第 49 卷第 10 期
2021 年 10 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 10
October，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210043

废弃橡胶颗粒对再生骨料砂浆技术性能改良

龚亦凡[1]，陈　萍[1]，张京旭[1]，詹静芳[2]，夏　鹏[1]，杲加俊[1]

(1. 浙江理工大学建筑工程学院，杭州 310018；2. 复旦大学外国语言文学学院，上海 200433)

摘　要：由于天然砂石日益紧缺，再生骨料的推广应用受到重视。基于改善再生骨料砂浆的技术缺陷，用废弃橡胶颗粒部分取代再生砖混细骨料制备再生骨料砂浆，研究不同水灰比下橡胶掺量对再生骨料砂浆技术性能的影响。测试了砂浆拌合物的稠度、保水率和表观密度，测试了砂浆试件的力学性能以及干缩性、渗透性和抗冻性。结果表明：随着橡胶颗粒掺量的增加，再生骨料砂浆拌合物的流动性增加，保水性下降，橡胶掺量小于 10%时，保水性下降不明显，而流动性改善效果显著；橡胶颗粒掺量在 3%~7%时，砂浆试件的抗折和抗压强度均得到提高，这与橡胶颗粒改善骨料的骨架作用和弹性变形对集中应力的消散作用有关；砂浆试件的抗收缩性能、抗渗性能和抗冻性能明显改善，且随橡胶颗粒掺量的增加逐步提高。适宜的橡胶掺量对改善再生骨料砂浆的技术性能效果明显。

关键词：再生砖混骨料；废弃橡胶颗粒；再生骨料砂浆；和易性；表观密度；力学性能；耐久性

中图分类号：TU528.041　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)10–2305–08

网络出版时间：2021–09–03

Improvement of Engineering Properties of Recycled Aggregate Mortar by Amending Waste Rubber Particles

GONG Yifan[1], *CHEN Ping*[1], *ZHANG Jingxu*[1], *ZHAN Jingfang*[2], *XIA Peng*[1], *GAO Jiajun*[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. College of Foreign Languages and Literatures, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Application of recycled aggregate becomes popular due to the shortage of natural sand and gravel. To improve the technical defects of recycled aggregate mortar, waste rubber particles were used to partially substitute for recycled brick-concrete fine aggregate. The influence of waste rubber particles content on the engineering properties of recycled aggregate mortar at different water-cement ratios was investigated. The consistency, water retentivity and apparent density of the mortar mixture were examined, and the mechanical properties, shrinkage, permeability and frost resistance of the mortar specimens were tested. The results show that the fluidity of the recycled aggregate mortar mixture increases, and the water retentivity decreases as the content of waste rubber particles increases. When the content of waste rubber particles is less than 10%, little decrease in water retentivity appears, while the improvement in fluidity is obvious. The rubber particles with contents of 3%–7% are able to improve the skeleton effect of the aggregate, hence increasing both the flexural and compressive strengths for the mortar specimens. This could be attributed to the elastic deformation of the rubber particles that reduces the stress concentration. When the contents of rubber particles are 3%–7%, the shrinkage resistance, anti-seepage property and frost resistance of the mortar specimens enhance, and these properties increase with increasing the content of waste rubber particles. The amendment of wastes rubber particles has a positive effect on the engineering properties of recycled aggregate mortar.

Keywords: recycled brick-concrete aggregate; waste rubber particles; recycled aggregate mortar; workability; apparent density; mechanical property; durability

收稿日期：2021–01–14。　修订日期：2021–02–24。

基金项目：浙江省–比利时西弗兰德省国际合作项目(2020C04013)；国家自然科学基金面上项目(41977250)。

第一作者：龚亦凡(1997—)，男，硕士研究生。

通信作者：陈　萍(1972—)，女，硕士，教授，硕士研究生导师。

Received date: 2021–01–14.　**Revised date:** 2021–02–24.

First author: GONG Yifan (1997–), male, Master candidate.

E-mail: 1023720644@qq.com

Correspondent author: CHEN Ping (1972–), female, Master, Professor.

E-mail: chenp@zstu.edu.cn

随着我国城市化的不断推进，大批不满足发展需求的建筑正面临拆迁，由此产生大量的拆除垃圾。据估算，我国每年产生的拆除垃圾约为 15.5～25.5 亿 t，积存未处理的拆除垃圾也达 200 多亿 t[1]。目前，我国拆除垃圾资源化利用率极低，不足 10%，资源化利用途径大多为制备再生骨料用于生产再生骨料混凝土、再生骨料砂浆或用于道路稳定层等，将再生细骨料用于制备建筑砂浆具有较好的应用前景。

