

低温法改善橡胶颗粒在砂浆中上浮的研究

朱 涵^{1,2}, 王林照¹, 于 泳¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;

2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 针对橡胶砂浆中橡胶颗粒上浮问题, 提出一种新的改善橡胶砂浆中橡胶颗粒上浮的方法。对两组橡胶颗粒进行表面烘干后低温冷冻然后再进行砂浆试件的拌合成型, 利用 R2V 自动矢量化软件结合 AutoCAD 软件统计试件截面内橡胶颗粒分布情况, 统计结果表明橡胶颗粒在砂浆中的上浮现象均得到了改善。通过试验测量了两组橡胶颗粒表面烘干冷冻前后的密度变化和橡胶砂浆力学性能的变化, 结果表明两组橡胶颗粒表面烘干冷冻后的密度较表面烘干冷冻前的密度分别增加了约 29% 和 32%, 3 d 抗折强度和抗压强度均低于表面烘干冷冻前强度, 28 d 抗折强度和抗压强度均高于表面烘干冷冻前强度。

关键词: 橡胶砂浆; 橡胶上浮; 密度; 力学性能

中图分类号: TU578.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2018)03-0036-08

橡胶集料混凝土(Crumb Rubber Concrete)是由普通混凝土进行橡胶颗粒取代一定体积含量的集料所得到的一种复合材料, 其不但在橡胶制品的回收处理方面有着重要意义, 而且橡胶集料混凝土结合了橡胶和混凝土两种材料的特点, 在材料力学性能和耐久性能方面较普通混凝土有很大变化, 有着广阔的应用前景。但是在另一方面, 由于橡胶颗粒密度较小, 在橡胶集料混凝土的施工过程中橡胶颗粒易发生上浮, 严重影响了橡胶集料混凝土内部均质性, 直接阻碍了橡胶集料混凝土的推广应用。刘峥等^[1]研究了橡胶集料混凝土成型过程中的振捣时间对橡胶在混凝土分布的影响, 得出振捣时间应控制在 40 s 以内, 才能对橡胶上浮起到一定控制作用的结论; 王昱^[2]通过正交试验的研究方法, 发现减小水胶比、减小减水剂掺量、增大体积砂率以及增大橡胶细集料的掺量可以改善轻集料在混凝土中的离析现象; Turatsinze 和 Garros^[3]研究发现, 掺入适量的超塑化剂(3.5~9.32 kg/m³)可以有效控制橡胶集料上浮的现象。控制橡胶集料混凝土的振捣时间虽然对控制橡胶上浮有一定的贡献, 但是如果振捣不充分会降低混凝土的密实性, 对橡胶集料混凝土的性能造成不良影响; 通过调整橡胶集料混凝土的配合比控制橡胶上浮的方法实现起来比较复杂, 受实际工程状况的约束较大; 超塑化剂的掺入造成混凝土含气量增加以及干表观密度的减小^[4]。为此, 现提出用表面烘干后低温处理橡胶颗粒的方法来改善其在砂浆中的分布。利用橡胶的热胀冷缩的物理性质, 将待掺入的橡胶颗粒烘干后放入-15℃的低温环境中冷冻一定时间, 由于低温造成橡胶颗粒体积收缩, 密度增大, 颗粒半径减小, 从而橡胶颗粒向上运动的速度减小, 橡胶砂浆中橡胶颗粒上浮的程度得到改善。

1 橡胶砂浆的数学模型

从物理学的角度分析, 导致颗粒从分散介质中分离的直接原因是它们之间发生了相对运动而产生不同的位移。在成型好的橡胶砂浆中, 出现橡胶颗粒分布不均匀的现象的直接原因是由于各种颗粒的相对运动速度不同, 此时橡胶颗粒的自重、砂浆的粘性抵抗力和浮力三者共同构成了橡胶颗粒的力状态。根

收稿日期: 2017-03-19 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxsbzrb.2018.03.06

基金项目: 空军重点项目(BKJ14C011)

作者简介: 朱涵(1956—)男, 教授, 主要从事橡胶集料混凝土和低碳结构设计研发。E-mail: ZHUHANTJU@163.com

朱涵, 王林照, 于泳. 低温法改善橡胶颗粒在砂浆中上浮的研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2018, 31(3): 36-43.

