

矿物掺合料对页岩陶粒混凝土抗压强度的影响^{*}

李玉平[†], 王伟, 章鹏, 马天齐, 高应霞

(1. 湖南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:以页岩陶粒混凝土为基础配方,系统研究了单掺和双掺不同含量的偏高岭土、粉煤灰、钢渣等矿物掺合料对其抗压强度影响,通过SEM和XRD进行了相关的微观结构和组成分析.结果表明当单掺矿物掺合料质量分数为10%时,页岩陶粒混凝土达到最高的抗压强度;双掺时,总掺量为10%(质量分数)、比例为1:2的偏高岭土和粉煤灰时,页岩陶粒混凝土的抗压强度最好,其3d、7d和28d的抗压强度分别达到了18.1、28.6和35MPa,对比没有加入矿物掺合料的页岩陶粒混凝土的抗压强度分别增加了417%、267%和250%,主要原因是偏高岭土和粉煤灰的掺加能够优化轻骨料混凝土的微观结构,对强度具有较大贡献.

关键词:页岩陶粒混凝土;矿物掺合料;粉煤灰;钢渣;抗压强度;微观结构

中图分类号:TU528.2;TQ178

文献标志码:A

Influence of Mineral Admixture Addition on Compressive Strength of Shale Ceramsite Concrete

LI Yuping[†], WANG Wei, ZHANG Peng, MA Tianqi, GAO Yingxia

(College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The effects of different contents of mineral admixtures including metakaolin, fly ash and steel slag, on the compressive strength of shale ceramsite concrete were studied systematically and the microstructure and composition were analyzed by SEM and XRD. The results show that the compressive strength of the concrete is the highest when the mass content of the mineral admixtures is about 10%. Then, when two kinds of mineral admixtures are added into the concrete at different ratio, the compressive strength testing shows that the concrete with 10% metakaolin and fly ash (ratio 1:2) exhibits the best compressive strength (18.1, 28.6, 35MPa at 3d, 7d, 28d, respectively), which is higher than the concrete without mineral admixture by 417%, 267% and 250% at 3d, 7d and 28d, respectively. The main reason is that the addition of metakaolin and fly ash can optimize the microstructure of lightweight aggregate concrete, thus, improving the strength of the concrete.

Key words: shale ceramsite concrete; mineral admixture; fly ash; steel slag; compressive strength; microstructure

* 收稿日期:2017-05-10

基金项目:湖南省战略新兴产业科技攻关项目(2015GK1031),

作者简介:李玉平(1962-),男,湖南郴州人,湖南大学教授

[†] 通讯联系人, E-mail: ciypli@hnu.edu.cn

页岩陶粒混凝土中加入矿物掺合料,可提高其力学性能和耐久性,这是一种有效提高混凝土工作性能的方式^[1]。矿物掺合料是工业废渣,价格低廉,来源广泛,通过添加掺合料来代替部分水泥,可以降低混凝土的成本,获得显著的经济效益^[2]。

常用的矿物掺合料主要有粉煤灰、钢渣、偏高岭土等,这三种矿物掺合料在国内外已经有一定的研究和应用^[2]。

粉煤灰、钢渣和偏高岭土单独在混凝土中的应用已研究了一段时间,1935年 R. E Davis 首次将粉煤灰应用于大体积混凝土结构中^[3-4]。20世纪50年代,粉煤灰除普遍应用于大体积混凝土中,还开始应用于如建筑、高速公路等具有高强度的结构物中。1953年,美国 Hungry Horse 大坝工程中应用了 13 余万吨粉煤灰,既改善了混凝土性能,也节约了水泥^[5]。在我国,钢渣应用于水泥中也已有 60 多年历史,通常是把钢渣作为生产水泥的混合材^[6]。但是,与水泥熟料相比,钢渣的易磨性较差,这限制了其掺入量。作为掺合料配入混凝土,可充分发挥钢渣优势,改善水泥及其制品的性能,提高钢渣利用率^[7-8]。20世纪70年代,国内外均开展了对于偏高岭土作为混凝土掺和料的研究^[9-10],不仅将其作为混凝土活性矿物掺合料,还可作为胶凝材料的制品。近几年,矿物掺合料在高性能轻质混凝土的应用方面做出了巨大贡献^[11]。但对其最佳掺量的研究却很少,同时不同掺合料的交互作用研究也处于初级阶段。