国内外学者开展了再生细骨料部分或全部取代天然骨料制备建筑砂浆的研究。结果表明，由于再生骨料技术性能的先天缺陷，导致再生骨料砂浆技术性能明显劣于普通砂浆。在和易性方面，Torkittikul 等[2]的实验结果表明，砂浆拌合物的稠度随着再生骨料取代率的增加而降低，全再生骨料砂浆稠度约为同配合比普通砂浆的 63%。在力学性能方面，Corinaldesi 等[3]、Lee[4]、Dapena 等[5]、Cuenca-Moyano 等[6]、Katz 等[7]的实验结果均表明，全再生骨料砂浆的抗压、抗折强度大幅度低于普通砂浆，下降幅度约为 20%～60%。在耐久性方面，Topçu 等[8]利用碎砖细骨料取代石英砂制备再生砂浆，发现全再生骨料砂浆 60 d 干燥收缩可达对照组普通砂浆的 4 倍左右；Ledesma 等[9]通过实验证明再生骨料取代率对砂浆的渗透性有显著影响，掺 40%再生骨料的砂浆渗透性下降了约 52%；孙家瑛等[10]研究发现随再生细骨料掺量的增加，再生细骨料混凝土的抗冻性逐渐下降，全再生细骨料混凝土 50 次冻融循环后动弹性模量下降了 31.8%，而未掺再生细骨料的混凝土仅下降了 4.2%。综上所述，再生骨料砂浆存在流动性较差、抗压抗折强度低以及耐久性差等问题。

橡胶集料因其在改善砂浆技术性能方面具有独特优势而被国内外学者广泛关注。在和易性上，严捍东等[11]的实验结果显示，橡胶粉取代部分砂可以增加砂浆流动性，减少砂浆需水量。已有研究[12–16]表明橡胶砂浆力学性能研究的结论基本一致：橡胶的掺入会降低砂浆的力学强度，但可以改善水泥基材料的脆性。在耐久性上，薛刚等[17]发现橡胶颗粒的掺加使得砂浆的自由收缩率大幅度降低。Singh 等[18]研究表明橡胶的掺入提高了混凝土的抗渗性。Segre 等[19]通过试验研究了橡胶砂浆的抗冻性，掺 10%橡胶颗粒的砂浆 60 次冻融循环后抗折强度下降了 20%，而对照组普通砂浆下降了 75%。目前国内外有关橡胶集料的研究主要集中在其对普通砂浆技术性能的影响，而对再生骨料砂浆技术性能的影响规律鲜有报道。

鉴于此，本研究采用再生砖混细骨料制备再生骨料砂浆，用废弃橡胶颗粒等体积替换砖混细骨料，通过设置不同的橡胶掺量(3%～40%)来研究其对再生骨料砂浆和易性、表观密度、力学性能和耐久性的影响规律。利用橡胶集料改善砂浆技术性能的优势，解决再生骨料砂浆流动性差、耐久性差等问题，实现固体废弃物的高效资源化利用，环境和经济效益显著。

1 实验

1.1 原材料及性能

再生细骨料(RFA)：来自杭州某拆除工程，由废弃混凝土和废弃砖经破碎、筛分而得，粒径范围为 0.075～4.750 mm，称其为再生砖混细骨料。根据《建设用砂》(GB/T14684–2011)，测得再生砖混细骨料的颗粒分布曲线如图 1 所示，细度模数为 2.25，表观密度为 2 300 kg/m^3，压碎指标和吸水率分别为 50%、21%，吸水饱和后备用。

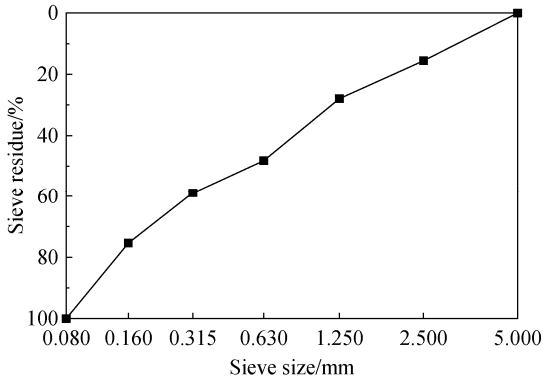


图 1 再生细骨料颗粒分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution of recycled fine aggregate

橡胶颗粒(WRA)：为废旧轮胎破碎制得，粒径范围为 2.36～4.75 mm，堆积密度为 586 kg/m^3。

水泥：采用杭州钱江水泥有限公司生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，按照国家有关规范对水泥物理力学性能进行测试，结果见表 1。

拌和用水：杭州地区自来水。

1.2 再生骨料砂浆配合比

为了研究再生骨料砂浆在不同橡胶掺量下的和易性能、表观密度、基本力学性能和耐久性能，依照《砌筑砂浆配合比设计规程》(JGJ/T98–2010)，分别以设计强度为 5、10、15 MPa 进行配合比设计，

然后用废弃橡胶颗粒分别以 3%、5%、7%、10%、20%、30%、40%的掺量等体积替换 2.36～4.75 mm 粒径的再生砖混细骨料，砂浆的试验配合比如表 2 所示。

表 1　水泥主要物理性能指标

Table 1　Main physical properties of cement

Specific surface area/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	Normal consistency/%	Setting time/min		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
		Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
350	28	140	208	26.7	48.6	5.3	8.4

