

地聚物再生骨料混凝土的力学性能研究

丁兆洋¹,周静海¹,苏群¹,王晴²,孙红¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究工业废渣和废弃混凝土替代水泥和自然石材制备地聚物再生骨料混凝土的制备条件及养护制度对地聚物再生骨料混凝土力学性能的影响。方法 对40组边长为100 mm的正立方体试件进行抗压强度试验,分析原材料氧化物物质的量比、水玻璃掺量、液胶比、NaOH掺量、再生骨料预处理制度、再生骨料原始强度等级、养护温度和养护时间对地聚物再生骨料混凝土抗压强度的影响,找出地聚物再生骨料混凝土的最佳配比。通过SEM和EDS对地聚物水化产物进行分析。结果 地聚物再生骨料混凝土最佳配比:原料氧化物 $n(\text{CaO} + \text{MgO}) : n(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) = 1$ 、NaOH掺量为0.09、水玻璃掺量为0.4、液胶比为0.55。再生骨料最佳处理方式采用NaOH和水玻璃溶液共同浸泡。最佳养护方式:养护温度60℃、养护时间为4 h。结论 制备的C30-C50地聚物再生骨料混凝土能够满足普通的建筑工程需要。

关键词 地聚物;再生骨料;抗压强度;微观分析

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Mechanical Properties of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete

DING Zhaoyang¹, ZHOU Jinghai¹, SU Qun¹, WANG Qing², SUN Hong¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: By using industrial waste and waste concrete to replace cement as cementing material, recycled aggregate to replace natural stone as aggregate, geopolymer recycled aggregate concrete (GRAC) was prepared, and its mechanical properties were studied in this paper. Compressive experiments were carried out on 40 groups of cube specimens with side length of 100 mm made of GRAC. The compressive strength of GRAC was researched by analyzing its oxide ratio in raw materials, water-glass dosage, liquid binder ratio, NaOH content, recycled aggregate strengthen method, recycled aggregate strength level and curing system, respectively. The optimum mix design

收稿日期:2020-10-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51678374);辽宁省自然科学基金项目(2018055098);住房和城乡建设部科技计划项目(2019-K-48);沈阳市“双百工程”重大科技成果转化项目(Z19-4-011)

作者简介:丁兆洋(1979—),男,博士研究生,主要从事土木工程及建筑材料方面研究。

of GRAC is that the ratio of $n(\text{CaO} + \text{MgO})$ and $n(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ is equal to 1,0.09 NaOH dosage,0.4 sodium silicate dosage,0.55 liquid/gel ratio. The best way to deal with recycled aggregates is soaked in NaOH and sodium silicate solution together. The best curing system of GRAC is curing temperature $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, curing time 4 h. Strength grade of C30 to C50 GRCA meets the needs of the ordinary construction projects.

Key words:geopolymer;recycled aggregate;compressive strength;micro-analysis

地聚物是一种新型胶凝材料^[1],其主要原料为矿渣、粉煤灰、硼泥、硅灰等含有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 成分的工业废弃物。作为水泥替代品,地聚物具有良好的力学性能、稳定的耐久性能、耐高温性能及耐腐蚀性能^[2-4]。再生骨料就是旧建筑上的废弃混凝土^[5-8],采用再生骨料替代自然石材会略微牺牲相关构建的强度和耐久性,但是其环保意义却极为显著。笔者采用地聚物取代水泥作为胶凝材料,废弃混凝土替代天然石材作为粗集料,制备地聚物再生骨料混凝土。制备的地聚物再生骨料混凝土基本不消耗任何自然资源,还将工业废渣、废弃混凝土等工业

废弃物进行了循环利用。

1 试 验

1.1 原材料

试验用高炉矿渣采用鞍山钢铁股份有限公司产粒化高炉矿渣粉,粉煤灰选用本溪的一级粉煤灰,矿渣和粉煤灰的主要化学成分如表 1 所示。水玻璃选用山东优索化工科技有限公司生产的水玻璃溶液,原始模数为 3.3 模,波美度为 40,其化学成分如表 2 所示。再生骨料为废弃混凝土,经人工破碎成最大粒径为 25 mm 且具有连续级配的再生混凝土粗骨料,砂子为天然中细河砂。

表 1 矿渣和粉煤灰的化学组成

Table 1 Chemical composition of slag and fly ash								%
材料	w(CaO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(MgO)	w(Na ₂ O)	w(K ₂ O)	烧失量
矿渣	43.10	32.26	14.69	2.06	6.19	—	—	0.97
粉煤灰	5.51	48.54	28.35	6.37	2.42	3.01	3.90	0.96

表 2 水玻璃的化学组成及性质

Table 2 Chemical composition and property of water glas				
m(水玻璃)/g	m(NaOH)/g	m(H ₂ O)/g	n(SiO ₂) : n(Na ₂ O)	pH
50	10	100	0.47	13.9

