

# 粉煤灰基地质聚合物研究进展

王丽萍, 徐靓, 王永旺, 李超\*

神华准能资源综合开发有限公司 研发中心, 内蒙古 鄂尔多斯 010300

中图分类号: X752 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)03-0090-05  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.03.015

**摘要** 粉煤灰制备成地质聚合物, 不仅能够使固体废弃物得到资源化利用, 而且还能够发挥地质聚合物在重金属离子吸附、防火保温、耐腐蚀以及低碳排放等领域的作用, 从而实现资源的高效利用。主要总结了近年来粉煤灰基地质聚合物的研究及应用, 并对当前存在的问题以及今后的发展趋势进行了总结和展望。

**关键词** 粉煤灰; 地质聚合物; 应用

## 1 引言

1978年, 法国的 Joseph Davidovits 教授在研究古代建筑材料时发现, 其胶凝材料中不仅含有硅酸盐水泥所具有的 C-S-H (水合硅酸钙) 组分, 而且还含有大量的沸石相物质, 由此便提出了地质聚合物的概念。地质聚合物是由富含活性硅铝酸盐的原料在碱的激发作用下, 通过缩聚反应而生成的具有三维网络结构的无定形胶凝材料<sup>[1-3]</sup>。它是一种新型的环境友好型材料, 具有优良的力学性能和抗腐蚀性以及较好的孔隙结构和较低的导热系数, 因而可以用于生产新型建筑材料、阻燃保温材料等, 还可以用于重金属、有毒和放射性废料的吸附, 改善环境污染。

研究发现<sup>[4-6]</sup>, 生产同等分量的混凝土, 地质聚合物混凝土的“碳足迹”会比水泥混凝土减少9%, 而如果用地质聚合物完全替代水泥来制备混凝土, 二氧化碳排放量将会减少一半以上。地质聚合物可以由粉煤灰、矿粉等工业生产中的固体废弃物作为原料, 同时制备地质聚合物所产生的能耗, 只可生产1/20的陶瓷、1/70的钢材、1/150的塑料制品, 因此它不仅可以实现固体废弃物的资源利用, 变“废”为宝, 还能够节约能源、资源以及减少碳排放量, 改善人类生存居住的环境, 对于我国的能源消耗现状以及绿色生态具有深远的意义。

我国是世界上最大的煤炭产出国和消费国, 煤炭资源储量丰富, 具有可获取性强、经济性好、保障程度高等特点, 可以满足74%的电力以及煤制油烯烃、甲

醇等现代煤化工产业发展需要。《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》中指出, 到2020年, 煤炭消费控制在国内一次能源消费总量的62%以内, 仍将是我国的主体能源。因此, 燃煤电厂仍将长期运行。粉煤灰是燃煤电厂排除的固体废弃物, 预计2020年总堆存量将达到30亿t, 并且还在以0.8亿t/年~1亿t/年的速度增加<sup>[7,8]</sup>。粉煤灰的堆积不仅会污染周边环境, 而且还会占用大量土地资源, 加强粉煤灰的资源化利用, 提高其经济价值, 减少环境污染, 具有十分重要的现实意义。

粉煤灰富含氧化铝和二氧化硅, 因而可以直接用来制备地质聚合物, 且粉煤灰基地质聚合物具有良好的物理、化学性质。依据粉煤灰化学组成的差异, 可以分为C型和F型粉煤灰。一般将粉煤灰中CaO含量低于10%的称为F型; 高于10%的称为C型。C型粉煤灰因含钙量高, 在合成过程中更有利于C-S-H相的生成。当F型粉煤灰含钙量低于5%时, C-S-H相的生成量不大。C型粉煤灰基地质聚合物具有较高的抗压强度, 但是耐化学腐蚀性差, 不如F型粉煤灰基地质聚合物稳定。本文总结了近几年粉煤灰在地质聚合物制备过程中的研究进展, 为后续多领域、多角度的开展研究工作提供一定的借鉴。

## 2 地质聚合物的制备

地质聚合物在制备过程中, 通常是利用碱(如NaOH、KOH、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、 $\text{K}_2\text{SiO}_3$ 等)在常温或者略高的温度下(一般 $<100\text{ }^\circ\text{C}$ )对原料进行激发活化, 然后在一

收稿日期: 2020-03-14

基金项目: 国家科学技术部“十二五”科技计划项目(2011BAA04B05)