表 2 砂浆配合比

Table 2　Mix proportions of mortar

Design strength/MPa	Sample	Rubber content/%	Mix proportion/kg			
			Cement	RFA	WRA	Water
5	RCM-5-0	0	190	1190	0	240
	RCM-5-3	3	190	1145	20	240
	RCM-5-5	5	190	1130	33	240
	RCM-5-7	7	190	1107	47	240
	RCM-5-10	10	190	1070	67	240
	RCM-5-20	20	190	952	133	240
	RCM-5-30	30	190	833	200	240
	RCM-5-40	40	190	714	266	240
10	RCM-10-0	0	240	1190	0	240
	RCM-10-3	3	240	1145	20	240
	RCM-10-5	5	240	1130	33	240
	RCM-10-7	7	240	1107	47	240
	RCM-10-10	10	240	1070	67	240
	RCM-10-20	20	240	952	133	240
	RCM-10-30	30	240	833	200	240
	RCM-10-40	40	240	714	266	240
15	RCM-15-0	0	290	1190	0	240
	RCM-15-3	3	290	1145	20	240
	RCM-15-5	5	290	1130	33	240
	RCM-15-7	7	290	1107	47	240
	RCM-15-10	10	290	1070	67	240
	RCM-15-20	20	290	952	133	240
	RCM-15-30	30	290	833	200	240
	RCM-15-40	40	290	714	266	240

1.3　再生骨料砂浆制备及性能测试

按表 2 所述配合比称料，先将骨料与水泥倒入水泥胶砂搅拌机中均匀搅拌 2 min，然后倒入水继续搅拌 3 min，制得掺橡胶再生骨料砂浆拌合物。对砂浆拌合物进行稠度、保水率和表观密度试验，并制成尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的试件，每组制备 6 个，分别用于测试 7、28 d 抗折强度和抗压强度。基于力学试验的结果，对橡胶掺量为 3%、5%、7%的试件进行干缩性、抗渗性和抗冻性的耐久性试验。干缩试验和抗冻试验试件尺寸规格为 40 mm×40 mm×160 mm，其中收缩性试验每组 3 个试件，抗冻性试验每组 6 个试件；抗渗性试验试件尺寸规格为上表面直径 70 mm，下表面直径 80 mm，高 30 mm 的变截面，每组制备 6 个。

试件成型后置于室温为(20±5)℃的环境中养护 24 h 后拆模，拆模后立即放入温度为(20±2)℃、相对湿度为 90%以上的标准养护室中养护，养护至相应龄期后，参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T17671–1999)对试件进行抗折抗压强度试验，参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T70–2009)对试件进行干缩性和抗渗性试验。对于抗冻性试验，先参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T70–2009)对试件进行 15 次冻融循环，再参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T17671–1999)对冻融循环后的试件进行抗折抗压强度试验。

2 结果与讨论

2.1 和易性能

2.1.1 砂浆拌合物流动性 以稠度值表征砂浆拌合物的流动性，稠度值越大，说明砂浆拌合物的流动性越大。再生骨料砂浆拌合物稠度与橡胶掺量的关系如图 2 所示。结果表明：橡胶颗粒的掺入增加了砂浆拌合物的流动性，且随着掺量的增加而增大；10%以内掺量改善效果突出，RCM-5-10、RCM-10-10、RCM-15-10 的稠度较 RCM-5-0、RCM-10-0、RCM-15-0 分别增长了 64.32%、102.52%和 128.13%。

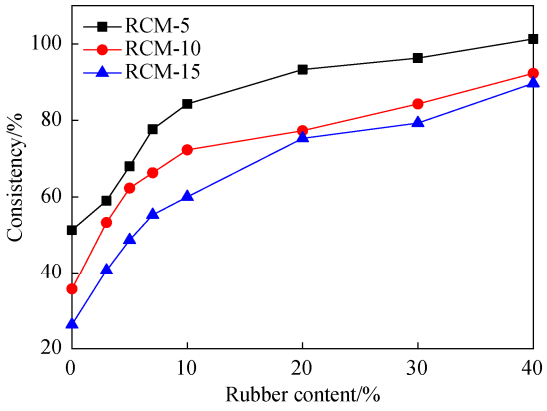


图 2 砂浆拌合物稠度与橡胶掺量的关系

Fig. 2 Relationship between the consistency of mortar mixture and rubber content

橡胶颗粒的接触角以及表观形貌如图 3 所示。由图 3 可见，橡胶颗粒具有较强的憎水性，且表面较为粗糙，因此橡胶颗粒的掺入增大砂浆流动性。主要有以下 3 个原因：1) 由于橡胶颗粒的憎水性，随着橡胶颗粒掺量的增大，会引起砂浆拌合物中自由水的增多，因而流动性增加；2) 拌合水在橡胶颗粒表面形成一层水膜，使橡胶颗粒在再生骨料砂浆中产生滚珠效应[20]，从而导致流动性的提高；3) 橡胶表面存在较多细小凹坑，凹坑被空气填充，因此橡胶颗粒的掺入具有引气作用，导致骨料和水泥颗粒间的摩擦力减小，流动性增加。

