彬

(济南大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250022)

摘要: 综述赤泥的化学和矿物组成, 利用赤泥制备矿渣水泥、硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥等的研究。指出以赤泥为原料制备水泥, 因铝矿来源不同而导致赤泥化学组分不稳定, 增加赤泥配制水泥生料的难度; 赤泥中氧化铁及碱金属含量较高, 易导致配制的水泥生料熔融, 增加回转窑结圈甚至堵塞风险; 生料中碱金属含量过高会导致预热器结皮, 易导致水泥硬化体泛碱, 降低赤泥在水泥制备时的利用率。认为利用赤泥制备水泥, 是处理赤泥的一条有效途径, 符合可持续发展政策, 具有良好的经济效益、环境效益和社会效益; 赤泥制备水泥仍须不断进行科研创新, 开发新赤泥利用途径, 实现赤泥的高效资源化利用。

关键词: 赤泥; 矿渣水泥; 硅酸盐水泥; 硫铝酸盐水泥

中图分类号: TU52

文献标志码: A

Application of industrial solid waste red mud in cement preparation: a review

HAO Yong, XIN Xiangyu, HUANG Yongbo, DUAN Guangbin

(School of Materials Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: Chemical and mineral compositions of red mud, as well as preparation of slag cement, Portland cements and sulfoaluminate cement were reviewed. It is pointed out that when red mud is used to prepare cement, different sources of aluminum ore can lead to unstable chemical compositions of red mud and increase the difficulty of raw cement preparation. The content of ferric oxide and alkali metals in red mud is high, which easily leads to melting of raw cement, and increases the risk of ring formation and even blockage of rotary kiln. High content of alkali metal in raw materials will lead to preheater crust, easily lead to cement hardening body pan alkali, and reduce the utilization rate of red mud in cement preparation. It is considered that using red mud to prepare cement is an effective way to deal with red mud, which is in line with the policy of sustainable development and has good economic, environmental, and social benefits. In order to realize efficient utilization of red mud, it is necessary to carry out scientific research and innovation in the preparation of cement from red mud.

Keywords: red mud; slag cement; Portland cement; sulfoaluminate cement

绿色、节能、环保是当今世界发展的主题, 在经济和科技发展的同时, 更要注重环保和持续发展^[1]。中国是世界上最大的氧化铝生产国, 2015 年我国氧化铝年产能已达 6 800 万 t, 占全球总产能的 50.2%^[2]。赤泥是铝土矿提炼氧化铝过程中排出的工业固体废弃物, 大多数生产厂家每生产 1 t 氧化铝会排放 1~2 t 赤泥, 我国赤泥年排放量已接近 1 亿 t^[3-4]。赤泥中含有大量碱金属, 并且部分以游离碱的形式存在, 导致赤泥呈强碱性, 阻碍了其资源化利用。赤泥的堆存需要占用大量土地, 而且随着赤泥中污染物的迁移, 容易造成地下水污染和土壤盐碱化, 因此, 赤泥处理与资源化利用刻不容缓^[5-6]。

收稿日期: 2021-10-02, **修回日期:** 2021-10-20。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 52002144; 山东省自然科学基金项目, 编号: ZR2020QE046。

第一作者简介: 郝勇(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为建筑材料。E-mail: 1907997707@qq.com。

通信作者简介: 黄永波(1987—), 男, 博士, 研究方向为建筑材料。E-mail: mse_huangyb@ujn.edu.cn;

段广彬(1983—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为流体机械与工程。E-mail: mse_duangb@ujn.edu.cn。

赤泥作为我国年排放量巨大的固体废弃物,目前为止,其利用主要有 5 个方面:金属回收、建筑材料、废气处理、水处理、土壤修复^[7-8]。由于建筑材料需求量大,可大量消耗赤泥,且处理成本低,处理彻底,无二次固废产生,对环境影响较小,因此,建筑材料资源化利用被认为是赤泥实现有效资源化利用的唯一途径^[9],而利用赤泥制备水泥又是在建筑材料领域中利用的重要方向。

矿渣水泥相较于其他水泥碳排放量低,更符合绿色生产的要求;硅酸盐水泥是目前世界上应用领域最广、使用最普遍的水泥;硫铝酸盐水泥作为特种水泥的代表,具有煅烧温度低、碳排放量低、早期强度高、耐氯离子和硫酸盐腐蚀性好等优点,常用于抢修工程、海工工程^[10]。本文中主要综述赤泥在矿渣水泥、硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥制备中的利用,分析利用赤泥作为原料生产这 3 种水泥的优势和不足。