作者简介: 王丽萍(1984-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事粉煤灰综合利用。Email: chwlp2008@163.com。

通信作者: 李超(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事粉煤灰综合利用。Email: lichao\_1122@163.com。

定条件下发生再聚合生成无机聚合物。

地质聚合物作为一类新型无机高聚合胶凝材料,它的经验表达式为  $M_n(-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2)_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$ ,式中:“M”为碱金属元素,如  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  等;“z”为硅铝比( $\text{Si}/\text{Al}$ ),其取值可以为 1、2、3……,“n”为缩聚反应的缩聚度;“w”为一个聚硅铝酸盐分子中所含结合水的数目( $0 \leq w \leq 4$ )。地质聚合物的聚合反应是从单体到二聚体,再从二聚体到更高聚体的三维大分子结构的缩聚过程,最终可以形成单体正硅铝酸盐、二聚体二硅铝酸盐等,低聚硅铝酸盐—硅氧体和低聚硅铝酸盐—二硅氧体。它的基本结构单元为硅氧四面体和铝氧四面体,产物中以离子键和共价键连结为主、范德瓦尔斯键和氢键连结为辅。

地质聚合物反应机理十分复杂,尤其是对不同体系及组成相对复杂的体系更是如此。国内外对地质聚合物的聚合机理研究较多<sup>[9-13]</sup>,虽然没有形成统一的意见,但结论都大致相同,普遍认为地质聚合物的形成是在激发剂的作用下,使硅铝酸盐结构中的( $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-$ )键断裂,重新聚合形成新的三维网状结构的凝胶体过程<sup>[14,15]</sup>。

由于粉煤灰成分的差异以及成灰时的降温速度和条件的不同,使得其制备的地聚物性能有一定的波动性<sup>[16-18]</sup>。除此之外,碱、硅铝组分、钙组分和水等都是影响地质聚合物性能的因素,而具体哪种因素起决定作用以及各因素之间的相互影响等,尚不清楚。

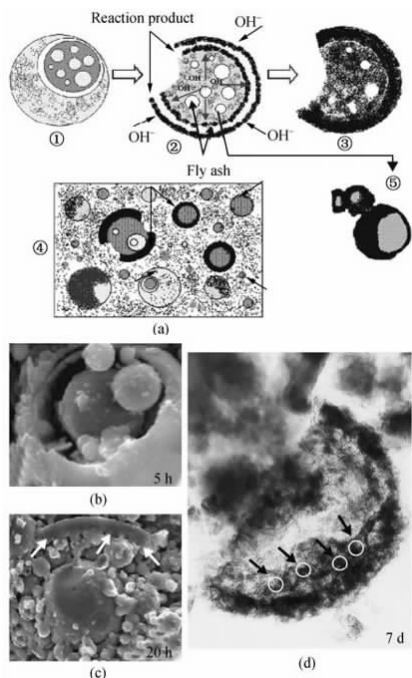


图 1 粉煤灰在碱激发作用下的描述性机理模型<sup>[19]</sup>  
Fig. 1 Descriptive model of the alkali activation of fly ash<sup>[19]</sup>

红外光谱、核磁共振等手段在微观层面对粉煤灰基地质聚合物的机理进行研究。Fernández<sup>[19]</sup>等通过研究粉煤灰基地聚合物在合成过程中各个阶段微观结构的变化,提出了描述性反应机理模型,如图 1 所示。图 1a 将反应过程划分成以下几个阶段:(1)粉煤灰中的硅铝相在碱液的作用下开始溶解(见图 1b);(2)碱液扩散进入粉煤灰玻璃体内部继续溶解(见图 1c);(3)在玻璃体的内部和外部生成硅铝胶体,阻碍反应继续进行;(4)硅铝胶体和玻璃体结合的情况;(5)大玻璃体内部小玻璃体被硅铝胶体所包裹的情况(见图 1d)。在整个反应过程中,最初是溶解作用占主导;而当碱液渗入到玻璃体内部时,则是由扩散作用控制反应的进行。

Criado 等<sup>[20-21]</sup>根据养护条件与反应产物结构的关系,提出了粉煤灰基地聚合物纳米结构,如图 3。在湿度 >90% 的条件下,硅铝单体形成高聚合度的富铝胶体 Gel 1;在 60 d 之后,富铝胶体中的硅元素含量升高,转变为 Gel 2。在湿度为 40%~50% 的条件下,由于碳化、失水及溶液的 pH 值降低等因素的影响,粉煤灰中玻璃体的溶解速度较缓慢,所形成的富铝胶体 Gel 1 聚合度变低,在 60 d 之后,其结构和化学组成变化也不大。

