

特约专栏

低碱高强硅铝聚合材料的研究

张文生, 叶家元, 王 渊, 邵中军, 董 刚, 文俊强

(中国建筑材料科学研究总院 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 以煅烧铝土矿选尾矿、矿渣微粉、水玻璃为主要原料, 在 800 °C 下煅烧 1 h 制备得到高强硅铝聚合材料。用 XRD 和 SEM 研究了反应产物的相组成和微观结构, 并着重比较研究了该材料与特种水泥的抗化学侵蚀性能差异。结果表明: 制备得到的胶砂试样, 28 d 抗折、抗压强度分别达到 10.2 MPa, 60.2 MPa; 试样分别经 3% 硫酸钠、3% 硫酸镁溶液浸泡 28 d 后, 其强度没有下降反而略有上升, 在石膏掺量为 7% 的硫酸盐环境中, 其累计膨胀率远远小于中抗硫酸盐硅酸盐水泥的; 分别经 5% 盐酸、5% 硫酸溶液浸泡 28 d 后, 其质量损失及强度损失均小于铝酸盐水泥和快硬硫铝酸盐水泥的。制备得到的硅铝聚合材料具有优异的抗硫酸盐侵蚀性能、一定的耐稀酸侵蚀性能。

关键词: 硅铝聚合材料; 反应产物; 微观结构; 性能

中图分类号: TQ172.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)09-0013-06

Study on Low Alkali Content and High Strength Geopolymer

ZHANG Wensheng, YE Jiayuan, WANG Yuan,
SHAO Zhongjun, DONG Gang, WEN Junqiang

(State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract: The geopolymer is synthesized from ore-dressing tailings of bauxite calcined at 800 °C for an hour, slag and waterglass as alkali-activator under the condition of normal temperature and low alkali content. The reaction product and its microstructure are investigated by XRD and SEM respectively. The comparison of geopolymer mortar's chemical stability with that of special cement is presented as well. The results show that the geopolymer mortar has high strength with 28-day flexural strength of 10.2 MPa and compressive strength of 60.2 MPa. In solution of sodium sulfate of 3% and magnesium sulfate of 3%, the flexural and compressive strength of geopolymer mortar increase both after 28-day immersion. In sulfate environment with 7% gypsum, the cumulative expansion ratio of geopolymer is rather less than that of moderate sulfate resistance Portland cement. The weight loss and strength deterioration of geopolymer mortar is also less than that of aluminat cement and early strength sulphoaluminate cement when exposed to solution of low concentration acid. According to above performance, the geopolymer synthesized from calcined ore-dressing tailings has excellent resistance to sulfate salt and a measure of resistance to low concentration acid.

Key words: geopolymer; reaction product; microstructure; performance

1 前 言

因采用选矿-拜耳法和选矿-烧结法而排出的铝土矿选尾矿, 是我国氧化铝工业继赤泥之后排放的又一宗固体废弃物。然而与赤泥具有一定自硬性、较容易筑坝堆存相比, 铝土矿选尾矿因富含粘土类矿物且颗粒极细使其含水量高、不易沉降、触变性大, 进而使得其前期处理、堆存、管理较赤泥更为困难^[1]。因此, 实现铝土

矿选尾矿的资源化利用已经成为我国氧化铝工业可持续发展所面临的新课题。铝土矿选尾矿富含硅、铝质矿物, 在化学组成上满足制备硅铝聚合材料的原料要求。为此, 本实验以该尾矿、矿渣微粉为主要原料, 进行了硅铝聚合材料制备方法及其反应产物、微观结构的研究。

以煅烧高岭土、粉煤灰、矿渣为主要原料制备的硅铝聚合材料具有优良耐化学侵蚀性能^[2-4]。但铝土矿选尾矿除含有高岭石外还含有较多的“杂质”矿物, 其有可能影响材料的性能。此外, 硅铝聚合材料在凝结行为、耐久性等方面具有与某些特种水泥相媲美的性能, 因此有必要对比研究本实验制备得到的硅铝聚合材料与

收稿日期: 2009-12-10

基金项目: 国家 863 计划资助课题(2008AA06Z338, 2009AA03Z506)