据流体力学原理, 橡胶颗粒在砂浆中的运动方程可以写为

$$\frac{3}{4}\pi r^3 \rho \frac{dv}{dt} = \frac{3}{4}\pi r^3 \rho g - 6\pi r \eta v - \frac{3}{4}\pi r^3 \rho_c g + f(P) + f(H) \quad (1)$$

式中 ρ 为橡胶颗粒表观密度; ρ_c 为砂浆密度; r 为橡胶颗粒半径; η 为砂浆的粘性系数; v 为橡胶颗粒的运动速度; $f(P)$ 为压力相因子, 表征压力变化对橡胶颗粒运动速度的影响; $f(H)$ 为历史相因子, 表征流体的历史相对橡胶颗粒运动速度的影响。

在静态条件下历史相因子和压力相因子均可忽略。整理式(1)可得

$$\frac{dv}{dt} + \frac{9\eta}{2\rho r^2} v = g \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho} \right) \quad (2)$$

对式(2)积分, 设定模型的初始条件为 $t=0$ $v=0$, 由此可得到

$$v = \frac{2r^2 g (\rho - \rho_c)}{9\eta} \left(1 - e^{-\frac{9\eta t}{2\rho r^2}} \right) \quad (3)$$

设 v 为颗粒的最终速度, 当 $t \rightarrow \infty$ 时可得到

$$v = \frac{2r^2 g (\rho - \rho_c)}{9\eta} \quad (4)$$

由于橡胶颗粒的表观密度 ρ 小于砂浆的密度 ρ_c , 因此 $\rho - \rho_c < 0$, 表示橡胶颗粒的运动方向与重力作用的方向相反, 橡胶颗粒向上浮。

对式(4)两边取绝对值可得到

$$|v| = \frac{2r^2 |g| (\rho_c - \rho)}{9\eta} \quad (5)$$

橡胶颗粒向上的运动速度越大, 橡胶砂浆中橡胶颗粒上浮程度越严重。由式(5)可见, 橡胶颗粒的向上运动速度的大小 $|v|$ 与橡胶颗粒粒径 r 的平方成正比, 与橡胶颗粒与砂浆的密度差 $\rho_c - \rho$ 成正比, 当橡胶颗粒的表观密度 ρ 增大时, $\rho_c - \rho$ 值减小, $|v|$ 减小, 表示橡胶颗粒向上的运动速度减小。下面探究一下通过低温方法改变橡胶颗粒表观密度和半径是否对控制颗粒上浮有所贡献。

2 原材料配合比及试验方法

2.1 原材料配合比

水泥采用天津市水泥实业公司(原天津市水泥厂)生产的骆驼牌 P. O42.5 普通硅酸盐水泥; 试验所用砂为标准砂; 粉煤灰采用唐山玉田电厂一级粉煤灰, 堆积密度为 580 kg/m^3 , 孔隙率为 55%; 硅灰采用山西忻州产的硅灰, 其表观密度为 2240 kg/m^3 , SiO_2 的含量为 89.97%; 橡胶颗粒采用粒径范围分别为 1~2 mm 和 2~3 mm 的两种橡胶颗粒, 其相关技术指标如表 1 所示; 减水剂采用江苏博特新材料有限公司(天津分公司)生产的聚羧酸高效减水剂, 减水率 30%; 水采用普通自来水。

表 1 橡胶集料技术指标

橡胶烃	炭黑	丙酮抽提物	异戊二烯	水	灰分	纤维含量	金属含量	其它
45.2	25.8	14.2	12.1	0.8	0.9	0.5	0.08	0.42

橡胶砂浆配合比如表 2 所示。基准砂浆(未掺入橡胶颗粒的砂浆)流动性测试采用金属截锥圆模如图 1 所示, 其尺寸如表 3 所示。测试过程在玻璃板上进行。当砂浆不再扩展时, 量取两个垂直方向的扩展尺寸, 对二者平均值取整数, 重复试验三组取其平均值作为基准砂浆最终流动性测试结果^[5]。基准砂浆流动性测试结果为 300 mm。

表 2 橡胶砂浆配合比

橡胶 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	硅灰 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂 / %
135	235	836	130	52.3	1215	1.3

