

建筑废弃物超细粉在混凝土中的应用研究现状

孙跃东¹, 赵相虎¹, 王申宁¹, 陈昭赫¹, 刘 锋¹, 武连明², 李传水²

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 2. 枣庄市金星爆破有限公司, 山东 枣庄 277116)

摘 要:将建筑废弃物加工为超细粉掺加到混凝土中,是建筑废弃物再生利用的有效途径,能够促进建筑业的节能、环保、绿色和可持续发展,具有良好的社会效益、环境效益和经济效益。总结建筑废弃物超细粉的生产工艺和作用机理,比较国内外不同研究者将建筑废弃物超细粉掺入混凝土中对混凝土拌合物工作性能、力学性能、耐久性影响的研究,指出建筑废弃物超细粉在研究和应用中存在的问题,为今后的研究工作提供参考。

关键词:建筑废弃物超细粉;混凝土;性能;生产工艺;作用机理;研究现状

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)01-0054-07

Current Research Status on Application of Ultra-fine Recycled Building Materials Powder in Concrete

SUN Yuedong¹, ZHAO Xianghu¹, WANG Shenming¹, CHEN Zhaohe¹, LIU Feng¹, WU Lianming², LI Chuanshui²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Zaozhuang Jinxing Blasting Co. Ltd, Zaozhuang, Shandong 277116, China)

Abstract: As an effective way of construction waste recycling, processing the construction waste into ultra-fine powder and adding it to concrete can promote the energy saving, environmental protection and sustainable development of construction industry, bringing about good social, environmental and economic benefit. By summarizing the production process and mechanism of ultra-fine recycled building materials powder and comparing studies conducted by researchers at home and abroad on its influence on the working properties, mechanical properties, durability of the concrete admixture, this paper points out the existing problems of ultra-fine recycled building materials powder in both research and application so as to provide reference for future research work.

Key words: ultra-fine recycled building materials powder; concrete; properties; production process; mechanism; current research status

随着我国城市改扩建规模的不断加大以及社会主义新农村建设的快速推进,大量旧建筑物和构筑物的拆除产生了大量的混凝土、砖、石、砂浆和瓦块等建筑废弃物。据住建部预计,到 2020 年中国还将新建住宅 300 亿 m²,由此产生的建筑废弃物至少达到 50 亿 t^[1]。目前,建筑废弃物大部分采用传统方式处置,不仅占用大量土地,而且还会对环境 and 人身安全造成很大危害^[2]。另外,混凝土的大量生产需要大量开采优质天然砂石资源,造成自然环境的严重恶化。

建筑废弃物加工成再生骨料来代替天然砂石生产混凝土方面的研究已较多,但将建筑废弃物加工成比表面积大于 400 m²/kg 的超细粉末来代替水泥或作为掺合料制备混凝土方面的研究还不够成熟。本文对建筑废弃物超细粉(只含有砖粉的称为超细砖粉,只含有混凝土粉的称为废弃混凝土粉,含有多种成分的称为建筑垃圾粉)在混凝土中应用的研究现状进行总结,分析其研究和应用中存在的问题,为今后的研究工作提

收稿日期: 2015-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208289); 山东省科技惠民计划项目(2014KJHM0212)

作者简介: 孙跃东(1962—),男,山东梁山人,教授,博士,主要从事混凝土结构基本理论与应用、再生混凝土材料和结构性能、结构工程鉴定与加固、特种结构等方面的教学和研究工作。E-mail: sunyd1236@126.com

