

# 不同含气量对混凝土收缩性能的试验研究

杭美艳<sup>1</sup>, 孙忠科<sup>1</sup>, 郭艳梅<sup>2</sup>

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 呼和浩特建设工程质量监督站, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** 通过试验研究了不同含气量对路面常用 C35 混凝土流动性、抗压强度、早期收缩、后期收缩的影响并通过图像处理的手段分析孔隙率和分级孔隙率对 90 d 收缩的影响。结果表明: 混凝土的流动性随着含气量的升高先增大后减小, 含气量为 6.5% 时坍落度达到最大值 165 mm。抗压强度随含气量的升高而降低。混凝土的含气量越高对早期收缩变形的抑制越明显, 当含气量为 8.0% 时 72 h 收缩率最小; 7 d 以前混凝土的收缩率随着混凝土含气量的升高而减小; 14~90 d 混凝土收缩率随着含气量的升高而增大。含气量为 4.6% 时混凝土的流动性、抗压强度和收缩性能得到较好的平衡。图像法分析可知孔隙率越大 90 d 混凝土收缩率越大, 其中孔径为 1 000~2 000  $\mu\text{m}$  的气孔对 90 d 收缩贡献最大而 10~100  $\mu\text{m}$  的气孔对 90 d 收缩贡献最小。该方法简便快捷为今后工程应用提供了很好的理论依据。

**关键词:** 含气量; 早期收缩; 后期收缩; 图像处理; 孔隙率

中图分类号: TU528.042

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)01-0015-06

## Effect of different air content on shrinkage property of concrete

HANG Meiyang<sup>1</sup>, SUN Zhongke<sup>1</sup>, GUO Yanmei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Inner Mongolia Baotou 014010, China;

2. Hohhot Construction Project Quality Supervision Station, Inner Mongolia Hohhot 010020, China)

**Abstract:** In this paper, the effects of different air content on the fluidity, compressive strength, early shrinkage and late shrinkage of C35 concrete are studied experimentally, and the effects of porosity and graded porosity on 90 day shrinkage are analyzed by means of image processing. The results show that the fluidity of concrete increases first and then decreases with the increase of air content, and the maximum slump is 160 mm when air content is 6.5%, and the compressive strength decreases with the increase of air content. The higher the air content of concrete, the more obvious the restraint of early shrinkage deformation. When the air content is 8.0%, the shrinkage rate of 72 hours is the smallest; before 7 days, the shrinkage rate of concrete decreases with the increase of air content of concrete; and after 14 days to 90 days, the shrinkage rate of concrete increases with the increase of air content. When the air content is 4.6%, the fluidity, strength and shrinkage of concrete can be well balanced. The image analysis shows that the larger the porosity is, the larger the shrinkage of concrete in 90 days. The pore size of 1 000~2 000  $\mu\text{m}$  contributes the most to the shrinkage in 90 days, while the pore size of 10~100  $\mu\text{m}$  contributes the least to the shrinkage in 90 days. This method is simple and fast, which provides a good theoretical basis for future engineering applications.

**Key words:** air content; early shrinkage; later shrinkage; image processing; porosity

混凝土在硬化过程中会因为水泥的水化反应、内部水分的蒸发以及外界环境温度湿度的变化引起体积的收缩, 收缩产生的拉应力极易造成裂缝的出现, 影响混凝土结构的使用寿命。关于膨胀剂、减缩剂、纤维、矿物掺合料、水胶比和养护温度对混凝土收缩性能的影响, 国内外学者已做了大量的试验研究<sup>[1-6]</sup>。而针对含气量对混凝土收缩性能影响的研究目前较少。