2.1.2 砂浆拌合物保水性 保水性可以判定砂浆拌合物在运输及停放时内部组分的稳定性，保水率越高稳定性越好。再生骨料砂浆拌合物保水率与橡胶掺量的关系如图 4 所示。结果表明：橡胶颗粒的掺入会在一定程度上降低砂浆拌合物的保水性。这是由于再生细骨料表面粗糙、棱角多，且结构疏松、内部连通孔隙多，拌合过程中能吸附较多的自由水。随着橡胶掺量的增加，再生细骨料逐渐被取代，骨料总体吸附能力降低，故保水率下降。

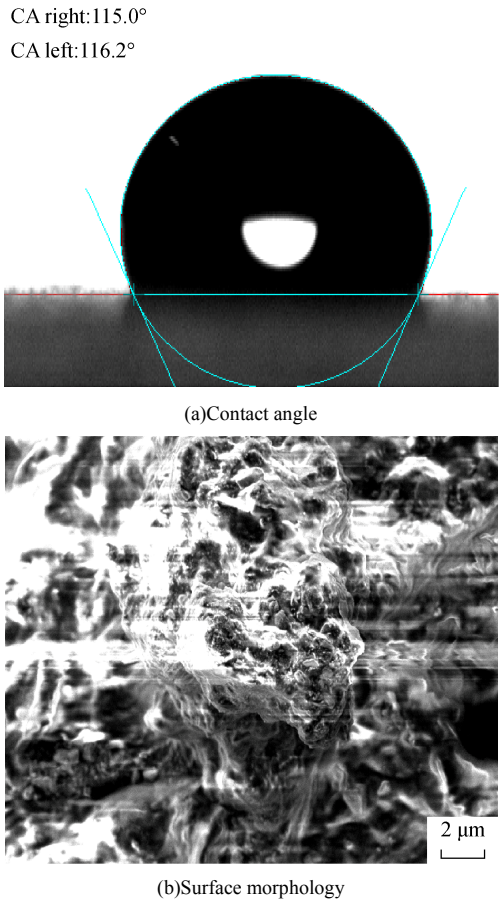


图 3 橡胶颗粒的接触角以及表观形貌

Fig. 3 Contact angle and surface morphology of rubber particle

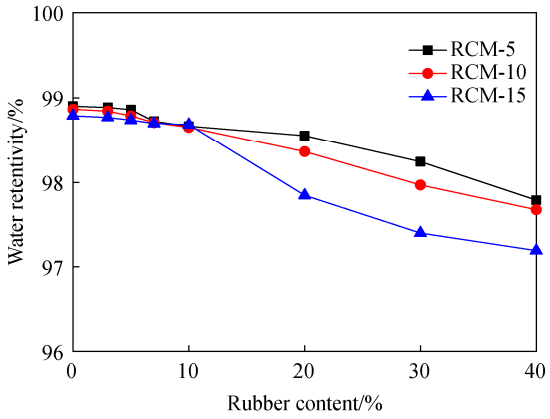


图 4 砂浆拌合物保水率与橡胶掺量的关系

Fig. 4 Relationship between the water retentivity of mortar mixture and rubber content

当橡胶掺量小于 10%时，橡胶掺量对砂浆拌合物保水性能影响不明显，RCM-5-10、RCM-10-10、RCM-15-10 的保水率较其基准组砂浆仅下降了 0.24%、0.21%和 0.11%；当橡胶掺量大于 10%时，随着橡胶掺量的增加，橡胶颗粒掺量对砂浆拌合物保水性降低作用逐渐显著。

2.2　砂浆拌合物表观密度

再生骨料砂浆拌合物表观密度与橡胶掺量的关系如图 5 所示。由图 5 可见，砂浆拌合物表观密度随橡胶掺量的增加先增大后减小，当橡胶掺量为 5%时，砂浆拌合物表观密度达到最大值，RCM-5-5、RCM-10-5、RCM-15-5 的表观密度较 RCM-5-0、RCM-10-0、RCM-15-0 分别增长了 2.69%、2.46%和 0.69%。

橡胶颗粒的掺入对砂浆拌合物表观密度的影响有 2 个方面：一是降低了骨料的平均表观密度，二是改变了骨料的颗粒级配。当橡胶掺量较低时，砂浆拌合物表观密度较不掺时增大，而骨料平均表观密度降低并没有引起拌合物表观密度的降低，说明此时拌合物更加密实，进一步说明橡胶的掺入改善了骨料的空间骨架结构。

2.3　力学性能

2.3.1　砂浆试件抗折、抗压强度　　砂浆试件抗折、抗压强度与橡胶掺量的关系如图 6 所示。由图 6 可见，掺入橡胶颗粒后，砂浆试件抗折、抗压强度随橡胶掺量增加先增大后减小。当橡胶掺量为 5%时，砂浆试件的抗折、抗压强度均达到最大值，RCM-5-5、RCM-10-5、RCM-15-5 的 28 d 抗折强度较 RCM-5-0、RCM-10-0、RCM-15-0 分别增长了 8.25%、6.33%和 4.27%，RCM-5-5、RCM-10-5、RCM-15-5 的 28 d 抗压强度较 RCM-5-0、RCM-10-0、RCM-15-0 分别增长了 23.33%、11.20%和 11.76%。