供参考。

1 建筑废弃物超细粉的生产工艺

目前建筑废弃物超细粉的应用仍处于研究阶段,还没有专门的生产加工工艺。以往试验采用的建筑废弃物超细粉的来源主要有:在颗粒整形强化技术中由除尘器收集起来的,产量约为原料质量的15%^[3];废弃混凝土→铁锤一次粗破碎→二次破碎至最大粒径不超过20 mm的颗粒→球磨机碾磨细度合格→试验用^[4];再生骨料破碎、筛分等过程中产生的,约占再生骨料质量的10%左右^[5]。以往试验用的建筑废弃物超细粉数量较少,生产工艺各异,没有形成批量生产。山东科技大学和枣庄市金星爆破有限公司合作,对现有的破碎、筛分和磨细设备进行改造,生产了部分建筑废弃物超细粉用于试验研究。该生产工艺流程(图1)主要包括:①预分拣阶段。将建筑废弃物人工或用筛分机分离出废料,再用履带式移动破碎机进行初级破碎,用磁选机分离出铁片、钢筋,风选分离台分离出轻质杂物;②破碎阶段。用颚式破碎机二次破碎成30~40 mm的碎块;③碾磨阶段。传送到磨粉机的转筒内,使其相互碰撞、摩擦、碾磨成粉末;④集粉阶段。用风机、选粉机和集粉器进行选粉、集粉,得到符合要求的建筑废弃物超细粉颗粒。建筑废弃物及加工后的建筑废弃物超细粉见图2。

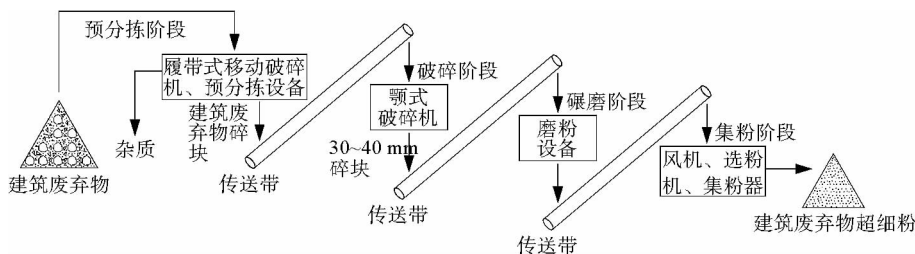


图1 建筑废弃物超细粉生产工艺流程图

Fig. 1 The production process flowsheet of ultra-fine recycled building materials powder

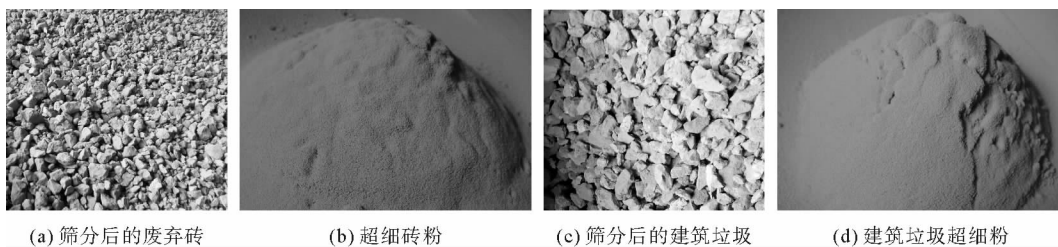


图2 建筑废弃物超细粉

Fig. 2 Ultra-fine recycled building materials powder

2 建筑废弃物超细粉对混凝土的作用机理

对于建筑废弃物超细粉在混凝土中的作用机理,一些研究者进行了试验研究和理论分析,现将得出的成果归纳如下。

1)微集料填充效应。混凝土可以视为连续的颗粒堆积体系,水泥颗粒之间的间隙由更细的石灰石粉颗粒来填充,一部分可以起到填充骨架的作用,使得混凝土的级配更加合理,进而改善了混凝土的各项使用性能^[6-7]。

2)形貌效应。石灰石粉颗粒表面光滑,形貌效应较好,球形颗粒在水泥颗粒间可以起到“滚珠”的作用,增加了混凝土拌合物的流动性,因此在满足同样的混凝土工作性能前提下可减少用水量,从而提高强度^[8-9]。

3)加速效应。适当掺量的石灰石粉能充当水化硅酸钙(calcium silicate hydrate, CSH)的成核基体,降低

成核位垒,加速水泥水化。加速效应有利于混凝土早期强度^[10-12]。

4)活性效应。石灰石粉和水泥中的铝相反应生成具有一定胶凝能力的碳铝酸盐复合物,该效应对混凝土的后期强度有贡献^[11-12]。

目前对于建筑废弃物超细粉对混凝土的作用机理研究还没有形成权威性结论,不少学者还提出了其他作用机理,如分散效应^[8]、微晶核效应^[9]和比重效应^[13]等。

3 超细砖粉在混凝土中的应用研究

将废砖加工成超细砖粉部分取代混凝土中水泥或作为掺合料的研究在国内外都很少。Heikal^[14]、葛智^[15-16]、潘磊^[17]、石正国^[18]、王功勋^[19]等通过试验研究了超细砖粉对混凝土各项性能的影响,研究表明超细砖粉在混凝土中的应用是可行的,既可节约天然砂石、降低混凝土生产成本,同时也为废砖的再生利用提供了有效途径。

