

文章编号: 1674-599X(2020)02-0035-05

偏高岭土聚物配合比对力学性能的影响研究

李一聪, 王世玉, 钟卿瑜, 罗冬, 谷上海

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为设计偏高岭土聚物最佳配合比, 研究原料各组分对于地聚物抗压强度的影响, 分析了 SiO_2 与 Al_2O_3 、 Na_2O 与 Al_2O_3 和 H_2O 与 Al_2O_3 的摩尔比对偏高岭土聚物 7 d 抗压强度的影响规律, 归纳出经验性摩尔配比。研究表明: 当 SiO_2 与 Al_2O_3 的摩尔比在 4 附近、 Na_2O 与 Al_2O_3 的摩尔比为 1 时, 偏高岭土聚物的 7 d 抗压强度最高(超过 65 MPa), 而 H_2O 与 Al_2O_3 的摩尔比对地聚物 7 d 抗压强度的影响作用不显著; SiO_2 与 Al_2O_3 、 Na_2O 与 Al_2O_3 和 H_2O 与 Al_2O_3 的摩尔比三者对于偏高岭土聚物 7 d 抗压强度的影响程度依次下降。

关键词: 偏高岭土; 地聚物; 力学性能; 碱激发; 配合比设计

中图分类号: U414

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.006

Study on the effect of raw material composition on the mechanical properties of metakaolin-based geopolymer

LI Yi-cong, WANG Shi-yu, ZHONG Qing-yu, LUO Dong, GU Shang-hai

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to design the optimum mix ratio of metakaolin-based geopolymer, the effects of raw material composition on the compressive strength of the geopolymer was studied. In this paper, the effects of the molar ratios of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ on the 7-day compressive strength of metakaolin-based geopolymer were analyzed. The empirical mole ratio was then summarized. The results show that when the molar ratio of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ is around 4 and the molar ratio of $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ is 0.9~1.1, the 7-day compressive strength of metakaolin-based geopolymer is maximum (over 65MPa). The effect of molar ratio of $\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ on the 7-day compressive strength of the geopolymer is limited. The effect of the molar ratios of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ on the 7-day compressive strength of the metakaolin-based geopolymer decrease successively.

Key words: metakaolin; geopolymer; mechanical properties; alkali-activated; mix design

随着基础设施建设对硅酸盐水泥的需求量的日益增加, 传统的“两磨一烧”的生产工艺所导致的环境问题也愈发严峻。据统计, 中国每年生产水泥所产生的二氧化碳近 9×10^8 t, 通过水泥熟料生产中的二氧化碳排放量途径进行分析, 发现目前中国的水泥企业平均每生产 1 t 水泥熟料约排放 0.8 t 的 CO_2 ^[1-2]。因此, 寻找合适的硅酸盐水泥的代替材料引起了诸多学者的研究兴趣^[3], 地聚物就是其

中之一。地聚物是属于无机聚合物材料的一种, 最早是由法国科学家 Davidovits^[4]提出的, 它是由 AlO_4^- 和 SiO_4 四面体单元通过共用氧相互交联形成的三维网络结构, 金属阳离子(如: Li^+ , Na^+ , K^+ 或 Cs^+ 等)分布于其网络孔隙内来平衡四配位铝原子所带负电荷, 以实现体系电荷平衡。与水泥相比, 地聚物的特点为: ①构筑结构轻质早强, 抗压强度和抗拉强度高, 力学性能优异; ②结构的耐久性良

收稿日期: 2019-09-02

基金项目: 长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2019SS08)

作者简介: 李一聪(1995-), 男, 长沙理工大学硕士生。

好,致密性较其他胶凝材料好;③对环境的影响小,生成 1 t 地聚物所需的能耗和排放的 CO_2 量分别是硅酸盐水泥的 41%和 20%^[5];④对核废料及重金属离子固封效果好;⑤容易生成和制备,数小时内可以完成缩聚反应;⑥原材料来源广泛。地聚物的特点使其成为一种极具潜力的碱激发胶凝材料^[6-10]。为了研究地聚物的力学性能和耐久性能,并将地聚物这种有潜力代替硅酸盐水泥的新型“绿色”材料投入实际应用,需要确定满足使用要求的地聚物配合比。