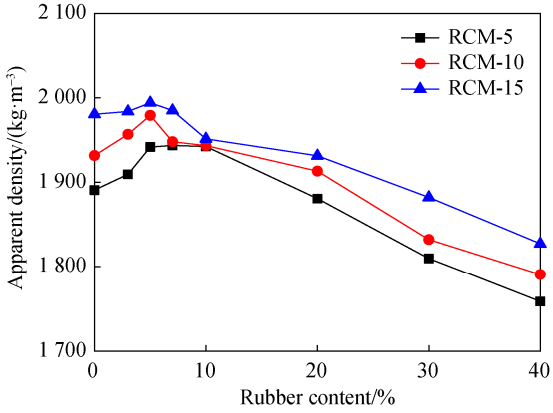
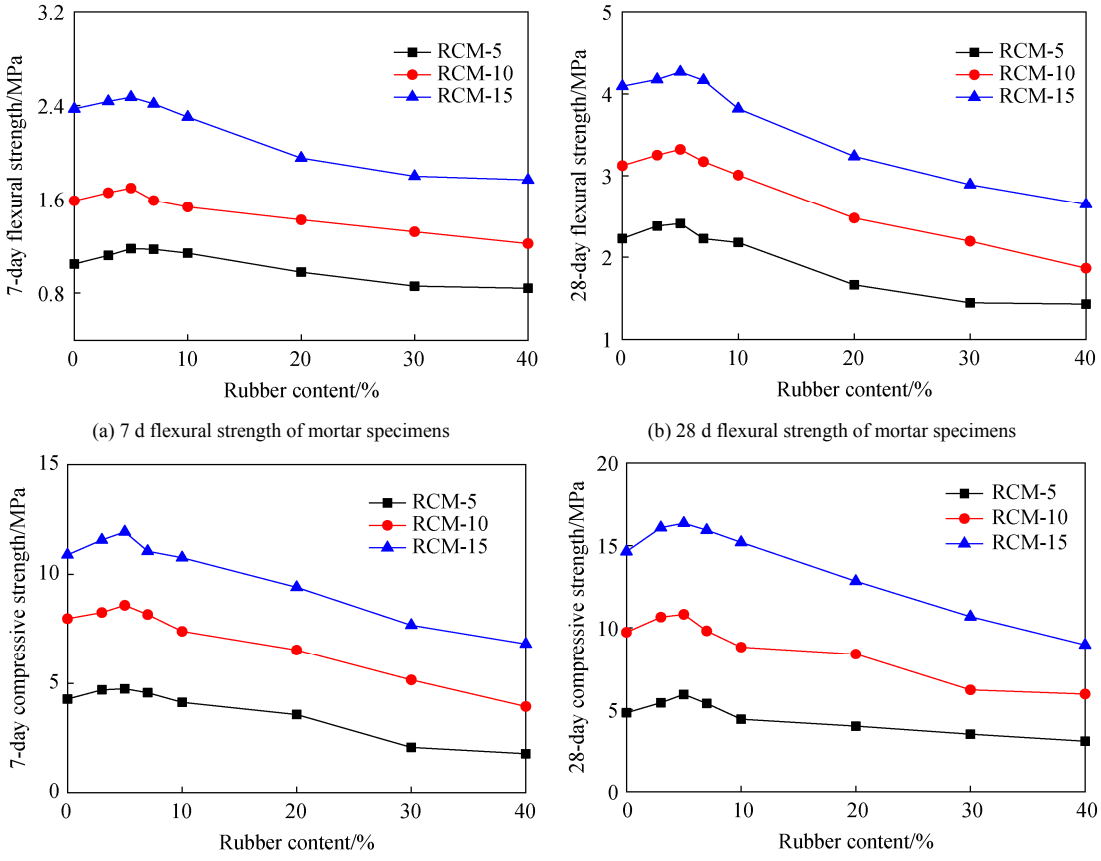


图 5　砂浆拌合物表观密度与橡胶掺量的关系

Fig. 5　Relationship between the apparent density of mortar mixture and rubber content



(a) 7 d flexural strength of mortar specimens

(b) 28 d flexural strength of mortar specimens

(c) 7 d compressive strength of mortar specimens

(d) 28 d compressive strength of mortar specimens

图 6　砂浆试件抗折、抗压强度与橡胶掺量的关系

Fig. 6　Relationship between flexural and compressive strength of mortar specimens and rubber content

砂浆可以看作是一个由骨料、水泥水化产物以及骨料和水泥水化产物之间的界面过渡区 3 部分组成的复合材料。橡胶颗粒对于强度的影响可以从以下几个方面进行分析：1) 橡胶颗粒具有良好的弹性变形能力，当试件受到外力作用时，橡胶颗粒在一定程度上会对其周围产生的集中应力产生消散作用，有利于增强砂浆的强度；2) 基于表观密度试验结果，低橡胶掺量的砂浆有着更高的密实度，因而具有更高的强度；3) 橡胶颗粒具有憎水性，水泥对橡胶颗粒的胶结强度低于其与砖混细骨料的胶结强度；4) 橡胶颗粒表面凹陷粗糙，具有引气作用，使砂浆内部含气量增多，导致强度降低。因此，橡胶颗粒掺入对砂浆强度的影响是多方面因素综合的结果。