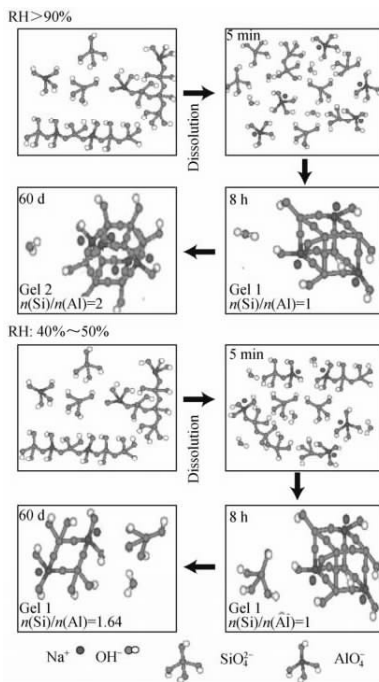


图 2 粉煤灰基地聚合物纳米结构模型<sup>[21]</sup>  
Fig. 2 Nanostructural model of fly ash-based geopolymer<sup>[21]</sup>

### 3 粉煤灰基地质聚合物应用的研究进展

#### 3.1 用于固封重金属离子

地质聚合物对重金属离子的固封方式主要有以下几种:物理固着、化学键合、吸附等<sup>[22]</sup>。Davidovits<sup>[23]</sup>研究发现,地质聚合物对 Mn、Hg 与 Pb 等的固定率可达

目前,人们主要是利用 X 射线衍射仪、扫描电镜、

到90%以上,即使在核辐射条件下,“笼型”网络骨架也相对稳定。Mallowe<sup>[24]</sup>研究认为,地质聚合物结构本身含有一定金属离子,对此可以发挥有效的固化作用。目前大量的试验研究发现,地质聚合物能降低固体工业废弃物或者核废料中的某些重金属离子的溶出<sup>[25,26]</sup>,如 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、氟化物、磷酸盐、 $\text{NO}_x$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、以及 $^{90}\text{Sr}$ 等。因此,地聚物在固封重金属离子的效果比水泥要好,并且成本比水泥更低。

刘泽<sup>[27]</sup>等以循环流化床超细粉煤灰为原材料,NaOH溶液为激发剂,制备地质聚合物固化重金属 $\text{Pb}^{2+}$ 。研究发现,地质聚合物固化体和 $\text{Pb}^{2+}$ 具有良好的相容性, $\text{Pb}^{2+}$ 对于固化体的强度没有特别影响; $\text{Pb}^{2+}$ 可能以离子态或以带负电羟基配合离子固化到地质聚合物的三维网络结构中,主要以物理固化为主,固化率达到90%以上。学者ONUTAI<sup>[28]</sup>认为,地质聚合物固化重金属 $\text{Pb}^{2+}$ 离子效果还会受到初始浓度的影响;当初始浓度超过一定限值时,地质聚合物上的吸附位点和空腔结构不足以吸附和包覆它们,而且活性位点的填充导致材料的表面能降低以及 $\text{Pb}^{2+}$ 离子之间的排斥使得地质聚合物固化能力下降, $\text{Pb}^{2+}$ 浸出率提升明显。

地质聚合物中的微孔尺寸与 $\text{Cu}^{2+}$ 直径比较接近,因而可以利用其固化水中 $\text{Cu}^{2+}$ ,以达到除去水中重金属的目的。Mohammad等<sup>[29]</sup>研究发现粉煤灰基地质聚合物对水中的 $\text{Cu}^{2+}$ 的吸附量可以达到96.8 mg/g。Wang等<sup>[30]</sup>在 $\text{pH} = 6.2$ 时,用粉煤灰基地质聚合物处理水溶液中 $\text{Cu}^{2+}$ ,吸附量达90 mg/g。这些研究主要是地质聚合物制备条件和最佳吸附量的关系,然而针对粉煤灰基地质聚合物的孔隙结构与 $\text{Cu}^{2+}$ 吸附性能的关系研究鲜见报道。王英明<sup>[31]</sup>等研究发现地质聚合物中1.5~6.0 nm的孔含量越高,那么它对溶液中 $\text{Cu}^{2+}$ 的吸附量就越大。