1.2 试验方法及相关仪器

地聚物再生骨料混凝土制备长宽高为 100 mm×100 mm×100 mm 的标准试块,分别测试其 3 d、7 d 和 28 d 的抗压强度值。抗压强度测试仪器选用深圳瑞格尔仪器有限公司生产的 RGM-100A 型微机控制万能试验机。采用日立公司的 S-4800 型冷场发射扫描电子显微镜(SEM)和 Horiba 的 20 mm²X 射线能谱仪(EDS)表征地聚物再生骨料混凝土的微观形貌和元素成分信息。

1.3 试件配比及分组

原材料氧化物组成物质的量比 5 组(M1 ~ M5)、NaOH 掺量 5 组(N1 ~ N5)、水玻璃掺量 5 组(WG1 ~ WG5)、液胶比 5 组(WB1 ~ WB5)、再生骨料原始强度等级 4 组(AL1 ~ AL4)、再生骨料预处理制度 5 组(AS1 ~ AS5)、养护温度 5 组(CT1 ~ CT5)和养护时间 5 组(CH1 ~ CH5),试块分组及地聚物再生骨料混凝土配比如表 3 所示。

表 3 试块分组及地聚物再生骨料混凝土配比

Table 3 GRAC mixture design and its group

分组	$n(\text{CaO} + \text{MgO}) :$ $n(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$	NaOH 掺量	水玻璃 掺量	液胶比	再生骨料 强度等级	再生骨料 处理制度	养护温 度/℃	养护时 间/h
M1 ~ M5	0.8 ~ 1.2	0.7	0.4	0.55	C40	A	—	—
N1 ~ N5	1.0	0.3 ~ 0.11	0.4	0.55	C40	A	—	—
WG1 ~ WG5	1.0	0.7	0.2 ~ 0.6	0.55	C40	A	—	—
WB1 ~ WB5	1.0	0.7	0.4	0.5 ~ 0.7	C40	A	—	—
AL1 ~ AL4	1.0	0.7	0.4	0.55	C20 ~ C50	A	—	—
AS1 ~ AS5	1.0	0.7	0.4	0.55	C40	A ~ E	—	—
CT1 ~ CT5	1.0	0.7	0.4	0.55	C40	A	20 ~ 100	4
CH1 ~ CH5	1.0	0.7	0.4	0.55	C40	A	60	1 ~ 24

注:A 表示不处理;B 表示水浸泡;C 表示 NaOH 水溶液浸泡;D 表示水玻璃溶液浸泡;E 表示 NaOH 和水玻璃溶液共同浸泡。

2 试验结果与分析

2.1 氧化物物质的量比对抗压强度的影响

地聚物再生骨料混凝土中胶凝材料为地聚物,骨料为再生骨料。其中地聚物的制备就是将具有一定比例,主要包括 CaO、MgO、SiO₂ 和 Al₂O₃ 的氧化物与矿物材料经碱激发使其具有强度的过程。试验选用矿渣和粉煤灰为胶凝材料,原料中 $n(\text{CaO} + \text{MgO}) : n(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 对地聚物再生骨料混凝土抗压强度的影响如图 1 所示。

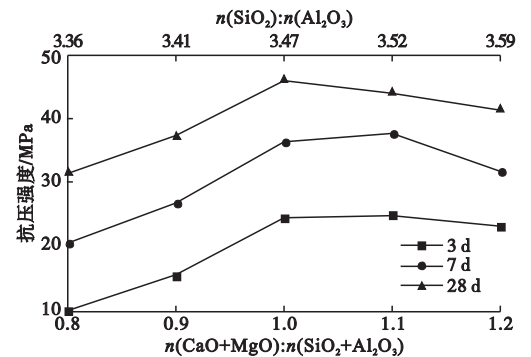


图 1 氧化物物质的量比对抗压强度的影响

Fig. 1 Effect of oxide molar ratio on compressive strength

从图 1 可以看出,随着 $n(\text{CaO} + \text{MgO}) : n(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 的增加,地聚物再生骨料混凝土各龄期的抗压强度均呈现先增加后降低的趋势。根据 J. L. Provis^[9] 的研究,

地聚物根据原料氧化钙含量的不同被划分为低钙和高钙体系,低钙体系为三维网络结构状(N - A - S - H 凝胶结构),强度较低;高钙体系为层状(C - A - S - H 凝胶结构),强度较高,地聚物的低钙和高钙体系结构如图 2 所示。

