



您可能感兴趣的文章、专题：

[“煤矿智能化综述及关键技术”专题](#)

[“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题](#)

[“煤地质与煤结构”专题](#)

[“煤矿安全+智能化”专题](#)

[“深部煤层瓦斯精准抽采”专题](#)

[“中国煤科首席科学家”专题](#)

[“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题](#)

[2020年度《煤炭科学技术》“领跑者5000”论文](#)

[2021《煤炭科学技术》封面文章](#)

[煤炭行业青年科学家论坛\(2021年\)](#)



移动扫码阅读

曹可,王亮,徐颖,等.再生细骨料掺量对矿用支护砂浆动态力学性能的影响[J].煤炭科学技术,2021,49(11):112-117. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.11.015

CAO Ke, WANG Liang, XU Ying, *et al.* Influence of recycled fine aggregate content on dynamic mechanical properties of mine supporting mortar [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 112 - 117. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.11.015

再生细骨料掺量对矿用支护砂浆动态力学性能的影响

曹可¹,王亮^{1,2},徐颖¹,沈文峰¹,王浩¹,王鹏举¹

(1.安徽理工大学 土木建筑学院,安徽 淮南 232001;2.淮北矿业股份有限公司,安徽 淮北 235000)

摘要:再生混凝土骨料的高孔隙率特性对砂浆抵抗冲击荷载具有积极作用,为研究再生细骨料水泥砂浆在复杂地下环境中应用于井下支护的可能性,制备了 0、10%、30%、50% 四种不同再生细骨料质量替代率的水泥砂浆。使用 $\phi 50$ mm 的分离式变截面霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)试验装置,对水泥砂浆进行 0.25、0.35 和 0.45 MPa 三种加载气压下的冲击试验,并测试再生细骨料水泥砂浆的静态抗压强度。通过比较不同替代率的再生细骨料水泥砂浆在不同冲击气压下的动态特性,研究再生细骨料砂浆的抗冲击性能。试验结果表明,随着替代率的提高,再生细骨料水泥砂浆的静态抗压强度呈先增长后降低的趋势,在替代率为 10% 时最大,替代率为 30% 以及 50% 时,其静态抗压强度也并未低于对照组;在相同冲击气压下,随着再生细骨料替代率的提高,试块所能承受的冲击荷载也随之提高;在相同替代率下,试块的动态抗压强度以及极限韧性随着冲击气压的增大呈现增加趋势;在应变率 $60.29 \sim 143.379 \text{ s}^{-1}$ 时,50% 替代率再生细骨料砂浆的动态强度增长因子(DIF)均高于其他组,该替代率的水泥砂浆的动态抗压强度、极限韧性最高,并且静态抗压强度也不低于对照组试块,具有较好的抗冲击性能。

关键词:再生细骨料;霍普金森压杆;水泥砂浆;注浆支护;矿井支护

中图分类号:TD35 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2021)09-0112-06

Influence of recycled fine aggregate content on dynamic mechanical properties of mine supporting mortar

CAO Ke¹, WANG Liang^{1,2}, XU Ying¹, SHEN Wenfeng¹, WANG Hao¹, WANG Pengju¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Huaibei Mining Industry Co., Ltd., Huaibei 235000, China)

Abstract: The high porosity of recycled concrete aggregate have a positive effect on the resistance of mortar to impact load. In order to study the feasibility of recycled fine aggregate mortar used in underground support, 4 types of cement mortars with different recycled fine aggregate mass replacement rates (0, 10%, 30% and 50%, respectively) were made. $\phi 50$ mm Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test device was used to test these cement mortars under different pressure loading (0.25, 0.35, 0.45 MPa). And the compressive strength of these mortars was also tested. Comparing the dynamic characteristics of cement mortar under different impact pressure loading, the impact resistance performance of recycled fine aggregate mortar was studied. The results show that the compressive strength of recycled fine aggregate cement mortar increases first and then decreases with the increase of the substitution rate, and reaches the maximum when the substitution rate is 10%, while the substitution rate is 30% and 50%, the compressive strength is not lower than that of the control group. Under the same impact pressure, with the increase of the replacement rate of recycled fine aggregate, the impact load that the mortars can bear also increases. Under the same substitution rate, the dynamic compressive strength and ultimate toughness of the mortars increases with the increase of impact pressure. Within the strain rate range from 60.29 to 143.379 s^{-1} , the dynamic increase factor (DIF) of the recycled

