

再生微粉颗粒级配对水泥凝胶体微观结构及强度的影响

李 滢, 康晓明, 陈 曦, 代大虎

(青海大学 土木工程学院; 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要: 基于 Andreasen 颗粒紧密堆积理论, 探究再生微粉的颗粒级配对水泥凝胶体微观结构及强度的影响。将经过不同时间球磨的再生微粉以相同取代率掺入水泥砂浆中, 考察水泥凝胶体中粉体材料的颗粒粒径分布变化与砂浆强度、水泥石孔隙结构及微观形貌的变化关系。结果表明: 随着粉磨时间的增加, 水泥凝胶体中粉体材料的颗粒级配得到改善, 小于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒数量不断增加, 这部分超细颗粒用于砂浆中可以填充到水泥浆体的孔隙中, 改善水泥凝胶体的微观结构。采用球磨 30 min 的再生微料制备的砂浆比未经粉磨再生微粉的砂浆总孔隙率增加 18.2%, 而平均孔径降低 51.9%, 小于 20 nm 的无害孔的数量增加 25%, 孔结构得到改善, 水泥石结构趋于密实, 砂浆 28 d 后抗压强度达到 43.9 MPa。

关键词: 再生微粉; 颗粒级配; 紧密堆积; 孔结构

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

Effect of particle size distribution of recycled concrete powders on microstructure and strength of cement gel

LI Ying, KANG Xiaoming, CHEN Xi, DAI Dahu

(School of Civil Engineering; Qinghai Provincial Key Laboratory of Energy Saving Building Materials and Engineering Safety, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: By using the Andreasen theory of the dense packing powder, the effect of the particle size distribution of the recycled concrete powders(RCP) on microstructure and strength of cement gel was discussed in this paper. The RCP powders were milled in different time and incorporated into the cement mortar in the same substitution to investigate the relationship between particle size distribution of powder materials in cement gels and mortar strength, cement stone pore structure and micro-morphology. It is demonstrated that with the grinding time increases, the particle gradation of the powder material in the cement gel is improved, the content of particles with the size under $10\ \mu\text{m}$ is continuously increasing, and it can exert a good filling effect after being used in mortar, and improve the microstructure of cement gel. The total porosity of mortar prepared with RCP-30 increased by 18.2% compared with the mortar by using unscrupulous RCP powders, while the average pore size decreased by 51.9%, the harmful holes with the diameter under 20 nm increased by 25%, and the pore diameter was gradually refined. The pore structure has been improved and the structure of cement paste tends to be density, and the mortar 28 d compressive strength reached 43.9 MPa.

Keywords: recycled concrete powder; particle size distribution; dense packing; pore structure

随着我国城市化进程的不断加快,大量既有的建筑物需要进行拆除和改造,由此产生了大量的建筑垃圾,近年来我国建筑垃圾的年均排放量超过了 20 亿 $\text{t}^{[1]}$ 。由于现阶段对这些建筑垃圾的处理能力有限,于是便出现了大量的建筑垃圾堆放在自然界土壤或河道中,给生态环境带来了严重的污染问题;另一方面,随着国内对矿山河道等采取越来越严厉的限制开采政策,砂石行业形势严峻,使得混凝土行业中的天然砂石原料出现严重短缺^[2],因此,如何解决这两方面的矛盾问题是我国混凝土行业现阶段面临的主要课题之一。为此,很多学者开展了建筑垃圾循环利用方面的研究,相关研究结果表明^[3-7],将

收稿日期: 2021-10-29, 修回日期: 2022-03-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 51668025; 青海省科学技术厅基础研究计划项目, 编号: 2017-ZJ-787。

第一作者简介: 李滢(1974—), 女, 教授, 硕士, 硕士生导师, 研究方向为建筑垃圾再生利用。E-mail: liying.qh@163.com。

建筑垃圾破碎后制备的再生骨料可以用于生产混凝土材料。再生骨料一般存在形状不规则、表面粗糙、旧砂浆粘附等问题,用于混凝土中会出现多种界面结构,进而影响再生混凝土的性能^[8-10]。有学者采用机械整形、化学处理等方法对再生骨料进行改性强化处理^[11-13],采用强化后的再生骨料制备的再生混凝土的性能可以得到明显的改善。

再生骨料加工过程中会产生大量粒径小于 0.075 mm 的微细粉末即再生微粉(RCP),其化学组成和矿物组成与粉煤灰等工业废渣接近,用作矿物掺合料掺入砂浆或混凝土制品中可以发挥火山灰活性,具有良好的循环利用价值。Xiao 等^[14]发现再生微粉取代率不超过 20% (质量分数,下同)时,混凝土的力学性能不会受到明显影响。刘音等^[15]将不同掺量的再生微粉替代水泥制备胶砂试件,再生微粉取代率为 10% 的砂浆强度与纯水泥砂浆很接近。Duan 等^[16]发现再生微粉的掺入会降低砂浆的流动性、密度和强度,当取代率为 30% 时,强度降低约为 20%。马郁等^[17]也同样发现,当再生微粉取代率超过 20% 时,混凝土抗压强度很难满足要求。吕雪源等^[18]的研究也发现,未经活性激发处理的再生微粉,其掺量的增加会使得水泥胶砂强度逐渐减低。