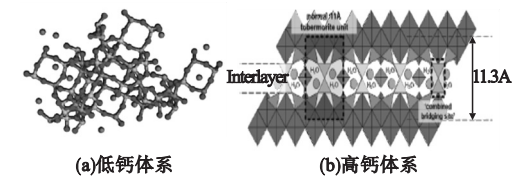


图 2 地聚物的低钙和高钙体系结构

Fig. 2 Low-CaO and High-CaO structure of geopolymer

当原料中 $n(\text{CaO} + \text{MgO}) : n(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 从 0.8 增加到 1.0 时,地聚物从低钙体系过渡到高钙体系,其抗压强度逐渐增加。当此物质的量比超过 1.0 以后,地聚物内部结构为高钙体系的层状结构,体系中的 CaO 和 MgO 已经饱和,强度由 $n(\text{SiO}_2) : n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 控制。根据王晴等^[10] 的研究,高钙体系地聚物中,随着 $n(\text{SiO}_2) : n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 由 3 增加到 4,强度下降。这是由于这个过程是由 PSS 型($[-\text{Si} - \text{Al} - \text{Si} -]$)地聚物转化为 PSSS 型($[-\text{Si} - \text{Al} - \text{Si} - \text{Si} -]$)地聚物,PSS 型地聚物具有更高的强度^[11]。当胶凝材料的 $n(\text{CaO} + \text{MgO}) : n(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 1 时,地

聚物再生骨料混凝土的抗压强度最大。

2.2 激发条件对抗压强度的影响

由于水胶比的改变会导致体系中 pH 值、 Na^+ 迁移能力及水玻璃内部凝胶团的结构改变^[12], 因此, 笔者将水胶比列为碱激发条件之一。通过单因素试验, 研究 NaOH 掺量 (NaOH 质量与胶凝材料质量之比)、水玻璃掺量 (水玻璃质量与液体总质量之比) 和液胶比对地聚物再生骨料混凝土抗压强度的影响。激发条件对抗压强度的影响如图 3 所示。

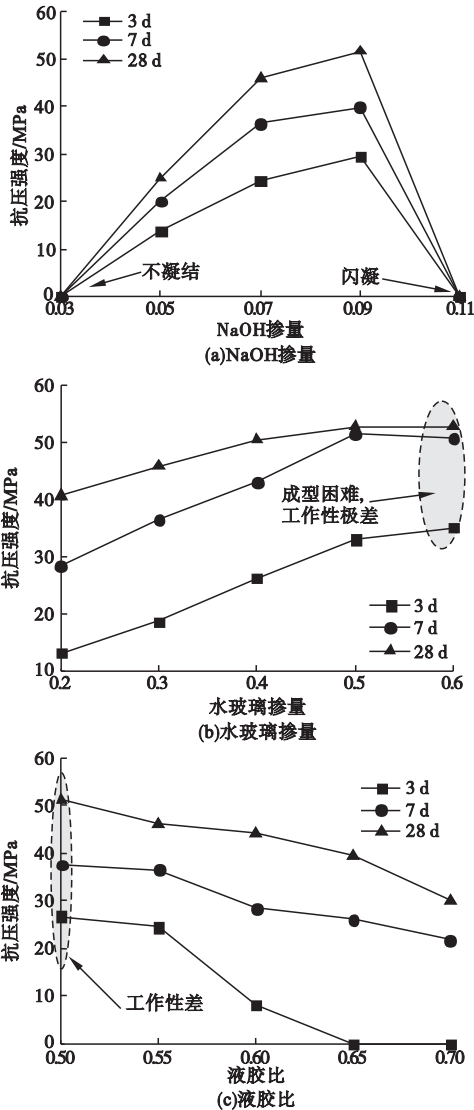


图 3 激发条件对抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of activated condition on compressive strength

从图 3 (a) 可以看出, 当 NaOH 掺量为 0.03 时, 凝土中的胶凝材料不凝结。根据 A. O. Purdon^[13] 的“碱激活”理论和 J. Davidovits^[14]“解聚 - 缩聚”理论, 地聚物的矿物原料要先由碱中的 OH^- 和 Na^+ 激发, 形成游离的硅氧四面单体 $[\text{SiO}_4]$ 和铝氧四面单体 $[\text{AlO}_4]$, 当单体浓度达到饱和时进行缩聚反应形成由硅氧四面单体和铝氧四面单体组成的空间网络结构。体系中 NaOH 掺量过低 (NaOH 掺量 < 0.03) 时无法激发出足够的单体结构, 无法发生缩聚反应, 所以无法形成强度。体系中 NaOH 掺量过高 (NaOH 掺量 > 0.11) 则缩聚反应提前发生, 发生闪凝现象, 形成的地聚物包裹住了原料表面, 使其无法继续发生解聚反应, 此时混凝土的强度很低或为零。当 NaOH 掺量在 0.05 至 0.09 时, 抗压强度与 NaOH 掺量成正比, 抗压强度最大值出现在 NaOH 掺量 = 0.09 处。