因页岩陶粒混凝土的骨料容重和强度都比较低,在建筑物中一般用在非承重墙的填充部分,很少能够应用于建筑物的承重部分,本文主要采用矿物掺合料来提高页岩陶粒混凝土的强度,从而使页岩陶粒应用范围更广。

本文首先通过加入不同含量的单组分矿物掺合料,探讨掺合料掺入量对混凝土力学性能的影响,获得最佳的单组份掺入量;然后,通过将偏高岭土、粉煤灰和钢渣按照不同比例两两掺和,比较其混凝土的抗压强度,得到最佳的两两掺和比例;再结合这两者的结果,配制得到最佳掺入总量以及掺入比例的混凝土,从而得到性能最好的页岩陶粒混凝土。

1 实验

1.1 主要实验原料

水泥采用湖南宁乡南方水泥有限公司生产的 P·O42.5 水泥;钢渣选用湖南湘潭发电厂的钢渣;粉

煤灰是由湖南岳阳首度建材厂提供的 II 级粉煤灰,细度 10%,需水量比 100%,密度 2.2 g/cm³;偏高岭土是由湖南醴陵某电瓷厂生产电瓷用的高岭土,经过在马弗炉中 750 °C 加热 2 h 后得到的,制备完成后的偏高岭土的氧化铝含量为 23.75%;陶粒来源于湖南益阳丰岩新材料发展有限公司,粒径为 4.75 mm ~ 19 mm、筒压强度为 1.01 MPa 的轻质板岩陶粒,砂是湘江河砂,细度模数 2.6。减水剂是由长沙市天心区浩羽防水材料厂生产的 HY-4015 型减水剂,减水率为 25%。

1.2 页岩陶粒混凝土配合比

本文采用了容重为 1 518 kg/m³ 的基础配方,主要通过添加矿物掺合料的方式来提高页岩陶粒混凝土的强度。实验采用的基础配方见表 1,然后将一定比例的矿物掺合料替代相应重量的水泥,其余组分均保持不变。

矿物掺合料的掺加方式为单组分掺加和双组份掺加,单组分从 5%~40% 之间不等,双组份的掺加总量为 30%,按照 30%+0%、20%+10%、10%+20% 和 0%+30% 的比例进行添加,最终寻找一个最佳配比。

通过 XRD 和 SEM 来探究三种矿物掺合料影响页岩陶粒混凝土抗压强度的原因,从而补充矿物掺合料对页岩陶粒混凝土影响的微观理论,同时也为工程实践提供理论依据。

表 1 本实验的基础配合比
Tab. 1 Basic formulation used in this experiment

容重 (kg·m ⁻³)	质量/g				
	骨料	水泥	砂子	石膏	水
1 541	458	450	475	23	135

1.3 实验过程

准确称量所需原料后均匀混合,加入页岩陶粒进行充分搅拌;搅拌均匀后加入水再次进行搅拌;最后将搅拌好的拌合物装入模具中制备出 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块。按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002) 的规定进行实验。

具体思路如下。

第一步:先将不同含量的单组分矿物掺合料(偏高岭土、粉煤灰、钢渣)分别加入到页岩陶粒混凝土中,比较加入相同矿物掺合料的混凝土的抗压强度,从而得到各个矿物掺合料的最佳掺入含量;

第二步:分别将偏高岭土、粉煤灰、钢渣以不同

的比例两两加入加到页岩陶粒混凝土中,比较其抗压强度,从而得到最佳的两两矿物掺合料掺入比例;

第三步:结合前两步的结果,以最佳的掺入含量和掺合料的比例设计实验,得到最优的实验配比.

1.4 表征方法

1.4.1 抗压强度

将配制好的轻骨料混凝土浆体倒入 100 mm×100 mm×100 mm 的模具中,采用常规养护,分别在 3 d、7 d 和 28 d 取样进行抗压强度检测,每组做 9 个取平均值.采用 INSTRON-3382 电子万能材料试验机,加载速度 0.5 MPa/s.