引气剂作为一种化学外加剂在混凝土的搅拌过程中可以引入大量微小、均匀、稳定、封闭的气泡, 在公路、港口和桥梁等工程中有广泛的应用, 可以有效改善混凝土的气孔结构、强度、抗冻性和抗氯离子渗透性。Rath 等<sup>[7]</sup>认为随着引气剂掺量的增加, 气孔的平均直径减小。Wong 等<sup>[8]</sup>发现随着含气量的增加气体扩散系数和渗透系数均会增加。张凯等<sup>[9]</sup>发现混凝土中掺入引气剂会

收稿日期: 2019-03-15 修改稿日期: 2020-01-17

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目(2018MS0534)

第一作者: 杭美艳(1964—), 女, 教授级高工, 硕士生导师, 主要从事新型混凝土及混凝土外加剂、固体废弃物的建材化方面的研究。  
E-mail: 136100841@qq.com

通讯作者: 孙忠科(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事超高性能混凝土力学性能和普通混凝土耐久性研究。E-mail: sunzhongke66@163.com

使混凝土孔间距系数减小,抗冻性提高,混凝土强度降低。万惠文等<sup>[10]</sup>指出,引气剂掺量增加可增加  $0.1\ \mu\text{m}$  以下孔的数量,增强孔的不连通性,提高抗氯离子渗透性。

本文主要研究了不同含气量对混凝土早期收缩和后期收缩的影响规律,并运用图像法研究了 90 d 硬化混凝土的分级孔隙率与收缩的关联度。通过研究不同含气量对混凝土收缩性能的影响规律,有助于北方地区降低路面混凝土的收缩开裂,提高耐久性,为今后工程应用提供了有效的理论依据和技术支持。

## 1 试验原材料及试验方法

### 1.1 原材料

水泥选用蒙西 P·O42.5 水泥,密度为  $2\ 940\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 3 d 抗压强度 19.8 MPa, 28 d 抗压强度 47.8 MPa, 比表面积  $389.7\ \text{m}^2/\text{kg}$ 。矿物掺合料采用东华电厂 I 级粉煤灰,细度为 2.6%, 需水比为 89%, 28 d 活性指数 88%。

粗骨料采用包头当地 5~25 mm 连续级配碎石,表观密度为  $2\ 755\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 堆积密度为  $1\ 625\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 压碎指标 10%。细骨料选用包头产河砂,细度模数为 2.7, 表观密度为  $2\ 520\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 堆积密度为  $1\ 543\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 含泥量为 2.7%。

减水剂选用含固量为 12.5%, 减水率为 21% 的聚羧酸高性能减水剂。

引气剂选用 K12 粉剂配制的浓度为 2% 的溶液。采用摇泡法对 K12 引气剂的气泡高度和稳泡性进行测定,测定结果:初始泡沫高度 202 mm, 30 min 后泡沫高度 173 mm, 稳泡性能较好。如图 1 所示。

### 1.2 试验方法及参考依据

#### 1.2.1 配合比确定

为研究不同含气量对混凝土流动性、抗压强

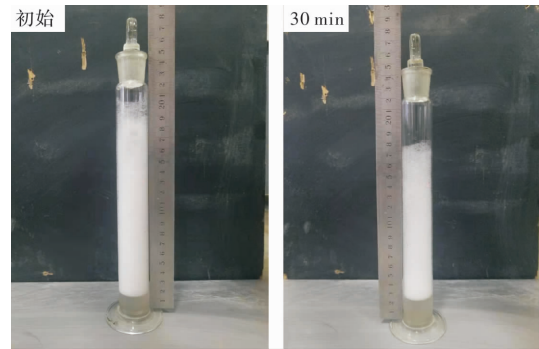


图 1 K12 引气剂摇泡状态

Fig. 1 Shaking state of air entraining agent K12

度、收缩性能的影响,依据 JGJ55-2011 选用北方路面常用 C35 混凝土的配合比作为基准组。试验组在基准组的基础上,仅改变引气剂的掺量,引气剂按胶材质量分数外掺,以此来改变混凝土的含气量。确定试验用混凝土配合比如表 1 所示。