通信作者: 张文生, 男, 1969 年生, 教授, 博士生导师

铝酸盐水泥、快硬硫铝酸盐水泥等特种水泥的耐久性,为该材料的技术经济分析及应用前景分析提供依据。为此,研究了在 5% 稀硫酸、稀盐酸及 3% 硫酸钠、硫酸镁溶液等侵蚀介质中硅铝聚合材料的侵蚀情况及其在硫酸盐环境中的膨胀性能,并着重比较研究了该材料与特种水泥在上述侵蚀环境中的性能差异。

2 实 验

2.1 原材料

铝土矿选尾矿来自中国铝业股份有限公司山东分公司,其矿物组成及化学组成分别见表 1 和表 2。

激发剂为工业级水玻璃,其模数为 2.42、固含量为 45.60%。调整水玻璃模数用的氢氧化钠为工业级片碱。

表 1 铝土矿选尾矿的矿物组成 (w/%)

Table 1 Mineral composition of ore-dressing tailing of bauxite (w/%)

Mineral Composition	Diaspore	Kaolinite	Goethite	Hematite	Anatase	Quartz	Sericite	Σ
Content	28.4	45.6	8.2	2.5	2.7	4.3	7.3	99.0

表 2 铝土矿选尾矿的化学组成 (w/%)

Table 2 Chemical composition of ore-dressing tailing of bauxite (w/%)

Chemical Composition	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	Σ
Content	32.2	8.7	38.1	1.2	0.9	2.3	0.3	1.0	13.7	98.4

2.2 硅铝聚合材料的制备及产物的 XRD 与 SEM 分析

铝土矿选尾矿中的高岭石矿物必须经煅烧活化为无定形偏高岭土才能使其具有反应活性。高岭石活化温度区一般为 600 ~ 900 °C^[5],为此,实验中设定了 600, 700, 800, 900 °C 的 4 个温度点,每个温度点的煅烧时间分别为 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6 h。经强度实验表明,该尾矿最佳煅烧制度为 800 °C 下在马弗炉中静态堆积煅烧 1 h。试样的 XRD 分析所用仪器为德国 Bruker AXS 的 D8 ADVANCE 型多晶 X 射线衍射仪, CuK_α 辐射,管流为 30 mA,管压为 30 kV。SEM 分析采用荷兰 FEI 公司的 Sirion200 扫描电镜,其分辨率为 1.5 nm,加速电压为 0.2 ~ 30 kV。其配套的 EDS 为英国 Oxford 生产的 INCA Energy X 射线能谱仪,其能量分辨率为 128 eV。

图 1 为煅烧前后的尾矿物相变化的 XRD 谱图。由图 1 可知,该尾矿煅烧后其水铝石脱水转变为 α-Al₂O₃ (Corundum),高岭石转变为无定形的高活性的偏高岭石,其他矿物保持不变。

用作激发剂的水玻璃的模数是硅铝聚合材料能否凝结硬化的最重要影响因素^[6-7]。强度实验表明,当水玻璃模数在 1.6 ~ 2.0 之间时,均能使浆体正常凝结,并且其模数为 1.8 时强度最高。因此,适于该煅烧尾矿的最佳水玻璃模数为 1.8,此时水玻璃的碱性不致太强。

为了在常温下得到较高强度的硅铝聚合材料,在

矿渣为首钢的水淬矿渣,其密度为 2.93 g/cm³,碱性系数、质量系数分别为 1.03、1.78。其化学组成为: SiO₂, 33.5%; Al₂O₃, 12.5%; Fe₂O₃, 1.1%; CaO, 37.9%; MgO, 9.3%; SO₃, 2.5%。

用于抗硫酸盐侵蚀及耐酸对比实验用的中抗硫酸盐硅酸盐水泥、铝酸盐水泥(CA-50)、快硬硫铝酸盐水泥(42.5 等级)、耐酸水泥均为市售产品,而矿渣硅酸盐水泥采用 60% 的矿渣与 40% 硅酸盐水泥(含 5% 石膏)配制。用于硫酸盐环境中膨胀性能实验的石膏为天然石膏,其 CaO 含量为 30.4%, SO₃ 含量为 37.3%。

