

一种高抗冲击性能贫铁矿石混凝土的实验研究

苗振坤, 田帅, 陈中航, 孙博

(辽宁科技大学土木工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 一种高抗冲击性能混凝土是以矿山中的超贫铁矿石做粗骨料制备而成, 称作贫铁矿石混凝土。采用自制落锤冲击装置进行抗冲击性能实验, 根据实验结果及实验现象对贫铁矿石混凝土的抗冲击性能做出分析, 并与石灰岩基准混凝土进行对比。结果表明: 与基准混凝土相比, 贫铁矿石混凝土的抗冲击性能增强了约 0.67~2.03 倍。强度为 C80 级时骨料破坏程度最大, 平衡的冲击能量最多, 超贫铁矿石特性被充分利用, 抗冲击性能增强幅度达到最大。对强度等级与抵抗破坏能力结果进行相关性检验, 二者成一次线性关系, 超贫铁矿石应用于高强混凝土中主要是以提升抵抗初裂破坏的能力进而增强了抗冲击性能。

关键词: 超贫铁矿石; 混凝土; 落锤冲击; 高抗冲击性能

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.06.007

中图分类号: TU528.57 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2021) 06-0034-06

为提高冶金矿山固废物的综合利用率, 减轻土地资源占用压力^[1]及降低运输费用等, 选用矿山中固体废物为实验原材做粗骨料应用于混凝土中。早期时, 我国对矿山固体废物利用已有初步研究工作。由于材料性能不同, 在应用上也存在差别, 如将粗粒尾矿破碎后做混凝土骨料^[2], 细粒尾矿可直接做建筑用砂^[3]。目前为止, 包慧明等^[4]做了将赤泥的固体废物应用于温拌改善沥青中的实验研究, 何良玉等^[5]研究将钢渣作胶凝材料和细集料去制备高性能砂浆, 朱向红等^[6]做了褐铁矿可制备水泥的研究, 郑永超等^[7]做了利用铁尾矿制备抗压强度达到 100 MPa 的高强结构材料的相关研究。尽管如此, 当下对于固体废物应用在建筑材料中的性能研究仍较少。现阶段我国各地建筑产业发展迅猛, 涉及的工程领域越来越广。众多工程构件在使用时将受到各种无法预知的冲击荷载

影响, 如机械撞击、爆炸、地震、海浪、不规则振动冲击等动载荷。在动荷载反复作用下, 强大的冲击力使构件受到反复压缩和拉伸, 混凝土内部的微细裂缝不断的诱发和扩散。特别当构件受到固定约束时, 荷载作用后所产生的冲击波在混凝土内部连续反弹, 使得构件寿命大大降低。为此, 研究混凝土材料特性, 增强混凝土的抗冲击性能是非常有意义的。

本文选用的实验原材为铁元素质量数 10%~15% 的超贫铁矿石, 前期在将其应用于普通混凝土的实验研究中^[8], 在理论与应用方面已取得了阶段性成果。但根据实验中破坏现象, 超贫铁矿石还未能发挥出其本身特性, 本文在现有的理论基础上将超贫铁矿石应用于高强混凝土中。采用美国 ACI 544 委员会推荐的标准自由落锤实验方法, 对强度等级 C60~C90 的贫铁矿石混凝土开

收稿日期: 2020-08-06

基金项目: 省教育厅项目 (2020LNJC02); 辽宁科技大学优秀人才培养项目 (2019RC01)

作者简介: 苗振坤 (1997-), 男, 硕士在读。

通信作者: 田帅 (1979-), 男, 硕士, 副教授。

展抗冲击性能实验。根据初裂次数、终裂次数、初裂终裂次数差、能量、抗裂能力^[9]指标对贫铁矿石混凝土的抗冲击性能及增强机理做出分析，并以石灰岩混凝土为基准做对比。

1 实验设计

1.1 实验原材料准备

水泥采用 P·O 52.5 级普通硅酸盐水泥，各项指标满足实验要求。粗骨料为超贫铁矿石，破碎成 4.75 ~ 25 mm 粒径碎石，连续级配。基准混凝土的粗骨料选用普通石灰岩碎石，粗骨料物理力学性质见表 1。

表 1 粗骨料物理力学性质
Table 1 Physical and mechanical properties of coarse aggregate

粗骨料类别	表观密度 (/kg·m ⁻³)	堆积密度 (/kg·m ⁻³)	含泥量 /%	压碎值 /%
超贫铁矿石	3 080	1 904	0.379	6.13
石灰岩	2 690	1 676	0.432	8.79

依据粗集料级配技术指标标准，两种粗骨料均属于 I 级料。细骨料选用细度模数为 2.73 的河砂，表观密度 2610 kg/m³，含泥量 1.8%。水采用自来水。

1.2 试样制备及强度检测

1.2.1 初步配比材料用量设计

根据设计要求，对高强混凝土配合比设计进行深入的研究，参考 JGJ 55-2011《普通混凝土配合比设计规程》以及相关技术规范，并充分考虑工程实际施工条件与实验室内的各项条件存在的差异等因素。为控制粗骨料用量变量，采用绝对体积法计算其用量，试件编号见表 2。