#### 1.2.2 试验参考依据

(1)混凝土含气量测试参照 GB/T50080-2016 的有关规定进行检验。

(2)混凝土立方体抗压强度测试参照 GB/T50081-2002 的有关规定进行检验。

#### (3)混凝土早期收缩测定方法

参照 GB/T50082-2009 非接触法的有关规定对混凝土早期收缩进行测定。将试验装置放在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为 66% 的环境中,在混凝土初凝后每隔 25 分钟读一次数,测量总时长为 72 h,每组取 3 个试件测试结果的算术平均值为评定结果。

#### (4)混凝土后期收缩测定方法

参照 GB/T50082-2009 接触法的有关规定对混凝土后期收缩进行测定,将试件放在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为 90% 以上的环境中养护,在 3 d 测完初长后,分别间隔 1 d、3 d、7 d、14 d、28 d、45 d、60 d、90 d 测量其收缩变形读数。

表 1 混凝土配合比/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$   
Tab. 1 Concrete mix ratio/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$

试验编号	水泥	粉煤灰	砂子	石子	水	减水剂	引气剂
J	280	120	828	994	160	6	0
Y-1	280	120	828	994	160	6	0.4
Y-2	280	120	828	994	160	6	0.8
Y-3	280	120	828	994	160	6	1.2
Y-4	280	120	828	994	160	6	1.6

#### 1.2.3 分析原理与断面处理方法

##### (1)分析原理

本方法基于定量体视学<sup>[11]</sup>,即通过二维截面

参数获得三维结构组织的定量表征。主要分为三步:二维测量→应用体视学公式→三维定量表征,本方法应用的体视学公式如下:

体积分数  $V_V = A_A = L_L = P_P$

式中:  $A_A$  代表空间中的面,  $L_L$  代表空间中的线,  $P_P$  代表空间中的点. 体视学公式的运用保证了把二维图像的相关参数转换为精确度较高的三维几何形态的定量信息<sup>[12]</sup>.

Fatih Özcan 等<sup>[13]</sup>认为新拌混凝土的含气量与图像处理硬化混凝土的孔隙面积值之间表现出良好的相关性. 图像处理可用于硬化混凝土空气含量的测定.

(2) 断面处理方法

混凝土掺入引气剂后, 引入大量微小的气泡, 为方便分析掺入引气剂后混凝土孔结构的变化, 故选取孔径范围为  $10 \sim 2\,000\ \mu\text{m}$  的气孔进行气孔分析. 参照张雄等人<sup>[14]</sup>断面处理的方法. 将养护 90 d 的试块从中部切开, 并对截面进行表面打磨处理, 将打磨好的截面用黑色记号笔涂黑, 用  $0.4\ \mu\text{m}$  白色  $\text{CaCO}_3$  粉末均匀涂抹在处理后的截面上, 刮去多余粉末并进行拍照. 采用 Image Pro Plus 软件对图片进行灰度和二次化处理, 使气孔在浆体中的分布和形貌变得清晰, 然后进行数据分析得到  $10 \sim 2\,000\ \mu\text{m}$  气孔的分级孔隙率.

2 试验结果与分析

2.1 不同含气量时混凝土的性能

不同含气量对混凝土性能的影响如表 2 所示. 相比 J 组, 各试验组随着引气剂掺量的增加混凝土坍落度呈先增大后减小的趋势, Y-3 组混凝土坍落度达到最大值 165 mm, 此时含气量为 6.5%. 将适量封闭稳定的气泡引入新拌和的混凝土中, 均匀分布的气泡起到滚珠的作用, 减小骨料之间的摩擦力, 大大增加了浆体的润滑作用<sup>[15]</sup>, 使得混凝土坍落度变大. 引入过量气泡, 浆体孔隙间的填充水被吸附在气泡表面, 使胶材颗粒间的水分减少, 骨料间填充的浆体变得干稠, 导致混凝土的流动性降低.