为设计偏高岭土地聚物最佳配合比,充分了解影响抗压强度的配合比设计参数的重要性,作者拟通过实验分析,研究 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 3 种因素对偏高岭土地聚物抗压强度的影响。

1 实验方案

1.1 实验材料

偏高岭土(MK)为内蒙古 KAPOZZ 系列高活性偏高岭土,由高岭土在 700 °C 煅烧 24 h 而成。K-1100 型偏高岭土的成分以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 MgO 为主,其含量分别为 54.5%、43%、1%和 0.8%。碱激发剂采用模数为 3.28 的硅酸钠溶液、工业片状氢氧化钠(纯度 98%)及去离子水配制而成。

对 K-1100 型偏高岭土进行了 X 射线衍射测试。测试单位为中南大学有色金属材料教育部重点实验室。X 射线的 λ 射角度 2θ 的测试范围在 3°~85°之间。K-1100 型偏高岭土 X 射线衍射图如图 1 所示。通过 X 射线衍射图分析可知,当 2θ 为 15°~35°之间时,有明显的驼峰,代表偏高岭土中大量

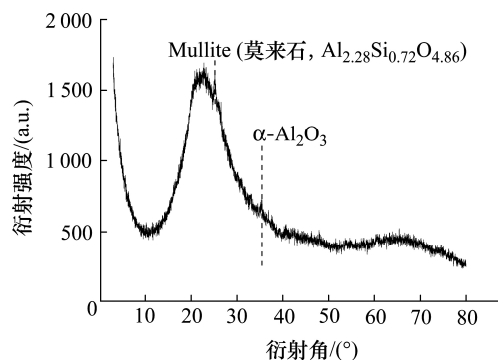


图 1 K-1100 型偏高岭土 X 射线衍射图

Fig.1 X-ray diffraction pattern of K-1100 metakaolin

的无定型物。当 2θ 在 24°时,检测出内部含有莫来石($\text{Al}_{2.28}\text{Si}_{0.72}\text{O}_{4.86}$)的成分,这是由于煅烧工艺所造成的,含有少量的杂质。当 2θ 为 35°附近时,检测出偏高岭土中所含氧化铝的类型为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。

1.2 地聚物制备方法

称取一定质量的硅酸钠、水及固体氢氧化钠后混合,设计成不同模数(SiO_2 与 Na_2O 的摩尔比, M_s)和质量分数($\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ 与碱激发剂的质量比, C)的碱激发剂,利用磁力搅拌器迅速搅拌,1~3 h 后冷却到常温并备用。再称取一定质量的 K-1100 偏高岭土加入到搅拌锅中进行预搅拌,使其均匀无大颗粒粘结后,将原料偏高岭土和碱激发剂按质量比(液固比, $m_{\text{liquid}}/m_{\text{solid}}$)缓慢加入激发剂,慢慢搅拌 2 min,快速搅拌 1 min 后倒入磨具中,放入振动台上充分振动 3 min 后,用塑封袋密封(防止水分散失)。放入养护箱中,养护 24 h 后,进行脱模。偏高岭土地聚物配合比见表 1。

1.3 试件的脱模

7 d 后进行抗压强度测试,测试前需要将试件表面用机床磨削,使试件表面达到平整度的要求,防止偏心受压,造成实验误差。压力机加载过程中速度控制在 0.3~0.5 kN/s。

2 实验结果与分析

计算激发剂模数、浓度及液固比并将其转化为地聚物各组份摩尔比($n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$)。将 K-1100 偏高岭土地聚物 7 d 抗压强度压力机加载过程中的速度控制在 0.3~0.5 kN/s,分析地聚物的最佳配比。 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 与偏高岭土地聚物 7 d 抗压强度的关系分别如图 2~4 所示。