表 3 截锥圆模尺寸 mm

高度	上部内径	底部内径	底部外径	厚度
60 ± 0.5	70 ± 0.5	100 ± 0.5	120 ± 0.5	> 5



图 1 截锥圆模

2.2 试验方法

对橡胶颗粒进行表面烘干处理,设置烘干箱温度为 60 °C^[6],并开启鼓风机,烘干持续时长 20 min 后关闭烘干箱,待箱内温度降低到常温后将橡胶颗粒取出放入冷冻箱内,冷冻箱内温度设置为 -15 °C。根据橡胶颗粒粒径的不同,试验分为 Y、Z 两组,Y 组橡胶颗粒粒径为 1 ~ 2 mm,Z 组橡胶颗粒粒径为 2 ~ 3 mm。各组橡胶冷冻时间如表 4 所示。橡胶砂浆试件尺寸 40 mm × 40 mm × 160 mm,每组制备 3 个试块,试块浇筑完成后 24 h 拆模,标准养护 24 h 后在中间位置横向剖开,观察横截面橡胶颗粒的分布。

表 4 冷冻时间

	min											
分组	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Y-6	Z-1	Z-2	Z-3	Z-4	Z-5	Z-6
时间	0	20	40	60	80	100	0	30	60	90	120	150

3 结果统计

将截面分为 4 块面积等大的区域,如图 2 中所示 A、B、C、D。其中 A 的上表面为浇筑试件的抹平面。利用 Photoshop 图片处理软件将彩色图像转换成灰度图像,调整对比度如图 3,利用 R2V(Raster2Vector) 自动矢量化软件对试块截面灰度图片进行矢量处理如图 4,然后利用 AutoCAD 软件中面积统计功能统计试块截面每个区域中橡胶颗粒的面积如图 5,每组中截面每个区域有 6 个统计数据,去掉最大值和最小值,将剩下数据的平均值作为统计有效数据,分别记为 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 。