表 2 不同含气量时混凝土的性能

Tab. 2 Performance of concrete with different air content

试验编号	含气量/%	坍落度/mm	抗压强度/MPa	
			7 d	28 d
J	1.3	140	33.1	52.1
Y-1	3.3	150	30.1	50.1
Y-2	4.6	160	27.6	47.8
Y-3	6.5	165	24.8	39.7
Y-4	8.0	140	24.6	37.8

相比 J 组, 各试验组掺入引气剂后, 混凝土 7 d 和 28 d 抗压强度都随含气量的增大而减小. J 组 28 d 抗压强度最高, 为 52.1 MPa; Y-4 组 28 d 抗压强度最低, 为 37.8 MPa. 新拌混凝土中引入气泡之后, 混凝土内部出现大量气孔, 且含气量越大气孔越多, 使得混凝土不再密实; 有部分气泡围绕在骨料周围, 气泡表面的水膜使得骨料与水泥石之间的粘结减弱, 形成薄弱界面. 以上原因使得混凝土的抗压强度随含气量的升高而降低.

2.2 不同含气量时混凝土的早期收缩

不同含气量时混凝土的早期收缩如图 2 所示. 对比 J、Y-2、Y-4 这 3 组的早期收缩, J 组 72 h 的收缩率最大, 其值为  $120 \times 10^{-6}$ . Y-2 组 72 h 的收缩率为  $72 \times 10^{-6}$ , Y-4 组 72 h 的收缩率最小, 其值为  $51 \times 10^{-6}$ , 相比于 J 组, Y-2 组 72 h 的收缩率下降了 40%, Y-4 组 72 h 的收缩率下降了 57.5%. 结果证明引气剂的掺入对混凝土早期收缩有明显的抑制作用, 随着含气量的升高混凝土早期收缩逐渐降低.

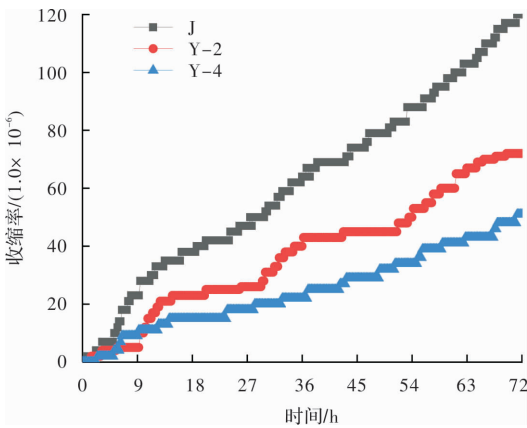


图 2 不同含气量时混凝土的早期收缩

Fig. 2 Early shrinkage of concrete with different air content

在试验过程中混凝土表面进行覆膜处理, 所以混凝土的早期收缩主要以自收缩<sup>[16]</sup>为主. 自收缩主要受毛细管压力、表面张力、分离压力和层间水迁移的影响<sup>[17]</sup>. 随着含气量的增大, 气泡间隔减小, 能有效隔断混凝土内部毛细管通道, 防止混凝土内部的水分泌出, 减弱毛细管压力并抑制了层间水的迁移. 大量气泡均匀分布在混凝土内部起到气垫缓冲作用, 削弱了因水泥凝胶颗粒的表面张力和 C-S-H 凝胶粒子间的分离压力引起的体积变化. 因此, 混凝土含气量越大早期收缩越小.

2.3 不同含气量时混凝土的后期收缩

不同含气量时混凝土的后期收缩如图 3 所示.

混凝土的收缩曲线呈阶段性变化, 7 d 以前混凝土的收缩率随含气量的升高而减小, 相比于 J 组 Y-2 组 7 d 的收缩率下降幅度为 5.6%, Y-4 组 7 d 的收缩率下降幅度为 22.4%; 14~90 d 混凝土收缩率随含气量的升高而增大. 相比于 J 组 Y-2 组 90 d 的收缩率增长幅度为 39.9%, Y-4 组 90 d 的收缩率增长幅度为 114.8%. 由此可见引气剂的掺入对混凝土 7 d 以前的收缩起抑制作用但对 14~90 d 的收缩起促进作用.