1.4.2 X 射线衍射(XRD)分析

将实验待测样品首先浸入酒精中 24 h,终止水泥的水化,然后置于 60 °C 的真空干燥箱 48 h 中,烘干至恒重,然后冷却至常温.将干燥好的样品用玛瑙

研磨,将研磨后的样品过 400 目筛,用 XRD-6100 型多晶粉末 X 射线衍射分析仪测试,确定水泥石物相,工作电压 40 kV,工作电流 30 mA,2 θ 扫描范围 5°~60°.

1.4.3 扫描电镜(SEM)

将规定龄期的水泥净浆试块破碎后,放入酒精中 24 h 进行脱水处理,然后取出置于 60 °C 烘箱中干燥 48 h 至恒重,然后取出冷却至常温.将试块放入煮沸的加拿大树胶中煮 10 min,再将试块取出冷却、切块、研磨、喷金,用 S4800 型扫描电镜观察水泥水化产物的微观形貌.

2 结果讨论

实验配比以及强度测试结果如表 2 所示.

表 2 实验结果
Tab. 2 Experimental result

组号	密度/(kg·m ⁻³)				强度/MPa		
	粉煤灰	水泥	钢渣	偏高岭土	3 d 强度	7 d 强度	28 d 强度
1	0	450	0	0	3.5	7.8	10
2	0	427.5	0	22.5	11.9	13.8	16.2
3	0	405	0	45	15.5	20.2	22.7
4	0	360	0	90	9.7	12.7	13.8
5	45	405	0	0	3.2	7.0	12.3
6	90	360	0	0	3.0	6.5	11.5
7	135	315	0	0	2.1	4.3	7.5
8	180	270	0	0	0.8	1.5	0.7
9	0	405	45	0	3.0	5.6	11.6
10	0	360	90	0	3.0	5.0	10.8
11	0	315	135	0	1.8	3.5	6.5
12	0	270	180	0	0.3	0	0
13	90	315	0	45	15.0	23.6	29.4
14	45	315	0	90	10.2	20.5	26.3
15	0	315	0	135	3.0	6.9	8.5
16	0	315	90	45	10.0	8.5	12.4
17	0	315	45	90	7.0	5.8	10.0
18	45	315	90	0	7.2	11.2	24.6
19	90	315	45	0	5.0	8.3	18.7
20	30	405	0	15	18.1	28.6	35.0
21	0	405	30	15	12.3	10.2	16.0
22	15	405	30	0	8.8	14.9	29.9

页岩陶粒混凝土的理想结构是页岩陶粒紧密堆积在水泥浆体中,而水泥浆体与页岩陶粒具有紧密的粘界面;水泥浆体中在早期出现能够提供强度的钙矾石晶体,而对界面具有损害作用的氢氧化钙是逐渐消耗的趋势.页岩陶粒混凝土与理想结构越接近,则页岩陶粒混凝土的抗压强度越好.借助

XRD 和 SEM 等手段观察矿物掺合料对页岩陶粒混凝土的作用,同时观察掺加矿物掺合料后与理想结构是否更相近.

首先,先通过分别掺入偏高岭土、粉煤灰和钢渣 3 d 的页岩陶粒混凝土 XRD 图来分析各个页岩陶粒混凝土成分的变化.图 1 为 3 d 的混凝土 XRD

图,图中 G、F、P 分别代表加入钢渣、粉煤灰和偏高岭土后的页岩陶粒混凝土试样.从图中可以看出,三组页岩陶粒混凝土中都出现了氢氧化钙和钙矾石的峰,但是加入偏高岭土的页岩陶粒混凝土中,钙矾石的峰相对更加明显,而氢氧化钙的峰相对更低,说明加入偏高岭土的页岩陶粒混凝土中含有更多的钙矾石以及更少的氢氧化钙.这是因为偏高岭土能与水泥中的水化产物氢氧化钙反应,生成钙矾石,从而钙矾石含量增加,氢氧化钙的含量减少.加入钢渣的页岩陶粒混凝土中,氢氧化钙的峰是最高的,这是因为加入钢渣含有一定量的氧化钙,因此在早期不但不会消耗水泥浆体中的氢氧化钙,还会产生氢氧化钙,从而氢氧化钙的含量最高.距离理想模型最近的是偏高岭土,而最远的是矿渣.