用于配制 3% 硫酸盐溶液的五水硫酸钠、硫酸镁为化学纯;用于配制 5% 稀硫酸及 5% 稀盐酸的浓硫酸、浓盐酸的浓度分别为 98%, 36.5%。

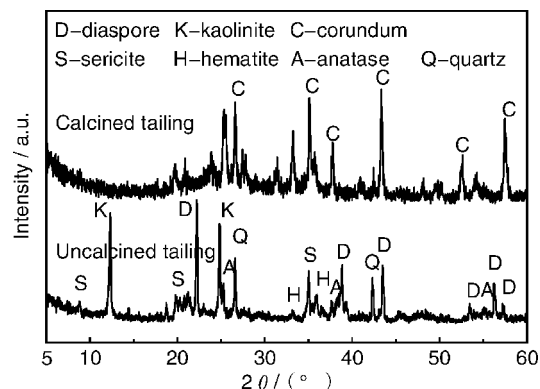


图 1 原状尾矿与煅烧尾矿的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of uncalcined and calcined tailing

尾矿经 800 °C 下煅烧 1 h、水玻璃模数为 1.8 的条件下进行了矿渣协同实验。强度测试结果表明,在一定矿渣用量条件下并非水玻璃掺量越高而强度越高,而是对应着某个最佳水玻璃掺量,如矿渣用量为 35% 时,其对应的最佳水玻璃用量为 20% (以固含量计)。在水灰比为 0.45、胶砂比为 1:2.5 的条件下,以该配方制备得到的硅铝聚合胶砂试样 3 d 抗折、抗压强度分别达到 6.7 MPa, 39.2 MPa, 28 d 抗折、抗压强度分别达到 10.2 MPa, 60.2 MPa。

图 2 为 3 d, 28 d 反应试样的 XRD 图谱。从图看出,反应并没有生成晶体物质,其谱图中的尖锐衍射峰

均为煅烧尾矿引入矿物(如云母、 α -三氧化二铝、赤铁矿、石英等)的对应特征峰。值得注意的是,在3 d

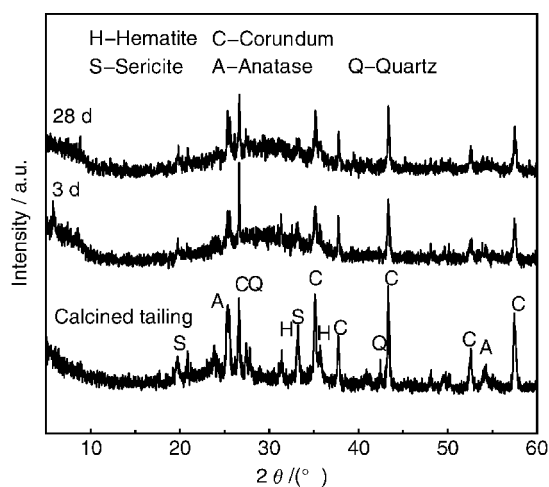


图2 3 d、28 d 反应试样及煅烧尾矿的 XRD 谱图

Fig. 2 XRD patterns of calcined tailing and samples cured for 3 days and 28 days

和28 d 反应产物的 XRD 图谱中,均在 2θ 为 $20 \sim 35^\circ$

范围内出现了一个较宽大的衍射峰包,这说明生成了一种无定形态物质,该物质是以 Si, Al, O 等为主要组分的凝胶。这种物质在反应过程中,逐渐包裹煅烧尾矿带入的晶体矿物,故使得图谱中相应的特征峰钝化。

图3为3 d、28 d 反应试样的 SEM 照片。由图可见,3 d 反应试样的基体中镶嵌着片层状细屑(a),且生成的凝胶包裹着未反应完的原料(b);28 d 反应试样中出现了尺寸更为细小、交错程度更为复杂的片层状细屑(c)及断面光滑的凝胶(d)。3 d、28 d 反应试样显微结构的差异反映了其强度发展过程。随着反应龄期的延长,更细小且相互交错的层状物质在试样破坏时必然要消耗更多的能量,再加上凝胶的不断形成,进而表现为强度的大幅度增长。具体表现为:抗折强度由3 d 的6.7 MPa 增长到28 d 的10.2 MPa,相应地抗压强度由39.2 MPa 增长到60.2 MPa。