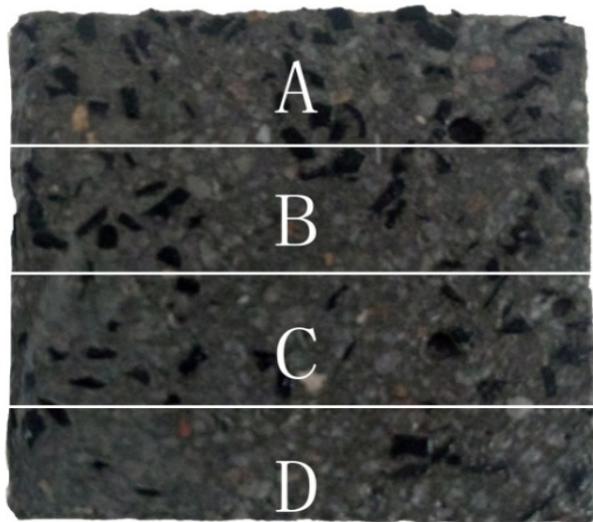


图 2 截面分区

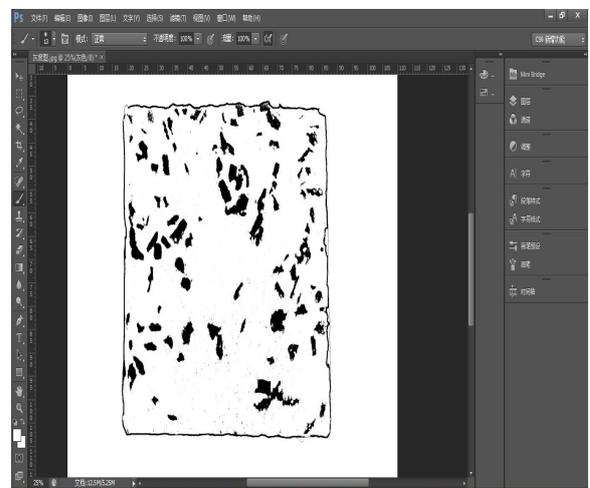


图 3 灰度图像

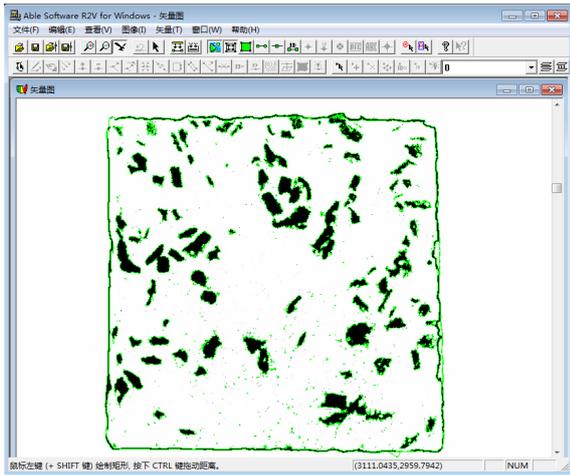


图 4 矢量图像

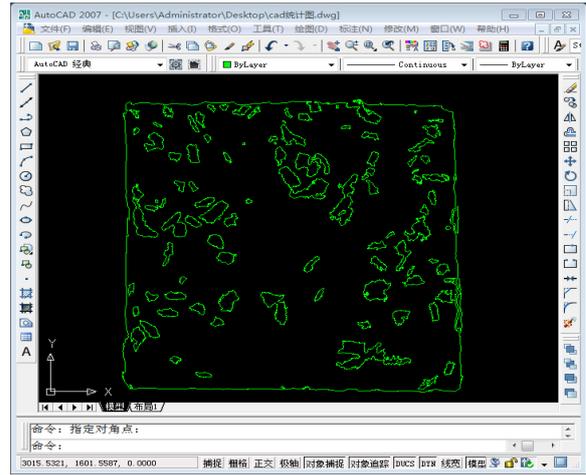


图 5 AutoCAD 统计图像

图形数据的数据结构分为矢量数据和栅格数据^[7], R2V 软件将栅格数据转化为矢量数据是通过以下 3 个过程实现:

(1) 二值化。扫描后的图像是按 0 至 255 的不同灰度值量度的不同灰度级来进行储存的, R2V 软件在进行栅格数据矢量化时, 将 256 个灰度级压缩为 0 和 1 两个灰度级, 二值化的关键是在灰度级的最大值和最小值之间选取一个阈值, 如式 (6) 所示, 当灰度级小于阈值时取值为 0, 当灰度级大于阈值时取值为 1。阈值可根据经验进行人工设定, 通常取值在 180 ~ 220 之间, 文中栅格图片比较简单故采用自动矢量过程, 其阈值由软件自动选取。

$$B(i, j) = \begin{cases} 1 & G(i, j) \geq T \\ 0 & G(i, j) < T \end{cases} \quad (6)$$

式中, T 为阈值; $G(i, j)$ 为灰度值。

(2) 细化。将二值图像像元阵列逐步剥除轮廓边缘的点, 使之成为线宽度只有一个像元的骨架图形, 矢量化软件细化图像方法主要有取中轴线法和迭代删除边界点法两种, 取中轴线法是将图像目标的像素到轮廓的距离为标记, 通过分析标记得到图像目标的骨架, 而迭代删除边界法是通过逐步删除边界点直到剩下单连通的线为止, 所得单连通线为目标骨架, R2V 软件采用迭代删除边界法进行图像矢量化处理。

(3) 跟踪。在栅格数据被细化之后, 将其整理为从结点出发的线段或者是闭合的线条, 并以矢量的形式存储特征栅格点中心的坐标, 至此栅格数据矢量化处理完毕, 将矢量数据以 . dxf 格式输出保存。

其统计结果如表 5 所示, 截面情况如图 6 所示。

表 5 统计结果 mm²

分组	S_A	S_B	S_C	S_D
Y-1	33.7	25.7	2.1	1.4
Y-2	34.4	31.0	11.9	4.8
Y-3	31.3	32.3	22.3	11.9
Y-4	30.2	35.7	26.0	21.4
Y-5	30.6	30.9	27.8	23.1
Y-6	30.9	29.9	28.0	27.3
Z-1	36.4	15.4	2.2	0.1
Z-2	36.5	20.2	2.3	0.3
Z-3	35.4	24.3	9.6	3.8
Z-4	36.4	30.3	24.1	12.0
Z-5	35.0	34.4	25.5	19.4
Z-6	31.8	31.3	26.0	19.5