Cr(VI)是一种氧化性强且溶解度高的重金属离子。毛林清<sup>[32]</sup>等将电镀污泥、粉煤灰和碱激发剂(水玻璃和NaOH)按一定比例混合制备粉煤灰基地质聚合物,对含铬电镀污泥进行固化。含18%电镀污泥的地质聚合物中Cr(VI)90 d的浸出浓度低于0.1 mg/L,符合V类水要求,抗压强度仍可达10 MPa以上。粉煤灰基地质聚合物对电镀污泥中Cr(VI)的固化作用主要归结于其硬化过程中形成的水化硅铝酸钠凝胶和三维网络结构对Cr(VI)的固化与包覆。与之相比,部分学者<sup>[33-34]</sup>还通过添加还原剂耦合地质聚合物处理重金属Cr(VI)离子,如 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{S}$ 和零价铁;地质聚合物制备过程中 $\text{Cr}^{6+}$ 被还原成 $\text{Cr}^{3+}$ , $\text{Cr}^{3+}$ 中和带负电荷的 $[\text{AlO}_4]$ 四面体,并随凝胶结构的固化完成铬的解毒和固定,该方法处理Cr(VI)效果更好、应用潜力巨大。

通常来说,重金属离子半径越大越有利于其被固化。因为重金属离子与小硅酸盐低聚物能够形成弱电

子对,促进大硅酸盐低聚物形成;而大硅酸盐低聚物与带负电的 $\text{AlO}_4$ 四面体更易结合,形成稳定的三维网络结构聚合物。

### 3.2 用于制造防火、保温材料

目前,传统的无机墙体保温材料主要由水泥发泡而成,具有保温性能好、耐久性强等优点,但是生产工艺复杂、价格较高;而有机合成保温材料虽然保温性能好,但是因其耐火性差,存在安全隐患,也限制了它的使用。因此,亟需一种安全节能、绿色环保及经济可行的新型墙体保温材料。地质聚合物材料的基体,通过发泡技术形成地质聚合物多孔无机材料,制备成本低,耐高温,导热性低,可以用作保温隔热材料。

王霞<sup>[35]</sup>等采用化学发泡法制备了轻质粉煤灰基地质聚合物发泡材料。随着发泡剂双氧水用量的提高,地质聚合物的总孔隙率增大,孔径变大,导热系数变低,最低至 $0.062 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,是非常好的保温材料。

亢一星<sup>[36]</sup>等在循环流化床粉煤灰中掺入锂渣,利用氢氧化钠和水玻璃为激发剂,加入双氧水制备发泡地质聚合物。试验结果表明,锂渣掺量对发泡地质聚合物的表观密度无显著影响;但锂渣中含有石膏相,其膨胀性会破坏发泡保温材料的结构,造成地质聚合物的抗压强度随着锂渣掺量的增加逐渐降低;并且随着养护时间的延长而提高,锂渣掺量为10%,养护28 d后的抗压强度最高,达0.48 MPa。

景宏君<sup>[37]</sup>等以粉煤灰地质聚合物作为黏结剂,轻质矿物材料为骨料,制备出了地质聚合物隧道防火涂料,通过添加5%的二氧化硅气凝胶,可使该涂料的耐火极限延长约30 min,并且各项性能均达到指标要求。目前,该配方涂料已在国道312陕西咸阳某隧道中得到应用,效果较好。

由此可见,传统的地质聚合物在制备过程中加入发泡剂,就可以使其内部产生均匀的孔隙。通过引入孔隙或者使用轻骨料等手段可以使其质量和密度大大降低,同时其良好的保温性能和耐火性能,在未来的建筑领域将会起到很大的作用。

### 3.3 用于制备耐腐蚀材料

普通硅酸盐水泥混凝土中含有氢氧化钙、硫酸钙以及C-S-H凝胶,在酸性环境下体积膨胀、强度降低,表面容易出现裂缝和空洞,从而加速了建筑物保护层的退化。地质聚合物混凝土由于结构中存在大量的Si-O和Al-O结构,在常温条件下与酸不发生反应,并且与水泥胶凝材料相比,具有生产能耗低、 $\text{CO}_2$ 排放低等特点,因而可以应用在建筑行业来制造耐酸材料。