收稿日期:2021-01-06;责任编辑:郭鑫

基金项目:安徽省高等学校自然科学研究资助项目(KJ2019A0129);安徽省重点研究与开发计划资助项目(201904a07020081);中国博士后科学基金资助项目(2020M681988)

作者简介:曹可(1995—),男,江苏徐州人,硕士研究生。E-mail:632737884@qq.com

通讯作者:王亮(1991—),男,安徽淮北人,讲师,博士。E-mail:2018028@aust.edu.cn

fine aggregate mortar with 50% substitution rate was higher than that of other groups. The recycled fine aggregate cement mortar with 50% substitution rate has the highest dynamic compressive strength and ultimate toughness under three different pressures, and its compressive strength is no less than that of the control group.

Key words: recycled fine aggregate; Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB); cement mortar; grouting support; mine support

0 引 言

井筒是矿井生产的咽喉,在地下长期经受到深部地压、采矿扰动等复杂的力学作用^[1],为保证施工安全,必须及时进行支护^[2]。随着锚杆喷射混凝土技术的问世及新奥法施工技术的发展,井筒采用喷射混凝土、锚喷支护及锚喷网支护技术维护井筒围岩的稳定,具有技术先进、质量可靠、经济合理等一系列优点,被广泛应用于竖井支护之中^[3-4]。在以上技术中,水泥基砂浆是一种被广泛应用的材料,而在地下复杂环境中,材料的强度及抵抗冲击的能力等性能,就显得尤为重要^[5-6]。目前,传统建筑材料生产和使用导致了资源过度消耗、能源短缺和环境污染等一系列严重问题,对于建筑废弃物尤其是旧混凝土、旧砂浆的再生利用已经成为各个国家关注的热点。将废弃混凝土破碎、筛分,形成的以满足不同使用要求的骨料就是再生骨料,其中粒径尺寸为 0.08~4.75 mm 的再生骨料称为再生细骨料(又称再生砂),主要组分包括建筑材料破碎后形成的表面附着水泥浆的砂粒、表面无水泥浆的砂粒、水泥石颗粒及少量破碎石块,将再生细骨料全部或者部分替代天然细骨料配制的砂浆称为再生细骨料砂浆^[7-9]。无论是喷射混凝土还是锚喷支护及锚喷网支护技术,对于砂浆都具有大量需求^[10-11],再生细骨料砂浆替代普通水泥砂浆,节省资金、减小污染、保护环境、节约资源,且再生细骨料砂浆具有更高的孔隙率^[12],能够在冲击荷载作用下吸收更多能量,从而在工程实际中发挥更好的作用。

基于此,对不同替代率的再生细骨料砂浆进行静态抗压强度测试以及 3 种不同气压下冲击加载试

验,根据结果分析其性能,对研究建筑废料合理利用以及在地下有冲击扰动的注浆工程中,如何合理选择材料具有借鉴意义和参考价值。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验材料为海螺牌 P·O 42.5 硅酸盐水泥;淮河河砂,细度模数 2.56;淮南市自来水;聚羧酸高效液态减水剂;再生细骨料(来自实验室相同配合比的废弃砂浆试件)具体配合比见表 1,试件经过破碎后,过 4.75 mm 圆孔筛,得到粒径 4.75 mm 以下再生细骨料。

表 1 普通砂浆配合比

Table 1 Mixing ratio of normal mortar

成分	水	水泥	砂
材料质量浓度/(kg·m ⁻³)	275	548	1 430

1.2 试样制备

为减小惯性效应和摩擦效应的影响,试件的长径比应该为 0.5 左右^[13],试件尺寸为 $\phi 50$ mm×25 mm。将再生细骨料分别替代 0(对照组)、10%、30%、50%的天然砂,按照表 2 配合比制作砂浆试件,所对应砂浆试件编号分别为 A、B、C、D。试件放置在标准养护室中养护 28 d 后取出,使用打磨机将试件两面打磨平整,端面平整度在 0.05 mm 以内。

根据 ASTM C109—16a《水硬性水泥砂浆抗压强度标准试验方法》^[14],为测试砂浆的抗压强度,制备 50 mm×50 mm×50 mm 立方体试块,在温度为(23±1)℃,相对湿度≥95%条件下养护至 7、14、28 d。抗压强度试块 6 个试块为 1 组,取平均值作为测试结果。