1 赤泥的组成

赤泥的主要组分为 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ,同时又含有一定量的可溶性碱,表现出强碱性^[11]。根据铝土矿提炼氧化铝工艺的不同,赤泥可以分为拜耳法赤泥、烧结法赤泥以及拜耳-烧结联合法赤泥,由于不同厂家矿石品位、生产方法、技术水平各不相同,因此排出赤泥的组分也有较大差异^[12]。另外,随着堆积时间的推移,赤泥中的可溶性碱在雨水冲刷的作用下流失,pH 也会逐渐减小。赤泥主要化学组分的质量分数见表 1。

表 1 赤泥主要化学组分的质量分数

Tab. 1 Mass fractions of main chemical constituents in red mud						%
赤泥类型	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O
拜耳法赤泥	3.0~20.0	2.0~8.0	10.0~20.0	30.0~60.0	2.0~10.0	
烧结法赤泥	20.0~23.0	46.0~49.0	5.0~7.0	7.0~10.0	2.0~2.5	0.2~0.4
联合法赤泥	20.0~20.5	43.0~48.0	4.4~7.5	6.1~7.5	2.8~3.0	0.5~5.7

赤泥中除了含有未反应完全的铝矿(一水硬铝石、三水铝石、铝硅酸盐)外,还含有部分方解石、石英、赤铁矿、针铁矿。需要注意的是,赤泥的矿物组成也会因铝矿产地及提铝方法的不同而发生改变^[13]。对于烧结法赤泥而言,在高温作用下,其中的 CaO 和 SiO_2 会反应形成 β 型硅酸二钙。

2 赤泥制备矿渣水泥

烧结法赤泥本身就属于具有潜在水化活性的固废,这是其可以配合其他原料进行矿渣水泥生产的重要原因。矿渣水泥是将铝硅酸盐材料、石膏、激发剂以一定的比例混合而成的一种无熟料水硬性胶凝材料,无需高温煅烧,被认为是一种低碳、低能耗胶凝材料^[14]。矿渣水泥所用激发剂通常为碱性激发剂。赤泥碱矿渣水泥是将赤泥引入碱矿渣水泥中,部分取代矿渣,形成的一种新型水泥体系——赤泥碱矿渣水泥体系,其性能可以相互促进、相互补充,我国对于碱矿渣水泥的研究始于 20 世纪 80 年代^[15]。赤泥碱矿渣水泥主要有以下特点:1)赤泥中的碱可作为体系中的碱激发剂;2)赤泥本身有一定的水硬性矿物,有利于水泥体系的强度;3)矿渣水泥中引入赤泥可以一定程度上解决碱矿渣水泥强度倒缩问题^[16]。

Garanayak^[17]通过对比普通硅酸盐水泥与不同矿渣和赤泥比例生产的矿渣水泥的水化和性能,发现矿渣和赤泥质量比为 1:1 时,生产的矿渣水泥具有不低于硅酸盐水泥的水化强度,且对碱性条件有更好的适应性。结合其较低的碳排放量,指出矿渣水泥更符合绿色可持续发展的时代要求,未来有望部分取代硅酸盐水泥。

潘志华等^[18]利用质量分数分别为 30%、70%的赤泥、矿渣,配合碱性激发剂成功制得一种具有良好性能的碱激发矿渣水泥。制得的这种水泥砂浆 1 d 抗压和抗折强度分别达到 20、3.3 MPa,28 d 抗压和抗折强度则分别为 56.0、8.4 MPa。与普通硅酸盐水泥相比,该矿渣水泥早期强度升高,凝结时间缩短,且后期强度持续增长,力学强度优于强度等级为 52.5 的硅酸盐水泥。除此之外,后期的试验表明

该水泥还具有体积稳定性好、抗冻性好等优点。岳云龙等^[19]研究了赤泥对碱矿渣水泥力学强度的影响,发现赤泥对碱矿渣水泥的强度有一定的影响,但是掺入量较少时,造成的影响几乎可以忽略不计。随后利用赤泥碱矿渣水泥制备了性能良好的免烧砖和轻质隔墙板,开辟了大量利用赤泥的有效途径,但是也存在一些不足:该方法制备的免烧砖容重相对较高,不利于在高层建筑中的应用。