有学者采用物理研磨的方式提高再生微粉的活性,因为再生微粉经过离心球磨后,能够发生活性反应的表面积增大,并且可以发挥微集料的填充效应,从而改善胶凝材料的孔隙结构,提高水泥基材料的后期强度^[19-20]。同时相关研究表明,利用机械粉磨的方法提高再生微粉的活性时,不仅与颗粒的细度有关,更重要的是粉体颗粒的级配效应。周文娟等^[21]对比了 I、II、III 级 3 种细度的再生微粉后发现,II 级再生微粉颗粒级配相对较好,加入到水泥胶砂中可以更有效地发挥粉体的填充效应,提高水泥胶砂的密实度和强度。余小小等^[22]对比了采用不同粉磨加工方式得到的再生粉体,结果表明,气流粉碎机粉磨的再生微粉粒径分布均匀,颗粒形状规则,填充效果好。Luiz 等^[23]和 Zhao 等^[24]的研究均表明,再生微粉的活性与其颗粒粒径大小紧密相关,再生微粉中的超细颗粒对于提高其活性作用更明显。对于这些现象可以利用粉体材料颗粒紧密堆积理论进行解释,该理论认为改善水泥胶凝材料的颗粒级配,使胶凝材料颗粒形成紧密堆积效应,可以改善孔结构,从而达到提高砂浆和混凝土性能的目的^[25-27]。故本研究中利用颗粒紧密堆积理论,利用不同粉磨时间改善再生微粉的颗粒级配,研究再生微粉的颗粒级配变化对水泥胶砂强度及微观结构的影响规律,探讨水泥凝胶体的微观结构以及胶砂试件强度与再生微粉颗粒级配之间的关系。

1 实验

1.1 原材料

- 1) 水泥:青海省互助金圆水泥厂生产的普通 42.5#水泥。
- 2) 砂:采用厦门艾思欧标准砂有限公司生产的中国 ISO 标准砂。
- 3) 再生微粉:将实验室中的废弃混凝土梁进行破碎后收集粉末材料,并用孔径为 0.16 mm 筛子筛分后制得。

水泥和再生微粉 2 种粉体材料的基本物理性能如表 1 所示。从表中可以看出,再生微粉颗粒比水泥颗粒粗,其 45 μm (孔径)筛余明显高于水泥,堆积密度和表观密度均小于水泥的。

表 1 粉体材料的基本物理性能
Tab. 1 Physical properties of particle materials

原材料	筛余质量分数/%	堆积密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
水泥	1.6	1 031	3 030
再生微粉	30.78	945	2 384

1.2 方法

1.2.1 再生微粉的加工与测试

将收集来的再生微粉在 PM2L 行星式球磨机中进行粉磨,球磨时间选定为 0、10、20、30 min,分别用 RCP、RCP-10、RCP-20 和 RCP-30 表示这 4 种不同细度的再生微粉。采用 Mastersizer 2000 (马尔

文)激光粒度仪测定粉体材料的粒度分布,采用 D/max 2500PC 型 X 射线衍射仪(XRD)测定再生微粉的矿物组成,采用 STA449F3-DSC200F3 热分析联用仪(TG-DSC)测定材料的质量损失和放热量。

1.2.2 胶砂强度对比

砂浆的配合比如表 2 所示,RCP、RCP-10、RCP-20 和 RCP-30 分别以胶凝材料总质量的 20% 掺入水泥砂浆中,各配比中标准砂用量为 1 350 g,用水量为 225 mL,成型为 40 mm×40 mm×40 mm 的水泥胶砂试件,标准养护 24 h 后,在标准养护箱中养护,测试龄期为 3、7、28 d。

表 2 砂浆的配合比
Tab.2 Mix ratio of cement mortar

编号	质量分数/%	质量/g				
		RCP	RCP-10	RCP-20	RCP-30	水泥
S0	0	0	0	0	0	450
S1	20	90	0	0	0	360
S2	20	0	90	0	0	360
S3	20	0	0	90	0	360
S4	20	0	0	0	90	360

1.2.3 水泥凝胶体微观结构

采用 JSM-6610LV 扫描电镜(SEM)观察水化至 28 d 的水泥凝胶体的微观形貌;采用 AutoPore IV 9500 全自动压汞仪测试内部孔隙结构。所有样品在测试之前均在无水酒精中浸泡。

2 Andreasen 粉体紧密堆积理论

本研究中采用 Andreasen 颗粒堆积方程,该方程表达式^[28]为

$$Y=100(D/D_L)^n。$$

(1)