表 2 再生细骨料砂浆配合比

Table 2 Mixing ratio of recycled fine aggregate mortar

编号	材料质量浓度/(kg·m ⁻³)					再生细骨料代替天然砂占比/%
	水	水泥	砂	再生细骨料	减水剂	
A	200	667	1 333.0	0	4	0
B	200	667	1 199.7	133.3	4	10
C	200	667	933.1	399.9	4	30
D	200	667	666.5	666.5	4	50

1.3 SHPB 试验装置与试验方法

使用 $\phi 50$ mm 变截面 SHPB 试验系统对试块进

行单轴冲击压缩试验,撞击杆、入射杆和透射杆是长度分别为 0.6、2.4、1.2 m 的合金钢,密度为 7 800 kg/m³,

弹性模量为 210 GPa,纵波波速为 5 190 m/s。采用 0.25、0.35、0.45 MPa 三种不同气压发射,每组试块在同一气压下重复 3 次冲击试验,试验前调平撞击杆、入射杆、透射杆与试件共轴,在试件两端涂抹少量凡士林以减小杆件与试件的摩擦,在入射杆端头贴整形器以减小波形震荡和弥散效应。每次冲击后,可得波形图如图 1 所示,结合式(1)一式(3),可求得试块的应力、应变、应变率为:

$$\sigma = \frac{AE}{2A_0}(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{C_0}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_0}{l_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (3)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; C_0 为压杆对应的弹性波速; A 、 E 为杆的横截面积、弹性模量; A_0 、 l_0 为试样的横截面积、长度; ε_i 为入射波所对应的应变脉冲; ε_r 为反射波所对应的应变脉冲; ε_t 为透射波所对应的应变脉冲^[15]。

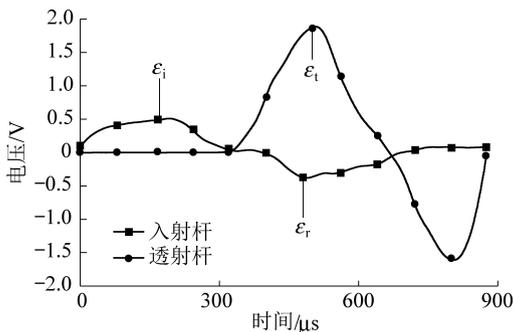


图1 典型波形

Fig.1 Typical waves of test

2 试验结果与分析

2.1 静态抗压强度

图 2 为不同再生细骨料替代率水泥砂浆静态抗压强度,由图 2 知使用再生细骨料替代部分天然细骨料的水泥砂浆,在 7、14、28 d 时,随着替代率由低到高,其静态抗压强度都大于或等于一般对照组的静态抗压强度。其中,再生细骨料替代率为 10% 时,水泥砂浆的静态抗压强度最高,替代率为 30% 及 50% 时,静态抗压强度略有下降,但依然能与一般对照组持平。出现上述结果一方面是因为试验中所使用的再生细骨料性能比较优异;另一方面是因为再生细骨料含有残余水泥浆,其孔隙率较高,造成用拌合物制作的再生水泥砂浆具有较强吸水性,实际水泥水化用水减少,通过微降低实际水灰比提高

强度,且水分被吸入裂缝和空隙中,形成局部加湿的养护环境有利于水泥砂浆养护和性能提升^[16],当替代率达到 30% 和 50% 时,由于砂浆密实程度降低,静态抗压强度有所下降。

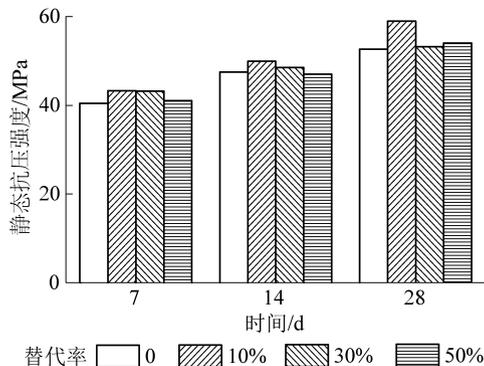


图2 不同再生细骨料替代率水泥砂浆静态抗压强度

Fig.2 Static compressive strength of cement mortar with different recycled fine aggregate substitution rate