水玻璃俗称泡花碱, 是一种能溶于水的硅酸盐。从图 3 (b) 可以看出, 由不同比例的碱金属和二氧化硅所组成。其内部结构为: 以一个无定型的 mSiO_2 为核心, 表面上吸附了硅酸负离子 H_3SiO_4^- , 反离子的一部分 zNa^+ 吸附在紧密层内, 另一部分或部分转变成硅凝胶, 形成电双层结构如图 4 所示^[15]。水玻璃失水

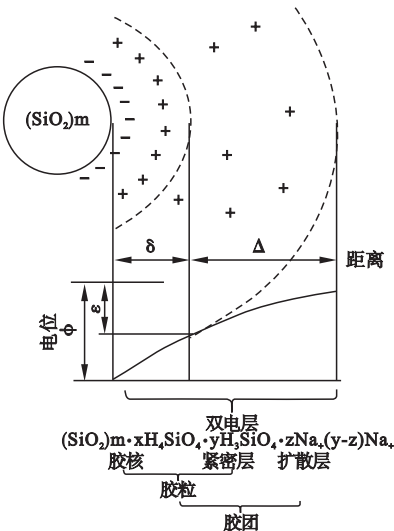


图 4 水玻璃内部的电双层结构

Fig. 4 Double electron layer structure of water glass

就可导致硬化,其机理是随着水分的减少,当水玻璃达到临界浓度值后,溶剂化层被迫减薄,扩散层的 Na^+ 离子被迫回到紧密层,胶粒失去稳定性而聚结增大或凝成凝胶^[16]。

地聚物再生骨料混凝土的拌和过程中,液体润湿胶凝材料和骨料后,水分被迅速吸收,导致水玻璃率先固化形成立体网状骨架的硅凝胶,也就是所谓的前驱体^[17]。随后,随着反应的进行,矿渣和粉煤灰表面被碱性环境激发出的游离的硅氧四面单体和铝氧四面单体迅速与前驱体相结合,逐渐生长,并相互连接,形成最初的骨架结构。骨架结构是否完整,直接影响了地聚物胶凝材料的强度。从图 3(b)中还可以看出,随着水玻璃占液体总量的增加,抗压强度逐渐增加,但当水玻璃掺量达到 0.5 以后,其强度增长并不明显,当水玻璃掺量达到 0.6 时,强度基本不再变化,而且由于液体中存在过多的水玻璃,拌和物非常黏稠,极难成型。从图 3(b)还可以看出,水玻璃掺量对地聚物再生骨料混凝土的早期强度影响较大,龄期为 3 d 时, $m(\text{水玻璃}):m(\text{液体})=0.2$ 时,抗压强度为 13.38 MPa, $m(\text{水玻璃}):m(\text{液体})=0.5$ 时,

抗压强度为 33.06 MPa,两者相差 2.47 倍;当龄期为 28 d 时,两个试块的强度分别为 40.37 MPa 和 52.82 MPa,两者相差只有 1.3 倍。这说明水玻璃多,则体系中的前驱体多,反应早期骨架更完整,所以早期强度高。如果不是特意的追求早期强度,制备地聚物再生骨料混凝土时,可以适当地降低水玻璃的掺量,其强度在随着龄期会有明显的提升,这样做的好处在于可以降低原材料的成本,以及避免由水玻璃过量产生的速凝。

液胶比指的是液体总量(水玻璃和水的质量)与胶凝材料之比。从图 3(c)可以看出,由于液体中大量水玻璃的存在,地聚物再生骨料混凝土的液胶比不能很低,一般不能低于 0.5,否则失去工作性而无法成型。其发展规律与水泥混凝土体系相似,即液体越多抗压强度越低,值得注意的是当液胶比为 0.65 和 0.7 时,其 3 d 强度为 0,但后期强度增长很快,可以达到 C20 和 C30 的等级。

2.3 再生骨料性能对抗压强度的影响

再生骨料的性能对地聚物再生骨料混凝土抗压强度的影响包括再生骨料预处理方式和再生骨料原始强度等级的影响(见图 5)。

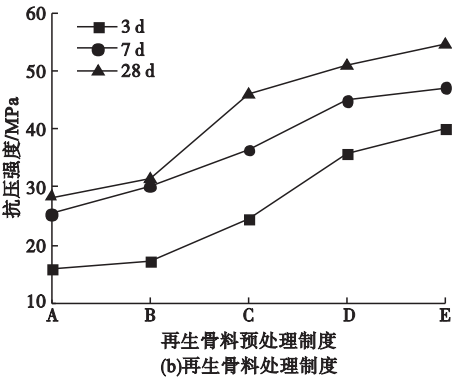
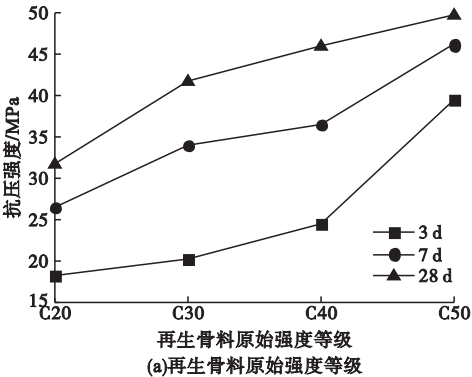