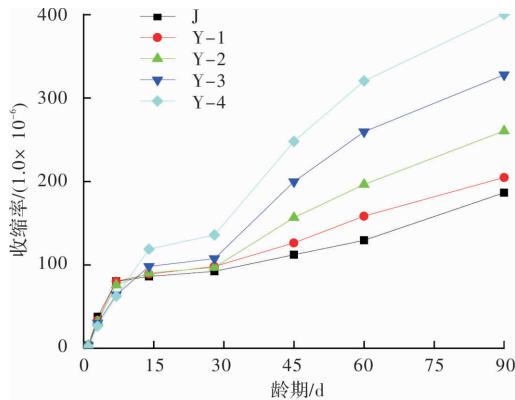


图3 不同含气量时混凝土的后期收缩

Fig. 3 Later shrinkage of concrete with different air content

混凝土后期收缩主要以自收缩和干燥收缩<sup>[18]</sup>为主. 在 7 d 以前, 混凝土开始逐渐硬化, 水化反应迅速, 在水胶比相同的情况下各组水化速率基本相同. 混凝土的含气量越高, 内部气泡隔断毛

细管通道的作用越明显, 混凝土自收缩和干燥收缩越小<sup>[19]</sup>, 此时与早期收缩的机理相似. 14 d 以后, 随着水化反应的进行混凝土已具有一定强度, 此时大部分毛细管中的水被消耗一空, 气孔对毛细管压力和层间水迁移的抑制作用减弱. 混凝土的含气量越大, 孔隙率越大, 平均孔径减小, 毛细孔数量增多. 有学者认为, 毛细孔和胶凝孔对混凝土收缩有明显影响<sup>[20]</sup>, 主要依靠胶凝孔和较小的毛细孔来补偿因水泥水化反应和干燥失水产生的体积变化. 另外随着含气量的增加, 气孔-水泥浆体界面过渡区微小气孔和重叠与连通的气孔增多, 增大了混凝土内部水分扩散速度, 加速了干燥收缩<sup>[21]</sup>. 因此, 含气量越大 14 d 以后的收缩越大.

#### 2.4 混凝土断面气孔分析

分别对 5 组混凝土断面的气孔进行图像处理和 分析, 混凝土截面气孔的孔隙率和分级孔隙率如 表 3 所示. 采用灰色关联分析方法<sup>[22]</sup> 分析分级孔 隙率与 90 d 混凝土收缩率之间的关联度, 其中 90 d 混凝土收缩率是母序列, 分级孔隙率是子序列. 此方法主要是通过比较子序列与母序列曲线几何 形状的相似程度来判断各序列间的联系是否紧密, 曲线形状越接近关联度越大, 反之则越小. 若正 关联则说明子序列对母序列起促进作用, 负关联 则说明子序列对母序列起抑制作用.

表 3 不同含气量时 90 d 混凝土的孔径分布

Tab. 3 Pore size distribution of 90 d concrete with different air content

试验编号	含气量 /%	总孔隙率 /%	90 d 收缩 率/%	分级孔隙率/%				
				10~100 / $\mu\text{m}$	100~250 / $\mu\text{m}$	250~500 / $\mu\text{m}$	500~1 000 / $\mu\text{m}$	1 000~2 000 / $\mu\text{m}$
J	1.3	0.173	186.4	0.000 3	0.018 7	0.025 5	0.021 0	0.088 7
Y-1	3.3	0.642	204.7	0.016 8	0.322 9	0.139 9	0.119 3	0.042 7
Y-2	4.6	1.135	260.7	0.010 9	0.533 7	0.339 0	0.238 2	0.090 7
Y-3	6.5	2.075	327.9	0.015 9	1.118 2	0.523 6	0.239 2	0.178 3
Y-4	8.0	3.367	400.3	0.029 3	1.340 0	1.342 8	0.435 3	0.219 8