冯向鹏等^[20]研究表明,拜耳法赤泥本身没有水化活性,但是经过 600 °C 煅烧后,会形成 C_2S (C 为 CaO , S 为 SiO_2)、 C_3A (A 为 Al_2O_3) 以及无定形铝硅酸盐物质,这些矿物的存在使赤泥具有一定的水化活性,可直接用于胶凝材料的制备。再利用质量分数为 50% 的煅烧拜耳法赤泥辅以矿渣、煤矸石、矿渣以及自配的激发剂,制得符合国家强度等级为 42.5 的胶凝材料。

3 赤泥制备硅酸盐水泥

从元素组成上看,赤泥中富含 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 , 这与制备硅酸盐水泥熟料所需氧化物相同,可部分取代硅酸盐水泥熟料的原料。Tsakiridis 等^[21]在制备硅酸盐水泥时加入质量分数为 1% 的拜耳法赤泥,发现制得水泥的矿物组成没有发生变化,对水泥的水化及强度发展也没有影响,证明了使用拜耳法赤泥制备硅酸盐水泥的可行性。对烧结法赤泥而言,其主要矿物组成中包含硅酸二钙,而硅酸二钙和硅酸三钙是硅酸盐水泥的主要矿物组成^[22]。烧结法赤泥作为原料时,其含有的硅酸二钙可作为硅酸盐水泥熟料矿物的晶种,促进硅酸二钙的形成。此外,赤泥中含有的碱金属可作为硅酸三钙的矿化剂,有助于而降低水泥熟料烧成温度,有效降低能源的消耗,从而降低水泥的生产成本^[23]。

在硅酸盐水泥的制备中,赤泥的用量普遍较低,原因是赤泥中含有的可溶性碱会对硅酸盐水泥熟料的烧成带来负面影响:1) 赤泥中含有大量的碱金属,在预热器中易形成氯化碱 (RCl) 和硫酸碱 (R_2SO_4) 等化合物^[24], 这些化合物在高温下气化,并混合烟气在预热器中随温度的逐渐降低而黏附在预热器底部形成结皮,严重的还会造成堵塞。虽然旁路放风可在一定程度上降低烟气中碱金属化合物的含量,但是赤泥中碱含量过高,难以从根本上解决问题。此外,回转窑烟气中碱金属化合物对耐火材料有一定的侵蚀性,若含量过高,则会大大缩短耐火材料使用寿命。2) 大量的碱会固溶进硅酸盐水泥熟料矿物中,水泥硬化后,在干湿和高低温循环的条件下,易出现泛碱的现象,严重时还会导致碱-集料反应^[25], 导致构筑物局部膨胀、变形,产生安全隐患。由此可知,降低赤泥中碱的影响是一个十分关键的问题。

降低赤泥中碱的含量主要有 2 种方法。一是在利用赤泥制备硅酸盐水泥时,对赤泥进行脱碱处理。吴峰等^[26]通过在水泥生料中掺加不同量的碳化脱碱赤泥,在 1 400 °C 下制得煅烧温度较低的硅酸盐水泥熟料。结果表明,赤泥的掺入质量分数控制在 15% 以下时,水泥熟料中的 Fe_2O_3 的含量适宜,且其中的碱对液相量和液相黏度影响较小,可忽略不计。虽然该水泥熟料的石灰饱和比系数 KH 略高于普通硅酸盐水泥熟料的,硅率 SM 则略低,但是水泥熟料的矿物组成变化不大^[27]。制备的水泥抗折强度与抗压强度均能达到使用要求,28 d 强度达到国家强度等级为 52.5 水泥标准。二是通过加入其他原料来降低赤泥的碱含量。何明达等^[28]将赤泥和铜渣按质量比为 1 : 1 混合,通过配料计算加入其他原料,并适当降低硅率,成功制得符合国家标准硅酸盐水泥。这种水泥 28 d 强度达到 63.1 MPa,赤泥质量分数接近 20%,各项经济指标也较好,大幅降低了水泥的生产成本,用实践证明了赤泥制备硅酸盐水泥工业生产的可行性。