3.1 超细砖粉对混凝土拌合物工作性能的影响

超细砖粉掺入混凝土中部分取代水泥或作为掺合料,充分发挥其“比重效应”、“微集料填充效应”和“分散效应”,对改善混凝土拌合物的工作性能有一定影响。

郑丽等^[15]研究了废黏土砖粉部分取代水泥对混凝土拌合物坍落度的影响,砖粉细度相同时,混凝土拌合物的坍落度随着砖粉取代率的增加而降低;砖粉取代率相同时,混凝土的坍落度随着砖粉细度的减小而降低。毋雪梅等^[20]得出了类似的结论。

潘磊^[17]研究了单掺陶瓷抛光砖粉对混凝土拌合物工作性能的影响:当陶瓷抛光砖粉掺量低于 10%时,可有效改善混凝土的工作性能,而当掺量高于 10%时,混凝土的坍落度随着掺量的提高而不断降低。石正国等^[18]得出了类似的结论,但认为掺量应控制在 20%以内。

王功勋等^[19]对比测试了抛光砖粉与粉煤灰作混凝土掺合料对其拌合物工作性能的影响:抛光砖粉与粉煤灰复掺,在不影响混凝土黏聚性和保水性的同时,具有较好的流动性。

目前对于混凝土中掺入超细砖粉的研究工作主要集中在超细砖粉取代的成分、掺量和不同细度对混凝土拌合物工作性能(坍落度、流动性、黏聚性和保水性)的影响。一般认为掺入超细砖粉可以提高混凝土的坍落度和流动性,混凝土拌合物的坍落度随着砖粉取代率的增加而降低,最佳掺量为 10%~20%。

3.2 超细砖粉对混凝土力学性能的影响

超细砖粉掺入混凝土中部分取代水泥后,充分发挥了其“微集料填充效应”,对提高混凝土的力学性能有一定影响。

葛智等^[16]研究了废黏土砖粉部分取代水泥对混凝土力学性能的影响,掺加废黏土砖粉的再生混凝土强度与普通混凝土相差不大,甚至高于纯水泥混凝土;废黏土砖粉对混凝土抗折强度影响较小。

潘磊^[17]研究了单掺陶瓷抛光砖粉对混凝土抗压强度的影响,混凝土抗压强度随着砖粉掺量的增加先提高后降低,最佳掺量为 10%。毋雪梅等^[20]得出了类似的结论,掺 20%废弃砖粉可提高抗压强度,超过 30%时抗压强度有所降低,而石正国^[18]认为掺量应控制在 20%以内。

目前对于混凝土中掺入超细砖粉的研究工作主要集中在超细砖粉取代的成分和掺量对混凝土力学性能(抗压强度和抗折强度)的影响。一般认为掺入少量超细砖粉可以提高混凝土的抗压强度,混凝土的抗压强度随着砖粉取代率的增加而降低,最佳掺量为 10%~20%。

3.3 超细砖粉对混凝土耐久性能的影响

超细砖粉掺入混凝土中部分取代水泥后,其“微集料填充效应”对改善混凝土的耐久性能有一定作用。

葛智等^[16]研究了废黏土砖粉部分取代水泥对混凝土收缩性能的影响,掺加废黏土砖粉的混凝土收缩值明显小于普通混凝土,砖粉的细度越细,混凝土的收缩值越小。

石正国等^[18]研究了掺有陶瓷抛光砖粉混凝土的耐久性能,掺加 5%、10%的陶瓷抛光砖粉的混凝土吸水率和气体渗透系数都有所降低,当掺量超过 15%时,随着掺量的增加,混凝土的吸水率和气体渗透系数都逐渐增加;掺加 5%~15%的陶瓷抛光砖粉可有效降低混凝土的渗透深度和氯离子扩散系数,当掺量超过 20%