2.2 应力-应变曲线分析

根据式(1)一式(3)对入射杆和透射杆应变片测得的脉冲波形信号(图 1)进行计算,得到砂浆试块在冲击荷载下的应力 σ 和应变 ε 的关系曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,砂浆试块的应力应变曲线可分为 4 个阶段:压密阶段、弹性阶段和屈服阶段、破坏阶段。在压密阶段,入射杆与试件接触面逐渐压实,在应力的作用下,试块内部缺陷、空隙逐渐压密,试块的抗变形能力不断增加^[17],在此阶段,曲线呈下凹特征;在弹性阶段,轴向应力随应变近似为线性增长,曲线斜率基本保持不变,因此该段斜率可作为试块的动态弹性模量,试件内缺陷几乎没有新的发展;随着作用在试件上的应力持续增大,试件进入到屈服阶段,此时曲线呈上凸特征,轴向应力随应变的增长趋势减缓,试件内裂纹逐渐扩展;应力达到峰值后,应力随应变的增大快速下降,试件进入破坏阶段,卸载超过试块强度极限,随之破坏。其中,部分曲线在初始阶段中出现了下凹段,是应力跌落现象,这是因为试块表面的不平整部分先接触到入射杆,承受冲击荷载后随即破裂,在出现短时间应力跌落之后,试块的其他部分接触到入射杆,应力开始回升。

由图 3a、3b、3c 可知,无论冲击气压如何变化,再生细骨料替代率为 50% 的水泥砂浆试块的峰值应力总是最大;由图 3d、3e、3f 可知,随着冲击气压的不断增大,砂浆试块的峰值应力与极限应变都随之增大,成正相关关系。这是由于水泥砂浆微观上可视作由细骨料、砂浆基质及过渡区界面、微裂纹或孔隙等组成的多相非均质复合材料。静态下,加载时间可满足砂浆内应力平衡和微裂纹的开展速度要