图 5 再生骨料原始强度等级和预处理制度对抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of aggregate strength level and enhanced method on compressive strength

从图 5(a)可以看出,采用原始强度等级为 C20、C30、C40 和 C50 的再生骨料制备地聚物再生骨料混凝土,保证同样的级配、砂率及其他制备条件。随着再生骨料原始强度等级的增加,地聚物再生骨料混凝土的强度也

增加。从图 5(b)可以看出采用水浸泡的方法的效果最差。采用氢氧化钠水溶液浸泡的预处理方式略强于用水浸泡,但强度也低于 C 预处理方式组,强度低是由于旧水泥砂浆吸收水分而增加了实际水胶比,强度比水浸

泡组略高是由于高浓度的碱环境会激活旧水泥砂浆中的活性物质,如未反应的水泥颗粒,但是由于这种效应太过微弱,强度只是略有增加。采用水玻璃浸泡的预处理制度会大大提升地聚物再生骨料混凝土的抗压强度,其效果明显优于 C 预处理方式,这是由于水玻璃覆盖在再生骨料表面后,会提前形成大量前驱体,使得地聚物再生骨料混凝土的强度得到大幅提升。效果最佳的预处理制度是采用氢氧化钠改性的水玻璃溶液进行浸泡,它

结合了 B 预处理方式和 D 预处理方式的优点,所以强度最高。

2.4 养护制度对抗压强度的影响

图 6 为养护制度对地聚物再生骨料混凝土抗压强度的影响。其中图 6(a)为养护温度的影响,温度分别为 20 ℃、40 ℃、60 ℃、80 ℃和 100 ℃,养护时间统一为 4h;图 6(b)为养护时间的影响,养护时间分别为 1 h、2 h、4 h、8 h 和 24 h,养护温度统一为 60 ℃。

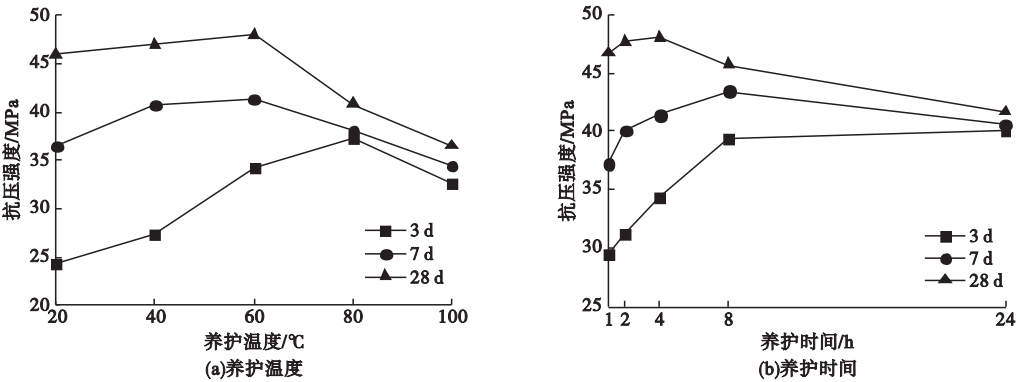


图 6 养护制度对抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of curing system on compressive strength

从图 6(a)可以看出,随着养护温度的提升,地聚物再生骨料混凝土的抗压强度呈现先增加后降低的趋势,这说明养护温度不是越高越好,适当的温度可以加速地聚物胶凝材料的反应过程,但当养护温度超过某一临界值后,过高的温度会破坏地聚物再生骨料混凝土的内部结构,使其水化过程不能完成,从而降低了抗压强度。从图 6(a)中还可以看出,不同龄期抗压强度出现下降的拐点不一致。龄期为 3 d 时,地聚物再生骨料混凝土抗压强度最大值出现在养护温度为 80 ℃,而龄期为 7 d 和 28 d 时,最大值出现在养护温度为 60 ℃。当养护温度超过 60 ℃时(80 ℃和 100 ℃),地聚物再生骨料混凝土的后期强度(7 d 和 28 d)的提升不大,说明过高的养护温度抑制了地聚物胶凝材料的反应过程。