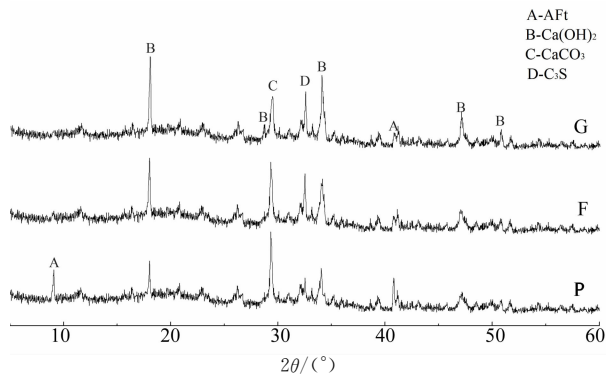


图 1 高岭土、粉煤灰、钢渣单掺混凝土 XRD 图
Fig. 1 XRD pattern of the concretes separately with metakaolin, flyash and slag

图 2(c)是页岩陶粒混凝土加入钢渣之后的 3 d、7 d 和 28 d 的抗压强度曲线.从图中可以看出随着钢渣的加入,页岩陶粒混凝土的 3 d 和 7 d 强度是逐渐降低的,当掺量小于 20% 时,页岩陶粒混凝土抗压强度下降值比较小,当掺量大于 20% 时,页岩陶粒混凝土的抗压强度呈现明显的下降趋势.早期强度的降低是因为加入钢渣后,在页岩陶粒混凝土中产生了氢氧化钙,导致水泥浆体与骨料的结合面发生破坏,从而其强度下降.页岩陶粒混凝土的 28 d 强度在钢渣掺量小于 20% 时与没有掺加钢渣的混凝土相比有一定程度的提高,这是因为钢渣的火山灰效应起到了影响,但是钢渣掺量超过 20% 时页岩陶粒混凝土强度下降很快,因此钢渣的最好效果为 10%.

从上述数据可以看出,偏高岭土对早期和后期混凝土强度的提高有明显作用,粉煤灰和钢渣对混凝土后期有一定程度的提高,而且粉煤灰的效果要强于钢渣,但是在早期的强度略有下降,早期应该加

强对混凝土的维护.

结合上面的分析,我们得到了最好的单掺入量为 10%,而偏高岭土和粉煤灰、偏高岭土和钢渣以及粉煤灰和钢渣两掺的最好比例是 1 : 2.于是我们把总产量设置为 10%,再以 1 : 2 的比例加入到页岩陶粒混凝土中.

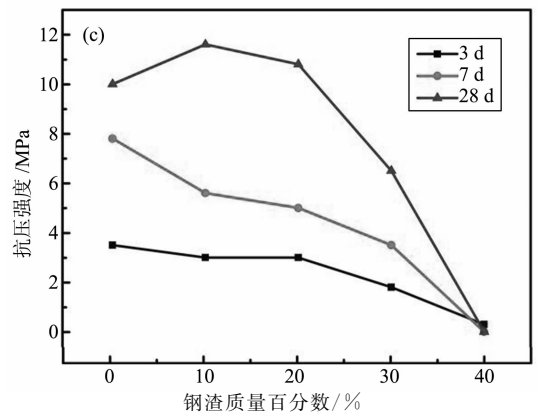
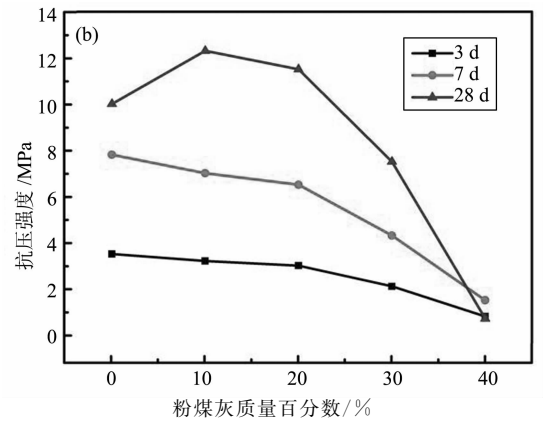
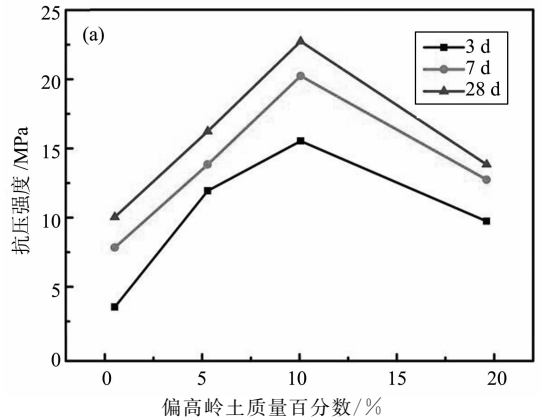