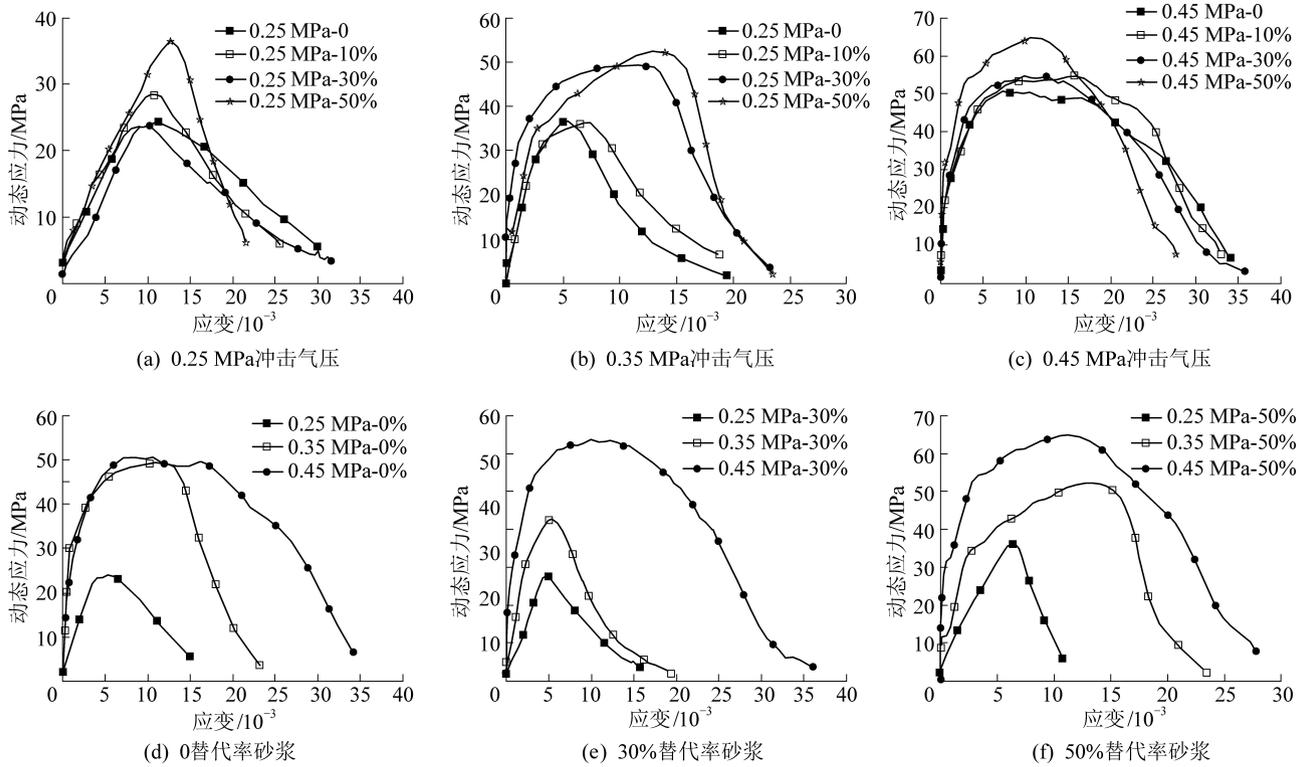


图3 动态应力-应变曲线

Fig.3 Dynamical stress-strain curves

求^[18],且骨料、砂浆基质及其过渡区受力均匀^[19],而微裂纹沿强度薄弱路径开展。高应变率冲击下,再生细骨料砂浆产生的裂纹数量大量增加,所吸收的能量增多,而裂纹扩展滞后于加载速度。根据冲量定理或功能原理,滞后的变形导致应力的增加,最终导致再生细骨料砂浆动态抗压强度的提升。再生细骨料特有的孔隙结构形成了骨料与砂浆基质间致密的界面过渡区,且再生细骨料本身具有优良的消波吸能效能,使得再生细骨料砂浆在冲击动载作用下体现较好的变形协调性,

避免了界面过渡区、微裂隙、微孔洞等局部应力集中现象,使得再生细骨料砂浆抗冲击性能高于一般水泥砂浆,且在再生细骨料替代率为50%时达到最优效果。

为进一步研究再生细骨料砂浆动态强度的应变率相关性,及动态强度增长因子 DIF (冲击荷载作用下动态抗压强度与静态单轴抗压强度之比),对图3中的峰值应力及应变率等参数进行统计分析,见表3,其中极限韧性是应力应变曲线的包络面积^[20]。

表3 各组砂浆的性能参数

Table 3 Performance parameters of each mortar group

编号	气压/MPa	冲击速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	应变率/ s^{-1}	动态峰值应力/ MPa	动态极限应变/ 10^{-3}	极限韧性/ ($J \cdot cm^{-3}$)	静态抗压强度/ MPa	动态强度增 长因子 DIF
A1	0.25	6.621	79.110	24.346	15.0	0.239 7	52.631	0.46
B1	0.25	6.511	65.630	28.561	12.8	0.218 7	58.948	0.48
C1	0.25	6.271	87.180	23.837	15.8	0.196 7	53.232	0.45
D1	0.25	6.082	60.290	36.386	16.8	0.242 7	54.029	0.67
A2	0.35	5.781	121.986	49.819	23.4	0.804 6	52.631	0.95
B2	0.35	5.501	154.443	36.505	18.8	0.741 8	58.948	0.62
C2	0.35	5.310	169.982	36.974	19.5	0.739 1	53.232	0.69
D2	0.35	5.470	136.043	52.346	23.5	0.814 7	54.029	0.97
A3	0.45	7.570	168.723	50.782	34.4	1.396 2	52.631	0.96
B3	0.45	7.159	167.191	54.967	33.2	1.378 1	58.948	0.93
C3	0.45	7.138	177.355	54.758	36.1	1.353 3	53.232	1.03
D3	0.45	7.142	143.379	64.959	37.9	1.396 6	54.029	1.20

由表3可知,相同再生细骨料替代率水泥砂浆的动态峰值应力、动态极限应变及动态强度增长因子均随应变率的增大而增大。动态峰值应力、极限应变具有明显的应变率相关性。在应变率达到 168.723 s^{-1} 时,应变率对与一般水泥砂浆的动态峰值应力影响较小,仅达到 0.96,而 50% 替代率再生细骨料砂浆在低应变率状态下,仍然比其他组别具有更高的 *DIF*,在应变率 $60.29 \sim 143.379 \text{ s}^{-1}$ 内,*DIF* 由 0.67 增长至 1.20,增幅高达 79.1%,再次说明 50% 替代率再生细骨料砂浆具有优异的抵抗冲击动力的性能。为进一步研究 50% 替代率再生细骨料砂浆的 *DIF* 及极限韧性随应变率的变化趋势,分别绘制 *DIF*、极限韧性(*M*)与应变率关系图,如图4、图5所示。