从碱激发条件对地聚物影响的分析可

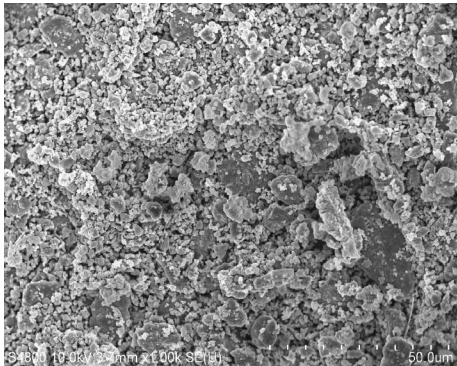
知,地聚物胶凝材料的反应过程可以大致分为 2 个阶段。第 1 个阶段为体系中的水玻璃率先析出、固化,形成立体网状骨架的硅凝胶。第 1 阶段地聚物原料中的硅、铝物质解聚形成游离的硅氧四面单体和铝氧四面单体,这些游离的硅氧四面单体和铝氧四面单体重新聚集在立体网状骨架的硅凝胶上,形成完整的网络结构。第 1 个阶段主要发生在反应早期,所以对地聚物胶凝材料的早期强度贡献较大。第 2 阶段贯穿整个反应过程,但是对地聚物胶凝材料的后期强度贡献较大。所以,适当升高养护温度可以提升地聚物再生骨料混凝土的抗压强度,这是由于适当的温度可以使更多的水玻璃固化,形成的网络骨架更完整,提高早期强度。但是过高的温度(80 ℃和 100 ℃)会使体系中的水分变成气态,形成了大量的孔洞,降低了整个试件的强度,而且根据 J. Davidovits^[1]“解聚 -

缩聚”理论,过高的温度还会抑制体系中硅、铝物质的聚合反应,严重降低地聚物胶凝材料的后期强度。

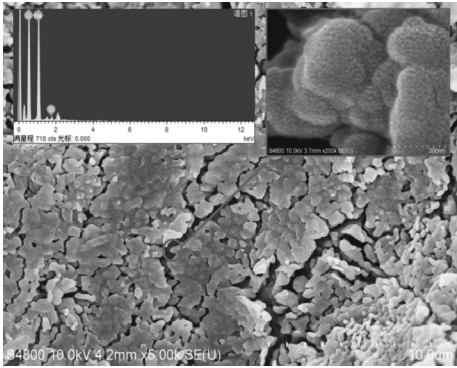
图 6(b)为养护时间对地聚物再生骨料混凝土抗压强度的影响。延长养护时间会提升地聚物再生骨料混凝土的 3 d 强度,但是随着养护时间的增加,强度逐渐降低,尤其是 28 d 强度,最大强度出现在养护时间为 4h 时,再延长养护时间,则强度逐渐降低。这说明随着养护时间的延长,在反应的最初阶段,胶凝体系中不断有硅氧四面单体和铝氧四面体被解聚,浓度饱和后发生缩聚反应,养护时间越长则发生缩聚反应越多,从而早期强度越高。但是过长的养护时间会透支体系中具有活性的硅、铝物质,使其后期产生的游离的可以进行缩聚反应的硅氧四面单体和铝氧四面单体变少,从而降低了后期强度。由图 6(b)可知,地聚物再生骨料混凝土的最佳养护时间为 2 h 或者 4 h,养护 4 h 的抗压强度最高(47.7 MPa),但是养护 2 h 的抗压强度(46.6 MPa)只比 4 h 的略低,考虑到成本问题,在工业生产中,选择养护时间为 2 h 为宜。

3 微观分析

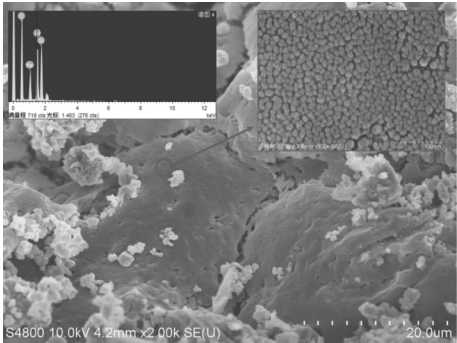
采用扫描电子显微镜(SEM)表征地聚物再生骨料混凝土中的地聚物部分在不同龄期下的表观形貌,并通过能谱仪(EDS)分析了其化学成分如图 7 所示。



