

文章编号:1673-2049(2013)01-0032-06

引气及搅拌作用对混凝土性能的影响

赵利军, 翁军良, 冯忠绪

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:通过试验对比研究了普通强制搅拌、振动搅拌以及掺入引气剂对新拌混凝土匀质性、含气量以及硬化混凝土抗压强度、孔结构的影响。结果表明:随着引气剂的掺入以及引气剂掺量的增加, 振动搅拌和普通强制搅拌混凝土的匀质性变化不大, 但混凝土含气量随之增加, 抗压强度随之降低, 并且与普通强制搅拌相比, 振动搅拌混凝土的含气量更大, 抗压强度更高; 振动搅拌和掺入引气剂都能提高硬化混凝土的孔隙率, 但振动搅拌主要增多的是 100 nm 以下的小孔, 不仅提高了引气效果, 而且也因为使孔隙细化, 改善了混凝土抗压强度; 当需要的混凝土含气量(体积分数)为 3% 时, 采用振动搅拌即可获得所需的引气效果, 而当需要的含气量更大时, 建议采用振动搅拌同时掺入引气剂。

关键词:混凝土; 含气量; 抗压强度; 孔结构; 引气剂; 振动搅拌; 普通强制搅拌

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

Effects of Air Entraining and Mixing on Concrete Performance

ZHAO Li-jun, WENG Jun-liang, FENG Zhong-xu

(Key Laboratory of Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The effects of common forced mixing, vibrating mixing and mixing with air entraining agent on homogeneity and air content of fresh concrete, compressive strength and pore structure of hardened concrete were tested and compared. The results show that the homogeneity of concrete by vibrating mixing and common forced mixing have little change with the addition and increasing of air entraining agent, but the air content of the concrete increases and the compressive strength decreases. The concrete made by vibrating mixing has higher air content and compressive strength than that made by common forced mixing. Vibrating mixing and common forced mixing with air entraining agent can improve the porosity of the hardened concrete, but the harmless pores with diameters less than 100 nm in the concrete by vibrating mixing increase significantly and the harmful large pores decrease, so vibrating mixing can improve the air entraining effect, and increase concrete compressive strength. When the air content (volume fraction) of concrete is required to be 3%, the required effect of air entraining can be obtained only by vibrating mixing; when the air content is required to be higher than 3%, vibrating mixing with air entraining agent is recommended.

Key words: concrete; air content; compressive strength; pore structure; air entraining agent; vibrating mixing; common forced mixing

收稿日期: 2012-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678026); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC093)

作者简介: 赵利军(1976-), 男, 河北张家口人, 副教授, 工学博士, E-mail: zhaolj@chd.edu.cn。

0 引言

混凝土作为目前使用最广泛的建筑材料,其耐久性与工程使用寿命密切相关,是混凝土工程中关注和研究的热点问题。为了增强混凝土的耐久性,提高混凝土中的含气量是目前各国普遍采用的方法之一。通过在搅拌过程中掺入引气剂来提高混凝土的含气量,是改善和保证混凝土抗冻耐久性的有效措施^[1-2]。然而,使用引气剂在提高混凝土耐久性的同时,也会在一定程度上削弱硬化混凝土的强度性能。有研究表明,掺入引气剂进行搅拌后,硬化混凝土抗压强度随着含气量的增加而呈线性下降,基本上每增加 1% 的含气量(体积分数,下文同),抗压强度降低 4%~5%^[3-4]。

混凝土作为由水、水泥和骨料组成的复合材料,其含气量和强度等性能不但受到原材料及其配合比的影响,还受到搅拌、养护以及振动成型等许多因素的影响^[5-6]。搅拌作为生产混凝土最基本的制备方法,必然在很大程度上决定和影响混凝土的强度及其他性能。但是在混凝土的搅拌过程中,同时存在有物理作用和化学作用,物料的容积和性质都发生了变化,过程的动态复杂性使人们对其认知不足,目前仍停留在宏观的尺度上,并且相关的研究也不多。众所周知,新拌混凝土呈现粘-塑状态,属于 Bingham 体,物料间的粘滞力成为搅拌阻力的一个主要来源,使得物料各组分均匀分散的搅拌过程变得特别困难^[7]。对混凝土进行合理的振动搅拌,就是在普通强制搅拌的同时加以振动作用,使得物料颗粒在具有一定频率下的振幅后处于颤振状态,能够破坏物料间的粘性连接,降低颗粒间的内摩擦力,从而改善混凝土的微观结构并有助于实现快速均匀的搅拌^[8]。本文中笔者从混凝土的搅拌过程出发,采用试验的方法,对比研究了普通强制搅拌、振动搅拌以及掺入引气剂对新拌混凝土匀质性、含气量以及硬化混凝土抗压强度和孔结构的影响。