赤泥除用作烧制硅酸盐水泥熟料的原料外,还可以作为硅酸盐水泥中的混合材料使用^[29]。任根宽^[30]通过将酸性的磷石膏与碱性赤泥按质量比为 10 : 1 的进行混合,并在 800 °C 下煅烧,制得一种改性赤泥,将烧结法赤泥中低活性的 $\gamma-C_2S$ 转化为活性相对较高的 $\beta-C_2S$ ^[31]。再利用质量分数为 45% 的改性赤泥作为混合材、5% 的磷石膏作为缓凝剂,加入到质量分数为 50% 的硅酸盐水泥熟料中,制得符合国家强度等级为 52.5 的硅酸盐水泥,且相较于普通硅酸盐水泥,该水泥具有早期强度高、稳定性好等优点。

4 赤泥制备硫铝酸盐水泥

在制备硫铝酸盐水泥时,加入适量的赤泥有利于降低水泥熟料的烧成温度^[32],原因是赤泥中含有

的 Na_2O 可作为 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ (S 为 SO_3) 和 C_2S 的矿化剂,促进 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 和 C_2S 的低温形成。另外, $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 对赤泥中的碱性元素有一定的固溶作用,可在一定程度上减小赤泥中的碱对水泥的负面影响,但是若加入过多的赤泥,也会劣化硫铝酸盐水泥力学性能,主要原因是生料中的碱含量随赤泥的增加而增加,导致大量的碱与 SO_3 反应生成 Na_2SO_4 ,消耗大量 SO_3 ,使得形成 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 所需的 SO_3 不足,最终降低水泥熟料中 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 形成量^[33]。

赵艳荣等^[34-35]利用赤泥与粉煤灰在 $1\,290\text{ }^\circ\text{C}$ 下制得贝利特硫铝酸盐水泥,结果发现,当掺入质量分数为 4% 的赤泥时,水泥 28 d 抗压强度可达到 48.9 MPa,符合国家强度等级为 42.5 的硫铝酸盐水泥标准,但是当赤泥的质量分数超过 8% 时,水泥的抗压和抗折强度下降严重。夏瑞杰等^[36]利用铝、硅含量较高的赤泥和脱硫石膏在 $1\,280\text{ }^\circ\text{C}$ 下成功制得高贝利特硫铝酸盐水泥,掺入赤泥的质量分数为 20% 左右。当通过改变硫铝酸盐水泥熟料的矿物组成,将 C_2S 摩尔分数调整为 45%~50%, $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 的摩尔分数调整为 25%~30% 时,该种水泥不仅具有良好的早期强度,而且保证了后期强度的发展,其 28 d 强度可以达到 48.2 MPa。赵宏伟等^[37]利用赤泥为主要原料,在 $1\,300\text{ }^\circ\text{C}$ 下成功制得 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 摩尔分数为 56% 的硫铝酸盐水泥熟料。赤泥的质量分数为 34%,且制得的硫铝酸盐水泥早期强度较高,强度发展稳定,水化浆体密实。该水泥 1 d 抗压强度与抗折强度分别达到 33、6.5 MPa, 28 d 抗压强度和抗折强度达到 65、10.5 MPa,力学强度优于市面上销售的强度等级为 42.5 的快硬硫铝酸盐水泥的。

赤泥中的 Fe_2O_3 质量分数一般高于 20%,而普通的硫铝酸盐水泥对 Fe_2O_3 需求量较低^[38-39],导致赤泥的消耗量也较低,但对于高铁型硫铝酸盐水泥来说,铁铝酸钙矿物质量分数大幅提高, Fe_2O_3 的需求量增加,从而提高了赤泥的消耗量^[40]。戴剑等^[41]利用赤泥在 $1\,310\text{ }^\circ\text{C}$ 下制得高铁型硫铝酸盐水泥, C_4AF (F 为 Fe_2O_3)、 C_2S 、 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 的摩尔分数分别为 16%、48%、34%,赤泥质量分数为 10.05%。该水泥 3、28 d 水化强度分别达到 30.9、63.1 MPa,具有良好的早期强度和中后期强度。张培新^[42]利用赤泥为主要原料在 $1\,325\text{ }^\circ\text{C}$ 下制得高铁型的硫铝酸盐水泥,其赤泥质量分数为 20%,矿物组成中 C_4AF 摩尔分数为 32% (即 Fe_2O_3 的质量分数为 11%)^[43-44], $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 的摩尔分数为 43%。该水泥中 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 的质量分数较高,水泥砂浆 3 d 抗压强度能达到 44.9 MPa,远高于普通硫铝酸盐水泥的。此外,高铁型硫铝酸盐水泥还具有体积稳定性好、耐冲刷粉磨等优点,以及良好的抗硫酸盐与氯离子侵蚀性能,可作为特种水泥用于道路工程、修补工程和海工工程^[45-47],但是高铁型硫铝酸盐水泥熟料中铁铝酸钙矿物含量较高,加之 Na_2O 可降低铁铝酸钙液相高温下的黏度,因此水泥熟料煅烧过程中极易出现水泥窑结圈的问题。

