

水玻璃激发碱-矿渣水泥的水化放热和凝结性能

何娟, 杨长辉

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400045)

摘要:水玻璃模数和碱当量对碱-矿渣水泥的水化放热和凝结性能有重要影响。该文系统地探讨了水玻璃模数和碱当量对碱-矿渣水泥水化放热和浆体凝结时间及抗压强度的影响规律。结果表明:随模数的增加,水化热降低,凝结时间延长,抗压强度先增加,随后降低;随碱当量的增加,水化热增加,凝结时间稍有延长,强度增加。比较合理的水玻璃模数 M_s 在 1.0~2.0, 碱当量为矿渣质量的 3%~6%。

关键词:水玻璃;碱-矿渣水泥;凝结;强度;水化热

中图分类号: TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)03-0147-06

Hydration Heat Evolution and Setting Performance of Alkali-slag Cement Activated with Water Glass

HE Juan, YANG Chang-hui

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The effect of dosage and modulus of water glass on the early hydration and setting performances of alkali-slag cement is very important. The variation of hydration heat and setting time and compressive strength of the alkali-slag cement with its modulus and alkali content are studied. It is found that with the increase of modulus, the hydration heat decreases and the setting time prolongs gradually, and the compressive strength increases first, then decreases. When the dosage of Na_2O increases, the hydration heat increases. And the setting time increases slightly and the compressive strength shows the trend of increasing. The reasonable modulus of water glass M_s is about 1.0~2.0, and the dosage is about 3%~6% of the mass of slag.

Key words: water glass; alkali-slag cement; setting; strength; hydration heat

碱-矿渣水泥具有高强、低水化热、高抗渗、高抗冻和高抗蚀等优异性能,而且这种水泥生产工艺简单、能处理大量的工业废渣、节约能源、成本较低,可以说碱-矿渣水泥是一种环保型“绿色水泥”,因而自 20 世纪 60 年代起就受到国内外学者的重视^[1-5]。

用水玻璃作碱组分时,碱-矿渣水泥水化凝结硬化快,强度高,引起了广泛的关注。潘志华^[6]的实验结果表明水玻璃的最佳掺量和激发强度与其模数有关。吴其胜^[7]认为水玻璃合理的模数 M_s 为 0.8~

1.2。当水玻璃模数 M_s 为 1.2 时,碱当量以 6%~8% 为宜。侯云芬^[8]的实验结果表明,随着水玻璃模数的增大,粉煤灰基矿物聚合物的抗压强度增大,但是当模数超过 1.4 后,其抗压强度降低。Wang^[9]指出水玻璃模数 M_s 为 1~1.5 时,可以获得较高的力学强度;T. Bakharev^[10]认为水玻璃模数 M_s 为 1.25 时,可以产生最大的力学强度,和 Wang 的结果比较一致。Fernando^[11]指出,较高的水玻璃模数可获得较高的水化水平。Cengiz^[12]的实验表明随水

收稿日期:2010-11-18

基金项目:国际合作项目(2009DFR50450);重庆大学大型仪器设备开放基金(2010121504)

作者简介:何娟(1974-),女,博士生,主要从事水泥基复合材料研究,(E-mail)hjxd@yahoo.com.cn。

杨长辉(通讯作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)yqh@cqu.edu.cn。

玻璃的模数和碱当量的增加,浆体的终凝时间缩短。Vladimír živica^[13]指出随水玻璃碱当量的增加,浆体的初终凝时间均表现出减小的趋势。而 J. J. Chang^[14]在实验中指出,凝结时间和水玻璃的模数没有固定的关系,但随着碱当量的增加,初终凝时间均会减小。

综上所述,碱-矿渣水泥的凝结时间和强度随水玻璃模数和碱当量的变化规律,各学者的研究结果有较大的差异:部分认为随模数和碱当量增加,凝结时间和抗压强度会增加;部分认为随模数和碱当量增加,凝结时间和抗压强度会降低。对于试验现象的解释,也存在较大的差异。重庆地区矿渣丰富,为了更好的利用这些资源,有必要研究碱激发矿渣水泥的性能。试验选取了重庆地区的高炉矿渣,从水