1 原材料与配合比

水泥选用陕西耀县生产的秦岭牌 P. O 32.5R

普通硅酸盐水泥;细骨料选用陕西省西安市灞河中砂,细度模数为 2.66;粗骨料选用陕西泾阳产的石灰岩碎石,粒径为 5~25 mm;拌和水采用自来水;引气剂选用河南某化工原料有限公司生产的 AH-1 型引气剂。

设计混凝土强度等级为 C20,新拌混凝土坍落度控制在 10~30 mm 之间,具体配合比如表 1 所示(本文中的掺量以质量分数计)。在不同的搅拌方式下,通过试验研究不掺入引气剂和引气剂掺量分别为 0.01%,0.02%,0.03% 时的混凝土性能。

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Concrete Mix Proportion

混凝土强度等级	各材料用量/(kg·m ⁻³)				引气剂掺量/%
	水泥	水	砂	石	
C20	306	165	656	1 273	0.00~0.03

2 试验设备与试验方法

2.1 试验设备

在现有双卧轴搅拌机技术的基础上,利用搅拌轴和叶片作为振动源的方案设计了振动搅拌机。该机采用 2 套独立的搅拌驱动和振动驱动,能够以振动和强制搅拌相结合的方式进行振动搅拌,也可关闭振动驱动来实现单独的普通强制搅拌。搅拌机主要性能参数见表 2,原理和结构见图 1,2。搅拌驱动输出搅拌动力,经同步齿轮传动后驱动搅拌轴及其叶片旋转,强制推动混合料在搅拌筒内循环运动;振动驱动输出振动动力,经传动皮带传动驱动振动轴高速旋转,强迫偏心安装在其上的搅拌轴和叶片产生振动。

2.2 试验方法

试验是在相同投料顺序和搅拌时间的条件下,分别测定振动搅拌与普通强制搅拌在不同引气剂掺量下得到的新拌混凝土匀质性和含气量以及硬化混凝土抗压强度和孔结构。

试验投料顺序为先依次加入砂、水泥和碎石,干拌 8 s 后,再加入水(或溶入所需比例引气剂的水),搅拌时间为湿拌 45 s。新拌混凝土含气量和匀质性依据《混凝土搅拌机》(GB/T 9142—2000)中的规

表 2 搅拌机的主要性能参数

Tab. 2 Main Performance Parameters of Test Mixer

容积/L	搅拌叶片数量 (单个搅拌轴)	设计振幅/mm	振动角频率/ (rad·s ⁻¹)	搅拌线速度/ (m·s ⁻¹)	搅拌驱动电机(BWD7.5-4-29)		振动驱动电机(Y100L-2)	
					功率/kW	输出转速/(r·min ⁻¹)	功率/kW	转速/(r·min ⁻¹)
100	2+5(返回叶片+ 推进叶片)	1.2	185	1.47	7.5	50	3.0	2 960

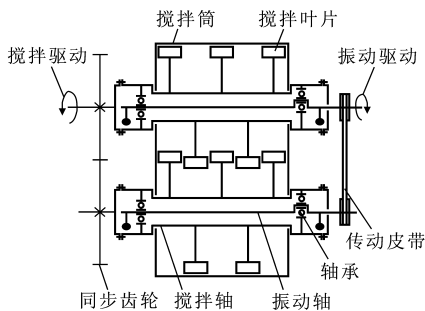


图 1 振动搅拌机原理
Fig. 1 Principle of Test Mixer

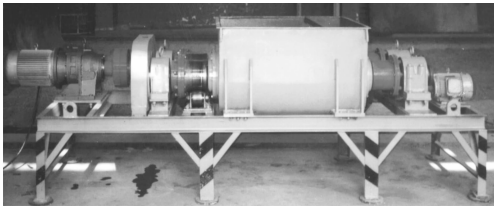


图 2 振动搅拌机结构
Fig. 2 Actual Structure of Test Mixer

定,含气量采用英国 ELE 公司的直读式含气量测定仪测定,匀质性以同一罐不同部位的拌和物中砂浆密度的相对误差 ΔM 和单位体积拌和物中粗骨料质量的相对误差 ΔG 作为评定指标。混凝土抗压强度取样是在卸出的新拌混凝土料堆中沿卸料长度方向均匀选取,制作 3 个 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土试件。试件按《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)中的方法成型,在空气中静养 24 h 后拆模,标准养护至规定龄期 7 d,测定硬化混凝土试件的抗压强度平均值及其标准差。采用压汞法测定混凝土孔结构,压汞仪器为美国麦克公司生产的 Micromeritics AutoPore IV 水银测孔仪,混凝土龄期为 28 d。