图 2 不同矿物掺合料单掺对混凝土抗压强度的影响
Fig. 2 Compressive strength comparison of the concretes with different single mineral admixtures

图 3 为总掺量为 10%、掺杂比例为 1 : 2 的两两掺杂时页岩陶粒混凝土的抗压强度对比.由图 3 可以得出,加入了偏高岭土和粉煤灰的页岩陶粒混

凝土,其各个时期的抗压强度都有了显著的提高,3 d、7 d 和 28 d 的抗压强度较没有添加矿物掺合料的混凝土分别高了 417%、267% 和 250%。加入粉煤灰和钢渣的页岩陶粒混凝土,3 d、7 d 和 28 d 的抗压强度较没有添加矿物掺合料的混凝土分别高了 151%、91% 和 199%。加入偏高岭土和钢渣的页岩陶粒混凝土,3 d、7 d 和 28 d 的抗压强度较没有添加矿物掺合料的页岩陶粒混凝土分别高了 251%、31% 和 60% (见图 4)。

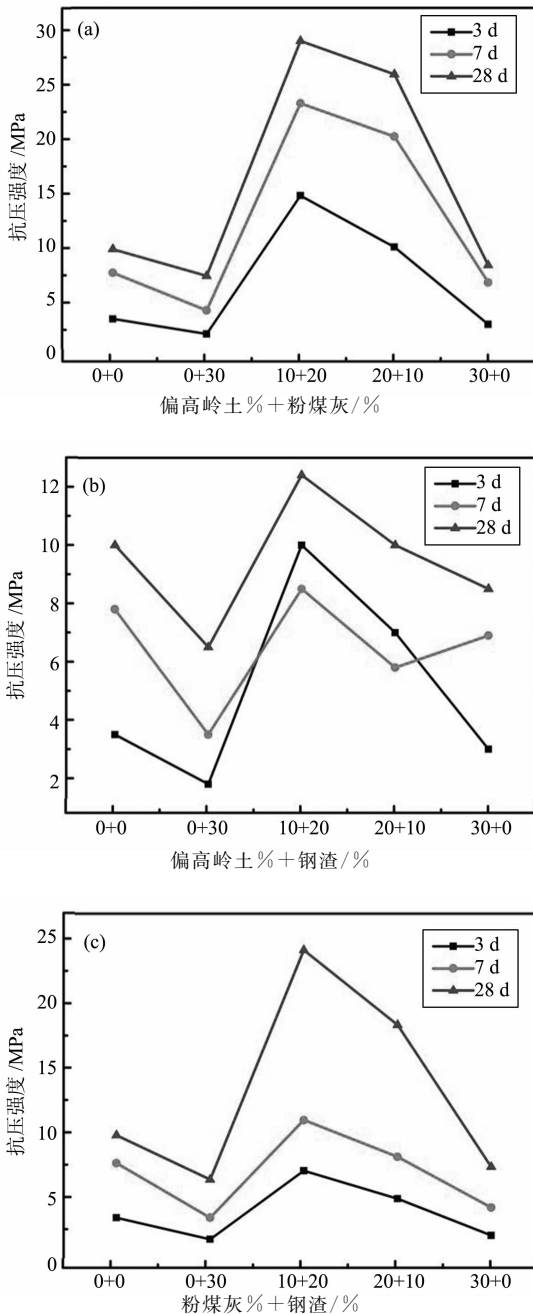


图 3 矿物掺合料两两掺加对混凝土抗压强度的影响
Fig. 3 Compressive strength comparison of the concretes with different dual mineral admixtures