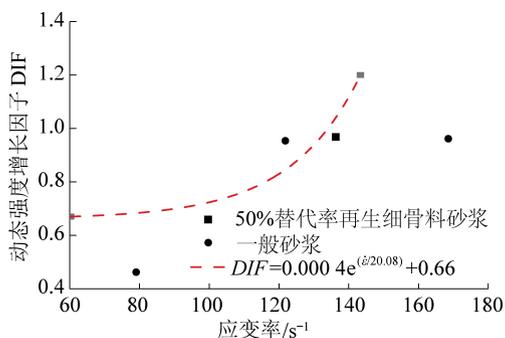


图4 再生细骨料砂浆与普通砂浆的 *DIF* 与应变率关系

Fig.4 Relationship between *DIF* and strain rate for recycled fine aggregate mortar and normal mortar

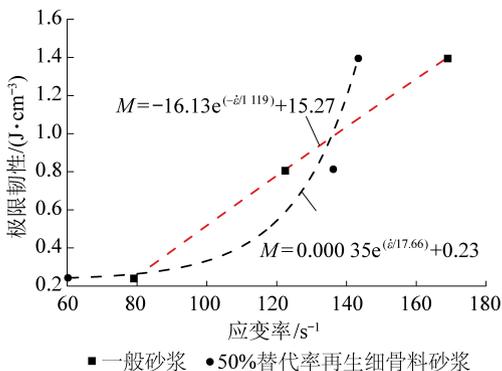


图5 再生细骨料砂浆与普通砂浆极限韧性与应变率关系

Fig.5 Relationship between ultimate toughness and strain rate for recycled fine aggregate mortar and normal mortar

由图4可知,在高应变率动力冲击下,50%替代率再生细骨料砂浆的 *DIF* 随应变率增加而非线性增大,且增速逐渐变快。在同等应变率下,50%替代率再生细骨料砂浆 *DIF* 高于一般水泥砂浆,且静态抗压强度略高于一般水泥砂浆,综合而言,抵抗动态冲击能力较强,可应用于防护结构。应用指数幂型关系式拟合 50% 替代率再生细骨料砂浆 *DIF* 与应变率关系,式(4)预测曲线与试验结果具有较好的一致性。

$$DIF = 0.0004 e^{\frac{\dot{\epsilon}}{20.08}} + 0.66 \quad (4)$$

由图5可知,50%替代率再生细骨料砂浆与普通砂浆的极限韧性都随着应变率增加而增大,但50%替代率再生细骨料砂浆其极限韧性增速远大于普通砂浆,这说明在高应变率情况下,50%替代率再生细骨料砂浆能够比普通砂浆吸收更多的冲击能量,起到更好的保护作用。

3 结 论

1) 在再生细骨料替代率为 10% 时,静态抗压强度达到最高。随着替代率增加到 50%,静态抗压强度有所下降,但仍可与一般水泥砂浆相当。

2) 在应变率 60.29 s^{-1} 到 143.379 s^{-1} 内,50%替代率再生细骨料砂浆的动态峰值应力、动态极限应变与应变率均呈正相关关系,其动态强度增长因子与应变率关系为 $DIF = 0.0004 e^{\frac{\dot{\epsilon}}{20.08}} + 0.66$,且以上性能均优于其他组别。

3) 再生细骨料具有孔隙率高的特点,使再生砂浆具有较好的抵抗冲击动力的性能。50%替代率再生细骨料砂浆吸收冲击能量的性能优于其他组别;综合静态抗压性能与动态抗冲击性能,再生细骨料替代率为 50% 的再生细骨料砂浆比一般水泥砂浆更能适应地下复杂环境。

参考文献 (References) :