对图3中的具有光滑断面的物质进行能谱分析表明,其主要成分为 Ca, Si, Al, Mg, O, 因此该物质为一种铝硅酸盐(能谱图没有列出)。

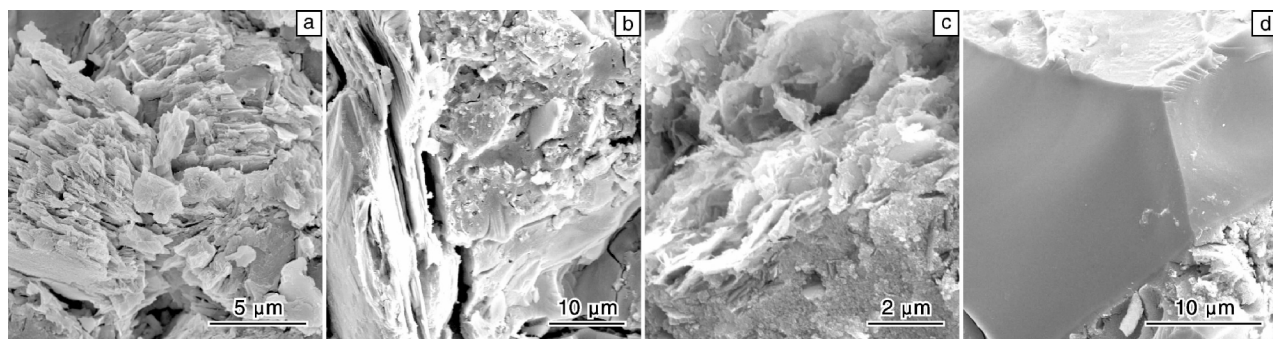


图3 3 d、28 d 反应试样的 SEM 照片

Fig. 3 SEM micrographs of samples cured for 3 d (a, b) and 28 d (c, d)

2.3 抗化学侵蚀实验方法

硅铝聚合材料的胶砂成型、养护、强度测试参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671 - 1999)进行,但水灰比、胶砂比根据实验要求设定。

抗硫酸盐侵蚀实验参考《水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法》(GB/T 749 - 2008)进行。实验时,耐酸水泥胶砂试样的成型参数为粉料:砂:液态水玻璃:氟硅酸钠 = 100:100:52:1.1(质量比),尺寸为 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$,其养护1 d 拆模后置于常温空气中养护30 d 后再进行浸泡实验。其他试样的水灰比为0.45,胶砂比为1:2.5,尺寸为 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ 。每种试样成型3组,标养1 d 拆模后,置于 50°C 的水中养护7 d(铝酸盐水泥胶砂试样置于 20°C 的水中养护)。高温水养完成后,连同铝酸盐水泥、耐酸水泥的胶砂试样分别转移至3%硫酸钠、3%硫酸镁溶液中浸泡28 d,另一组试样置入 20°C 淡水中养护至相同龄期。浸泡完毕后,取出浸泡试块,

观察外观并测其强度。以硫酸盐溶液浸泡后试块的外观完整性及浸泡前后的强度变化来表征各试样的抗硫酸盐侵蚀能力。

在膨胀性能实验中,除石膏掺量固定为7%外,其他所有条件及步骤均参照《水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法》(GB/T 749 - 2008)进行。以各龄期的膨胀值、膨胀率及累计膨胀率来表征其在硫酸盐环境中的体积稳定性。

耐酸实验中试样的成型、养护与抗硫酸盐侵蚀实验的一致。高温养护完毕后,包括常温淡水养护的铝酸盐水泥胶砂试样及空气养护的耐酸水泥胶砂试样在内的所有试样均取出2组试块擦净称量,然后分别转移至5%硫酸、5%盐酸中浸泡28 d。另外1组试块不需称量,直接置于 20°C 淡水中浸泡28 d,以用作强度对比样。浸泡完毕后,取出酸液浸泡试块,观察外观并擦净称量、测试强度。本实验为静止浸泡,在浸泡过程中不调