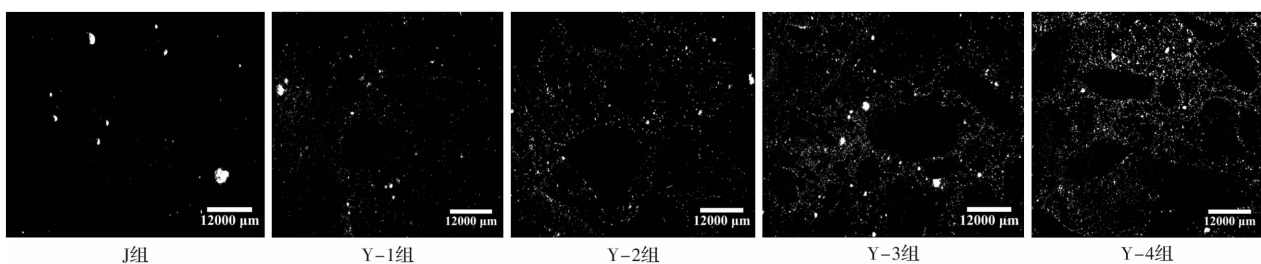


图 4 90 d 混凝土的气孔分布和形貌特征

Fig. 4 Pore distribution and morphological characteristics of 90 d concrete



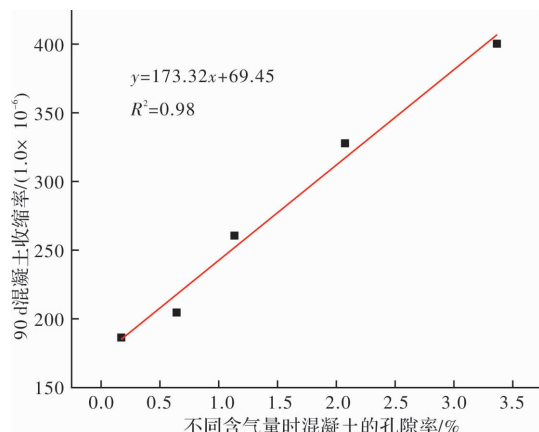


图5 不同含气量时孔隙率对90 d混凝土收缩的影响

Fig. 5 Effect of porosity on shrinkage of 90 d concrete with different air content

由图4、图5可以看出随着含气量的升高,混凝土基体中的气孔分布逐渐均匀,且微小的气孔增多,孔隙率增大,混凝土90 d收缩率与孔隙率成正相关,即孔隙率越大90 d收缩率越大。由此可以推测出含气量越大混凝土90 d收缩越大。通过对表3进行关联度计算<sup>[23]</sup>,结果为:10~100  $\mu\text{m}$ 为+0.57;100~250  $\mu\text{m}$ 为+0.65;250~500  $\mu\text{m}$ 为+0.78;500~1 000  $\mu\text{m}$ 为+0.86;1 000~2 000  $\mu\text{m}$ 为+0.99。关联度从大到小的顺序为:1 000~2 000  $\mu\text{m}$ >500~1 000  $\mu\text{m}$ >250~500  $\mu\text{m}$ >100~250  $\mu\text{m}$ >10~100  $\mu\text{m}$ 。关联度为正,表明基体中的气孔都对90 d混凝土收缩起促进作用。结果表明,孔径为1 000~2 000  $\mu\text{m}$ 的气孔对混凝土90 d收缩增长的贡献最大,孔径为10~100  $\mu\text{m}$ 的气孔对混凝土90 d收缩增长的贡献最小,气孔越大90 d混凝土收缩越大。由此可知相同含气量时增大混凝土中10~100  $\mu\text{m}$ 的气孔含量减小1 000~2 000  $\mu\text{m}$ 的气孔含量,有利于降低90 d混凝土收缩。