化热的角度,探讨了水玻璃模数、碱当量对碱-矿渣水泥凝结时间、力学性能的影响规律,以期确定为合理的水玻璃模数和碱当量提供一定的理论依据。

1 试验

1.1 原材料

矿渣:重庆钢铁集团水淬高炉矿渣,密度 2.85 g/cm³,比表面积为 453 m²/kg,主要化学成分见表 1,质量系数为 1.68,碱性系数为 1.07,活性系数为 0.37。

碱组分:水玻璃为工业产品,物理化学指标见表 2,试验中水玻璃模数通过加入 NaOH 调至要求模数;NaOH 为四川德阳片碱,纯度 99%。

水:自来水。

表 1 矿渣化学成分

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
30.97	11.40	37.59	1.79	7.60	0.22	0.66	0.37	1.01

表 2 水玻璃物理化学指标

SiO ₂ /%	Na ₂ O/%	M _s	波美度/°Bé	密度/(g·cm ⁻³)
26.49	9.95	2.75	40.0	1.405

1.2 实验方法

1.2.1 凝结时间的测定 按照 GB/T 1346—2001《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》进行。水玻璃的掺量以 Na₂O 当量计,分别取:2%、3%、4%、5%、6%和 7%(为矿渣质量的百分比);模数分别取 0.5、0.8、1.0、1.2、1.5、1.8、2.0、2.2 和 2.5。

1.2.2 抗压强度的测定 水泥净浆强度测定试体为 40 mm×40 mm×40 mm 的立方体,在温度为 20±2℃、RH>90%湿空气环境带模养护 24 h 后脱模后,然后再放入 20±1℃的水中养护至预定龄期测试强度。

1.2.3 水化热的测定 水化热的测定使用美国 TA 公司水化热检测设备 TAM air 及其配套实验方法,仪器检测水化放热原理为控制恒温通道内环境温度稳定在一定值(20℃),通过热电偶检测吸收水泥水化所放出的热量,与比热相同的参照样品比较,从而得出水泥水化放热情况。测定时,矿渣质量 5 g,水渣比为 0.45,水玻璃模数分别取 0.5、0.8、1.5、2.0,碱当量分别取 3%、4%、5%和 6%(为矿渣质量的百分比)。

2 结果与讨论

2.1 碱-矿渣水泥的凝结时间与抗压强度

2.1.1 水玻璃模数对碱-矿渣水泥凝结时间与抗压强度的影响 水玻璃模数对碱-矿渣水泥凝结时间与抗压强度的影响见图 1 和图 2,碱当量为矿渣质量的 4%,水渣比均为 0.25。随水玻璃的模数从 0.8 增加到 2.50,浆体的初、终凝时间均呈现出延长的规律。而 M_s 由 0.8 到 2.0 之间变化时,凝结时间是逐渐增长的;当 M_s≥2.0 时,凝结时间陡然增加很多,且 M_s=2.5 时的凝结时间最长,这和马保国^[15]的试验结果比较相似。M_s 为 0.5 时的初、终凝时间比 M_s 为 0.8 的浆体要大得多,不符合上述规律。模数为 0.5 的水玻璃碱性最高,[SiO₄]⁴⁻含量最小。而水化早期,是水玻璃中[SiO₄]⁴⁻和矿渣颗粒溶解出来的 Ca²⁺之间的反应^[16-17]。碱度大,虽然可以溶解出较多的 Ca²⁺,但较少的[SiO₄]⁴⁻,满足不了生成 C-S-H 的需求,因此,初、终时间较长。而当模数大于 0.8 之后,碱性会逐渐降低,使矿渣颗粒的解体受到影响;而且,随模数增加,水玻璃中硅酸根阴离子的单聚体减少、多聚体增加,使硅氧基团的活化点减少,从而延长了碱-矿渣水泥的凝结时间^[18-19]。