式中:Y 为颗粒粒径为 D 时的累积筛下质量分数,%;D_L 为颗粒的最大粒径,μm;n 为分布模数。
Andreasen 根据大量的试验结果得出,随着分布模数 n 值的减小,粉体材料的空隙率会随之减小,当降至 n=1/3 时,密实度最大,而 n 值继续减小,空隙率不会再明显下降^[28-29]。水泥的颗粒分布一般具有连续性,可以利用该方程进行计算。若取水泥颗粒的最大粒径为 150 μm,代入公式(1),计算出达到最紧密堆积状态的水泥粉体颗粒粒径分布,如表 3 所示。表 4 为实际测得的水泥和再生微粉的颗粒粒径分布。

表 3 最紧密堆积时水泥粉体的粒径分布(D_{max}=150 μm)
Tab.3 Particle size distrubution of cement in dense packing state(D_{max}=150 μm)

原材料	质量分数/%						
	<2 μm	<4 μm	<10 μm	<20 μm	<40 μm	<80 μm	<100 μm
水泥	23.71	29.88	40.55	51.09	64.37	81.10	87.36

表 4 原材料的颗粒粒径分布
Tab.4 Particle size distrubution of cement and RCP

原材料	质量分数/%						
	<2 μm	<4 μm	<10 μm	<20 μm	<40 μm	<80 μm	<100 μm
水泥	7.17	15.22	34.39	53.92	77.27	94.80	97.97
再生微粉	3.84	6.32	12.68	21.00	33.66	57.37	65.07

对比表3和表4可以看出,水泥粉体的颗粒级配中,粗颗粒的含量与紧密堆积的要求差距并不大,紧密堆积状态下,粒径大于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒的质量分数比实际水泥粉体中的高出 3.73% 。不过二者之间的差距在粒径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒中开始逐渐扩大,水泥粉体中粒径小于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒的质量分数为 6.32% ,而紧密堆积时这部分颗粒为 15.22% ,前者比后者低了 8.90% 。可见实际的水泥粉体相比紧密状态缺乏粒径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的超细颗粒,使得粗细颗粒之间不能形成良好的级配效应,所以导致出现较大的孔隙率。再生微粉未经过粉磨处理直接用于替代水泥时,其颗粒级配与最紧密堆积状态的要求之间的差距更大,即未经粉磨的再生微粉的颗粒级配较水泥差,采用再生微粉替代水泥制备内部结构密实的水泥凝胶体,必须先对其颗粒级配进行优化^[30]。

3 结果与分析

3.1 再生微粉粒度变化

不同时间粉磨后再生微粉颗粒的粒径变化趋势如图1所示。从图中可以看出,随着球磨时间的增加,再生微粉中大颗粒的含量开始逐渐减少,整个分布曲线逐渐左移,并且出现不均匀波动,球磨时间为 30 min 时,再生微粉粒度分布曲线的波动幅度最大。RCP-10、RCP-20、RCP-30再生微粉的中值粒径分别从 $34.823\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐减小到 19.403 、 $18.529\text{ }\mu\text{m}$,说明球磨时间从 10 min 增加到 20 min 时,再生微粉的颗粒粒径明显减小,但是从 20 min 延长到 30 min 时,下降幅度明显减小,球磨效率开始降低。

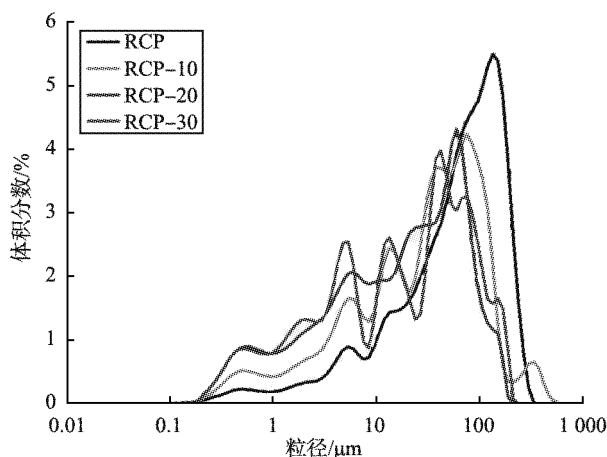


图1 不同时间粉磨后再生微粉粒径变化趋势图

Fig.1 Change of particle size distribution of recycled concrete powder with different grinding time

不同粉磨时间再生微粉的颗粒粒径分布如表5所示。随着粉磨时间的增加,再生微粉的粒径逐渐细化,其中粒径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的超细颗粒含量逐渐增加,粉磨 20 min 后,粒径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒质量分数达到 38.15% ,超出水泥的 10.9% ,说明再生微粉经过适当粉磨后颗粒级配得到改善,掺入水泥浆体中可以发挥微集料填充效应,使得水泥凝胶体形成相对紧密堆积的效果,改善其微观结构。粉磨 30 min 的微粉与粉磨 20 min 的相比,粒径变化不大,说明球磨时间超过 20 min 后,球磨难度增大,效率降低,并且超细颗粒容易发生团聚现象,继续增加球磨时间意义不大^[31]。