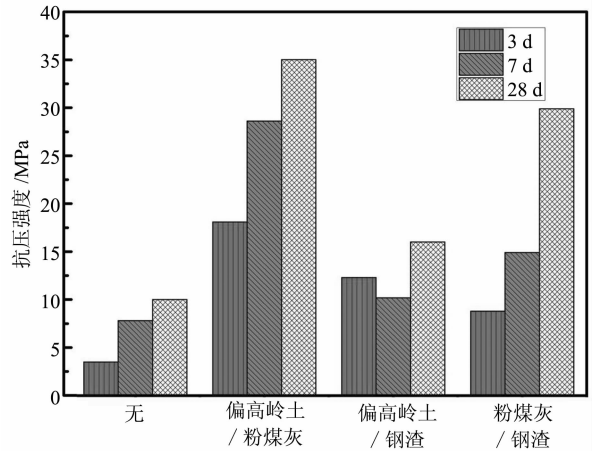


图 4 总量 10% 的两掺混凝土的抗压强度数据
Fig. 4 Compressive strength comparison of the concretes with 10% mineral admixtures

通过这三组混凝土比较可以看到,加入偏高岭土和粉煤灰的混凝土具有最高的抗压强度.为了解释这一现象,我们对比了加入偏高岭土、粉煤灰的混凝土和加入偏高岭土、钢渣的页岩陶粒混凝土的 SEM 图(图 5).从图 5(a)可以看出,偏高岭土和钢渣的掺入,能够产生一定量的钙矾石,但是钙矾石的晶体粗大,并且量较少,没有形成交联结构几乎不会对强度产生贡献,同时产生了裂纹对强度损害比较严重.从图 5(b)可以看出,偏高岭土和粉煤灰一起掺加能够产生大量的钙矾石,并且互相产生交联状态,能够对强度提供较大的贡献.因此,偏高岭土和粉煤灰具有相互促进的作用,能够使两种掺合料的作用在页岩陶粒混凝土抗压强度方面发挥到最大;而钢渣的加入会减小偏高岭土和粉煤灰的作用.

偏高岭土、粉煤灰和钢渣的最佳掺量的确定能够更好指导它们在工程中的使用不至于在用量过大使得强度下降严重而出现工程事故,也不至于用量过小而没有达到预期的经济效益.

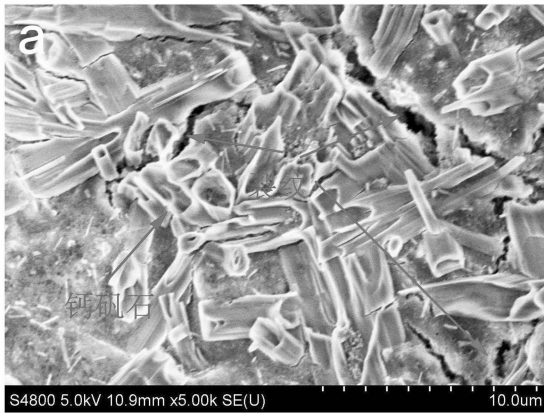
3 结 论

1) 单独掺入不同量的掺合料,掺入量为 10% 时页岩陶粒混凝土的抗压强度最高;两两掺合,根据页岩陶粒混凝土的抗压强度可以得到,偏高岭土和粉煤灰、偏高岭土和钢渣、粉煤灰和钢渣掺加比(质量比)为 1:2 时效果最佳.