整溶液的 pH 值。以酸液浸泡前后试块的外观变化、质量变化、强度变化来表征各试样的耐酸性能。

3 结果与讨论

3.1 抗硫酸盐溶液侵蚀

耐酸水泥胶砂试样 (AAC) 经硫酸盐溶液浸泡 28 d 后, 其沿棱角发生了开裂, 并在开裂处生长出大量白色物质。除该试样外, 其他试样经硫酸盐浸泡后外观均无裂纹、无膨胀、无剥离, 但强度表现有差别。

表 3 为硅铝聚合胶砂试样 (G) 的硫酸钠、硫酸镁溶液侵蚀实验结果及与特种水泥的对比结果。由表 3 可知, 中

抗硫酸盐硅酸盐水泥胶砂试样 (MSRC)、矿渣硅酸盐水泥胶砂试样 (BFSC) 经 3% 的硫酸盐溶液浸泡后, 虽然试块的抗折强度增加了, 但抗压强度却有不同程度的降低, 且抗折强度增加百分比越大则抗压强度降低得更多。铝酸盐水泥胶砂试样 (AC) 的强度变化情况与上述两种试样的恰恰相反, 其经 3% 的硫酸盐溶液浸泡后, 虽然试块的抗压强度增加了, 但抗折强度却降低了。在所有水泥胶砂试样中, 只有快硬硫铝酸盐水泥胶砂试样 (ESSAC)、硅铝聚合胶砂试样 (G) 经硫酸盐溶液浸泡后表现为抗折、抗压强度都有所增长, 但后者在各种环境中的强度较前者的都要高, 其抗折、抗压强度分别超过了 10.0 MPa, 60.0 MPa。

表 3 硫酸盐溶液浸泡试样的强度及其变化
Table 3 Strength and its change of samples immersed in sulfate solution

Samples	Strength/MPa	in water	in 3% Na ₂ SO ₄	Strength change/%	in 3% MgSO ₄	Strength change/%
MSRC	Flexural strength	8.6	9.1	5.8	9.9	15.1
	Compressive strength	49.3	48.4	-1.8	47.4	-3.9
BFSC	Flexural strength	9.0	9.0	0.0	10.1	12.2
	Compressive strength	55.8	53.4	-4.3	52.9	-5.2
AC	Flexural strength	6.8	6.3	-7.4	6.5	-4.4
	Compressive strength	55.2	56.6	2.5	57.3	3.8
ESSAC	Flexural strength	6.9	7.4	7.2	8.8	27.5
	Compressive strength	42.6	44.7	4.9	43.8	2.8
G	Flexural strength	10.0	10.1	1.0	10.1	1.0
	Compressive strength	60.0	61.1	1.8	61.2	2.0

Notation: cracking strength of Anti-Acid Cement mortar (AAC) didn't measured.

另外, 比较硫酸钠与硫酸镁溶液的侵蚀情况还发现, 这两种侵蚀介质对硅铝聚合胶砂试样 (G) 的作用几乎无异, 如分别经 3% 的硫酸钠、硫酸镁溶液浸泡后其抗折强度均增加了 1.0%, 而抗压强度分别增加了 1.8% 和 2.0%。而其他试样均表现出一定程度的差异, 如快硬硫铝酸盐水泥胶砂试样 (ESSAC) 分别经 3% 的硫酸钠、硫酸镁溶液浸泡后, 其抗折强度变化相差 20.3%。这从另一个方面说明硅铝聚合胶砂试样 (G) 在硫酸盐溶液中的化学稳定性优于上述特种水泥胶砂试样的。

综上所述, 硫酸盐对耐酸水泥胶砂试样侵蚀严重, 对中抗硫酸盐硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、铝酸盐水泥的胶砂试样强度也有一定程度的不利影响; 硅铝聚合胶砂试样具有优良的抗硫酸盐侵蚀性能, 主要表现在其强度高, 且经硫酸钠、硫酸镁溶液浸泡后强度略有上升并能保持几乎相同的强度。