2.1 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 对偏高岭土地聚物 7 d 抗压强度的影响

从图 2 中可以看出,随着 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 的增加,偏高岭土地聚物的抗压强度先增加后减小。当 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 小于 3.6 时,地聚物的 7 d 抗压强度不高,均在 50 MPa 以下。当 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 为 4.0 附近时,地聚物的抗压强度最高。因为当 $n_{\text{Si}}/n_{\text{Al}}$ 较低时, Si-O-Si 含量低于 Si-O-Al 含量,且 Si-O-Si 强于 Si-O-Al 之间的连接作用。随着 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 的增加,地聚物的微观结构更加致密,抗压

表 1 偏高岭土聚物试验配比

Table 1 The mixture ratio of metakaolin-based geopolymer													
编号	M_s	C	$m_{\text{liquid}}/m_{\text{solid}}$	$n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$n_{\text{Al}_2\text{O}_3}/n_{\text{Na}_2\text{O}}$	$n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	编号	M_s	C	$m_{\text{liquid}}/m_{\text{solid}}$	$n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$n_{\text{Al}_2\text{O}_3}/n_{\text{Na}_2\text{O}}$	$n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$
A1010	1.0	30	1.0	3.32	1.29	0.70	B1410	1.4	35	1.0	3.74	1.32	0.81
A1011	1.0	30	1.1	3.44	1.17	0.77	B1411	1.4	35	1.1	3.90	1.20	0.90
A1012	1.0	30	1.2	3.56	1.07	0.84	B1412	1.4	35	1.2	4.06	1.10	0.98
A1210	1.2	30	1.0	3.42	1.41	0.70	B1610	1.6	35	1.0	3.84	1.43	0.81
A1211	1.2	30	1.1	3.56	1.28	0.77	B1611	1.6	35	1.1	4.00	1.30	0.90
A1212	1.2	30	1.2	3.68	1.18	0.84	B1612	1.6	35	1.2	4.18	1.19	0.98
A1410	1.4	30	1.0	3.52	1.54	0.70	C1010	1.0	40	1.0	3.72	0.96	0.93
A1411	1.4	30	1.1	3.66	1.40	0.77	C1011	1.0	40	1.1	3.86	0.88	1.02
A1412	1.4	30	1.2	3.80	1.28	0.84	C1012	1.0	40	1.2	4.02	0.80	1.12
A1610	1.6	30	1.0	3.60	1.67	0.70	C1210	1.2	40	1.0	3.86	1.06	0.93
A1611	1.6	30	1.1	3.74	1.51	0.77	C1211	1.2	40	1.1	4.02	0.96	1.02
A1612	1.6	30	1.2	3.88	1.39	0.84	C1212	1.2	40	1.2	4.20	0.88	1.12
B1010	1.0	35	1.0	3.52	1.10	0.81	C1410	1.4	40	1.0	3.98	1.15	0.93
B1011	1.0	35	1.1	3.66	1.00	0.90	C1411	1.4	40	1.1	4.16	1.05	1.02
B1012	1.0	35	1.2	3.78	0.92	0.98	C1412	1.4	40	1.2	4.34	0.96	1.12
B1210	1.2	35	1.0	3.64	1.21	0.81	C1610	1.6	40	1.0	4.08	1.25	0.93
B1211	1.2	35	1.1	3.80	1.10	0.90	C1611	1.6	40	1.1	4.26	1.14	1.02
B1212	1.2	35	1.2	3.94	1.01	0.98	C1612	1.6	40	1.2	4.46	1.04	1.12

注: M_s 为碱激发剂模数, 即 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Na}_2\text{O}}$; C 为碱激发剂的质量分数, 即 $(m_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}+m_{\text{NaOH}})/m_{\text{碱激发剂}}$; $m_{\text{liquid}}/m_{\text{solid}}$ 为原料偏高岭土和碱激发剂的质量比, 即液固比; $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 为 SiO_2 与 Al_2O_3 的摩尔比; $n_{\text{Al}_2\text{O}_3}/n_{\text{Na}_2\text{O}}$ 为 Al_2O_3 与 Na_2O 的摩尔比; $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 为 H_2O 与 Al_2O_3 的摩尔比。