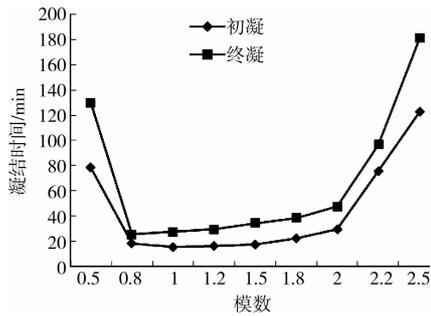


图1 水泥凝结时间随水玻璃模数的变化

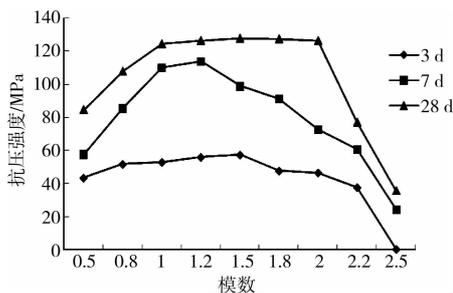


图2 水泥抗压强度随水玻璃模数的变化

图2的结果也可以看出,随水玻璃模数的增大,3个龄期的抗压强度都呈现出先增大,后减小的趋势,模数为2.5时的抗压强度最小。模数小时(例如 $M_s=1.5$),碱性大,但引入的硅酸根阴离子少;随模数增加,引入硅酸根离子增加,所以强度增加。但模数过大(例如 $M_s \geq 2.0$),则水玻璃溶液的碱性降低,矿渣颗粒的解体减慢,对碱-矿渣水泥抗压强度的增长有一定的抑制作用。

综合图1、图2,可以认为,作为碱-矿渣水泥的碱组分,水玻璃比较合理的模数应该在1.0~2.0之间。对于某一给定的水玻璃-矿渣-水体系,在强度允许条件下, M_s 的选择可往较大值的方向确定,从而有利于延缓碱-矿渣水泥的快速凝结。

2.1.2 碱当量对碱-矿渣水泥凝结时间与抗压强度的影响 进行碱当量对碱-矿渣水泥凝结性能影响的试验时,水玻璃模数 M_s 固定为1.5,水渣比为0.25。从图3的结果可以看出,碱当量2%时,初、终凝时间最长;当碱当量大于3%后,随碱当量增加到6%,初、终凝时间基本都呈现出增长的趋势(和付兴华^[20-21]试验结果规律一致),但增长的幅度比较小:3%时的初、终凝时间为17 min和21 min;6%时为26 min和31 min。初、终凝间隔较短,在3~5 min之间。但碱当量7%时,初、终凝时间均突然变小。图4显示,碱当量2%时,碱矿渣浆体在3 d和7 d龄期时,没有强度,28 d时才具有一定的强度(31.3 MPa)。碱当量在3%~6%之间变化时,强度呈现出逐渐增长的趋势,7%时,强度降低。