3 试验结果分析

3.1 对新拌混凝土匀质性的影响

在不同引气剂掺量下,不同搅拌方式下的新拌混凝土匀质性见图 3、4。从图 3、4 可以看出,随着引气剂掺量的变化,振动搅拌和普通强制搅拌得到的新拌混凝土拌和物中砂浆密度相对误差以及粗骨料质量相对误差都有一定的变化,但是差别不大,并且都符合 $\Delta M < 0.8\%$ 和 $\Delta G < 5\%$ 的标准要求。这是因为新拌混凝土匀质性指标仅反映了搅拌的宏观均匀性,其主要取决于搅拌装置结构与参数以及搅拌时间等,只要能够保证混合料在搅拌机内良好且充分地运动,就很容易达到要求。匀质性试验结果

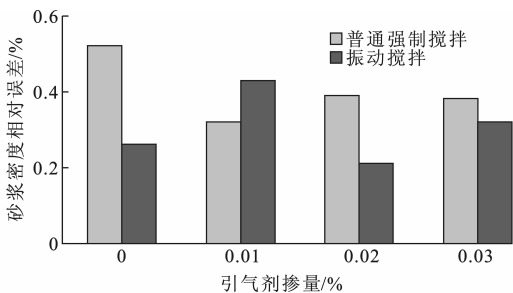


图 3 不同搅拌方式下混凝土的砂浆密度相对误差
Fig. 3 Relative Errors of Mortar Density in Concrete by Different Mixing Methods

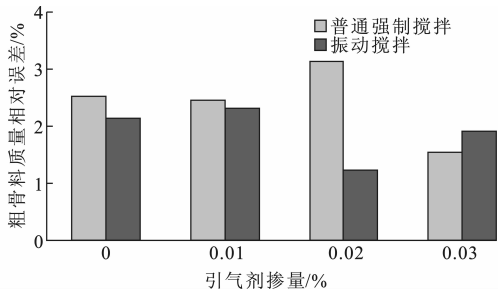


图 4 不同搅拌方式下混凝土的粗骨料质量相对误差
Fig. 4 Relative Errors of Coarse Aggregate Quality in Concrete by Different Mixing Methods

表明,该搅拌机的搅拌装置结构与参数以及选用的搅拌时间是合理的。

3.2 对新拌混凝土含气量的影响

在不同引气剂掺量下,不同搅拌方式下的新拌混凝土含气量见图 5。从图 5 可以看出,随着引气剂掺量的增加,2 种搅拌方式的新拌混凝土含气量都有所增加,这表明引气剂对不同搅拌方式的混凝土都具有良好的引气效果。在引气剂掺量为 0.01%~0.03% 的条件下进行振动搅拌和普通强制搅拌,含气量都能够控制在工程中推荐的 3%~6% 范围内。但与普通强制搅拌相比,振动搅拌在掺入相同掺量引气剂的条件下,新拌混凝土表现出了更高的含气量,并且在不掺入引气剂的条件下,振动搅拌混凝土的含气量也大于 3.0%,达到了工程推荐范围。

3.3 对硬化混凝土抗压强度的影响

在不同引气剂掺量下,不同搅拌方式下的硬化混凝土的 7 d 抗压强度见图 6。从图 6 可以看出,不同搅拌方式下的混凝土抗压强度都随着引气剂掺量的增加而减小。这是因为随着引入含气量的增加,混凝土内部孔隙增多,单位承载面积减少,抗压强度就随之下降。但与普通强制搅拌相比,振动搅拌在不掺入以及掺入相同掺量引气剂的条件下,硬化混