3.2 再生微粉的矿物组分

图2为不同粉磨时间再生微粉的XRD图谱。由图2可以看出,再生微粉中的主要矿物组成包括方解石(CaCO_3)、石英(SiO_2)、白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)和未水化的硅酸二钙(C_2S)及少量的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。粉磨时间的增加会改变再生微粉中的部分结晶峰,在衍射角为 26° 附近的 SiO_2 的结晶峰逐渐下降,余小小等^[22]研究发现,机械力作用会改变 SiO_2 的形态结构,从而提高了再生微粉的活性。球磨 10 min 时, C_2S 结晶峰明显增强,说明对再生微粉进行球磨时,可以将水泥颗粒中被包裹的未水化成分 C_2S 释放出来, C_2S 作为水泥中的主要水化相,其含量增加对提高再生微粉的水化活性是有利的;同时,再生微粉球磨过程可以让更多的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 暴露于空气中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CO_2 发生反应使

得 CaCO_3 结晶峰增加, CaCO_3 可以促进水泥中铝酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{C}_3\text{A}$) 和硅酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2, \text{C}_3\text{S}$) 的水化,生成更多的 C-S-H 凝胶^[32-33],有利于提高砂浆的强度。

表5 不同粉磨时间再生微粉的颗粒粒径分布
Tab.5 Particle size distrubution of RCP with different grinding time

样品	质量分数/%						
	<2 μm	<4 μm	<10 μm	<20 μm	<40 μm	<80 μm	<150 μm
水泥	7.17	15.22	34.39	53.92	77.27	94.80	97.97
RCP	3.84	6.32	12.68	21.00	33.66	57.37	65.07
RCP-10	8.38	13.55	25.33	38.18	54.61	77.66	85.59
RCP-20	14.65	22.67	38.15	50.77	67.45	89.73	94.15
RCP-30	15.47	23.95	38.02	51.61	64.92	85.12	90.71

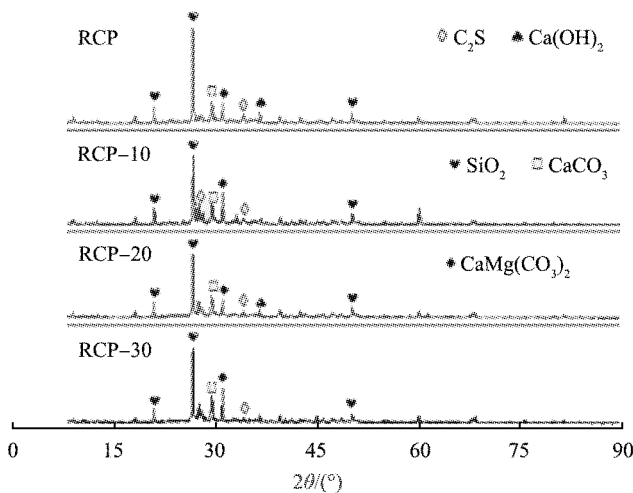


图2 不同粉磨时间再生微粉的 XRD 图谱
Fig.2 XRD analysis of recycled concrete powder with different griding time

3.3 热重分析

RCP 和 RCP-30 的热重分析(TG-DSC)曲线如图 3 所示。由图可以看出,整个曲线中明显的吸热峰出现在 400 ~ 800 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,并有相应的质量损失出现,其中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的分解脱水吸热峰出现在 400 ~ 500 $^{\circ}\text{C}$, 600 ~ 800 $^{\circ}\text{C}$ 为 CaCO_3 的分解吸热峰^[34]。在 450 ~ 500 $^{\circ}\text{C}$ 时 RCP 和 RCP-30 中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的质量损失率分别为 1.04%、0%,在 600 ~ 800 $^{\circ}\text{C}$ 时 CaCO_3 的质量损失率分别为 10.23%、16.28%,这与 XRD 定性分析结果一致。

3.4 胶砂强度

20% 取代率下,砂浆在不同水化龄期的抗压强度变化趋势如图 4 所示。从图可以看出,未经粉磨的再生微粉制备的砂浆在各个龄期的抗压强度最低,说明再生微粉的活性较低,掺入水泥砂浆中后不利于砂浆的强度增长。随着粉磨时间的增加,砂浆的强度逐渐增大,用 RCP-30 制备的砂浆 S4 在各个龄期的抗压强度最高,其 28 d 抗压强度达到 43.9 MPa,可以达到纯水泥砂浆的 86.4%,相比用 RCP 制备的砂浆 S1 强度增长了 18.0%。这一方面与再生微粉中的矿物组成随着粉磨时间的增加出现变化有关,微粉中 CaCO_3 含量的增加,能够促进水泥中 C_3A 和 C_3S 的水化作用,有利于提高砂浆的强度^[32-33];另一方面,说明掺入不同细度的再生微粉颗粒后,砂浆中胶凝材料的颗粒级配效应不断增强。