从试验结果来看：当橡胶掺量较低时，砂浆试件抗折、抗压强度会有小幅度提高，这是由于橡胶掺量较低，橡胶的掺入对砂浆空间骨架的优化作用以及对集中应力的消散作用大于其它方面对砂浆强度的削弱作用；当橡胶掺量较高时，橡胶颗粒对强度的弱化作用增强，随着橡胶颗粒掺量的增加，弱化作用逐渐增强，砂浆试件强度逐渐降低。由此，橡胶掺量存在一个较优范围，当橡胶掺量为 3%～7%时，砂浆试件的强度一定程度上得到增强。

2.3.2 砂浆试件受压应力变形曲线分析 图 7 为不同橡胶掺量砂浆 28 d 试件的受压应力变形曲线。由图 7 可见，砂浆试件的应力变形曲线为典型的单峰曲线。不掺橡胶颗粒时，应力过峰值点后快速回落，形成陡峭的尖峰，砂浆试件发生脆性破坏；掺入橡胶颗粒后，砂浆试件的应力变形曲线发生了变化，曲线的上升阶段斜率减小，峰值应力所对应的变形增大，应力下降阶段试件产生明显的塑性变形。应力变形曲线的变化进一步说明了橡胶颗粒的掺入增加了再生砂浆的韧性。

2.4 耐久性能

2.4.1 砂浆试件收缩性 砂浆试件干燥收缩率与橡胶掺量的关系如图 8 所示。由图 8 可见，随着橡胶颗粒掺量的增加，砂浆试件干燥收缩率减小，橡胶颗粒的掺入降低了砂浆的收缩性，RCM-15-3、RCM-15-5、RCM-15-7 的 28 d 干燥收缩率较 RCM-15-0 分别下降了 11.22%、18.06%和 20.34%。

砂浆干燥收缩是指由于砂浆内部水分含量高于外部环境中的水分含量而引起砂浆内部水分流失产生的收缩。前期水泥水化程度较低，砂浆拌合物中存在大量的自由水，前期砂浆收缩率上升较快；随着水泥进一步水化，砂浆拌合物中的自由水含量逐渐降低，后期砂浆收缩率慢慢趋于稳定。由于水分的蒸发，砂浆内部产生收缩应力，而橡胶颗粒具有良好的弹性变形能力，在受到收缩应力时,通过发生体积形变来吸收收缩应力，从而有效抑制砂浆的干燥收缩[21]。

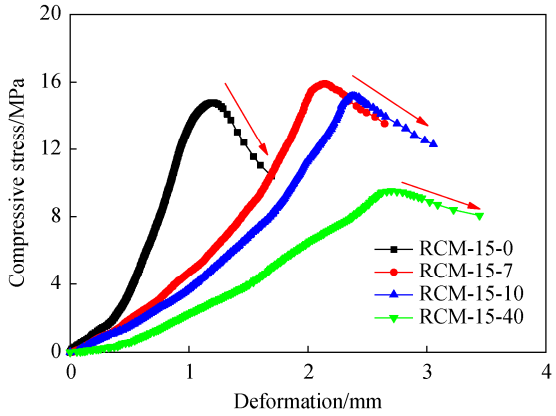


图 7 不同橡胶掺量 28 d 砂浆试件的受压应力变形曲线

Fig. 7 Compressive stress and deformation curves of 28 d mortar specimens with different rubber content

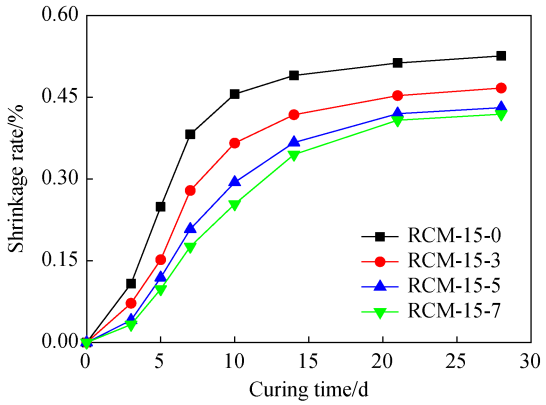


图 8 砂浆试件干燥收缩率与橡胶掺量的关系

Fig. 8 Relationship between shrinkage rate of mortar specimens and rubber content

2.4.2 砂浆试件抗渗性 砂浆试件抗渗水压与橡胶掺量的关系如图 9 所示。由图 9 可见，随着橡胶颗粒掺量的增加，砂浆试件的抗渗水压增大，橡胶颗粒的掺入提高了砂浆的抗渗性，RCM-15-0 的抗渗水压为 0.31 MPa，而 RCM-15-3、RCM-15-5、RCM-15-7 的抗渗水压为 0.35 MPa、0.38 MPa、0.39 MPa，较 RCM-15-0 分别增长了 12.90%、22.58%和 25.81%。