3.2 膨胀性能

实验对象为中抗硫酸盐硅酸盐水泥胶砂试样 (MSRC) 和硅铝聚合胶砂试样 (G)。表 4 为各试样的各龄期膨胀值及膨胀率。由该表知, 中抗硫酸盐硅酸盐水泥

胶砂试样试块在前 14 d 发生了较大程度的膨胀, 线膨胀值及膨胀率分别达到了 0.216 mm, 0.086%, 均比硅铝聚合胶砂试样的高 1 倍以上。随后中抗硫酸盐硅酸盐水泥胶砂试样发生了微量收缩, 而硅铝聚合胶砂试样虽然也发生了收缩, 但 28 d 以后体积几乎保持不变, 至 60 d 时仅膨胀了 0.007 mm。

表 4 各试样的各龄期膨胀值及膨胀率
Table 4 The potential expansion value and ratio of different samples for each curing ages

	0 ~ 14 d		14 ~ 28 d		28 ~ 60 d	
	Value/mm	Ratio/%	Value/mm	Ratio/%	Value/mm	Ratio/%
MSRC	0.216	0.086	-0.040	-0.016	-0.043	-0.017
G	0.106	0.042	-0.060	-0.024	0.007	0.003

图 4 为试样各龄期时的累计膨胀率。由图可知, 硅铝聚合胶砂试样在养护期间总体上表现为膨胀, 虽然 28 d 时因收缩而使膨胀程度有所减弱, 但其后几乎无变化。中抗硫酸盐硅酸盐水泥胶试样块早期膨胀较大, 虽然后期因收缩而抵偿了部分膨胀, 但累计膨胀率仍然远远高于硅铝聚合胶砂试样的。

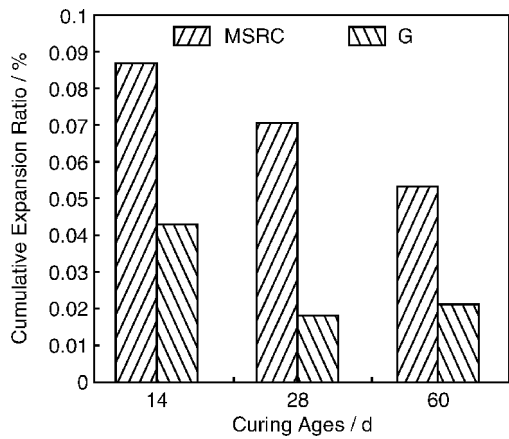


图 4 各试样在各龄期时的累计膨胀率

Fig.4 The cumulative potential expansion ratio of samples with different curing ages

由上可知，硅铝聚合胶砂试样较中抗硫酸盐硅酸盐水泥试样在硫酸盐环境中具有更优异的体积稳定性。

3.3 耐酸性能

试块经 5% 硫酸溶液浸泡后，溶液底部沉淀有稀泥状物质，这说明有的试块已被硫酸溶液侵蚀。比较各试块的外观可知，除硅铝聚合胶砂试块和耐酸水泥胶砂试块保持完整外形外，其他各试块的表面都凹凸不平，且矿渣硅酸盐水泥试块表面变得异常蓬松，这说明前两者的耐稀硫酸侵蚀性能较其他的优良。经 5% 盐酸溶液浸泡后，铝酸盐水泥胶砂试块与快硬硫铝酸盐水泥胶砂试块发生了严重腐蚀，而其他试块的外形保持较完好。

表 5 为各试样经 5% 的酸液浸泡 28 d 后的质量变化。由表 5 可知，除矿渣硅酸盐水泥因蓬松吸水外，其他试样浸泡后都有不同程度的质量损失，但硅铝聚合胶砂试样的质量损失较其他试样的要小一些或大致相当。如经 5% 硫酸溶液浸泡后，硅铝聚合胶砂试样的质量损失比除

矿渣硅酸盐试样外的其他试样的都要小；经 5% 盐酸溶液浸泡后，硅铝聚合胶砂试样的质量损失虽然比耐酸水泥胶砂试样的稍大，但远远小于铝酸盐水泥和快硬硫铝酸盐水泥的，而与硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥的大致相当。以上说明，硅铝聚合胶砂试样较铝酸盐水泥、中抗硫酸盐硅酸盐水泥等特种水泥胶砂试样具有更优良的耐稀酸侵蚀性能，甚至与耐酸水泥胶砂试样的相当。