时,混凝土的渗透深度和氯离子扩散系数大大提高。

目前对于混凝土中掺入超细砖粉的研究工作主要集中在超细砖粉取代的成分、掺量和不同细度对混凝土耐久性能(收缩、吸水率、气体渗透系数、渗透深度和氯离子扩散系数)的影响。一般认为掺入少量超细砖粉可以改善混凝土的耐久性能,混凝土的耐久性能随着砖粉取代率的增加而变差,最佳掺量为10%~20%。

综上所述,超细砖粉掺入混凝土中部分取代水泥的掺量在10%~20%时,可有效改善混凝土的工作性能(坍落度、流动性、黏聚性、保水性)、力学性能(抗压强度、抗折强度)、耐久性能(收缩、吸水率、气体渗透系数、渗透深度和氯离子扩散系数)。

4 建筑垃圾粉在混凝土中的应用研究

建筑垃圾粉具有一定的活性,将其掺入混凝土中替代部分水泥或粉煤灰,可降低混凝土生产成本,消耗大量建筑垃圾,减少天然资源的耗用。目前的研究主要集中在建筑垃圾粉对混凝土的坍落度、抗压强度、收缩和膨胀等方面,并取得了一定的成果。

4.1 建筑垃圾粉对混凝土拌合物工作性能的影响

建筑垃圾粉掺入混凝土中取代部分水泥后,由于建筑垃圾粉具有显著的“微集料填充效应”,且吸水性比水泥大,可改善混凝土拌合物的工作性能。

宁夏大学的马纯滔^[5]等研究了建筑垃圾粉对混凝土拌合物工作性能的影响,当水胶比不变,建筑垃圾粉总掺量相同时,随着废砖粉含量的增加,混凝土的坍落度逐渐变大;当高效减水剂掺量不变时,建筑垃圾粉总掺量增加,会使混凝土的黏聚性变好。

李建勇等^[21]研究了建筑垃圾粉的掺量对不同强度等级混凝土工作性能的影响,使用建筑垃圾粉会降低混凝土拌合物的流动性。

目前对于混凝土中掺入建筑垃圾粉的研究工作主要集中在建筑垃圾粉的各成分含量、取代成分、水胶比和高效减水剂掺量对混凝土拌合物工作性能(坍落度、黏聚性和流动性)的影响。一般认为建筑垃圾粉中废砖粉含量的增加会提高混凝土的坍落度,且随着建筑垃圾粉掺量的增加,混凝土拌合物的黏聚性变好,流动性降低。

4.2 建筑垃圾粉对混凝土力学性能的影响

建筑垃圾粉掺入混凝土中取代部分水泥后,由于建筑垃圾粉吸水性比水泥大,使得混凝土的抗压强度稍有降低。

马纯滔等^[5]研究了建筑垃圾粉对混凝土抗压强度的影响,混凝土的28 d抗压强度最大的影响因素是建筑垃圾粉中废砖粉的含量和水胶比,且随着砖粉含量和水胶比的增大而减小。

李建勇等^[21]研究了建筑垃圾粉的掺量对混凝土抗压强度的影响,在15%的掺量水平下,各龄期的抗压强度均能维持在所对应的基础混凝土的抗压强度80%~90%的范围内。

目前对于混凝土中掺入建筑垃圾粉的研究工作主要集中在建筑垃圾粉的各成分含量、取代的成分、掺量和水胶比对混凝土抗压强度的影响。一般为了保证混凝土的抗压强度降低量不超过20%,建筑垃圾粉掺量不应超过15%。

4.3 建筑垃圾粉对混凝土耐久性能的影响

建筑垃圾粉掺入混凝土中完全替代粉煤灰后,充分发挥了其“微集料填充效应”和“活性效应”,对改善混凝土的耐久性能有一定作用。

李建勇^[21]等研究了建筑垃圾粉完全替代粉煤灰对不同强度等级混凝土的耐久性能的影响,建筑垃圾粉完全替代粉煤灰后,混凝土的综合耐久性能优异,建筑垃圾粉可以作为矿物掺合料用来制备C60以下各等级的大流动性能混凝土。