对于铁含量较高的赤泥,可先回收赤泥中的铁,再利用尾渣制备硫铝酸盐水泥熟料。陈鑫等^[48]以焦炭为还原剂,将 Fe_2O_3 质量分数为 46% 的高铁赤泥在 $1\,600\text{ }^\circ\text{C}$ 下煅烧 30 min 后提铁,残余产物提铁尾渣 Fe_2O_3 的质量分数仅为 1.08%,铁含量显著降低。之后以提铁尾渣为主要原料,通过配料计算辅以其他原料配制水泥生料,在 $1\,350\text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 1 h,成功制得结晶程度良好的硫铝酸盐水泥熟料。该方法提铁尾渣利用率达到 20% 以上,即赤泥利用率达到 36% 以上,达到了大量利用赤泥的目的。研究^[49]结果表明,高温煅烧后提铁尾渣中存在一定量的玻璃相,对水泥熟料矿物的形成具有很好的促进作用。除 C_2S 与 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ 外,水泥熟料中还存在少量 CaTiO_3 ,这对水泥的水化几乎不会产生影响。该方法优点是在回收赤泥中铁的同时,还能利用剩余的除铁尾渣制备硫铝酸盐水泥,实现了赤泥高附加值资源化利用。

水泥工业 CO_2 的排放量与能源消耗量较高,因而利用赤泥制备水泥熟料的环境效益与社会效益也是必须要考虑的一个重要方面^[50]。Ren 等^[51]利用全工业固体废弃物(赤泥、脱硫石膏、铝渣、电石渣)制得一种硫铝酸盐熟料,并与普通原料(铝土矿、天然石膏、石灰石)制得的硫铝酸盐水泥熟料进行了比较,发现工业固体废弃物制备水泥熟料的 CO_2 的排放量仅为常规原料制备的水泥熟料排放量的 57.9%,且能源消耗量降低了 8.3%。与传统原料制备的水泥熟料相比,该种水泥制备方法对环境负担的影响降低了 38.62%。

5 总结与展望

1) 作为赤泥排放大国,我国通过大量的经济投入和科技研究,在水泥行业对赤泥的研究、处理、应用

已卓有成效。利用赤泥制备水泥,是彻底处理赤泥的一条有效途径,符合国家可持续发展的政策,具有良好的经济效益、环境效益和社会效益。

2)赤泥制备水泥依旧存在很多弊端。①铝矿来源不同,其化学成分波动比较大,导致赤泥化学成分不稳定,增加了赤泥配制水泥生料的难度;②赤泥中氧化铁及碱金属含量较高,水泥生料中氧化铁含量过高易导致水泥生料熔融,增加回转窑结圈甚至堵塞的风险;③生料中碱金属含量过高不仅会导致预热器结皮,而且易导致水泥硬化体泛碱,降低赤泥在水泥制备时的利用率。

真正实现赤泥基水泥的工业化生产还有很长的路要走,还需要科研和技术人员的不断创新和突破。与此同时,开发新的赤泥利用途径,譬如制备硫硅酸钙-硫铝酸钙-铁铝酸钙水泥,该水泥制备需要高铁材料,且水泥熟料烧成温度低(低于1 200 ℃),铁铝酸钙在该温度下不熔融,有望实现赤泥的高效资源化利用。

参考文献(References):