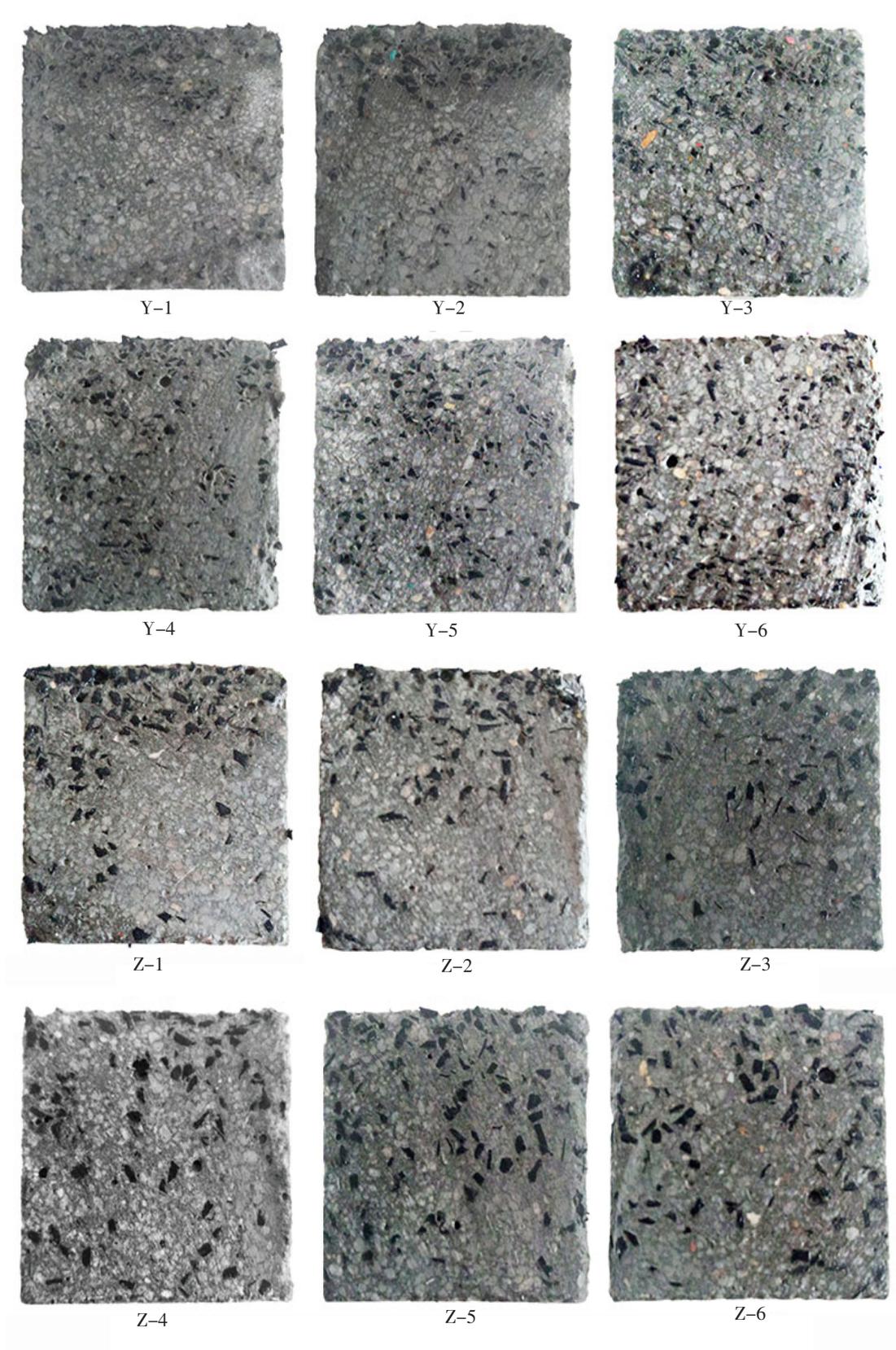


图 6 截面图像

4 数据分析

计算橡胶颗粒上浮系数^[8]

$$K = \frac{S_A + S_B}{S_C + S_D} \quad (7)$$

式中 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 分别为截面中 A、B、C、D 区中橡胶集粒面积。 K_Y 、 K_Z 分别表示 Y、Z 组的橡胶颗粒上浮系数 K 值越大表示橡胶颗粒上浮越明显 K 值为 1 时 表示橡胶颗粒没有上浮。