目前对于混凝土中掺入建筑垃圾粉的研究工作主要集中在建筑垃圾粉取代的成分对不同强度等级混凝土耐久性能(抗水渗透性能、抗氯离子渗透性能、抗碳化性能、抗冻融性能、抗硫酸盐侵蚀性能)的影响。一般认为建筑垃圾粉完全替代粉煤灰可以改善C60以下各等级的大流动性能混凝土的耐久性能。

综上所述,建筑垃圾粉可以掺到混凝土中代替部分水泥或粉煤灰,但掺量应控制在 15% 内。

5 废弃混凝土粉在混凝土中的应用研究

目前一些研究人员对掺有废弃混凝土粉的混凝土的工作性能、力学性能和耐久性能进行对比研究,发现混凝土的各项性能不仅没有降低,反而得到了改善。可见,该研究成果的应用不仅可以减少对天然砂石的开采,而且可以使大量废弃混凝土得到资源化利用。

5.1 废弃混凝土粉对混凝土拌合物工作性能的影响

废弃混凝土粉掺入混凝土中取代部分水泥后,由于废弃混凝土粉具有显著的“微集料填充效应”和“形貌效应”,对改善混凝土拌合物的工作性能有一定作用。

马纯滔^[5]等在多种因素不变的条件下与普通混凝土进行对比试验,随着废弃混凝土粉替代率的增加,混凝土的坍落度逐渐提高,流动性逐渐增大。钱大行等^[22]得出了类似的结论。

毋雪梅等^[20]用废弃混凝土粉作矿物掺和料取代部分水泥制备混凝土,废弃混凝土粉的加入使混凝土的坍落度略有降低,但不会对混凝土的坍落度及工作性能带来不利影响。

目前对于混凝土中掺入废弃混凝土粉的研究工作主要集中在废弃混凝土粉取代的成分和掺量对混凝土拌合物工作性能(坍落度、流动性)的影响。一般认为掺入废弃混凝土粉可以提高混凝土拌合物的坍落度和流动性。

5.2 废弃混凝土粉对混凝土力学性能的影响

废弃混凝土粉掺入混凝土中取代部分水泥后,由于废弃混凝土粉具有显著的“微集料填充效应”、“微晶核效应”和“活性效应”,对改善混凝土的力学性能有一定影响。

毋雪梅等^[20]研究者的试验表明,废弃混凝土粉代替 20% 水泥和 15% 砂的混凝土 28 d 抗压强度略有提高,长期强度仍有增加;废弃混凝土粉取代 30% 水泥的混凝土 28 d 抗压强度降低幅度并不大,180 d 长期强度几乎没有降低。

马纯滔等^[5]的试验表明,随着废弃混凝土粉替代率的增加,混凝土 7, 28 d 抗压强度虽呈现下降的趋势,但当掺量不超过 20% 时,抗压强度仍高于对比组。钱大行等^[22]得出了类似的结论。

目前对于混凝土中掺入废弃混凝土粉的研究工作主要集中在废弃混凝土粉取代的成分和掺量对混凝土力学性能(抗压强度)的影响。一般认为掺入少量废弃混凝土粉可以提高混凝土的力学性能,最佳掺量为 20% 左右。

5.3 废弃混凝土粉对混凝土耐久性能的影响

废弃混凝土粉掺入混凝土中取代部分水泥后,废弃混凝土粉的“微集料填充效应”对改善混凝土的耐久性能有一定影响。

刘小艳等^[23]研究试验表明,掺矿粉和废弃混凝土粉的混凝土 28 d 干缩变形均低于基准混凝土,粒径越细小的废弃混凝土粉掺入混凝土后,混凝土的干缩变形越小。

目前对于混凝土中掺入废弃混凝土粉的研究工作主要集中在废弃混凝土粉取代的成分和不同细度对混凝土耐久性能(干缩)的影响。一般认为掺入废弃混凝土粉可以降低混凝土的干缩变形,粒径越小,降低作用越大。