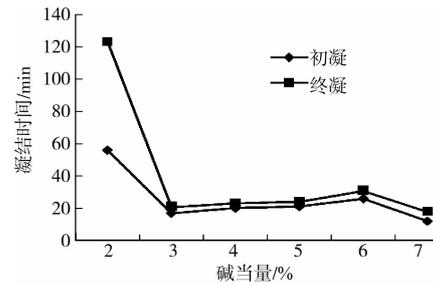


图3 水泥凝结时间随碱当量的变化

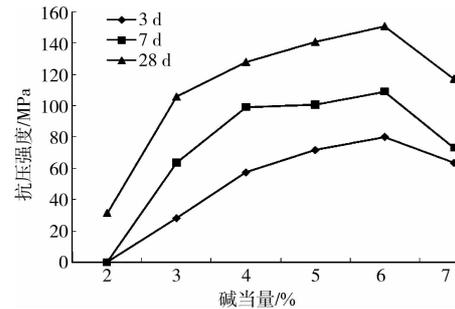


图4 水泥抗压强度随碱当量的变化

碱当量为2%时,对矿渣的激发能力不足,凝结时间长,强度低。当碱当量超过3%时,随着碱当量的增加,各试样的凝结时间逐渐增加,这和一些学者的试验结果相矛盾^[12-14,22],反映出碱的含量对 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 与 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 的聚合反应速度具有较大的、复杂的影响,可能和具体试验中使用的水玻璃及矿渣的结构有关,有待于继续深入的研究。试验中,随碱当量增加、碱的塑化作用,使浆体略有变稀一些,可能会对碱产生稀释作用,碱的激发作用暂时受到影响,使凝结时间略有延长,但没有影响随后强度的发展。而碱当量7%时,浆体突然变稠,凝结时间变短,应该是由碱的激发作用强于碱的塑化作用的结果。浆体干稠不好成型造成强度的降低。

因此,综合图3、图4,比较合适的碱当量宜在3%~6%之间。而且,为满足施工要求,应该考虑加入相应的缓凝物质,延缓碱-矿渣水泥的凝结时间。

2.2 碱-矿渣水泥的水化热

2.2.1 水玻璃模数对碱-矿渣水泥水化热的影响

碱-矿渣水泥的水化放热曲线有3种^[17,23-26],水玻璃激发的碱-矿渣水泥的水化放热曲线在诱导期之前会出现1个主初始峰和1个附加初始峰,在诱导期之后出现1个加速峰,由于主初始峰和附加初始峰出现的时间很接近,会合并成为1个峰。初始峰可归结于矿渣颗粒的润湿和溶解,附加初始峰则是由于从矿渣颗粒溶解出来的 Ca^{2+} 和由水玻璃溶解出来的阴离子或阴离子团之间的反应引起的,其反应及反应产物(C-S-H)对水泥浆体的凝结时间和强度

有重要的影响^[17,26-27]。生成的C-S-H凝胶的沉淀导致了诱导期的出现,而加速峰可归结于矿渣水化的加速。从图5和图7可以看出,试验中,加速峰之前只显示出1个合并了的峰。

图5显示,碱当量取4%,模数依次为0.8、1.5、2.0时,放热曲线的第1个峰变低变宽,而加速峰后移,并且变低。第1个峰出现的时间很快,大约在加水后4~5min之间。模数为0.5时,第1个峰低,加速峰要高一些,出现的也早一些。而模数为0.8、1.5、2.0时,加速峰分别出现在29、35、38h附近,且加速峰比第1个峰要低。

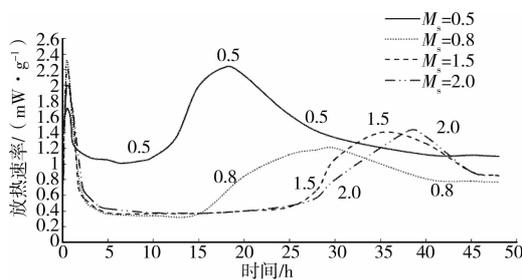


图5 模数对碱-矿渣水泥水化放热速率的影响(4%Na₂O)

前面凝结时间试验表明,模数在0.8之后,随模数的增加,初终凝时间都有所延长,这似乎和水化热曲线反应的规律是一致的。第1个峰反映了矿渣颗粒的润湿和溶解以及从矿渣颗粒溶解出来的Ca²⁺与水玻璃溶解出来的阴离子或阴离子团之间的反应情况。峰越低越宽,放热速率越慢,是由于随模数增加,矿渣的溶解、解体减缓,Ca²⁺和[SiO₄]⁴⁻反应减缓引起的。只是模数为0.5时,情况有所不同,可能是由于碱性过大,[SiO₄]⁴⁻阴离子结构的显著不同造成。

随着模数的增加,碱-矿渣水泥水化的累积水化热是逐渐减少的,从图6中可以清楚地看出这点。随模数增加,水玻璃中[SiO₄]⁴⁻减少,且单聚体减少、多聚体增加,使硅氧基团的活化点减少,则矿渣的溶解、激发受到抑制,水化过程减缓,水化热减少。模数如果过大,虽然能降低水化热,但水化程度降低会使强度受到影响。因此,结合凝结时间、强度、水化热,水玻璃比较适宜的模数约为1.5。