表 5 在水和酸液中浸泡 28 天后各试块的质量变化

Table 5 Quantity change of samples immersed in water and acid solution for 28 d

Samples	MSRC	BFSC	AC	ESSAC	G	AAC
in water/g	584.6	581.8	581.2	572.9	586.5	541.7
in 5% H ₂ SO ₄ /g	495.4	605.1	561.5	524.3	571.0	518.0
Quantity change/%	-15.3	4.0	-3.4	-8.5	-2.6	-4.4
in water/g	586.9	582.1	582.2	575.0	582.4	542.1
in 5% HCl/g	563.1	561.2	530.4	466.7	560.9	532.0
Quantity change/%	-4.06	-3.59	-8.90	-18.83	-3.69	-1.86

The expansion of Portland blast-furnace slag cement mortar occurred, which results in water absorption and quantity increase. AAC-Anti-acid Cement.

比较各试样的质量损失可发现，这两种酸对上述胶砂试块的侵蚀程度各有不同。5% 的硫酸溶液对中抗硫酸盐硅酸盐水泥胶砂试样和矿渣硅酸盐水泥胶砂试样的侵蚀较严重，前者质量损失高达 15.26%，后者发生了蓬松、起皮的外观破坏，而其他胶砂试块的质量损失都在 10% 以下。5% 的盐酸溶液对快硬硫铝酸盐水泥胶砂试样的侵蚀较严重，质量损失高达 18.83%，而其他胶砂试块的质量损失都在 10% 以下。

表 6 为各试样经 5% 的酸液浸泡 28 d 后的强度变化。由表 6 知，硅铝聚合胶砂试样经 5% 硫酸浸泡后，其

表 6 在水和酸液中浸泡 28 天后各试块的强度变化

Table 6 Strength change of samples immersed in water and acid solution for 28 d

Samples	Strength/MPa	in water	in 5% H ₂ SO ₄	Strength change/%	in water	in 5% HCl	Strength change/%
MSRC	Flexural strength	8.6	6.9	-19.8	8.6	6.9	-19.8
	Compressive strength	49.3	15.5	-68.6	49.3	31.0	-37.1
BFSC	Flexural strength	9.0	7.8	-13.3	9.0	8.4	-6.7
	Compressive strength	55.8	23.2	-58.4	55.8	37.2	-33.3
AC	Flexural strength	6.8	4.5	-33.8	6.8	5.5	-19.1
	Compressive strength	55.2	29.5	-46.6	55.2	33.3	-39.7
ESSAC	Flexural strength	6.9	5.7	-17.4	6.9	5.3	-23.2
	Compressive strength	42.6	13.5	-68.3	42.6	16.0	-62.4
G	Flexural strength	8.4	7.5	-10.7	8.4	6.8	-19.0
	Compressive strength	52.2	38.3	-26.6	52.2	36.7	-29.7
AAC	Flexural strength	2.6*	5.3	103.9	2.6*	/	/
	Compressive strength	5.0*	2.7	-46.0	5.0*	/	/

* The strength of anti-acid cement mortar that cured in air, because this mortar can't be resistant to water. Anti-acid cement mortar has no strength.

抗折、抗压强度损失是所有试样中最小的,尤其是抗压强度损失要远远小于其他试样的;经 5% 盐酸浸泡后,其抗压强度损失不超过 30.0%,是所有试样中最小的,但其抗折强度损失较大,达到了 19.0%,与其他试样的大致相当。经 5% 的酸液浸泡后,其他品种水泥胶砂试样(除耐酸水泥胶砂试样外)的强度损失很大,尤其是经 5% 硫酸溶液浸泡后其抗压强度损失甚至高达 60% 以上,如中抗硫酸盐硅酸盐水泥、快硬硫铝酸盐水泥的胶砂试样的抗压强度损失分别为 68.56%, 68.31%。值得注意的是,耐酸水泥胶砂试样经 5% 盐酸浸泡后,试体内部变得非常松软,试块几乎没有强度;其经 5% 硫酸浸泡后,试块的抗折强度虽然增加了,但抗压强度却下降不小。以上说明硅铝聚合胶砂试样较其他水泥胶砂试样的抗稀酸侵蚀性能良好。