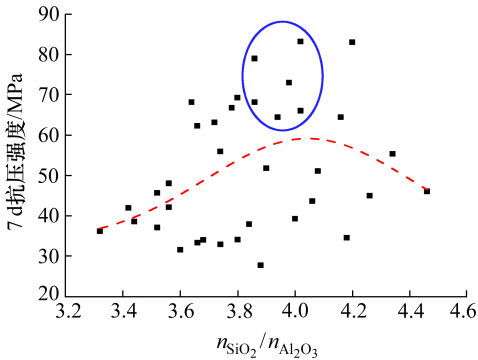


图 2 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 与地聚物 7 d 抗压强度的关系
Fig.2 Relationship between $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio and geopolymer 7 d compressive strength

强度逐步提高。但是,随着 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 进一步提高,抗压强度下降到 50 MPa 以下,此时,未反应的偏高岭土的含量增多,地聚物内部孔隙率增加,导致部分结构疏松,使得抗压强度的降低。Duxson^[10-11]等人在研究中发现,在利用 XRD 分析反应物结晶情况时发现,随着龄期的增加,地聚物反应愈加充分,使得孔隙率降低,地聚物内部结构得以填充。

由于铝组分只存在于原料偏高岭土中,因此, $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 实则体现了硅组分含量对于地聚物抗

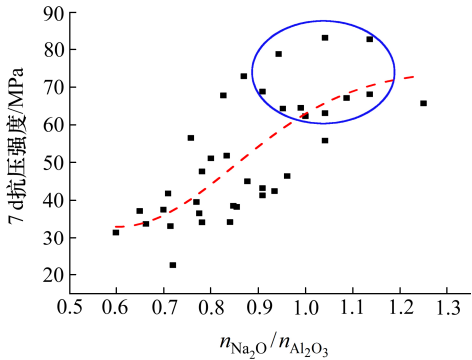


图 3 $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 与地聚物 7 d 抗压强度的关系
Fig.3 Relationship between $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio and geopolymer 7 d compressive strength

压强度的影响,尤其是碱激发剂中所含硅组分的作用。在地质聚合反应过程中,原料偏高岭土在碱激发剂的作用下会发生“溶解-聚合”反应,碱激发剂中所含的 OH^- 和可溶性硅组分会促进偏高岭土中活性硅和活性铝的溶出。 OH^- 含量越高,所提供的碱性溶解环境越高,有利于原料偏高岭土中 $\text{Si}-\text{O}$ 键和 $\text{Al}-\text{O}$ 键的断裂,尤其是 $\text{Al}-\text{O}$ 键。此时,碱激发剂中较多含量的可溶性硅组分和原料中 $\text{Si}-\text{O}$ 键会发生断裂而生成硅组分,进一步聚合,会

形成以 Si 组分为主要骨架的 N—A—S—H 三维网状结构,故硅组分在合成地聚物的过程中起十分重要的作用。

2.2 $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 对偏高岭土地聚物 7 d 抗压强度的影响

从图 3 中可以看出,随着 $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 的增加,地聚物抗压强度呈现逐渐变大的趋势, $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 在 0.9~1.1 之间时抗压强度较高。在碱激发偏高岭土地聚物结构中,Na 组分包含于 NaOH 与 Na_2SiO_3 中,其含量在一定程度上代表了 OH⁻ 和 SiO_3^{2-} 的含量。在地质聚合反应过程中,Na 组分起平衡硅氧四面体电荷的作用,且部分参与 N—A—S—H 三维网状结构。当 $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 较低时,钠组分含量较低,对应的 OH⁻ 和 SiO_3^{2-} 的含量也较低,导致了地质聚合反应的不完全进行,尤其不充裕的 OH⁻ 不利于原料偏高岭土的溶解,使得地聚物中未反应的原料偏高岭土含量增加,结构内部出现较多的空隙。Lahoti^[12]等人通过扫描电镜观察地聚物的微观结构发现:当 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 为 4、 $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 为 1 时,微观结构更加密实,可以获得很好的抗压强度。尽管 $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 较高时会给地质聚合反应提供更多的反应原料,促进“溶解-聚合”反应的进行,提高地质聚合反应水平,有利地聚物强度的生成。但是,较高的 OH⁻ 含量会使地质聚合反应速率过快,最先生成的凝胶会包裹未反应的原料土,并迅速硬化,使得部分结构出现弱化,并且过量的碱会与空气中的二氧化碳发生反应,生成碳酸钠,给生成物中加入了杂质,可使抗压强度降低。