J. Davidovits等研究发现波特兰水泥和地质聚合物材料分别在 $\text{pH} = 0$ 的硫酸中浸泡60 d后,前者质量

损失 63%, 而后者仅失重 30%。雷耀武<sup>[38]</sup>等将以低钙固硫灰为原料制备出胶凝材料试块, 置于模拟的酸雨溶液中浸泡 180 d, 外观和质量未发生明显变化, 抗压强度比未浸泡试样增加 26.5%, 达到了 57.73 MPa。倪成林<sup>[39]</sup>等研究发现, 将矿粉掺入到粉煤灰地质聚合物中会提升地聚物抗酸侵蚀的性能。酸浸时间越长, 作用越明显。

综上所述, 由于地质聚合物中含钙较少, 产物中基本没有 C-A-S-H 和 C-S-H 凝胶、钙矾石, 因此在酸性环境下不会发生脱钙化后导致腐蚀的现象; 除此之外, 合适的掺加物及其含量会实现提升地质聚合物抗酸侵蚀性能的效果。

### 3.4 用于制备新型低碳环保材料

混凝土作为目前全球使用量最多的建筑材料, 其生产过程不但要消耗大量的资源和能源, 而且用水泥作为胶凝材料, 还会产生大量的温室气体。生产水泥所排放的温室气体量占人类总排放量的 7% 左右<sup>[40]</sup>; 基于地质聚合物种类的不同、制备工艺以及运输距离等因素的影响, 生产地质聚合物混凝土所产生的温室气体排放量要比普通混凝土低 26% ~ 80%<sup>[41,42]</sup>。

蒲云辉等<sup>[43]</sup>用碱激活粉煤灰作为辅助胶凝材料, 替代水泥拌制地质聚合物混凝土, 该种混凝土具有降低温室气体排放量的潜力。研究发现, 粉煤灰地质聚合物混凝土在碱激活剂的制备和后期高温养护产生的温室气体约占总量的 90%; 以生产 1 m<sup>3</sup> 混凝土为例, 粉煤灰地质聚合物排放的温室气体为 273.280 kg, 而普通混凝土的碳排放量却高达 321.502 kg, 煤灰地质聚合物混凝土的温室气体排放量降低率为 15%。

粉煤灰制备地聚物混凝土既低碳环保又节约能源, 可以很好地用在建筑建设上。但是目前的研究主要集中在低钙粉煤灰, 而对于高钙粉煤灰的研究还比较少。这是由于低钙粉煤灰中铝硅质含量相对较高, 更易发生解聚缩聚反应, 而高钙粉煤灰中钙含量的增加使得硅铝含量相对减少, 反应进行较难; 但高钙粉煤灰处理也是亟需解决的问题。

柴淑媛<sup>[44]</sup>等以 CaO 含量 12.64% 的高钙粉煤灰为原料、水玻璃和氢氧化钠为激发剂, 制备地质聚合物材料。研究表明, 粉煤灰中的 CaSO<sub>4</sub> 和 CaO 均参与了反应, 并且粉煤灰地聚物的抗压强度会随着激发剂模数和用量的增加呈现出先增大后减小的趋势。冯泽平<sup>[44]</sup>以 CaO 含量 10.92% 的高钙粉煤灰为原料, 水玻璃为激发剂, 得到了高钙粉煤灰地质聚合物胶凝材料。研究表明: 高钙粉煤灰地质聚合物所有龄期抗压强度均优于 42.5 水泥胶砂的强度, 在 120 d 龄期时能够达到 83.3 MPa 的高强度。

## 4 结语

用粉煤灰制备地质聚合物, 不仅能够使固体废弃

物得到资源化利用, 而且可以降低地质聚合物的生产成本, 具有广阔的应用前景。但是, 由于粉煤灰来源不同, 性质具有不确定性, 从而导致合成的地质聚合物性能也不稳定, 这对研究粉煤灰地质聚合物的反应机理造成了一定的难度。

目前利用粉煤灰制备地质聚合物的研究依旧停留在制备阶段, 并且主要集中在低钙粉煤灰, 而对高钙粉煤灰制备地质聚合物的研究还比较少, 钙组分在地质聚合物中的作用还缺少试验数据支撑, 这就限制了高钙粉煤灰在地质聚合物领域的大规模应用。除此之外, 关于重金属离子的固化研究较多地集中在物理机制上, 而在化学键合方面研究较少。在今后的研究工作中, 仍然需要对粉煤灰制备地质聚合物的机理进行进一步探究, 提升粉煤灰地质聚合物的性能, 使其应用得到更大范围的推广。