比较各试样在这两种稀酸的强度变化还发现,各试样的抗折强度损失都要较其抗压强度损失小;5% 盐酸对硅铝聚合胶砂试样的侵蚀较 5% 硫酸的更严重,对其他品种水泥则恰恰相反。综合分析各试样的质量损失及强度损失可知,硅铝聚合胶砂试样抗稀硫酸侵蚀性能较抗稀盐酸侵蚀性能要好。

4 结 论

利用 800 °C 下煅烧 1 h 的铝土矿选尾矿为原料,以模数为 1.8 的水玻璃为激发剂,当复掺 35% 的矿渣微粉时,在水玻璃用量为 20% 的常温条件下可制备得到 3 d 与 28 d 抗折强度分别达到 6.7 MPa、10.2 MPa,抗压强度分别达到 39.2 MPa、60.2 MPa 的硅铝聚合材料。

聚合反应并不生成晶体,而是生成以 Ca, Si, Al, O 等为主要组分的凝胶。基体中尺寸细小、相互交错的片层结构及大量生成的凝胶是胶砂试样强度随龄期延长而增长的本质原因。

该材料具有优异的抗硫酸盐侵蚀性能。分别经 3% 硫酸钠和 3% 硫酸镁溶液浸泡 28 d 后,相比于铝酸盐水泥、中抗硫酸盐硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥等特种水泥胶砂试样,其强度不仅发挥稳定,保留值高,而且还稍有增长;在硫酸盐环境中(石膏掺入量为 7%),其体积稳定性远远优于中抗硫酸盐硅酸盐水泥。

该材料具有一定的抗稀酸侵蚀性能。分别经 5% 稀硫酸及 5% 稀盐酸浸泡 28 d 后,其不仅能够保持完整的外观,而且其质量损失和强度损失都要较铝酸盐水泥、中抗硫酸盐硅酸盐水泥、快硬硫铝酸盐水泥等特种水泥胶砂试样的小。

参考文献 References

- [1] Li Taichang(李太昌), Pan Haie(潘海娥). 铝土矿选尾矿资源化利用途径探讨[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*(矿产保护与利用), 2007(1): 40-43.
- [2] Bakharev T. Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35: 1 233-1 246.
- [3] Bakharev T, Sanjayan J G, Cheng Y B. Sulfate Attack on Alkali-Activated Slag Concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32: 211-216.
- [4] Bakharev T. Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35: 658-670.
- [5] Guo Wenying(郭文瑛), Wu Guolin(吴国林), Wen Ziyun(文梓芸), et al. 偏高岭土活性评价方法的研究[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*(武汉理工大学学报), 2006, 28(1): 76-79.
- [6] Andini S, Colangelo T, Montagnaro F, et al. Coal Fly Ash as Raw Material for the Manufacture of Geopolymer-Based Products [J]. *Waste Management*, 2008, 28: 416-423.
- [7] Christina K Y, Grant C L, John L P, et al. Effect of Calcium Silicate Sources on Geopolymerisation[J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38: 554-564.

Ultrasensitive, Highly Flexible Electronic Skin Developed

By sandwiching a precisely molded, highly elastic rubber layer between two parallel electrodes, researchers have been able to create an electronic sensor that can detect the slightest touch. It was able to detect pressures well below the pressure exerted by a 20 milligram bluebottle fly carcass that they experimented with, and with unprecedented speed. The key innovation in the new sensor is the use of a thin film of rubber molded into a grid of tiny pyramids. The thin rubber film between the two electrodes stores electrical charges, much like a battery. When pressure is exerted on the sensor, the rubber film compresses, which changes the amount of electrical charges the film can store. That change is detected by the electrodes and is what enables the sensor to transmit what it is “feeling.”

(From http://www.mrs.org/s_mrs/sec.asp?CID=1920&DID=84063)