2.3 $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 对偏高岭土地聚物 7 d 抗压强度的影响

从图 4 中可以看出, $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 与偏高岭土地聚物 7 d 抗压强度之间并没有特别明显的联系。表明: H_2O 含量对于偏高岭土地聚物的抗压强度作用不明显。其原因是:在地聚物生成的过程中 H_2O 只起到反应传输中介的作用,对反应物的和易性会产生一定的影响,且在聚合过程中生成孔隙,但并未参与到地聚物结构中。

对于地聚物的抗压强度,需要控制合理的 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 及 $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 。表明: $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 对地聚物 7 d 抗压强度的影响最大, $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 对地聚物 7 d 抗压强度的影响次之, $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 对地聚物 7 d 抗压强度的影响最小。这

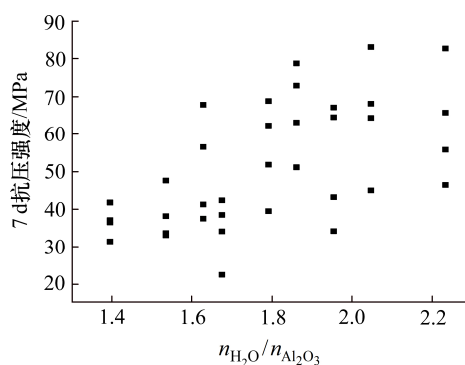


图 4 $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 与地聚物 7 d 抗压强度的关系

Fig.4 Relationship between $\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio and geopolymer 7 d compressive strength

是由于与 3 种组分在地聚物生成过程中的微观结构所起的作用相关。

3 结论

对 K-1100 型偏高岭土地聚物进行了配合比实验,将模数、质量分数及液固比等实验参数转化为地聚物组分摩尔比进行了分析。优化了实验过程,确定了偏高岭土地聚物的氧化物组分摩尔最佳比例配比。得出的结论为:

1) 偏高岭土地聚物配合比 $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 为 4、 $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 为 1 时,内部结构更加致密;7 d 抗压强度最佳,可达到 65~80 MPa 之间, $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 与偏高岭土地聚物 7 d 抗压强度之间并没有特别明显的联系。

2) $n_{\text{SiO}_2}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 对地聚物 7 d 抗压强度的影响最大,其次是 $n_{\text{Na}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 对地聚物 7 d 抗压强度的影响, $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 对地聚物 7 d 抗压强度的影响最小。这也与硅、钠、水组分在地聚物生成过程中所起的作用相关。

参考文献(References):

- [1] Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO” cements[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(9):1489-1498.
- [2] 陈赞,李婵,李晶晶.高速公路沥青路面施工机械碳排放测算模型[J].公路工程,2019,44(1):140-144.(CHEN Yun, LI Chan, LI Jing-jing. The carbon emission calculating model of the asphalt pavement construction machineries of highway[J]. Highway Engineering, 2019, 44(1): 140-144.(in Chinese))