橡胶颗粒提高砂浆抗渗性的原因为：1) 橡胶颗粒的引气作用减少了毛细孔之间的相互贯通，延长了毛细水在砂浆内部的渗流路径；2) 橡胶颗

粒的表面接触角大于 90°，毛细孔压力方向与重力方向相反，可以增大液体渗流时的阻力，从而抑制水流渗流[22]。因此，橡胶颗粒通过延长毛细水的渗流路径和增大毛细水的渗透阻力提高了砂浆的抗渗性。

2.4.3　砂浆试件抗冻性　　砂浆试件抗冻强度损失率与橡胶掺量的关系如图 10 所示。由图 10 可见，随着橡胶颗粒掺量的增加，砂浆试件的抗冻强度损失率降低，橡胶颗粒的掺入提高了砂浆的抗冻性，RCM-15-0 在 15 次冻融循环后抗折、抗压强度分别下降了 20.21%和 28.09%，而 RCM-15-7 仅下降了 10.31%和 11.16%。

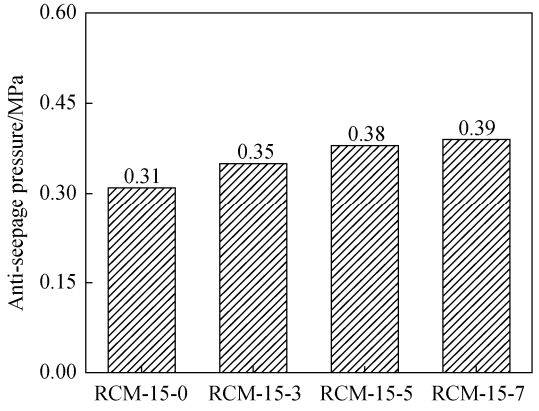


图 9　砂浆试件抗渗水压与橡胶掺量的关系

Fig. 9　Relationship between the anti-seepage pressure of mortar specimens and rubber content

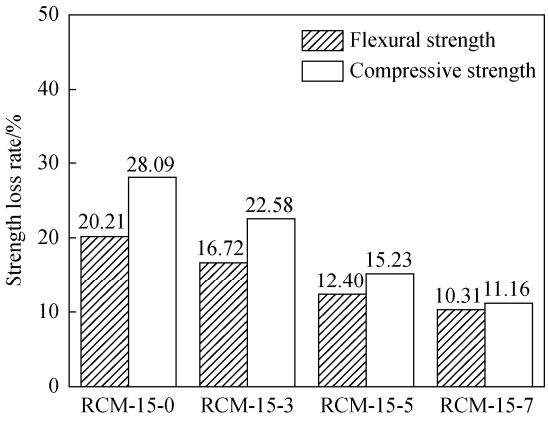


图 10　砂浆试件抗冻强度损失率与橡胶掺量的关系

Fig. 10　Relationship between the frost strength loss rate of mortar specimens and rubber content

砂浆试件抗冻试验过程中，试件表层水首先在负温环境下开始结冰，试件表面被封闭。随着冷冻时间的增长，试件内部水分逐渐结冰，体积不断膨胀，导致内部产生内应力并逐渐增加，从而产生损伤，进一步引起砂浆试件的强度降低。当砂浆中掺入橡胶颗粒后，橡胶颗粒通过弹性变形可以一定程度上消散毛细水结冰膨胀产生的内应力，减少砂浆在冻融过程中产生的损伤，对砂浆抗冻性能产生明显改善作用，同时砂浆内部含气量由于橡胶颗粒的引气作用而增加，既降低了砂浆试件的饱和吸水率，又缓解了水结冰时的膨胀应力，进一步提高了砂浆的抗冻性[23]。

3　结论

1) 橡胶颗粒的掺入能够有效增加砂浆拌合物的流动性，流动性随着橡胶颗粒掺量的增加而增加。橡胶颗粒的掺入同时导致保水性下降，但橡胶掺量小于 10%时，保水性下降程度较低。

2) 随橡胶颗粒掺量的增加，砂浆试件的抗折强度和抗压强度呈现先增大后逐步减小的现象，掺量在 3%～7%时，砂浆试件的抗折和抗压强度较不掺时得到提高。这与橡胶颗粒改善骨料的骨架作用和弹性变形对集中应力的消散作用有关。

3) 橡胶颗粒的掺入增加了砂浆试件破坏时的变形能力，砂浆的脆性降低，韧性增加。

4) 橡胶颗粒掺量在 3%～7%时，砂浆试件的抗收缩性能、抗渗性能和抗冻性能均得到明显改善，且随掺量的增加逐步提高。

参考文献:

[1] DUAN H B, LI J H. Construction and demolition waste management: China's lessons[J]. Waste Manag Res, 2016, 34(5): 397–398.

[2] TORKITTIKUL P, CHAIPANICH A. Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes[J]. Cem Concr Compos, 2010, 32(6): 440–449.

[3] CORINALDESI V. Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars[J]. Cem Concr Compos, 2009, 31(7): 505–510.

[4] LEE S T. Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack[J]. Waste Manag, 2009, 29(8): 2385–2391.