综上所述,废弃混凝土粉掺入混凝土中部分取代水泥的掺量不超过 20% 时,可有效改善其工作性能(坍落度、流动性)、力学性能(抗压强度)和耐久性能(干缩变形)。

6 存在的问题

1) 建筑废弃物超细粉生产加工工艺复杂

目前对建筑废弃物超细粉没有形成批量的工业化生产,导致其生产加工工艺复杂,影响了相关试验研究和应用,若形成批量的工业化生产,需要一套能够专门批量生产建筑废弃物超细粉的生产工艺。

2) 试验结果离散性大且研究不够深入

不同研究者关于同一个问题得出的结论有较大差别,甚至相反,这是因为试验标准不统一造成的,如:试验材料不同;建筑废弃物超细粉的细度或混凝土强度等级不同。另外,建筑废弃物超细粉取代部分砂子,或同时取代部分石子和砂子,掺入混凝土后对混凝土的早期抗裂、抗冻、抗水渗透、抗氯离子渗透、受压徐变、抗碳化和抗硫酸盐侵蚀等各项性能影响的研究还不够深入。

3) 微观结构和作用机理研究不够透彻

微观结构和作用机理研究不够透彻,需要采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)等技术进一步研究掺有建筑废弃物超细粉混凝土的微观结构,从化学反应的角度进一步研究其作用机理,为建筑废弃物超细粉的相关国家标准或行业标准的制订以及在混凝土中的应用提供理论基础。

7 结束语

建筑废弃物的再生利用已成为一项迫切需要解决的课题,将建筑废弃物处理成超细粉掺加到混凝土中代替水泥或作为掺合料的研究尚不成熟。目前的研究还处于实验室研究阶段,要达到实际工程应用还有很多工作要做,如建筑废弃物超细粉生产设备和工艺需要完善,试验方法和标准需要统一,微观结构和作用机理需要更深入的研究等。

参考文献:

- [1]高峰. 变废为宝建筑垃圾新用[J]. 中国住宅设施, 2011(1):40.
GAO Feng. Waste to wealth, construction waste to material of value[J]. China Housing Facilities, 2011(1):40.
- [2]TOPCU L B. Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(12):1817-1823.
- [3]吕雪源, 张健, 李秋义. 再生微粉混凝土渗透性实验研究[J]. 商品混凝土, 2009(3):28-31.
LÜ Xueyuan, ZHANG Jian, LI Qiuyi. The research on permeability of concrete mixed with recycled micro-powder[J]. Ready-Mixed Concrete, 2009(3):28-31.
- [4]胡智农, 杨黎, 刘昊. 再生微粉混凝土耐久性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013(3):1-5.
HU Zhinong, YANG Li, LIU Hao. The research on durability of concrete mixed with recycled micro-powder[J]. China Concrete and Cement Products, 2013(3):1-5.
- [5]马纯涛, 宋建夏, 王彩波, 等. 建筑垃圾再生微粉利用的试验研究[J]. 宁夏工程技术, 2009, 8(1):55-58.
MA Chuntao, SONG Jianxia, WANG Caibo, et al. Experimental study on utilization regeneration of powder of construction waste[J]. Ningxia Engineering Technology, 2009, 8(1):55-58.
- [6]陈剑雄, 崔洪涛, 陈寒斌, 等. 掺入超细石灰石粉的混凝土性能研究[J]. 施工技术, 2004, 33(4):39-41.
CHEN Jianxiong, CUI Hongtao, CHEN Hanbin, et al. Study on performance of concrete mixed with ultra-fine limestone flour[J]. Construction Technology, 2004, 33(4):39-41.
- [7]雷昌聚. 掺磨细石灰石粉混凝土的试验与应用[J]. 混凝土, 1996(4):21-31.
LEI Changju. Test and application of concrete mixed with grinding limestone powder[J]. Concrete, 1996(4):21-31.
- [8]叶建雄, 余林文, 黄义雄. 磨细石灰石粉对混凝土早期性能的影响[C]//第三届两岸四地高性能混凝土国际研讨会论文集. 北京:中国建材工业出版社, 2012:93-98.
- [9]陈剑雄, 李鸿芳, 陈寒斌, 等. 掺超细石灰石粉和钛矿渣粉超高强混凝土研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(6):672-676.
CHEN Jianxiong, LI Hongfang, CHEN Hanbin, et al. Study of super high strength concrete containing super-fine limestone powder and titanium slag powder[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(6):672-676.
- [10]陆平, 陆树标. CaCO₃ 对 C₃S 水化的影响[J]. 硅酸盐学报, 1987, 15(4):289-294.
LU Ping, LU Shubiao. Effect of CaCO₃ on the hydration of C₃S[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1987, 15(4):289-294.
- [11]袁航, 谢友均. 石灰石粉细度对混凝土性能的影响[J]. 粉煤灰, 2009(2):13-15.
YUAN Hang, XIE Youjun. Effect of fineness of limestone powder on concrete performance[J]. Coal Ash, 2009(2):13-15.
- [12]陈改新, 孔祥芝. 石灰石粉:一种新的碾压混凝土掺和料[J]. 中国水利, 2007(21):16-18.
CHEN Gaixin, KONG Xiangzhi. Limestone powder: A new type of RCC admixture[J]. China Water Resources, 2007(21):