- [1]王强,翁雪鹤,潘登,等. 我国铝产业“十二五”总结暨“十三五”展望[J]. 冶金经济与管理, 2016(3): 17—19.
- [2]RUAN W Q, LIAO J G, LI F H, et al. Effects of water purifying material waste and red mud on performance of magnesium phosphate cement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 303: 86—93.
- [3]SNEHA S, AJOY K R, AMITAVA B. Proposal for resources, utilization and processes of red mud in India: a review [J]. International Journal of Mineral Processing, 2013, 118: 43—55.
- [4]ALINE A S O, DEMETRIO A S C, IVO F T, et al. Gold nanoparticles supported on modified red mud for biphasic-oxidation of sulfur compounds: a synergistic effect[J]. Applied Catalysis: B: Environmental, 2015, 162: 475—482.
- [5]ZHANG T A, WANG Y, LU G, et al. Comprehensive utilization of red mud: current research status and a possible way forward for non-hazardous treatment[C]//TMS Annual Meeting & Exhibition. Springer, 2018.
- [6]LIANG G, CHEN W, NGUYEN A V, et al. Red mud carbonation using carbon dioxide: effects of carbonate and calcium ions on goethite surface properties and settling[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 217: 230—238.
- [7]ERCAGT E, APAK R. Furnace smelting and extractive metallurgy of red mud: recovery of TiO_2 , Al_2O_3 and pig iron [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 1997, 70(3): 241—246.
- [8]罗丹,李紫龙,杜秋,等. 赤泥综合利用研究进展[J]. 科技创新与应用, 2020(15): 75—76.
- [9]顾振华,卿山,张玉辉,等. 赤泥特性及资源化应用现状[J]. 应用化工, 2020, 49(8): 2087—2090.
- [10]YANG Z, GAO W J, KUN L, et al. Experimental verification on conversion mechanism of calcium aluminate cement hydrates[J]. China's Refractories, 2019, 28(2): 27—30.
- [11]KHAIRUL M A, ZANGANEH J, MOGHADDERI B. The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 141: 483—498.
- [12]李俊峰,史玉娟,王宁. 浅谈轻金属氧化铝生产工艺的应用与发展[J]. 世界有色金属, 2019(19): 223—224.
- [13]王梅. 赤泥粉煤灰免烧砖的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [14]DENER M, KARATAS M, MEHRZAD M. Sulfate resistance of alkali-activated slag-Portland cement mortar produced with lightweight pumice aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2021, 304: 62—70.
- [15]戴丽莱,陈建南. 碱-矿渣-粉煤灰水泥[J]. 硅酸盐通报, 1988(4): 25—32.
- [16]龚春明. 碱-赤泥-矿渣胶凝材料的研究[D]. 南京: 南京化工大学, 1996.
- [17]GARANAYAK L. Strength effect of alkali activated red mud slag cement in ambient condition[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44(1): 1437—1443.
- [18]潘志华,方永浩,吕忆农,等. 碱矿渣赤泥水泥[J]. 水泥工程, 2000(1): 53—56, 69.
- [19]岳云龙,芦令超,常均,等. 赤泥-碱矿渣水泥及其制品的研究[J]. 硅酸盐通报, 2001, 20(1): 46—49.
- [20]冯向鹏,刘晓明,孙恒虎,等. 赤泥大掺量用于胶凝材料的研究[J]. 矿产综合利用, 2007(4): 35—38.
- [21]TSAKIRIDIS P E, AGATZINI S, OUSTADAKIS P. Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 116(1): 103—110.
- [22]张宇炫. 赤泥在墙体材料行业中的应用分析[J]. 墙体革新与建筑节能, 2010(8): 27—28, 3.
- [23]FUJII A L, DOS R T D, ROMANO R C, et al. Impact of superplasticizer on the hardening of slag Portland cement blended with red mud[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 432—439.