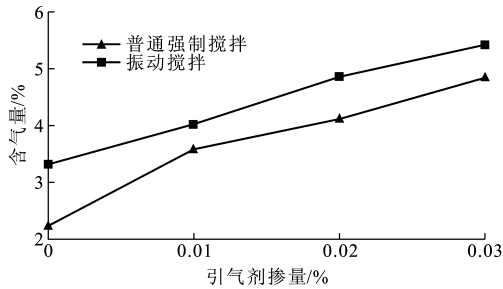


图5 不同搅拌方式下混凝土的含气量

Fig. 5 Air Contents of Concrete by Different Mixing Methods

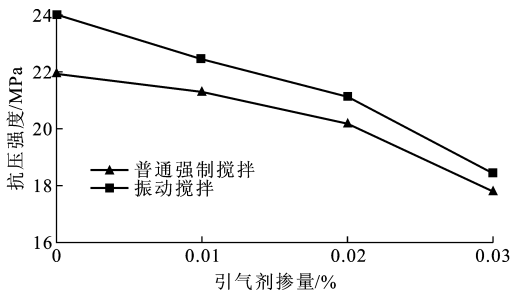


图6 不同搅拌方式下混凝土的7 d 抗压强度

Fig. 6 7 d Compressive Strength of Concrete by Different Mixing Methods

凝土都表现出了更高的抗压强度。

根据混凝土抗压强度平均值和标准差,绘制出不同搅拌方式下的混凝土强度概率密度曲线,见图7。从图7可以看出:振动搅拌混凝土的强度概率密度曲线表现为高而窄,说明强度值比较集中,波动较小,混凝土的匀质性较好;普通强制搅拌的曲线表现为宽而矮,说明强度值离散程度较大,混凝土的匀质性较差。结合对含气量的影响可以看出,采用振动搅拌或振动搅拌掺入引气剂的方式,混凝土不但可以达到工程要求的较高含气量,而且比掺入引气剂下普通强制搅拌的混凝土强度明显增大。显然,目前在普通强制搅拌技术中通过掺入引气剂来提高混凝土的含气量,但硬化混凝土强度却存在一定损失的问题,振动搅拌技术表现出了良好的解决效果。

3.4 对混凝土孔结构的影响

不同搅拌方式下的混凝土总孔隙率和平均孔径见图8,混凝土孔径分布见图9。由图8可见:对于总孔隙率,普通强制搅拌混凝土的最小,振动搅拌混凝土的次之,掺入引气剂强制搅拌的最大;对于平均孔径,振动搅拌混凝土的最小,普通强制搅拌混凝土的次之,掺入引气剂强制搅拌的最大。孔隙率增大,会对混凝土耐久性起到积极作用,但过大的孔径则会削弱混凝土强度。与普通强制搅拌相比,虽然掺

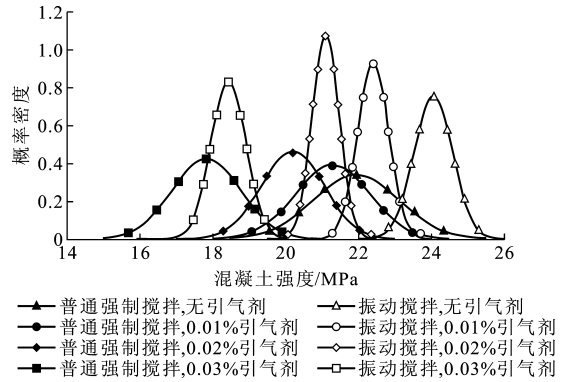


图7 不同搅拌方式下混凝土强度的概率密度曲线

Fig. 7 Curves of Probability Density of Concrete Strength by Different Mixing Methods

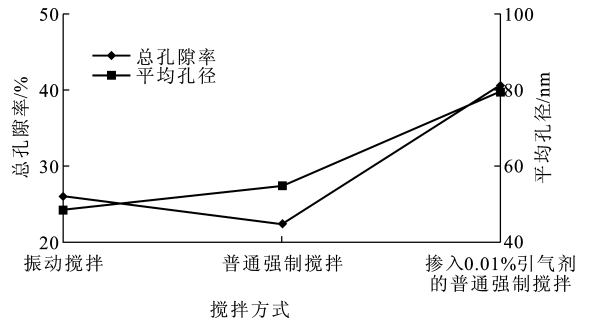


图8 不同搅拌方式下混凝土的总孔隙率和平均孔径

Fig. 8 Total Porosities and Average Pore Diameters of Concrete by Different Mixing Methods