16-18.

- [13]肖斐,崔洪涛,陈剑雄,等.超磨细石灰石粉高强混凝土的研究[J].硅酸盐通报,2010,29(6):1303-1307.
XIAO Fei,CUI Hongtao,CHEN Jianxiong,et al. Study on high strength concrete containing ultra-fine limestone powder [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2010,29(6):1303-1307.
- [14]HEIKAL M,ZOHDY K M, ABDELKREEM M. Mechanical, microstructure and rheological characteristics of high performance self-compacting cement pastes and concrete containing ground clay bricks[J]. Construction and Building Materials,2013,38(1):101-109.
- [15]郑丽.废粘土砖粉混凝土的性能研究[D].济南:山东大学,2012:54-55.
- [16]葛智,王昊,郑丽,等.废黏土砖粉混凝土的性能研究[J].山东大学学报(工学版),2012,42(1):104-108.
GE Zhi,WANG Hao,ZHENG Li,et al. Properties of concrete containing recycled clay brick powder[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science),2012,42(1):104-108.
- [17]潘磊.双掺陶瓷抛光粉和粉煤灰对混凝土抗压强度的影响[J].粉煤灰综合利用,2013(2):43-49.
PAN Lei. Effects on compressive strength of concrete mixed with ceramic polishing powder and fly ash[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization,2013(2):43-49.
- [18]石正国,王黎.陶瓷砖抛光粉在C30混凝土中的应用[J].混凝土,2012(3):138-140.
SHI Zhengguo,WANG Li. Utilization of ceramic polishing brick powder in C30 concrete[J]. Concrete,2012(3):138-140.
- [19]王功勋,苏达根,钟小敏.陶瓷抛光砖粉对混凝土性能的影响[J].混凝土,2008(10):64-66.
WANG Gongxun,SU Dagen,ZHONG Xiaomin. Effect of ceramic polishing powder as admixture on performance of concrete[J]. Concrete,2008(10):64-66.
- [20]毋雪梅.粉粒状建筑垃圾在水泥混凝土中的应用研究[D].郑州:郑州大学,2004:30-40.
- [21]李建勇,马雪英,尚百雨,等.建筑废弃物再生微粉在混凝土中应用的试验研究[J].江西建材,2014(12):244-250.
LI Jianyong,MA Xueying,SHANG Baiyu,et al. Experimental study on application of construction waste recycled powder in the concrete[J]. Building Materials of Jiangxi,2014(12):244-250.
- [22]钱大行,孙犁,张日华.再生磨细掺合料的研制和应用[J].混凝土,2008(9):48-49.
QIAN Daxing,SUN Li,ZHANG Rihua. Development and application of recycled mill admixture[J]. Concrete,2008(9):48-49.
- [23]刘小艳,金丹,刘开琼,等.掺再生微粉混凝土的早期抗裂性能[J].建筑材料学报,2010,13(3):398-408.
LIU Xiaoyan,JIN Dan,LIU Kaiqiong,et al. Early anti-crack performance of concrete containing re-production powder[J]. Journal of Building Materials,2010,13(3):398-408.

(责任编辑:吕海亮)