- [1] 刘娟红,陈志敏,纪洪广. 基于早龄期荷载及负温耦合作用下的仿钢纤维井壁混凝土性能的研究[J]. 煤炭学报,2013,38(12):2140-2145.
LIU Juanhong, CHEN Zhimin, JI Hongguang. Study on the behavior of steel fiber imitation shaft lining concrete under early age load and negative temperature coupling [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2140-2145.
- [2] 龙志阳,桂良玉. 千米深井凿井技术研究[J]. 建井技术,2011,32(1):16-18.
LONG Zhiyang, GUI Liangyu. Technical study on the excavation of kilometers deep shaft [J]. Mine Construction Technology, 2011, 32(1): 16-18.
- [3] 张仙保. 锚杆喷射混凝土技术在矿山竖井工程中的应用[J]. 煤炭技术,2007(9):93-95.
ZHANG Xianbao. Application of bolting and shotcreting technology in shaft project [J]. Coal Technology, 2007(9): 93-95.
- [4] 马利,许鹏. 岩巷掘进快速湿式喷射混凝土支护技术[J]. 煤炭科学技术,2013,41(4):5-7.
MA Li, XU Peng. Rapid wetshotcreting support technology of mine rock roadway [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(4): 5-7.
- [5] 刘娟红,吴瑞东,周昱程. 基于深地复杂应力条件下混凝土冲击倾向性试验[J]. 煤炭学报,2018,43(1):79-86.

- LIU Juanhong, WU Ruidong, ZHOU Yucheng. Impact tendency Test of concrete under deep complex stress [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 79-86.
- [6] MARK C. Coal bursts in the deep long-wall mines of the United States [J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2016, 3(1): 1-9.
- [7] 庄广志. 再生骨料砂浆性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [8] 孙 冰, 肖苗良, 陈露辉, 等. 再生混凝土力学性能研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2): 497-502.
- SUN Bing, XIAO Zhuoliang, CHEN Luhui, *et al.* Research progress on mechanical properties of recycled concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(2): 497-502.
- [9] 申 健, 牛获涛, 王 艳, 等. 再生混凝土耐久性能研究进展 [J]. 材料导报, 2016, 30(3): 89-100.
- SHEN Jian, NIU Ditao, WANG Yan, *et al.* Durability research status of recycled aggregate concrete [J]. Materials Review, 2016, 30(3): 89-100.
- [10] 王照刚. 爆破动载下锚固支护结构动态力学响应研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- [11] 郭 浩, 杭鑫坤. 适于喷射的聚合物修补砂浆研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(8): 70-73.
- GUO Hao, HANG Xinkun. Research about polymer repair mortar materials by using spraying [J]. New Building Materials, 2016, 43(8): 70-73.
- [12] OIKONOMOU N D. Recycled concrete aggregate concretes [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(2): 315-318.
- [13] 陈裕泽, 田常津, 陈 刚, 等. SHPB 系统圆柱形试件的惯性效应分析 [J]. 固体力学学报, 2005(1): 107-110.
- CHEN Yuze, TIAN Changjin, CHEN Gang, *et al.* Analysis of the inertial effect of the cylindrical specimen in SHPB system [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2005(1): 107-110.
- [14] ASTM C109, Standard test method for autogenous strain of cement paste and mortar [S].
- [15] 余同希, 邱信铭. 冲击动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 49-51.
- [16] 肖 倍, 安旭文, 杨 瑞, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及其影响因素研究 [J]. 混凝土, 2018(11): 32-36.
- XIAO Bei, AN Xuwen, YANG Rui, *et al.* Experimental research on basic mechanical characteristics of recycled aggregate concrete and influencing factors [J]. Concrete, 2018(11): 32-36.
- [17] 高 强, 汪海波, 吕 闹, 等. 不同冲击速度下硬煤的力学特性试验研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(1): 69-74.
- GAO Qiang, WANG Haibo, LYU Nao, *et al.* Experimental study on mechanical characteristics of hard coal under different impact velocities [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(1): 69-74.
- [18] SUN X, ZHAO K, LI Y, *et al.* A study of strain-rate effect and fiber reinforcement effect on dynamic behavior of steel fiber-reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 657-669.
- [19] SONG Z, LU Y. Mesoscopic analysis of concrete under excessively high strain rate compression and implications on interpretation of test data [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 46(6): 41-55.
- [20] 田正宏, 江桂林, 苏伟豪, 等. 冲击荷载下纤维砂浆动态受压特性 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(1): 90-97.
- TIAN Zhenghong, JIANG Guilin, SU Weihao, *et al.* Dynamic compressive properties of fiber mortar subjected to impact load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(1): 90-97.