- [24] OGAWA K, ROY D M. C_4A_3S hydration, ettringite formation, and its expansion mechanism: III: effect of CaO , $NaOH$ and $NaCl$: conclusions[J]. Cement and Concrete Research, 1982, 12(2): 247—256.
- [25] KIM T, KANG C. Investigation of the effect of mixing time on the mechanical properties of alkali-activated cement mixed with fly ash and slag[J]. Materials, 2021, 14(9): 2301—2301.
- [26] 吴锋, 李辉, 杨康. 用脱碱赤泥替代生料制备水泥熟料试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(4): 1306—1310.
- [27] 谢礼兰, 邓敏. 率值对含磷硅酸盐水泥熟料矿物组成和微观结构的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 473—479.
- [28] 何明达, 黄鹏, 陆强. 赤泥替代铁矿配料生产水泥熟料的实践[J]. 四川水泥, 2014(7): 33—34.
- [29] WANG S H, JIN H X, DENG Y, et al. Comprehensive utilization status of red mud in China: a critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 289: 1—13.
- [30] 任根宽. 用改性赤泥为原料制备水泥[J]. 化工环保, 2008, 28(6): 526—530.
- [31] 方永浩, 杨南如. 异离子对 β - C_2S 的稳定性及显微结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 1993, 12(6): 7—11.
- [32] 王文龙, 田伟, 段广彬, 等. 完全以工业固废为原料制备硫铝酸盐水泥的研究与应用[J]. 水泥工程, 2015(6): 12—15.
- [33] MOTA B, MATSCHEI T, SCRIVENER K. Impact of $NaOH$ and Na_2SO_4 on the kinetics and microstructural development of white cement hydration[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 108(6): 172—185.
- [34] 赵艳荣, 陈平, 韦怀琚, 等. 利用粉煤灰、拜耳法赤泥制备贝利特硫铝酸盐水泥[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(3): 581—584.
- [35] 赵艳荣, 陈平, 韦怀琚, 等. 以粉煤灰、赤泥低温烧制贝利特硫铝酸盐水泥[J]. 非金属矿, 2015, 38(2): 21—23.
- [36] 夏瑞杰, 朱建平, 刘少雄, 等. 赤泥和脱石膏制备高贝利特硫铝酸盐水泥熟料[J]. 有色金属工程, 2017, 7(6): 58—63, 79.
- [37] 赵宏伟, 李金洪, 刘辉. 赤泥制备硫铝酸盐水泥熟料的物相组成及水化性能[J]. 有色金属, 2006(4): 119—123.
- [38] SAI P S, SUKESH C. Strength properties of concrete by using red mud as a replacement of cement with hydrated lime[J]. International Journal of Civil Engineering and Technology, 2017, 8(3): 38—49.
- [39] WANG W L, WANG X J, ZHU J P, et al. Experimental investigation and modeling of sulfoaluminate cement preparation using desulfurization gypsum and red mud[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(3): 1261—1266.
- [40] 王燕谋. 推广铁铝酸盐水泥破解海洋工程中水泥混凝土腐蚀的世界难题[J]. 中国建材, 2020(10): 16—17.
- [41] 戴剑, 陈平, 刘荣进, 等. 利用赤泥研制铁铝酸盐水泥及掺钡活化研究[J]. 非金属矿, 2018, 41(4): 90—92.
- [42] 张培新. 利用赤泥制备硫铝酸盐快硬水泥的研究[J]. 环境污染与防治, 2000(6): 16—18.
- [43] IDRISSE M, DIOURI A, DAMIDOT D, et al. Characterisation of iron inclusion during the formation of calcium sulfoaluminate phase[J]. Cement Concrete Research, 2010, 40(8): 1314—1319.
- [44] CHEN D, FENG X J, LONG S Z. The influence of ferric oxide on the properties of $3CaO \cdot Al_2O_3$ [J]. Construction and Building Materials, 1993, 215: 157—169.
- [45] SHEN Y, CHEN X, ZHANG W, et al. Influence of ternesite on the properties of calcium sulfoaluminate cements blended with fly ash[J]. Construction and Building Materials, 2018, 193: 221—229.
- [46] HUANG Y B, PEI Y, QIAN J S. Bauxite free iron rich calcium sulfoaluminate cement: preparation, hydration and properties[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118774.
- [47] SINGH M, UPADHAYAY S N, PRASAD P M. Preparation of special cements from red mud[J]. Waste Management, 1996, 16(8): 665—670.
- [48] 陈鑫, 吕国志, 王坤, 等. 高铁赤泥提铁尾渣制备硫铝酸盐水泥[J]. 材料与冶金学报, 2020, 19(4): 234—239.
- [49] LI Y, SUN H H, ZHAO Y H, et al. Research of formation mechanism on cementitious reactivity of water-cooled slag[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007, 7(1): 79—84.
- [50] 付立娟, 杨勇, 卢静华. 水泥工业碳达峰与碳中和前景分析[J]. 中国建材科技, 2021, 30(4): 80—84.
- [51] REN C Z, WANG W L, MAO Y P, et al. Comparative life cycle assessment of sulfoaluminate clinker production derived from industrial solid wastes and conventional raw materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 167: 1314—1324.

(责任编辑:吴敬涛)