20% 取代率下,砂浆中胶凝粉体材料颗粒的粒径分布如图 5 所示。从图可以看出,随着再生微粉球磨时间的不断增加,制得的砂浆粉体材料中小于粒径 20 μm 的颗粒不断提高,其中 S3 和 S4 中粒径小于 20 μm 颗粒的质量分数超过了紧密堆积时的要求,粒径小于 10 μm 的颗粒超过了纯水泥砂浆,说明在水

泥砂浆中掺入了比水泥颗粒更细的再生微粉颗粒后,可以弥补水泥粉体材料中超细颗粒不足的缺陷,使得砂浆中的较大孔隙被大量的超细颗粒填充,这种微集料填充效应可以在一定程度上弥补其活性不足带来的负面效应,表现出来就是用级配良好的再生微粉制备的砂浆强度增加趋势明显。

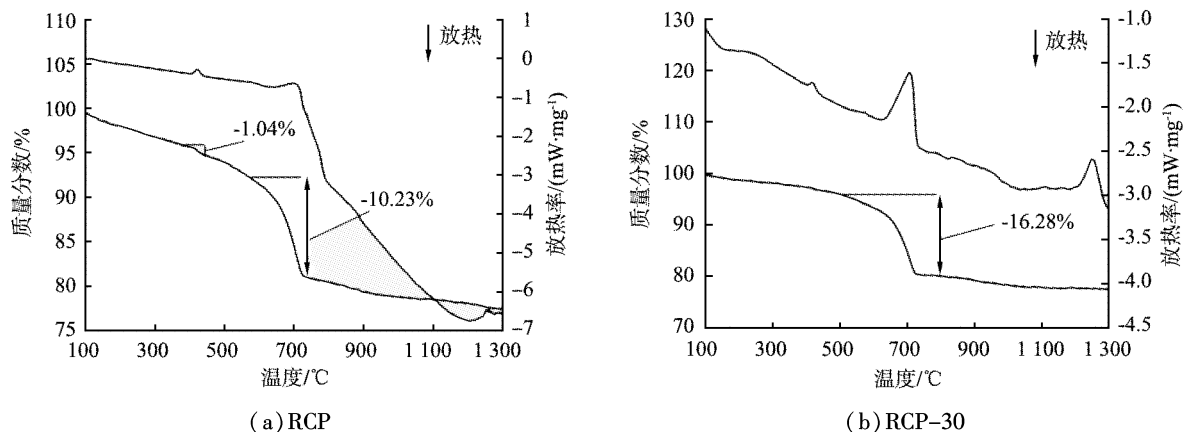


图3 RCP、RCP-30 的热重-示差扫描量热分析

Fig.3 TG-DSC of RCP and RCP-30

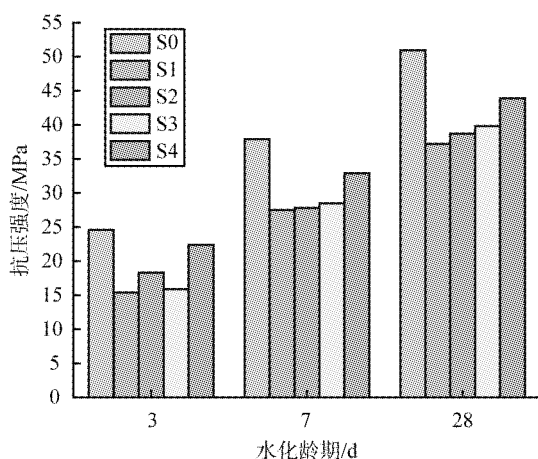


图4 不同水化龄期砂浆抗压强度的变化趋势图

Fig.4 Compressive strength change of mortar under different hydration ages

20% 取代率下,砂浆在不同水化龄期的抗折强度变化趋势如图6所示。从图可以发现,掺入再生微粉后,砂浆的抗折强度并没有表现出明显下降的趋势。S4是利用粉磨30 min的微粉制得的,其各龄期的抗折强度与纯水泥砂浆的非常接近,其中28 d抗折强度达到纯水泥砂浆的99.6%。这主要是因为再生微粉的粗糙颗粒表面可以给水泥浆体提供更多的附着位置,可以提升水泥浆体在界面过渡区的附着能力^[31],界面黏结能力提高,从而抵消了一部分因水泥中活性矿物含量减少带来的强度损失。