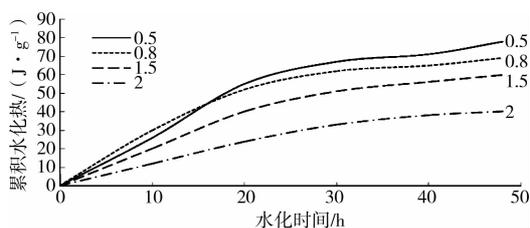


图6 模数对碱-矿渣水泥累积水化热的影响(4%Na₂O)

2.2.2 碱当量对水泥水化热的影响 试验时,水玻璃模数为1.5,图7和图8显示了碱当量对碱-矿渣水泥水化热的影响。从图7可以看出,随碱当量的增加,第一个峰更前、更高、更窄;加速峰更高、更前;诱导期变短;累积水化热增大(图8)。主要是由于增加碱组分的量,碱-矿渣水泥体系中碱性增强,[SiO₄]⁴⁻增多,则矿渣的溶解、解体加快,Ca²⁺和[SiO₄]⁴⁻的反应加快,可促进碱-矿渣水泥的水化,提高同龄期时,碱-矿渣水泥的水化程度,使峰出现的时间提前,增加了总的水化热。而且,生成的C-S-H凝胶量大,易于沉淀,则诱导期随碱当量的增加变短。当碱当量为6%时,变化比较明显。加速峰提前到12h左右,48h水化热快接近150J。因此,从降低水泥水化热的角度考虑,碱-矿渣水泥碱当量不宜超过6%。另外,从水化热的角度也解释了,随碱当量的增加,浆体的抗压强度会有所提高。

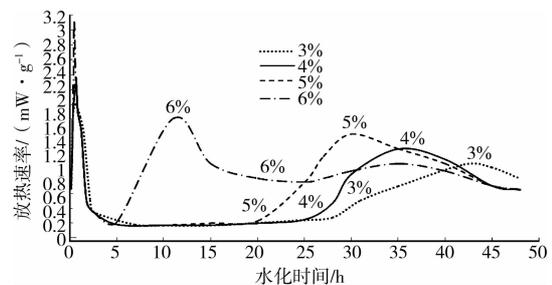


图7 碱当量对碱-矿渣水泥水化放热速率的影响(M_s=1.5)

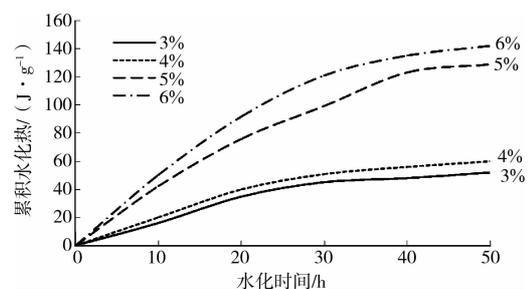


图8 碱当量对碱-矿渣水泥累积水化热的影响(M_s=1.5)

3 结论

1)当水玻璃的模数 M_s 由0.8到2.0之间变化时,凝结时间逐渐延长;抗压强度先增长,随后减小,水玻璃比较合理的模数 M_s 应该在1.0~2.0之间。

2)水玻璃模数取1.5,碱当量2%时,凝结时间最长,由3%增加到6%时,初终凝时间逐渐延长;抗压强度呈现递增的趋势,因此适宜的碱当量在3%~6%。

3)水玻璃模数分别取0.8、1.5、2.0时,水化放热峰第1个峰值增加,加速峰后移,诱导期延长,累

积水化热减小。

4)水玻璃的模数 M_s 为 1.5 时,碱当量从 3% 增加到 6%,第 1 个峰前移变窄增高,加速峰前移增高,诱导期变短,累积水化热增大。

参考文献:

- [1] 吴中伟. 绿色高性能混凝土与科技创新[J]. 建筑材料学报,1998,1(1):1-7.
WU ZHONG-WEI. Green high performance concrete and innovation[J]. Journal of Building Materials,1998,1(1):1-7.
- [2] LI CHAO, SUN HENG-HU, LI LONG-TU. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40 (9): 1341-1349.
- [3] PALACIOS M, HOUST Y F, BOWEN P, et al. Adsorption of superplasticizer admixtures on alkali-activated slag pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39 (8): 670-677.
- [4] JAE EUN O H, PAULO J M. The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40 (2): 189-196.
- [5] ROY D M. Alkali-activated cements: Opportunities and challenges[J]. Cem. Concr. Res, 1999,29(2):249-254.
- [6] 王冬冬,潘志华,李栓民,等. 矿渣活性激发过程中铝硅酸盐物质结构变化的 NMR 探析[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28 (3):426-430.
WANG DONG-DONG, PAN ZHI-HUA, LI SHUAN-MIN, et al. NMR study on the structure transformation of the aluminosilicate anions in slag during the activation process by alkalis[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2009, 28 (3):426-430.
- [7] 吴其胜. 水玻璃模数对碱-矿渣水泥性能的影响[J]. 水泥工程,1999(5):10-11.
WU QI-SHENG. Influence of glass water module on performance of alkali slag cement [J]. Cement Engineering, 1999(5):10-11.
- [8] 侯云芬,王栋民,李俏,等. 水玻璃性能对粉煤灰基矿物聚合物的影响[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36 (1): 61-68.
HOU YUN-FEN, WANG DONG-MIN, LI QIAO, et al. Effect of water glass performance on fly ash-based geopolymers [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36 (1): 61-68.
- [9] WANG S D, SCRIVENER K, PRATT P. Factors affecting the strength of alkali-activated slag [J]. Cement and Concrete Research, 1994(24):1033-1043.
- [10] BAKHAREV T, SANJAYAN J G, CFENG Y B. Alkali-activation of Australian slag cements[J]. Cement and Concrete Research,1999,29(1):113-120.
- [11] FERNANDO PACHECO-TORGAL, JOÃO CASTRO-GOMES, SAID JALALI. Alkali-activated binders: A review Part 1, Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration product [J]. Construction and Building Materials,2008,22(7):1305-1314.
- [12] CENGIZ DURAN ATIS, CAHIT BILIM, OKAN KARAHAN, et al. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 548-555.
- [13] VLADIMÍR ŽIVICA. Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(7): 1463-1469.
- [14] CHANG J J. A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(7): 1005-1011.
- [15] 马保国, 亓萌, 李宗津. 碱-矿渣水泥快速凝结的影响因素与机理研究[J]. 建筑材料学报,1999,2(2):99-104.
MAO BAO-GUO, QI MENG, LI ZONG-JIN. Influence factors and mechanism of fast setting of AAS cement [J]. Journal of Building Materials, 1999,2(2):99-104.
- [16] 杨南如. 碱胶凝材料形成的物理化学基础(I)[J]. 硅酸盐学报, 1996, 24(2): 209-215.
YANG NAN-RU. Physicochemical aspects of the formation of alkaline cementitious materials (I) [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1996, 24(2): 209-215.
- [17] SHI CAI-JUN, DAY R L. A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(6): 1333-1346.
- [18] 肖忠明, 张大同, 陈萍, 等. 水玻璃对水玻璃型碱-矿渣水泥的凝结时间及力学性能的影响[J]. 水泥石灰, 1994(4):13-15.
XIAO ZHONG-MING, ZHANG DA-TONG, CHEN PING, et al. Effects of water glass on set time and mechanical properties of water glass activated alkali-slag cements[J]. Cement and Lime, 1994(4):13-15.
- [19] KRIZAN, BRANISLAV ZIVANOVIC. Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements[J]. Cement and Concrete Research, 2002,32(8):1181-1188.
- [20] 付兴华, 陶文宏, 孙凤金. 水玻璃对地聚物胶凝材料性能影响的研究[J]. 水泥工程,2008(2):6-9.
FU XING-HUA, TAO WEN-HONG, SUN FENG-JIN. Study on the effect of water glass on the performance of