记 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 的标准差 V 为橡胶颗粒在上下方向的均布系数 V_Y 、 V_Z 分别表示 Y、Z 组的橡胶颗粒在上下方向的均布系数 V 值越小 表示橡胶颗粒在上下方向分布越均匀。

图 7 为橡胶颗粒上浮系数随其冷冻时间的变化曲线图 由图 7 可以看出 橡胶颗粒在砂浆中的上浮程度与橡胶颗粒的粒径有关 Z-1 组的橡胶颗粒上浮系数 K 约为 Y-1 组的 1.3 倍。表面烘干后冷冻处理橡胶的方法对控制橡胶颗粒在砂浆中上浮有显著效果 Y-6 组的橡胶颗粒上浮系数 K 约为 Y-1 组的 1/15 Z-6 组的橡胶颗粒上浮系数 K 约为 Z-1 组的 1/16。 K_Y 在 150 min 处取得最小值 且 K_Y 曲线在此处切线接近水平线 K_Z 在 80 min 处取得最小值。

图 8 为橡胶颗粒均布系数随冷冻时间的变化曲线图 由图 8 可以看出 随着冷冻时间的增加 V_Y 呈现不断下降的趋势 V_Z 曲线呈现先上升后下降趋势。

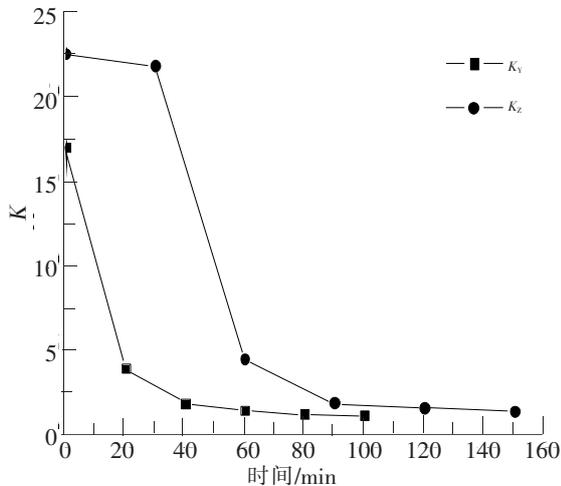


图 7 橡胶颗粒上浮系数随冷冻时间的变化曲线图

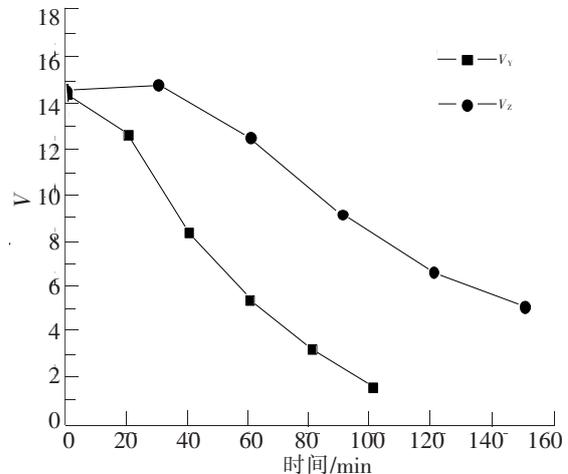


图 8 橡胶颗粒均布系数随冷冻时间的变化曲线图

由以上分析可知 1 ~ 2 mm 橡胶颗粒在冷冻 80 min 时橡胶颗粒上浮系数与上下方向的均布系数均取得最小值 2 ~ 3 mm 橡胶颗粒在冷冻 150 min 时橡胶颗粒上浮系数与上下方向的均布系数均取得最小值 其原因在于经过低温处理后 橡胶颗粒体积收缩 在质量不变的情况下 其密度增大 且收缩导致颗粒半径有所减小 由数学模型中公式(5)可得 在 ρ 增大 r 减小的情况下 橡胶颗粒向上运动速度 $|v|$ 减小。