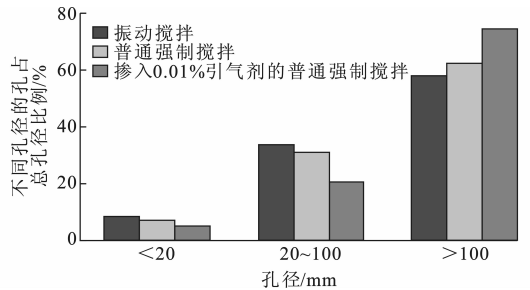


图9 不同搅拌方式下混凝土的孔径分布

Fig. 9 Pore Diameter Distributions of Concrete by Different Mixing Methods

入引气剂和振动搅拌都提高了硬化混凝土的总孔隙率,但振动搅拌混凝土的平均孔径最小。在混凝土结构中,一般认为小于20 nm的孔是无害凝胶孔,而大于100 nm的孔则认为是显著影响材料强度及渗透性的大毛细孔^[9-14]。由图9可见:对于大于100 nm的有害大孔数量,振动搅拌混凝土的最少,掺入引气剂强制搅拌混凝土的最多;而小于100 nm的各级别小孔数量,振动搅拌混凝土都要多于普通强制搅拌和掺入引气剂混凝土。这说明振动搅拌改善了混凝土中的孔结构,使孔隙得到细化,减少了有害

大孔的数量,因此能够提高混凝土强度。

3.5 机理分析

混凝土是一种非均质多相复合材料,搅拌装置与混合料间的相互作用对混凝土的形成过程及性能有着很大影响。普通强制搅拌过程中,搅拌叶片通过对物料进行推挤、剪切和抛出等强制搅拌作用,将空气带入水泥浆并被浆体包裹形成气泡。由叶片带入的空气,大部分因气泡直径过大而又被物料挤压出去,只有一些较小尺寸的气泡留存下来,所以新拌混凝土的含气量不大,硬化后的孔隙率也较小。引气剂由于具有界面活性作用和起泡、稳泡作用,因此掺入引气剂搅拌能够带入较多的空气且形成和留存的气泡尺寸较小,从而提高了混凝土的含气量和孔隙率,但也由于其内部孔隙的增多,在一定程度上削弱了混凝土的抗压强度及耐久性。振动搅拌过程中,由于搅拌叶片边强制搅拌边驱使物料振动,使得叶片带入的大气泡在振动作用下不断分裂为更小的

气泡而得以留存,因此振动搅拌通过孔隙细化来留存更多气体的方式增加了混凝土的含气量和孔隙率,同时也改善了混凝土的抗压强度和耐久性。振动搅拌能够改变混凝土中含气量及其孔结构分布,这与普遍采用的掺入引气剂来提高混凝土含气量而硬化混凝土强度却有一定减小的现象是有本质区别的。

为进一步验证振动搅拌技术在实际混凝土生产中的效果,在实验室研究的基础上,联合企业共同开发了 1 m³ 的双卧轴振动搅拌机,并配置在河南万里路桥集团有限公司许禹工地的 HZS50 型混凝土搅拌站。试验结果表明^[15],工业搅拌机的作业周期、单位产量能耗、搅拌匀质性等指标均满足国家标准要求,并且与普通强制搅拌相比,所生产的 C30 混凝土的 7 d 抗压强度提高约 12%,28 d 抗压强度提高约 10%。表 3 为实际工程的对比试验结果。

表 3 实际工程的对比试验结果

Tab. 3 Contrast Test Results of Real Engineering

搅拌方式	新拌混凝土 含气量/%	新拌混凝土匀质性		7 d 抗压强度/MPa		28 d 抗压强度/MPa	
		砂浆密度相 对误差/%	粗骨料质量 相对误差/%	平均强度	标准差	平均强度	标准差
振动搅拌	3.12	0.51	0.93	30.2	0.38	43.3	0.26
普通强制搅拌	2.04	0.57	1.21	27.0	0.75	39.5	0.59

4 结 语

(1)在不同引气剂掺量下,振动搅拌和普通强制搅拌的新拌混凝土匀质性差别不大,都完全符合 $\Delta M < 0.8\%$ 和 $\Delta G < 5\%$ 的标准要求;但随着引气剂的掺入以及掺量的增加,振动搅拌和普通强制搅拌混凝土的含气量都随之增加,抗压强度都随之降低,并且与普通强制搅拌相比,振动搅拌在不掺入引气剂以及掺入相同掺量引气剂的条件下,混凝土含气量都更大,抗压强度都更高。

(2)振动搅拌和掺入引气剂都能够提高硬化混凝土的孔隙率,但振动搅拌主要增多的是 100 nm 以下的小孔数量,所以不但能够提高混凝土的引气效果,而且也因为使孔隙细化,减小了有害大孔的数量,使混凝土强度性能得到改善。

(3)采用振动搅拌或振动搅拌掺入引气剂的方式,混凝土不但可以达到工程要求的较高含气量,而且比掺入引气剂下普通强制搅拌的混凝土强度显著增加,从而为提高混凝土综合性能提供了一种新的途径。当要求的含气量在 3% 时,只采用振动搅拌

即可获得所需的引气效果;当要求的含气量更高时,建议采用振动搅拌并同时掺入适量引气剂。

参考文献:

References:

[1] DU L X, FOLLIARD K J. Mechanisms of Air Entrainment in Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(8): 1463-1471.