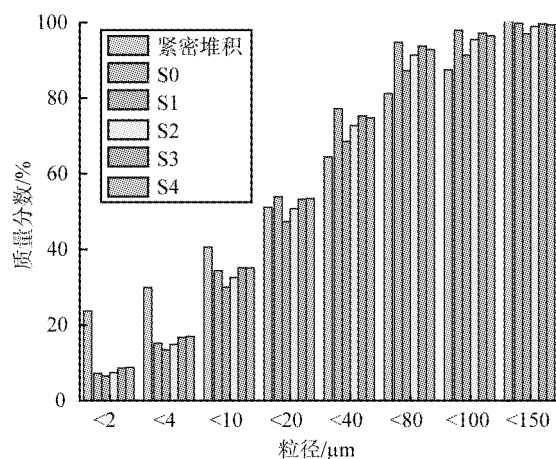


图5 砂浆中胶凝粉体材料颗粒的粒径分布

Fig.5 Particle size distribution of cementitious material in mortar

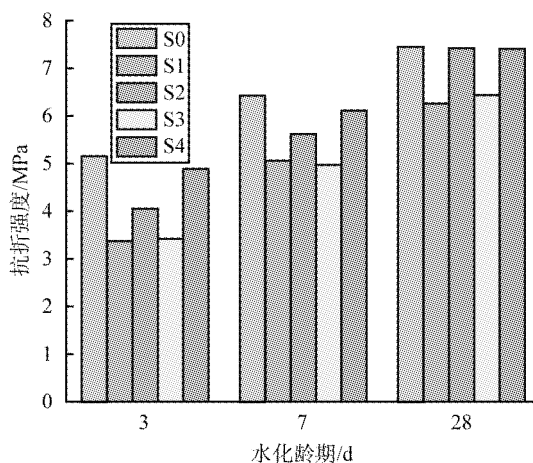


图6 不同水化龄期砂浆抗折强度的变化趋势图

Fig.6 Tensile strength change of mortar under different hydration ages

3.5 胶凝材料级配对凝胶体微观结构的影响

图7为水化28 d后砂浆的SEM图像。由图可见,到28 d龄期时,采用未经粉磨的RCP制得的砂浆S1中水化产物较少,内部结构疏松,多处可见六方片状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$;随着粉磨时间的增加,制得的砂浆中C-S-H凝胶含量不断增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶减少,水泥石的结构逐渐趋于致密,说明随着粉磨时间的增加,再生微粉中有更多的活性组分可以与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应^[34],生成的产物进一步填充水泥石内部孔隙,从而提高砂浆的强度。

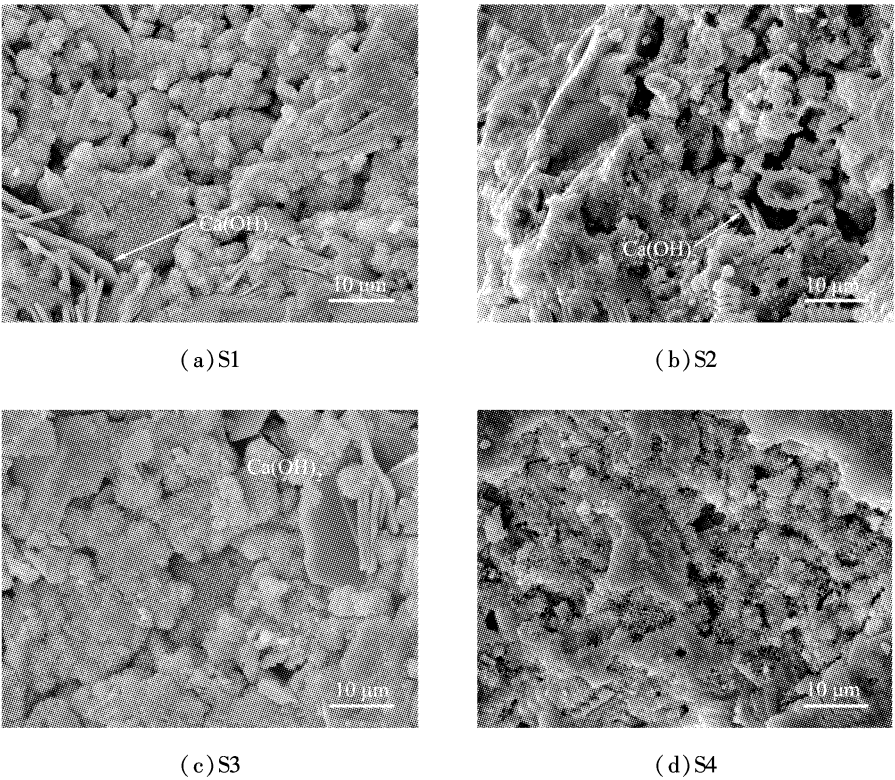


图7 水化28 d后砂浆的SEM图像

Fig.7 SEM images of mortar at 28 d

表6为各配比砂浆的孔结构特征参数。从表中可以看出,S4比S1总孔隙率增加了18.2%,孔面积增加了142.9%,而平均孔径降低了51.9%,最可几孔径减小,说明掺加富含超细颗粒的再生微粉后,虽然砂浆中总的孔隙率增加了,但是小孔明显增多,说明随着再生微粉颗粒级配的不断优化,其填充水泥石中孔隙的作用明显提升,对改善砂浆中水泥凝胶体微观结构产生积极作用。