[5] DAPENA E, ALAEJOS P, LOBET A, et al. Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes[J]. J Mater Civ Eng, 2011, 23(4): 414–422.

[6] CUENCA-MOYANO G M, MARTIN-MORALES M, VALVERDE-PALACIOS I, et al. Influence of pre-soaked recycled fine aggregate on the properties of masonry mortar[J]. Constr Build Mater, 2014, 70: 71–79.

[7] KATZ A, KULISCH D. Performance of mortars containing recycled fine aggregate from construction and demolition waste[J]. Mater Struct, 2017, 50(4): 1–16.

[8] TOPCU I B, BILIR R. Experimental investigation of drying shrinkage cracking of composite mortars incorporating crushed tile fine aggregate[J]. Mater Design, 2010, 31(9): 4088–4097.

[9] LEDESMA E F, JIMENEZ J R, FERNANDEZ J M, et al. Properties

of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates[J]. Constr Build Mater, 2014, 71: 289–298.

[10] 孙家瑛, 耿健. 再生细骨料粒径及掺量对混凝土抗冻性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 382–385.
SUN Jiaying, GENG Jian. J Build Mater (in Chinese), 2012, 15(3): 382–385.

[11] 严捍东, 麻秀星, 陈秀峰, 等. 废橡胶粉对混合砂浆性能影响的研究[J]. 环境工程学报, 2008(3): 418–423.
YAN Handong, MA Xiuxing, CHEN Xiufeng, et al. Chin J Envir Eng (in Chinese), 2008(3): 418–423.

[12] UYGUNOGLU T, TOPCU I B. The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars[J]. Constr Build Mater, 2010, 24(7): 1141–1150.

[13] TURKI M, ZARRAD I, BRETAGNE E, et al. Influence of Filler Addition on Mechanical Behavior of Cementitious Mortar-Rubber Aggregates: Experimental Study and Modeling[J]. J Mater Civ Eng, 2012, 24(11): 1350–1358.

[14] PEDRO D, BRITO J D, VEIGA R. Mortars Made with Fine Granulate from Shredded Tires[J]. J Mater Civ Eng, 2013, 25(4): 519–529.

[15] ANGELIN A F, ANDRADE M FF, BONATTI R, et al. Effects of spheroid and fiber-like waste-tire rubbers on interrelation of strength-to-porosity in rubberized cement and mortars[J]. Constr Build Mater, 2015, 95: 525–536.

[16] ANGELIN A F, CECCHE-LINTZ R C, GACHET-BARBOSA L A, et al. The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar with recycled rubber[J]. Constr Build Mater, 2017, 151: 534–545.

[17] 薛刚, 孙立所, 邵建文, 等. 高掺量橡胶集料水泥砂浆收缩性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3252–3259.
XUE Gang, SUN Lisuo, SHAO Jianwen, et al. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2020, 39(10): 3252–3259.

[18] SINGH S, NAGAR R, AGRAWAL V, et al. Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete[J]. J Cleaner Prod, 2016, 116: 223–235.

[19] SEGRE N, JOEKKES I, GALVES A D, et al. Rubber-mortar composites: Effect of composition on properties[J]. J Mater Sci, 2004, 39(10): 3319–3327.

[20] 杨林虎, 朱涵, 张亚梅. 橡胶集料对水泥砂浆孔结构的影响[J]. 天津大学学报, 2011, 12(44): 1083–1087.
YANG Linhu, ZHU Han, ZHANG Yamei. J Tianjin Univ (in Chinese), 2011, 12(44): 1083–1087.

[21] 朱腾阔. 橡胶集料水泥浆基体微观分析及其性能改善研究[D]. 东南大学, 2015.
ZHU Tengkuo. Research on the microstructure and performance of rubber cement mortar (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2015.

[22] ABRAHAM, MARMUR. Penetration and displacement in capillary systems of limited size[J]. Adv Colloid Interface Sci, 1992, 39: 13–33.

[23] 陈爱玖, 王静, 马莹. 钢纤维橡胶再生混凝土的抗冻性试验[J]. 复合材料学报, 2015, 32(4): 933–941.
CHEN Aijiu, WANG Jing, MA Ying. Acta Mater Compos Sin (in Chinese), 2015, 32(4): 933–941.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



陈萍，浙江理工大学建筑工程学院教授，硕士生导师。主持或参与国家自然科学基金项目、浙江省自然科学基金项目、浙江省重点研发项目、浙江省国际合作项目等 10 多项，在国内外学术刊物发表论文 40 余篇。兼任浙江省土木工程学会建筑材料专委会委员。主要研究方向为固体废弃物固化稳定化及再生利用方面的研究。



龚亦凡，浙江理工大学建筑与土木工程专业硕士研究生，主要从事建筑废弃物再生利用方面的研究。所在课题组研究项目包括：再生砖混骨料资源化利用关键技术和示范应用；建筑渣土与废弃泥协同处置及资源化利用关键技术及示范应用；生活垃圾填埋场开采渣土环境土工特性的微生物诱导改良机制；基于微生物诱导碳酸盐沉淀的垃圾焚烧飞灰固化/稳定化机理与方法。