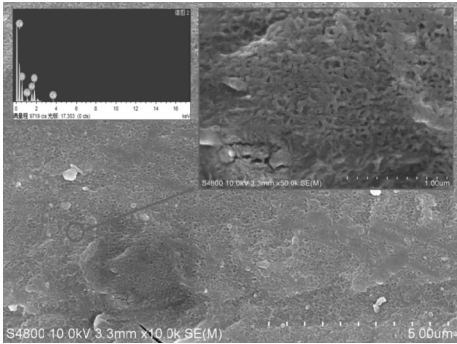
(a)龄期1 h



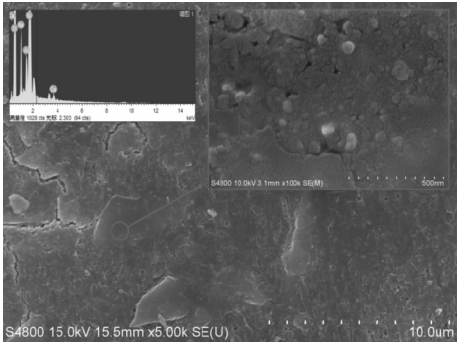
(b)龄期1 d



(c)龄期3 d



(d)龄期7 d



(e)龄期28 d

图 7 地聚物再生骨料混凝土的微观分析
Fig. 7 Microstructure of geopolymer recycled aggregate concrete

从7(a)地聚物再生骨料混凝土龄期为1h的SEM图片可以看出,由于龄期太早,反应才刚刚开始,可以看出参加反应的原料松散地分布在SEM图片上,而且无明显的反应生成物。

从7(b)反应龄期为1d时的SEM图片可以看到,反应原料已经基本消失,原料表面形成了骨架状结构,其特征为形状类似的链状物体相互连接在一起形成了三维的比較致密的结构。将图中局部区域进行放大,放大倍数为20万倍时发现组成这些链状物体结构的基本单元为10~20nm的球形结构。通过EDS分析发现,这种基本单元的化学元素组成为Si、Na和O,所述前驱体以及朱纯熙^[15-16]对水玻璃失水凝结的初始产物其结构和组成^[17]相一致,这也验证了关于地聚物反应初期水玻璃率先在原料表面析出形成硅凝胶的说法。

从7(c)反应龄期为3d时的SEM图片可以看出,原来比較致密的结构变得更加致密,聚合反应正在进行,大量的硅氧四面体和铝氧四面体聚集到了由水玻璃析出产生的硅凝胶三维骨架上,并相互连接,逐渐形成一个整体,其力学强度也因此得到了提升。图中红色区域放大30万倍后发现,仍然存在硅凝胶的球形结构。通过EDS的分析发现,这种结构的元素成分发生了变化,其元素组成为Si、Na、O和Al,比龄期为1d时多了Al元素,说明体系中的铝氧四面体已经附着到了硅凝胶表面上。

从7(d)反应龄期为7d时的SEM图片可以看出,地聚物胶凝材料表面更加致密,已经基本形成一个整体,地聚物再生骨料混凝土的抗压强度也因此得到了提升。通过对图中红色区域进行分析发现,微小的球状结构已经观察不到,取而代之的是相互连接的条状结构,这是由于体系总的硅氧四面体和铝氧四面体不断附着到球状结构上,使其相互连接,并形成了空间三维的网状结构。

通过EDS分析发现,其元素组成为Si、Na、Al、Ca和O,这说明地聚物的反应产物也包括含钙的凝胶物质^[18-20],由硅铝氧组成的网络结构和由钙形成的凝胶共同加强了地聚物的结构,使其更加密实。

从图7(e)反应龄期为28d时的SEM图片可以看出,地聚物表面非常致密,已经完全形成了一个整体,类似于网状结构消失不见,说明地聚物的“解聚-聚合”已经基本完成,地聚物再生骨料混凝土的抗压强度也得到了大幅提升。图中局部区域放大10万倍后发现,龄期为7d时相互连接的条状结构已经消失不见,地聚物的基本单元相互紧密地结合在一起,其EDS分析发现元素组成和7d时一样,都是Si、Na、Al、Ca和O,说明没有形成新的物质,而只是反应产物持续填充到了原结构的空隙上,使地聚物的表面更加紧密。

4 结 论

(1)地聚物再生骨料混凝土原材料的氧化物 $n(\text{CaO} + \text{MgO}) : n(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 为1时抗压强度最优。NaOH掺量过少或过多都会严重影响地聚物再生混凝土的制备,合理范围为0.05~0.09,当NaOH掺量为胶凝材料质量的0.09时,其强度最大。水玻璃的加入会增强地聚物再生骨料混凝土的抗压强度,但加入过量则会使其失去工作性,最佳掺量为 $m(\text{水玻璃}) : m(\text{液体}) = 0.4$ 或0.5。

(2)采用NaOH改性的水玻璃处理再生骨料可以有效地提升再生骨料混凝土的抗压强度。原始强度等级高的再生骨料也会提升地聚物再生骨料混凝土的强度。地聚物再生骨料混凝土的最佳养护制度为养护温度60℃,养护时间为2~4h。