- [3] 刘平,刘国涛.基质沥青添加反应型活性橡胶改善性能的研究[J].交通科学与工程,2018,34(4):1-5.(LIU Ping, LIU Guo-tao.Research on improving the performance of the activated rubber with the addition of the matrix asphalt[J].Journal of Transport Science and Engineering, 2018,34(4):1-5.(in Chinese))
- [4] Davidovits J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials[J].Journal of Thermal Analysis,1991,37(23): 1611-1656.
- [5] Duxson P, Provis J L, Lukey G C, et al. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'[J].Cement and Concrete Research,2007, 37(12):1590-1597.
- [6] Palomo A, Grutzeck M W, Blanco M T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future[J].Cement and Concrete Research,1999,29(8):1323-1329.
- [7] Zhang Y S, Sun W. Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer[J]. Journal of Hazardous Materials,2007,143(12):206-213.
- [8] Mo B H, Zhu H. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers[J]. Applied Clay Science,2014(99):144-148.
- [9] 贾德昌,何培刚,苑景坤,等.铝硅酸盐聚合物及其复合材料研究进展[J].硅酸盐学报,2017,45(12):1721-1737. (JIA De-chang, HE Pei-gang, YUAN Jing-kun, et al. Development of geopolymer and geopolymer-based composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017,45(12):1721-1737.(in Chinese))
- [10] Duxson P, Provis J L, Lukey G C, et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005,269:47-58.
- [11] Duxson P, Provis J L. Designing precursors for geopolymer cements[J]. Journal of the American Ceramic Society,2008,91(12):3864-3869..
- [12] Lahoti M, Narang P, Tan K H, et al. Mix design factors and strength prediction of metakaolin-based geopolymer[J]. Ceramics International,2017,43:11433-11441.

(上接第34页)

- [11] 丁立丰,郭啟良,王成虎.工程岩体裂隙渗透性试验方法研究及应用[J].岩土力学,2009,30(9):2599-2604.(DING Li-feng, GUO Qi-liang, WANG Cheng-hu. Research and application of testing methods for engineering rock mass fissure permeability[J]. Rock and Soil Mechanics,2009, 30(9):2599-2604.(in Chinese))
- [12] 韩同春,何露林,博文,等.一种裂隙土的双重入渗模型及对边坡稳定的影响[J].华南理工大学学报:自然科学版,2019,47(5):123-129,138.(HAN Tong-chun, HE Lu-lin, BO Wen, et al. A double infiltration model of fissured soil and its effect on slope stability[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition,2019, 47(5):123-129,138.(in Chinese))
- [13] 陈善雄,戴张俊,陆定杰,等.考虑裂隙分布及强度的膨胀土边坡稳定性分析[J].水利学报,2014,45(12):1442-1449.(CHEN Shan-xiong, DAI Zhang-jun, LU Ding-jie, et al. Stability analysis of expansive soil slope considering crack distribution and strength[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,45(12):1442-1449.(in Chinese))
- [14] 杨秀竹,康镜,刘正夫,等.裂隙岩质边坡非饱和降雨入渗特征分析[J].水土保持通报,2016,36(4):143-147.(YANG Xiu-zhu, KANG Jing, LIU Zheng-fu, et al. Unsaturated seepage analysis of fractured rock slope under rainfall condition[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(4):143-147.(in Chinese))
- [15] Dahal R K, Hasegawa S, Yamanaka M, et al. Comparative analysis of contributing parameters for rainfall-triggered landslides in the Lesser Himalaya of Nepal[J]. Environmental Geology,2009,58(3):567-586.
- [16] 袁俊平,蔺彦玲,丁鹏,等.裂隙诱导各向异性对边坡降雨入渗的影响[J].岩土工程学报,2016,38(1):76-82. (YUAN Jun-ping, LIN Yan-ling, DING Peng, et al. Influence of anisotropy induced by fissures on rainfall infiltration of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(1):76-82.(in Chinese))
- [17] 曾铃,刘杰,史振宁.坡积土边坡裂隙各向异性特征对雨水入渗过程的影响[J].交通运输工程学报,2018,18(4): 38-47.(ZENG Ling, LIU Jie, SHI Zhen-ning. Effect of colluvial soil slope fracture's anisotropy characteristics on rainwater infiltration process[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(4): 38-47. (in Chinese))
- [18] 张家俊.干湿循环下膨胀土裂隙、体变与渗透特性研究[D].广州:华南理工大学,2010.(ZHANG Jia-jun. Study on the cracks, body deformation and permeability characteristics of expansive soils under dry-wet cycle[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.(in Chinese))