### 3 结论

(1)混凝土的流动性随含气量的增大呈先升高后降低的趋势,含气量为6.5%时坍落度达到最大值165 mm;抗压强度随含气量的增大而减小。

(2)引气剂的掺入对混凝土早期收缩有很好的抑制作用,混凝土的早期收缩率随着含气量的升高逐渐减小,在含气量为8%时72 h收缩率最小,其值为 $51 \times 10^{-6}$ ;混凝土7 d前的收缩随含气量的升高逐渐减小;14~90 d的收缩随含气量的升高逐渐增大。

(3)含气量为4.6%时,混凝土流动度较好,

对早期收缩有很好地抑制作用,对强度和后期收缩的影响较小,这四者之间得到较好的平衡。

(4)新拌混凝土含气量越高,90 d收缩增长越大;其中孔径为1 000~2 000  $\mu\text{m}$ 的气孔对90 d收缩贡献最大,而10~100  $\mu\text{m}$ 的气孔对90 d收缩贡献最小。应用图像法可以更简单快捷的测出气孔分布对后期收缩的影响。

### 参考文献 References

- [1] 阎培渝,韩建国,曹丰泽,等. 补偿收缩混凝土性能的影响因素与质量控制[J]. 施工技术,2018,47(16):97-99.  
YAN Peiyu, HAN Jianguo, CAO Fengze, et al. The influencing factors of property and quality control of shrinkage compensating concrete [J]. Construction Technology, 2018, 47(16):97-99.
- [2] ZHAN Peimin, HE Zhihai. Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201:676-690.
- [3] BOUZIADI F, BOULEKBACHE B, HAMRAT M. The effects of fibres on the shrinkage of high-strength concrete under various curing temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114:40-48.
- [4] 张骏,田帅,梁丽敏,等. 矿物掺合料对混凝土早期收缩及开裂性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2018(9):16-19.  
ZHANG Jun, TIAN Shuai, LIANG Limin, et al. The influence of mineral admixtures on early age shrinkage and cracking of concrete[J]. Concrete and Cement Products, 2018(9):16-19.
- [5] 冯竟竟,苗苗,阎培渝. 补偿收缩复合胶凝材料的水化与膨胀性能[J]. 建筑材料学报,2012,15(4):439-445.  
FENG Jingjing, MIAO Miao, YAN Peiyu. Hydration and expansion properties of shrinkage compensating composite cementitious materials[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4):439-445.
- [6] SHEN Dejian, JIANG Jinliang, SHEN Jiaxin, et al. Influence of curing temperature on autogenous shrinkage and cracking resistance of high-performance concrete at an early age[J]. Construction and Building Materials, 2016, 103:67-76.
- [7] RATH S, OUCHI M, PUTHIPAD N, et al. Improving the stability of entrained air in self-compacting concrete by optimizing the mix viscosity and air entraining agent dosage[J]. Construction and Building Materials, 2017, 148:531-537.
- [8] WONG H S, PAPPAS A M, ZIMMERMAN R W, et al. Effect of entrained air voids on the microstructure