5 冷冻对材料性能的影响

5.1 橡胶颗粒密度的变化

采用李氏瓶法分别测量 Y 组橡胶颗粒表面烘干冷冻前和冷冻 80 min 后的密度以及 Z 组橡胶颗粒表面烘干冷冻前和冷冻 150 min 后的密度 用酒精作为测量液体 其浓度为 95% 密度约为 0.8 g/cm^3 其中冷冻后的两组橡胶颗粒密度的测量过程在 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境中进行 测量结果如图 9 所示。由图中可以看出表面烘干冷冻后较冷冻前两组橡胶颗粒密度均有增加 经计算可知

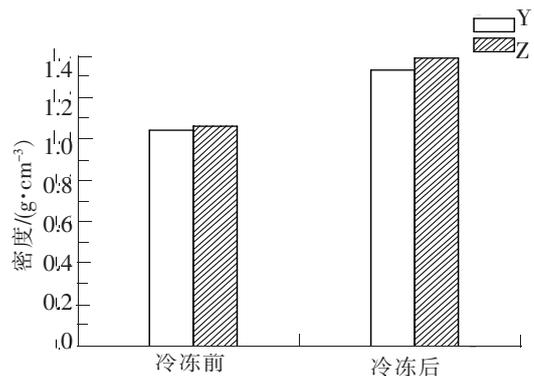


图 9 橡胶颗粒密度

Y 组橡胶颗粒密度增加了约 29% ,Z 组橡胶颗粒密度增加了约 32% 。

5.2 橡胶砂浆强度的变化

为探究橡胶颗粒表面烘干后冷冻对橡胶砂浆强度的影响 ,本实验选取了一组在橡胶颗粒表面烘干后冷冻处理之前不发生上浮的基准配合比进行实验 ,从而排除了橡胶颗粒上浮程度对橡胶砂浆强度的影响 ,所采用的橡胶粒径所用配合比如表 6 所示。

kg/m ³			
橡胶	水	水泥	砂
149.9	238.9	555.6	1 349.9

根据橡胶颗粒粒径的不同 ,以及冷冻情况不同 ,试验分为 CA、LA、CB 和 LB4 组 ,CA 和 LA 组橡胶颗粒粒径为 1~2 mm ,CB 和 LB 组橡胶颗粒粒径为 2~3 mm。CA 和 CB 橡胶颗粒冷冻时间为 0 min ,LA 橡胶颗粒冷冻时间为 80 min ,LB 橡胶颗粒冷冻时间为 150 min。

强度试验结果如图 10、图 11 所示 ,由图 10、图 11 可以看出 ,经过表面烘干后冷冻处理 ,橡胶砂浆的前期抗折、抗压强度均有降低 ,其原因可能是由于橡胶颗粒经过表面烘干后冷冻造成橡胶颗粒周围区域砂浆的入模温度变低 ,从而致使水泥早期水化速度降低 ,使其前期强度发展缓慢^[9-10]。

另外可以看出 ,橡胶砂浆的后期抗折、抗压强度均有增加 ,其原因可能是经过表面烘干后冷冻处理的橡胶颗粒在砂浆中发生了膨胀 ,橡胶颗粒和砂浆的过渡区界面中孔隙减少 ,过渡区界面强度增加 ,从而橡胶砂浆的强度增加^[11-12]。