- geopolymer cementitious material [J]. Cement Engineering, 2008(2):6-9.
- [21] 付兴华,陶文宏,孙凤金,等.地聚物凝胶材料性能与聚合机理的研究[J].硅酸盐通报,2008,27(4):730-735.
FU XING-HUA, TAO WEN-HONG, SUN FENG-JIN, et al. Studies on properties and mechanisms of geopolymer cementitious material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2008, 27(4):730-735.
- [22] 潘志华,杨南如.碱-矿渣-赤泥水泥的研究[J].硅酸盐通报,1999,(3):34-39.
PAN ZHI-HUA, YANG NAN-RU. Study on alkali-slag-red clay cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 1999, (3):34-39.
- [23] SHI C J, DAY R L. Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements[J]. Cem. Concr. Res, 1996, 26(3): 439-447.
- [24] SHI C J, DAY R L. Selectivity of alkaline activators for the activation of slags[J]. Cem. Concr. Aggreg, 1996, 18(1): 439-447.
- [25] GONG C M, YANG N R. Effect of phosphate on the hydration of alkali-activated red mud-slag cementitious material[J]. Cem. Concr. Res, 2000, 30(7): 1013-1016.
- [26] BROUGH A R, ATKINSON A. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars Part I. Strength, hydration and microstructure [J]. Cem. Concr. Res, 2002, 32(6):865-879.
- [27] FEMÁNDEZ-JIMÉNEZ A. Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali-activated slag cements[J]. Advances in Cement Research, 2003, 15(3): 129-136.

(编辑 胡英奎)

(上接第 146 页)

- SUN JIA-YING. Research and application of recycled concrete aggregate for cement stabilized gravel [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5):581-584.
- [4] 潘昕. 废弃混凝土用作再生细集料研究[J]. 福建建筑, 2008, (7):121-122.
PAN XIN. Studied on waste concrete used as fine recycled aggregate [J]. Fujian Architecture & Construction, 2008(7):121-122.
- [5] 张虹,熊学忠. 废弃混凝土再生骨料特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(3):64-66.
ZHANG HONG, XIONG XUE-ZHONG. Properties of recycled aggregate made by scrap concrete debris[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(3):64-66.
- [6] 陈云钢. 再生混凝土界面强化试验的微观机理研究[J]. 混凝土, 2007(11):53-57.
CHEN YUN-GANG. Microscopic mechanism research analysis about strengthening methods of interfacial zone in recycled-aggregate concrete[J]. Concrete, 2007(11): 53-57.
- [7] ILKER B T, SEI IM S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34:1307-1312.
- [8] TU TSUNG-YUEH, CHEN YUEN-YUEN, HWANG CHAO-LU NG. Properties of HPC with recycled aggregates[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36: 943-950.
- [9] LIN Y H, TYAN Y Y, CHANG T P, et al. An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8):1373-1380.
- [10] 陈云钢,孙振平,肖建庄. 再生混凝土界面结构特点及其改善措施混凝土[J]. 混凝土, 2004, 2(172):10-13.
CHEN YUN-GANG, SUN ZHEN-PING, XIAO JIAN-ZHUANG. Characteristics and strengthening methods of interfacial zone between aggregate and cement paste in recycled aggregate concrete[J]. Concrete, 2004, 2(172):10-13.
- [11] RINGOT E, BASCOUL A. About the analysis of Micro cracking in concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23:261-266.
- [12] EVANGELISTA L, BRITO J DE. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregate[J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29: 397-401.
- [13] OTSUKI N, MIYAZATO S, YO W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2003, 9/10:443-451.
- [14] 孙家瑛,蒋华钦. 再生粗骨料特性及对混凝土性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(1):30-32.
SUN JIA-YING, JIANG HUA-QIN. Study on properties of reclaimed coarse aggregate and its influence on properties of concrete[J]. New Building Materials, 2009, 36(1):30-32.

(编辑 胡玲)