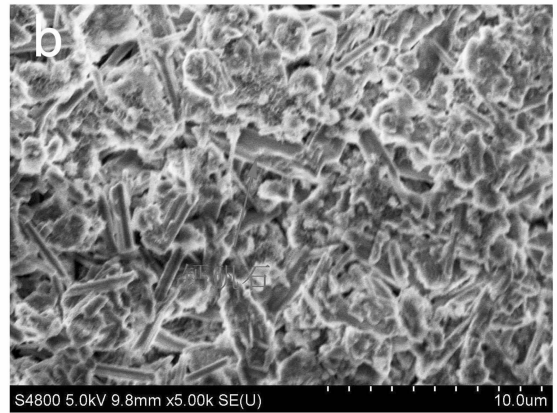
2) 混合活性掺合料中,偏高岭土和粉煤灰的掺合效果最佳,粉煤灰和钢渣混合掺合时,混凝土的早

期和中期强度较低,页岩陶粒混凝土的抗压强度分别为 8.8 MPa 和 14.9 MPa,因此要加强早中期的

养护,但是 28 d 强度达到 29.9 MPa,强度增长明显.



(a) 偏高岭土/钢渣两掺混凝土



(b) 偏高岭土/粉煤灰两掺混凝土

图 5 2 种混凝土的扫描电镜图

Fig. 5 SEM of concrete with (a) metakaolin/slag, (b) metakaolin/flyash

3) 偏高岭土和粉煤灰掺入到页岩陶粒混凝土中,按照 10% 的掺量,比例为 1 : 2,页岩陶粒混凝土的抗压强度达到 35 MPa,能够使页岩陶粒混凝土满足建筑物一般承重的要求.

参考文献

- [1] GARCIA N M, ZAPATA L E, SUÁREZ O M, *et al.* Effect of fly ash and nanosilica on compressive strength of concrete at early age[J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2015, 114(2): 99–106.
- [2] DEMIREL B, KELETEMUR O. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume [J]. *Fire Safety Journal*, 2010, 45(6/8):385–391.
- [3] 蔡跃波. 掺活性掺合料混凝土研究与应用中的几个疑难问题[J]. *硅酸盐学报*, 2000, 28(z1):55–59.
CAI Y B. Some knotty problems in the research and application for concrete containing mineral admixtures [J]. *Journal of the Chinese Society*, 2000, 28(z1):55–59. (In Chinese)
- [4] SAJEDI F, SHAFIGH P. High-strength lightweight concrete using leca, silica fume, and limestone [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2012, 37(7):1885–1893.
- [5] 钱觉时. 粉煤灰特性与粉煤灰混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2002:5–223.
QIAN J S. Characteristics of fly ash and fly ash concrete [M]. Beijing: Science Press, 2002:5–223. (In Chinese)
- [6] 曹征良, 李伟文, 陈玉伦. 偏高岭土在混凝土中的应用[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2004, 21(2):183–186.

CAO Z L, LI W W, CHEN Y L. Application of metakaolin in concrete[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2004, 21(2):183–186. (In Chinese)

- [7] 李澄. 大掺量粉煤灰混凝土材料及发展[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2001, 19(5): 29–31.
LI C. Concrete with high volume of fly-ash materials and its development [J]. *Journal of Qinghai University*, 2001, 19(5): 29–31. (In Chinese)
- [8] ANDREJKOVICOVA S, LVES A, VELOSA A, *et al.* Bentonite as a natural additive for lime and lime-metakaolin mortars used for restoration of adobe buildings [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2015, 60: 99–110.
- [9] 朱桂林, 孙树杉, 王建华. 高炉矿渣粉作高性能混凝土掺合料的研究和应用[J]. *粉煤灰*, 2001, 13(2):17–18.
ZHU G L, SUN S S, WANG J H. Research and application of blast furnace slag powder used as admixture for high performance concrete[J]. *Coal Ash China*, 2001, 13(2):17–18. (In Chinese)
- [10] 周红. 钢渣微粉在水泥生产中的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
ZHOU H. Research on the utilization of GBFS powder in cement production [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. (In Chinese)
- [11] 秦淑芳. 偏高岭土对轻骨料混凝土力学性能与耐久性影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
QIN S F. Research on the influence of mechanics and durability of natural lightweight aggregate concrete by mixing metakaolin [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University. (In Chinese)