### 参考文献:

- [1] DAVIDOVITS J. The ancient egyptian pyramids - concrete or rock [J]. Concrete International, 1987, 9(12): 28-32.
- [2] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric new materials [J]. Journal of Thermal Analysis, 1989, 35(2): 429-441.
- [3] DAVIDOVITS J. Geopolymers; Inorganic polymer new materials [J]. Journal of Thermal Analysis, 1991, 37: 1633-1656.
- [4] LOUISE K. T, FRANK G. C. Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub> - e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 43: 125-130.
- [5] MCLELLAN B C, WILLIAMS R P, LAY J. et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement [J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(9): 1080-1090.
- [6] 王磊. 我国工业固废综合利用的现状 & 进展 [J]. 资源节约与环保, 2017(2): 16-17.
- [7] 张灿强. 不同种类粉煤灰特性的试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [8] Cao D Z, Selic E, Herbell. Utilization of fly ash from coal-fired power plants in China [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2008(9): 681-687.
- [9] HUA XU, VAN DEVENTER J S J. The geopolymerisation of aluminosilicate minerals, mineral process, International Journal of Mineral Processing, 2000(59): 247-226.
- [10] HUA XU, VAN DEVENTER J S J. Effect of alkali metals on the preferential geopolymerization of stillbite/kaolinite mixtures [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001(40): 3749-3756.
- [11] 马鸿文, 杨静, 任玉峰, 等. 矿物聚合物材料: 研究现状与发展前景 [J]. 地学前沿, 2002, 9(4): 398-407.
- [12] 张书政, 龚克成. 地聚物 [J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(3): 430-435.
- [13] KHATE D, CHAUDHARY R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review [J]. Journal of Materials Science 2007, 42: 729-746.
- [14] HUA X, DEVENTER J S J, VAN. The geopolymerisation - silica minerals [J]. International Journal of Mineral Processing, 2000, 114: 497-500.
- [15] Davidovits J. Geopolymer chemistry and properties [C] // Proceedings of the First European Conference on Soft Mineralogy. Paris, 1988: 25-48.
- [16] 王丽萍, 李超. 粉煤灰资源化技术开发与利用研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2019(4): 38-44.
- [17] 孙道胜, 王爱国, 胡普华. 地质聚合物的研究与应用发展前景 [J]. 材料导报, 2009, 23(4): 61-65.
- [18] 倪文, 王恩, 周佳. 地质聚合物 - 21 世纪的绿色胶凝材料 [J]. 新材