- and mass transport properties of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(10):1067-1077.
- [9] 张凯,王起才,王庆石,等. 含气量对低温养护下混凝土早期实际强度及抗冻性能的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(3):677-683.
- ZHANG Kai, WANG Qicai, WANG Qingshi, et al. Research of air content on the effect of concrete early actual strength and frost resistance under low temperature curing [J]. Silicate Bulletin, 2015, 34 (3): 677-683.
- [10] 万惠文,杨淑雁,吕艳锋. 引气混凝土抗氯离子渗透性与孔结构特性[J]. 建筑材料学报, 2008(4):409-413.
- WAN Huiwen, YANG Shuyan, LV Yanfeng. Resistance to chloride ion permeability and pore structure of air entrained concrete[J]. Journal of Building Materials, 2008 (4):409-413.
- [11] 刘国权,王浩,肖翔,等. 经典体视学:基本功能、独特应用与标准化应用[J]. 中国体视学与图像分析, 2012, 17(4):293-300.
- LIU Guoquan, WANG Hao, XIAO Xiang, et al. Classical stereology: basic capabilities, state of art applications and standar dization[J]. Chinese Stereology and Image Analysis, 2012, 17(4):293-300.
- [12] 刘国权,刘胜新,黄启今,等. 金相学和材料显微组织定量分析技术[J]. 中国体视学与图像分析, 2002(4):248-251.
- LIU Guoquan, LIU Shengxin, HUANG Qijin, et al. Metallography and quantitative analysis techniques of material microstructure[J]. China Stereology and Image Analysis, 2002(4):248-251.
- [13] FATİH Özcan, MEHMET Emin Koç. Influence of ground pumice on compressive strength and air content of both non-air and air entrained concrete in fresh and hardened state[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187:382-393.
- [14] 张雄,黄廷皓,张永娟,等. Image-Pro Plus 混凝土孔结构图像分析方法[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1):177-182.
- ZHANG Xiong, HUANG Tinghao, ZHANG Yongjuan, et al. Image-Pro Plus analysis of pore structure of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18 (1): 177-182.
- [15] 周美茹,陈国强,朱洪波. 含气量对混凝土流动性、强度和氯离子渗透性的影响[J]. 混凝土, 2015(6):63-65.
- ZHOU Meiru, CHEN Guoqiang, ZHU Hongbo. Effects of air content on fluidity, compressive strength and chloride penetration of concrete [J]. Concrete, 2015(6):63-65.
- [16] 周双喜. 混凝土的自收缩机理及抑制措施[J]. 华东交通大学学报, 2007(5):13-16.
- ZHOU Shuangxi. Autogenous shrinkage of concrete and its restraining measures[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007(5):13-16.
- [17] 曹秀丽,张红飞,董先锋,等. 高性能混凝土自收缩机理及预测模型的研究进展[J]. 混凝土, 2012(10):48-50.
- CAO Xiuli, ZHANG Hongfei, DONG Xianfeng, et al. Review of mechanisms and prediction models of autogenous shrinkage in high performance concrete[J]. Concrete, 2012(10):48-50.
- [18] SONG Kaiwei, CHEN Guofu, ZHANG Hang, et al. Mechanism research of drying shrinkage of cement pastes based on the contact angle [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 670-671:391-395.
- [19] 杨钱荣,黄士元. 引气混凝土的特性研究[J]. 混凝土, 2008(5):3-7.
- YANG Qianrong, HUANG Shiyuan. Characteristics of air entrained concrete[J]. Concrete, 2008(5):3-7.
- [20] 宋强. 矿渣水泥的收缩性与其硬化水泥石组成的关系 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2005.
- SONG Qiang. The relationship between shrinkage of slag cement and its hardened cement stone composition [D]. Xi'an:Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2005.
- [21] PIASTA W, SIKORA H. Effect of air entrainment on shrinkage of blended cements concretes[J]. Construction and Building Materials, 2015, 99:298-307.
- [22] 高辉,张雄,张永娟. 混凝土气孔结构对其强度及界面过渡区的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(5):751-756.
- GAO Hui, ZHANG Xiong, ZHANG Yongjuan. Effect of air void structure on strength and interfacial transition zone of concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2014, 42 (5): 751-756.
- [23] 周立霞,王起才. 粉煤灰粒度分布及其活性的灰色关联分析[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(3):656-661+666.
- ZHOU Lixia, WANG Qicai. Grey incidence analysis between particle size distribution of fly ash and its activity [J]. Silicate Bulletin, 2011, 30 (3): 656-661,666.

(编辑 沈 波)