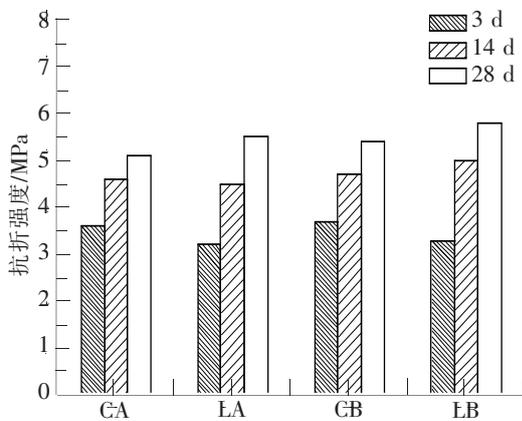


图 10 抗折强度

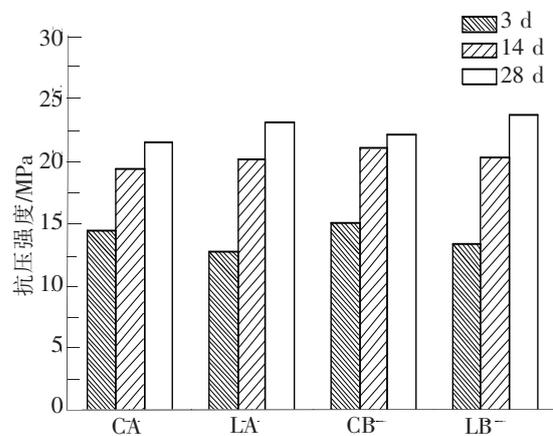


图 11 抗压强度

6 结论

通过分析可以得出以下结论:

- (1) 通过表面烘干后冷冻处理橡胶颗粒的方法控其在砂浆中上浮的方法效果显著 ,且橡胶颗粒粒径越大 ,最佳冷冻时间越长。
- (2) 橡胶颗粒粒径大小对橡胶颗粒在砂浆中上浮现象影响较大 ,橡胶颗粒粒径越大 ,其上浮现象越明显。
- (3) 橡胶颗粒粒径越大 ,表面烘干后冷冻处理橡胶颗粒的方法对其上浮改善程度越大。橡胶颗粒粒径越小 ,此方法对其上浮改善的最终效果越好。
- (4) 经过橡胶颗粒表面烘干后冷冻 ,橡胶砂浆前期抗折和抗压强度较未处理时的橡胶砂浆有所降低 ,但后期抗折和抗压强度会高于未处理时的橡胶砂浆强度。

参 考 文 献

- [1]刘峥,周梅,白金婷,等. 振捣时间对橡胶集料混凝土强度及橡胶颗粒均质性的影响[J]. 工业建筑, 2012(S1): 509-512.
- [2]王旻. 橡胶轻集料混凝土试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2006: 34-69.
- [3]Turatsinze A, Garros M. On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting concrete incorporating rubber aggregates [J]. Conservation and Recycling 2008, 52(10): 1209-1215 .
- [4]周敏. 新型共聚超塑化剂在高强陶粒混凝土中的应用研究[J]. 新型建筑材料, 2015(6): 66-68.
- [5]中国建筑材料科学研究院. GB/T 2419—2005 水泥胶砂流动度测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [6]张飞,沈家锋,王益庆,等. 干燥方式对天然橡胶性能的影响[J]. 橡胶工业, 2016, 63(2): 93-97.
- [7]李鲁群,安效国,邓敏. 面向对象矢量的栅格存储数据结构研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2003, 22(3): 36-38.
- [8]王志伟,吴国友,李秋义. 轻集料混凝土中轻集料上浮的试验研究[J]. 淮海工学院学报: 自然科学版, 2007, 23(2): 70-73.
- [9]陈松,刘汝生,王起才. 普通硅酸盐水泥水化热影响因素试验研究[J]. 铁道建筑, 2014, 54(6): 149-151.
- [10]孟会林. 橡胶颗粒改性沥青混合料室内试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2011, 24(3): 106-110.
- [11]于泳,朱涵,朱学超,等. 孔隙对橡胶集料水泥砂浆弹性模量预测模型的影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(3): 892-896.
- [12]孔丽娟,许旭栋,杜渊博. 不同集料混凝土抗冻性能与孔结构的关系[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2014, 27(1): 88-94.

Study on Low Temperature Method to Improve the Floating of Rubber Particles in Mortar

Zhu Han^{1, 2}, Wang Linzhao¹, Yu Yong¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coastal Civil Engineering Structure and Safety, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A new method to improve the floating of rubber particles in rubberized mortar was proposed in this paper. The two groups of rubber particles were surface dried and frozen, and the distribution of rubber particles in the cross section of the specimen was confirmed by R2V and AutoCAD. The statistical results showed that the floating phenomenon of the rubber particles in the mortar was improved. The changes of the density of the rubber particles and the mechanical properties of the rubber mortar were measured. Experimental results showed that the density of the two groups of rubber particles increased by about 29% and 32%, respectively. 3 d flexural strength and compressive strength were lower than before, and the compressive strength and compressive strength at 28 days were higher than before.

Key words: rubberized mortar; rubber floating; density; mechanical properties