表6 各配比砂浆中水泥石孔隙结构特征参数

Tab.6 Characteristic parameters of pore structure in different types of mortar

编号	孔隙率/%	总孔体积/($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)	孔面积/($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	平均孔径/nm	最可几孔径/nm
S1	9.94	0.047 60	3.867	49.26	50.37
S2	11.75	0.066 30	0.911	24.30	50.43
S3	11.18	0.052 51	8.568	24.51	40.31
S4	11.75	0.055 60	9.393	23.68	50.42

根据吴中伟等^[35]对混凝土中孔径的划分方法,可以将水泥石中的孔径分布划分为4个区域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ。再生微粉取代率为20%时,水化28 d后砂浆水泥石中的孔径分布变化规律如图8所示。从图可以看出,随着再生微粉粉磨时间的增加,砂浆中有害孔(50~200 nm)和多害孔(>200 nm)的数量明显减少,而无害孔(<20 nm)和少害孔(20~50 nm)的数量明显增加。S2为粉磨时间为10 min的

微粉制得,其中小于20 nm的无害孔含量超过了S3,所以S2的抗压强度与S3非常接近,而抗折强度甚至超过S3,说明S2中水泥石中孔隙结构的改善对于提高水泥胶砂强度是有利的。S4为粉磨时间为30 min的微粉制得,其中小于20 nm的孔的数量明显多于其他配比的砂浆,比S1增加了25%;大于200 nm的孔的数量明显减少,比S1减少了29%,说明对再生微粉进行适当粉磨,改善其颗粒级配,可以有更多的超细颗粒细化水泥石中有害孔隙的孔径,使得水泥石结构变得更加致密^[36-37]。

4 结论

利用Andreasen颗粒紧密堆积理论,研究再生微粉经球磨0、10、20、30 min后的颗粒级配的变化对水泥凝胶体微观结构及强度的影响,结论如下。

1)随着球磨时间的增加,再生微粉中粒径小于10 μm 的超细颗粒含量逐渐增加,粉磨20 min时粒径小于10 μm 的颗粒质量分数达到38.15%,超出水泥的10.9%。粉磨30 min的微粉与粉磨20 min的相比,粒径变化不大,球磨效率降低,建议对再生微粉的球磨时间控制在30 min以内。

2)随着再生微粉在球磨机中粉磨时间的逐渐增加,其矿物组成中 CaCO_3 的结晶峰在逐渐增强,可以对水泥中 C_3A 和 C_3S 的水化起到促进作用,提高再生微粉的水化活性。

3)当再生微粉取代率为20%时,粉磨30 min的微粉制得的砂浆,在各个龄期均表现出最高的抗压强度。用RCP-30制备的砂浆28 d抗压强度达到43.9 MPa,比用RCP制备的砂浆强度增大了18.0%。

4)在再生微粉取代率一定的情况下,随着再生微粉粉磨时间的增长,相应制得的砂浆水泥石中C-S-H凝胶含量不断增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体数量不断减少,内部孔隙逐渐减少,水泥石结构逐渐趋于致密。用RCP-30制备的砂浆比采用未经粉磨再生微粉的砂浆总孔隙率增加了18.2%,而平均孔径降低了51.9%,孔径小于20 nm的孔的数量增加了25%,大于200 nm的孔减少了29%,说明随着再生微粉颗粒级配的不断优化,大量的超细颗粒可以起到细化孔径的作用,水泥石结构更加趋于密实。

参考文献(References):

- [1]刘斌. 建筑垃圾再生细骨料及微粉制备再生砂浆试验研究[D]. 郑州:郑州大学, 2019.
- [2]XIAO J ZH, LIW G, FANY H, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996—2011)[J]. Construction and Building Materials, 2012, 31: 364—383.
- [3]史才军, 曹芷杰, 谢昭彬. 再生混凝土力学性能的研究进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2016, 30(12): 96—103.
- [4]SILVA R V, BRITO J, DHIR R K. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: a review[J]. Construction and Building Materials, 2018, 178: 19—31.
- [5]TAM V W Y, SOOMRO M, EVANGELISTA A C J. A review of recycled aggregate in concrete applications(2000—2017)[J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 272—292.
- [6]GUO H, SHI C J, GUAN X M, et al. Durability of recycled aggregate concrete: a review[J]. Cement and Concrete Composite, 2018, 89: 251—259.
- [7]KATRINA M, THOMAS H K. Recycled concrete aggregates: a review[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2013, 7(1): 61—69.
- [8]LI W G, XIAO J ZH, SUN Z, et al. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 1045—1055.
- [9]XIAO J ZH, LI W G, SUN ZH H, et al. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 35(1): 276—292.