- 料产业,2003(6):24-28.
- [19] FERNÁNDEZ - JIMÉNEZ A, PALOMO A, CRIADO M. Microstructure development of alkali - activated fly ash cement: A descriptive model [J]. *Cem Concr Res*, 2005, 35(6): 1204 - 1209.
- [20] CRIADO M, PALOMO A, FERNÁNDEZJIMÉNEZ A. Alkali activation of fly ashes. Part I: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products [J]. *Fuel*, 2005, 84(16): 2048 - 2054.
- [21] CRIADO M, FERNÁNDEZ - JIMÉNEZ A, PALOMO A. Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description [J]. *Fuel*, 2010, 89(11): 3185 - 3192.
- [22] QIAN G, CAO Y, CHUI P, et al. Utilization of MSWI fly ash for stabilization/solidification of industrial waste sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 129: 274 - 281.
- [23] DAVIDOVITS J. Properties of geopolymers [C]//Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research. Kiev, 1994: 131 - 149.
- [24] WILLIAM A M. Fixation of hazardous wastes and related products: US, 5976244 [P]. 1999 - 11 - 01.
- [25] TEMUJIN J, MINJIGMA A A, DAVAABAL B, et al. Utilization of radioactive high - calcium Mongolian fly ash for the preparation of alkali - activated geopolymers for safe use as construction materials [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(10): 16475 - 16483.
- [26] ZHANG J, PROVIS J L, FENG D, et al. Geopolymers for immobilization of  $\text{Cr}^{6+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  and  $\text{Pb}^{2+}$  [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 157(2-3): 587 - 598.
- [27] 刘泽,李丽,张媛,王栋民. 粉煤灰地质聚合物固化重金属  $\text{Pb}^{2+}$  的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(4): 1382 - 1386.
- [28] ONUTAI S, KOBAYASHI T, THAVORNITI P, et al. The adsorption of cadmium ions on fly ash based geopolymer particles [J]. *Key Engineering Materials*, 2018, 766: 65 - 70.
- [29] MOHAMMAD S A I H, KAMEL A I Z, LEEMA A I M, et al. Fly ash based geopolymer for heavy metal removal: A case study on copper removal [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015, 3(3): 1669 - 1677.
- [30] WANG S B, LI L, ZHU Z H. Solid - state conversion of flyash to effective adsorbents for Cu removal from wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 139(2): 254 - 259.
- [31] 王英明,姜亮,董彦博,等. 粉煤灰地质聚合物制备及其对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附性能 [J]. *洁净煤技术*, 2018, 24(5): 120 - 125.
- [32] 毛林清,武双磊,李鹏飞,等. 粉煤灰地质聚合物固化含铬电镀污泥研究 [J]. *新型建筑材料*, 2018(10): 29 - 34.
- [33] MALEKI A, HAJIZADEH Z, SHARIFI V, et al. A green, porous and eco - friendly magnetic geopolymer adsorbent for heavy metals removal from aqueous solutions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 1233 - 1245.
- [34] SUN T, CHEN J Y, LEI X R, et al. Detoxification and immobilization of chromite ore processing residue with metakaolin - based geopolymer [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2014, 2(1): 304 - 309.
- [35] 王霞,卓锦德,季宏伟,等. 分级粉煤灰对地质聚合物发泡材料性能的影响 [J]. *洁净煤技术*, 2018, 24(4): 136 - 140.
- [36] 亢一星,王启宝,秦子敬,等. 锂渣掺量对粉煤灰基发泡地质聚合物性能的影响 [J]. *新型建筑材料*, 2019(8): 115 - 118.
- [37] 景宏君,景宏彬,艾涛,等. 地质聚合物隧道防火涂料配方设计及应用 [J]. *筑路机械与施工机械化*, 2017, 34: 72 - 76.
- [38] 雷耀武,王晋峰,齐彦,等. 模拟酸雨环境下地质聚合物耐久性研究 [J]. *建筑材料·节能*, 2019, 16: 29 - 30.
- [39] 倪成林. 微硅粉和粉煤灰高强混凝土的制备及其酸侵蚀性能研究 [D]. 昆明:昆明理工大学, 2014: 1 - 95.
- [40] HUNTZINGER D N, EATMON T D. A life - cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(7): 668 - 675.
- [41] MCLELLAN B C, WILLIAMS R P, LAY J, et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(9): 1080 - 1090.
- [42] STENGEL T, REGER J, HEINZ D. LCA of geopolymer concrete - what is the environmental benefit [C]//In Proceedings Concrete 09, 24th Biennial Conf Australian Concrete Institute, Concrete Institute of Australia. Sydney, 2009: 54 - 62.
- [43] 蒲云辉,王清远,李文渊,等. 粉煤灰地质聚合物混凝土和普通混凝土温室气体排放量的对比研究 [J]. *混凝土*, 2019(4): 10 - 13.
- [44] 柴淑媛,李艳,张雪芳,等. 高钙粉煤灰地质聚合物制备及强度特性研究 [J]. *墙材革新与建筑节能*, 2019(11): 70 - 72.
- [45] 冯泽平. 高钙粉煤灰地质聚合物的制备及耐久性研究 [J]. *矿产保护与利用*, 2018(2): 107 - 110.

## Research Progress of Fly Ash Based Geopolymers

WANG Liping, XU Liang, WANG Yongwang, LI Chao\*

*Shenhua Zhunneng Resources Comprehensive Development Company Limited, Erdos 010300, China*

**Abstract:** As the synthetic raw material of geopolymers, fly ash can not only make the solid waste be used as resources, but also give full play to the advantages of geopolymers in heavy metal ion adsorption, fire protection and heat preservation, corrosion resistance, low carbon emission and other fields, so as to realize the efficient utilization of resources. The research of fly ash based geopolymers and its application in recent years were summarized in this paper, and the current problems and future development trend were pointed out and prospected.

**Key words:** fly ash; geopolymers; application

引用格式:王丽萍,徐靓,王永旺,李超. 粉煤灰地质聚合物研究进展 [J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(3): 90 - 94.

Wang LP, Xu L, Wang YW and Li C. Research progress of fly ash based geopolymers [J]. *Conservation and utilization of mineral resources*, 2020, 40(3): 90 - 94.