[2] 杨钱荣. 混凝土渗透性及引气作用对耐久性的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 744-748.

YANG Qian-rong. Effect of Permeability of Concrete and Air Entrainment on Durability of Concrete[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(6): 744-748.

[3] 张金喜, 郭明洋, 杨荣俊, 等. 引气剂对硬化混凝土结构和性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(5): 38-41.

ZHANG Jin-xi, GUO Ming-yang, YANG Rong-jun, et al. Effect of Air-entraining Admixtures on the Structure and Properties of Hardened Concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30

- (5):38-41.
- [4] 黄维蓉,杨德斌,周建廷. 掺合料及引气剂对混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土,2010(9):80-82.
HUANG Wei-rong, YANG De-bin, ZHOU Jian-ting. Effects of Admixtures and Air Entraining Agent on Performance of Concrete[J]. Concrete, 2010(9): 80-82.
- [5] MAHBOUB K C, CUTSHAW Q A. Effects of Fresh Concrete Temperature and Mixing Time on Compressive Strength of Concrete[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(1): 59-62.
- [6] 程云虹, 苟振志, 王 元. 搅拌、振捣及养护对高性能混凝土强度影响的试验研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2010, 31(12): 1790-1793.
CHENG Yun-hong, GOU Zhen-zhi, WANG Yuan. Testing Investigation on Effects of Mixing, Vibrating and Curing on Strength of High-performance Concrete[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2010, 31(12): 1790-1793.
- [7] 张良奇, 冯忠绪. 混凝土搅拌过程及其评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(2): 101-105.
ZHANG Liang-qi, FENG Zhong-xu. Process of Concrete Mixing and Its Evaluation [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2): 101-105.
- [8] 冯西宁, 冯忠绪, 王卫中. 混凝土振动搅拌技术研究的回顾[J]. 中国工程机械学报, 2007, 5(1): 113-116.
FENG Xi-ning, FENG Zhong-xu, WANG Wei-zhong. Review on Concrete Vibratory Mixing Techniques [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2007, 5(1): 113-116.
- [9] 杨佑升. 水泥混凝土微观结构对抗压强度的影响[J]. 公路工程, 2009, 34(4): 151-154.
YANG You-sheng. Relationship Between Pore Structure of Concrete and Its Frost Durability Degradation [J]. Highway Engineering, 2009, 34(4): 151-154.
- [10] 张朝山. 浅谈混凝土搅拌方法和混凝土搅拌机的工艺现状[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(4): 25-27.
ZHANG Chao-shan. Technological Status of Mixing Method and Equipment for Concrete [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(4): 25-27.
- [11] 周立霞, 王起才, 张粉芹. 矿物掺合料和孔结构对混凝土抗渗性的影响[J]. 水力发电学报, 2010, 29(3): 196-201.
ZHOU Li-xia, WANG Qi-cai, ZHANG Fen-qin. Effect of Mineral Admixture and Pore Structure on the Permeability of Concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(3): 196-201.
- [12] 蒋春阳. 砂含泥量对水泥混凝土强度的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(12): 72-73, 77.
JIANG Chun-yang. Influence of Mud Content of Sand on Strength of Cement Concrete [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(12): 72-73, 77.
- [13] 费国新. 外加剂对水泥混凝土性能的影响分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(2): 70-73.
FEI Guo-xin. Analysis on Influence of Additive on Performance of Cement Concrete [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(2): 70-73.
- [14] 陈伟林, 张金喜, 金珊珊, 等. 煤矸石砂浆的孔结构与强度的关系[J]. 混凝土, 2010(8): 113-117.
CHEN Wei-lin, ZHANG Jin-xi, JIN Shan-shan, et al. Relationship Between the Pore Structure and Strength of Coal Gangue Mortar [J]. Concrete, 2010(8): 113-117.
- [15] 陈 卫. 1 m³ 双卧轴振动搅拌机的设计与试验[D]. 西安: 长安大学, 2012.
CHEN Wei. Design and Experiment of Twin-shaft Vibrating Mixer with the Capacity of 1 m³ [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