(3)通过微观分析发现,地聚物的反应过程在龄期早期阶段,水玻璃对其影响较大,在龄期的后期阶段,体系中硅氧四面体和铝氧四面体的聚合反应对其影响较大。

参考文献

- [1] DAVIDOVITS J. Geopolymers-inorganic polymeric new materials [J]. Therm anal, 1991, 37(8): 1633 - 1656.
- [2] 施惠生, 夏明, 郭晓璐. 粉煤灰基地聚合物反应机理及各组分作用的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(7): 972 - 979.
(SHI Huisheng, XIA Ming, GUO Xiaolu. Research development on mechanism of fly ash-based geopolymer and effect of each component [J]. Acta silicate, 2013, 41(7): 972 - 979.)
- [3] DAVIDOVITS J. 30 years of successes and failures in geopolymer applications market trends and potential breakthroughs [C]. Geopolymer 2002 conference, Melbourne, Australia, October, 2002.
- [4] 王晴, 刘磊, 吴昌鹏. 矿渣基无机矿物聚合材料力学性能的研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 23(1): 73 - 76.
(WANG Qing, LIU Lei, WU Changpeng. Research on Mechanical Property of Slag Based Geopolymer [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science) 2007, 23(1): 73 - 76.)
- [5] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(11): 1445 - 1449.
(XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [J]. Journal of tongji university (natural science), 2007, 35(11): 1445 - 1449.)
- [6] 李佳彬. 再生混凝土基本力学性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
(LI Jiabin. Investigation on basic mechanic properties of recycled aggregate concrete [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.)
- [7] 周静海, 刘丹, 董健飞. 废弃纤维再生混凝土的本构关系[J]. 混凝土, 2013(2): 59 - 63.
(ZHOU Jinghai, LIU Dan, DONG Jianfei. Constitutive relation of waste fiber recycled concrete [J]. Concrete, 2013(2): 59 - 63.)
- [8] 周静海, 何海进, 孟宪宏. 再生混凝土基本力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(3): 464 - 468.
(ZHOU Jinghai, HE Haijin, MENG Xianhong. Basic mechanical properties of recycled concrete experimental study [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(3): 464 - 468.)
- [9] PROVIS J L, RUPERT J. X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders [J]. Cement and concrete research, 2012, 42(12): 855 - 864.
- [10] 王晴, 康升荣, 吴丽梅. 地聚合物凝胶体系中 N - A - S - H 和 C - A - S - H 结构的分子模拟[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 184 - 191.
(WANG Qing, KANG Shengrong, WU Limei. Molecular simulation of N - A - S - H and C - A - S - H in geopolymer cementitious system [J]. Journal of building materials, 2020, 23(1): 184 - 191.)
- [11] XU H, DEVENTER J S J. Ab initio calculations on the five-membered aluminosilicate framework links model: implications for dissolution in alkaline solutions [J]. Computers and chemistry, 2000, 24(5): 391 - 404.
- [12] PERERA D S, BANCE E R, FINNIE K S, et al. Disposition of water in metakaolinite based geopolymers [J]. Ceramic transactions, 2009, 43(2): 218 - 223.
- [13] PURDON A O. The action of alkalis on blast-furnace slag [J]. Socchemind, 1940(59): 191 - 192.
- [14] DAVIDOVITS J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials [J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 1991, 37: 1633 - 1656.
- [15] 朱纯熙, 卢晨. 水玻璃硬化的认识过程[J]. 无机盐工业, 2001, 33(1): 22 - 25.
(ZHU Chunxi, LU Chen. The progress to recognize the hardening mechanism of waterglass [J]. Inorganic chemicals industry, 2001, 33(1): 22 - 25.)
- [16] 朱纯熙. CO₂ 水玻璃砂硬化机理的认识过程[J]. 热加工工艺, 1998(6): 46 - 47.
(ZHU Chunxi. Process of understanding the hardening mechanism of CO₂ sodium silicate sand [J]. Hot working technology, 1998(6): 46 - 47.)
- [17] RAHIER H, WASTIELS J. Reaction mechanism, kinetics and high temperature transformations of geopolymers [J]. Journal of material science, 2007(42): 2982 - 2996.
- [18] OH J E. Microstructural and compositional change of NaOH-activated high calcium fly ash by incorporating Na-aluminate and co-existence of geopolymeric gel and C - S - H (I) [J]. Cement & concrete research, 2012(42): 673 - 685.
- [19] 王晴, 丁兆洋, 贺天姝. 地聚合物混凝土抗压强度发展规律的研究[J]. 商品混凝土, 2010(9): 39 - 42.
(WANG Qing, DING Zhaoyang, HE Tianshu. Research on development of geopolymer concrete compressive strength [J]. Ready-mixed concrete, 2010(9): 39 - 42.)
- [20] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(11): 1445 - 1449.
(XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [J]. Journal of tongji university (natural science), 2007, 35(11): 1445 - 1449.)

(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)