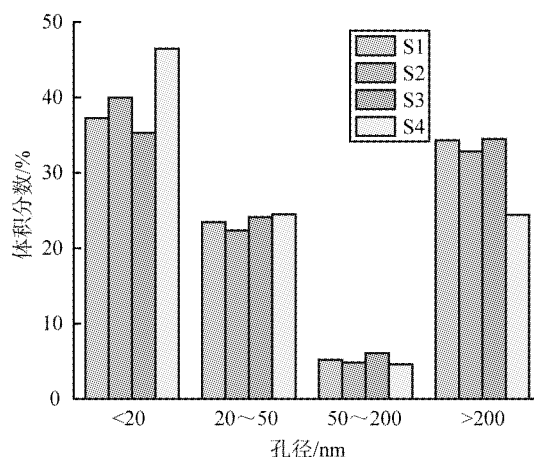


图8 水化28d后砂浆水泥石的孔径分布变化规律

Fig.8 Variation rule of pore size distribution of mortar paste at 28 d

- [10] SHAHAN W M, YANG J, SU H L, et al. Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate: a review[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2019, 17(4): 151–167.
- [11] SHI C J, LI Y K, ZHANG J K, et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(1): 466–472.
- [12] 王忠星, 姚宏, 李秋义, 等. 再生粗骨料强化处理方式对再生混凝土抗碳化性能的影响[J]. *混凝土*, 2017(9): 57–60.
- [13] 肖建庄, 李标, 张凯建, 等. 纳米二氧化硅改性再生混凝土的单轴受压动态力学性能[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 30–39.
- [14] XIAO J Z, MA Z M, SUI T B, et al. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 720–731.
- [15] 刘音, 路畅, 张浩强, 等. 建筑垃圾再生微粉胶凝性的实验研究[J]. *中国粉体技术*, 2015, 21(5): 33–36.
- [16] DUAN ZH H, HOU SH D, XIAO J ZH, et al. Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253: 119865.
- [17] 马郁. 掺建筑垃圾再生微粉混凝土性能试验研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2016(10): 88–90.
- [18] 吕雪源, 王乐生, 陈雪, 等. 混凝土再生微粉活性试验研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2009, 30(4): 137–139.
- [19] KUMAR S, KUMARR, BANDOPADHYAY A, et al. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cements[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(8): 679–685.
- [20] BINICI H, TEMIZ H, KOSE M M. The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground-granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(5): 1122–1128.
- [21] 周文娟, 季志远, 赵磊, 等. 建筑垃圾再生微粉基本材性及对水泥胶砂性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2019(3): 93–96.
- [22] 余小小, 李如燕, 董祥, 等. 机械力粉磨对再生微粉性能的影响[J]. *人工晶体学报*, 2017, 46(4): 687–692.
- [23] LUIZ A, DEPEREIRA O, JOAO P, et al. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31: 197–203.
- [24] ZHAO Y S, GAO J M, LIU CH B, et al. The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118521.
- [25] 李滢, 杨静. 胶凝材料颗粒级配在水泥凝胶体结构及强度的影响[J]. *新型建筑材料*, 2004(3): 1–4.
- [26] 张同生, 刘向阳, 韦江雄, 等. 水泥熟料与辅助性胶凝材料优化匹配的基础研究进展(I): 物理效应[J]. *水泥*, 2014(7): 7–13.
- [27] 於林锋. 再生微粉在水泥中作用机理的试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2017(7): 108–111.
- [28] 陆厚根. 粉体工程导论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993: 58–59.
- [29] LI SH J, GAO J M, LI Q Y, et al. Investigation of using recycled powder from the preparation of recycled aggregate as a supplementary cementitious material[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 267: 120976.
- [30] 康晓明. 再生微粉颗粒级配对再生砂浆力学性能及微观结构的影响研究[D]. 西宁: 青海大学, 2019.
- [31] 刘超, 胡天峰, 刘化威, 等. 再生复合微粉对混凝土力学性能及微观结构的影响[J]. *建筑材料学报*, 2020, 24(4): 726–735.
- [32] LIU Q, TONG T, LIU S, et al. Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 73: 754–763.
- [33] 周长顺, 吉红波, 赵丽颖. 再生微粉在水泥基材料中的应用与研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(8): 2456–2463.
- [34] YU K Q, ZHU W J, DING Y, et al. Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP)[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 124: 105813.
- [35] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 22–25.
- [36] ALIDA M, GIACOMO M. Particle size, size distribution and morphological evaluation of glass fiber reinforced plastic (GRP) industrial by-product[J]. *Micron*, 2014, 67: 169–178.
- [37] 吴凯, 施惠生, 徐玲琳, 等. 矿物掺合料调控界面过渡区微结构对混凝土力学性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(5): 623–630.