表 2 试件编号
Table 2 Number of concrete specimens

A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
超贫铁矿石				石灰岩			
C60	C70	C80	C90	C60	C70	C80	C90

经计算得出混凝土初步配合比材料用量结果见表 3。

1.2.2 强度检测

抗压强度实验试件尺寸 150 mm×150 mm

×150 mm，每组 6 个试件。按表 3 配合比备料进行拌和实验。搅拌方式为人工搅拌，在振动台成型，24 h 后脱模。实验室混凝土试件养护间温度为 20℃，相对湿度为 95%。经 28 d 养护，采用标准实验方法测得的砼极限抗压强度，结果见表 4。

表 3 初步配合比材料用量
Table 3 Material consumption of preliminary concrete mix proportion

编号	水灰比 /%	砂率 /%	水 (/kg·m ⁻³)	水泥 (/kg·m ⁻³)	细骨料 (/kg·m ⁻³)	粗骨料 (/kg·m ⁻³)
A1	0.4	32	165	412.5	566.3	1 372.9
A2	0.35	31	160	457.1	538.2	1 359.9
A3	0.3	30	150	483.9	516.8	1 370.6
A4	0.28	29	145	483.3	501.9	1 366.7
B1	0.4	32	165	412.5	566.3	1 206.2
B2	0.35	31	160	457.1	538.2	1 194.8
B3	0.3	30	150	483.9	516.8	1 204.2
B4	0.28	29	145	483.3	501.9	1 200.7

表 4 28 d 抗压强度 /MPa
Table 4 Pressure strength of 28 days

A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
60.3	74.5	85	95.6	60.8	71.0	80.4	91.5

表 4 结果显示，各组混凝土抗压强度实测值均高于标准值，强度符合要求，可参照表 3 设计配比用量开展抗冲击性能实验。

1.3 实验方法

该实验方法是将一个重 4.55 kg 的钢锤从落距 460 mm 的高度自由下落冲击试件。实验试件为圆饼状，试件直径 150 mm、厚 63.5(±2) mm。按照表 3 计算配比用料，按照表 2 的编号每组制备 6 个试件，共计 48 个。

仪器底端为钢制底板，仪器本身具有固定试件功能，可保持试件形状。试件上表面正中心位置放置一个直径 63.5 mm 的钢球，用自制钢球固定垫固定。实验前需检查试件中心位置确保其平整无凹凸部分。实验过程中，钢锤自由下落先冲击钢球，钢球再将能量传递给试件。循环实验操作，当观察试件表面首次出现裂缝时记录下冲击次数 N₁（初裂次数），并用读数显微镜测出裂缝长度 L、宽度 c，深度 d。继续循环实验操作，每操作一次

后观察试件表面,当试件表面的裂缝数不再增加时定义试件完全破坏,记录破坏时的冲击次数 N_2 (终裂次数),再次测出破坏后的试件裂缝长度及宽度,根据实验现象定义此时的裂缝深度为试件厚度 (63.5 mm)。

该实验方法通过以下几项指标评价试件抗冲击性能:初裂冲击次数 N_1 ;终裂冲击次数 N_2 ;初裂终裂冲击次数差 ΔN ;试件初裂、终裂吸收的能量 W ;试件初裂、终裂抵抗破坏的能力 P ;参照美国 ACI544 委员会^[10]推荐,使用(1)式计算混凝土受到的冲击能量。

$$W = Nmgh \quad (1)$$

式中: W —冲击能量; N —冲击次数; h —重锤下落高度; m —重锤质量; g —重力加速度,取 9.81m/s^2 ;

采用式(2)计算试件抵抗初裂、终裂破坏能力;

$$P = \frac{W}{\Delta S} \quad (2)$$

式中: P —试件抵抗破坏能力; W —初裂、终裂时冲击能量; ΔS —裂缝开裂体积。

$$\Delta S = Ldc \quad (3)$$

式中: L —测得裂缝长度; d —裂缝深度,终裂时取试件厚度为裂缝深度; c —裂缝宽度。

2 实验结果与机理分析

2.1 实验现象描述

图1为两种混凝土初裂破坏形态(取裂纹较为明显试件)。在落锤反复锤击后,试件中心位置先发生凹陷现象,初始裂纹由凹陷部分向外扩散。两种混凝土产生的初始裂纹宽度深度基本相似,贫铁矿石混凝土试件表面裂纹数量较少,基准混凝土表面裂纹数量较多,分散在试件表面,试件表面损伤更为严重。图2为两种混凝土终裂破坏形态。

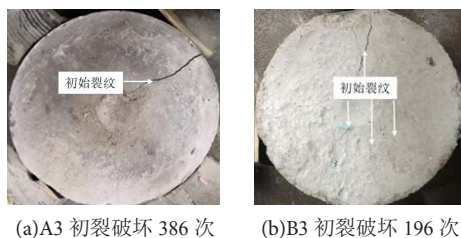


图1 初裂破坏

Fig.1 First crack

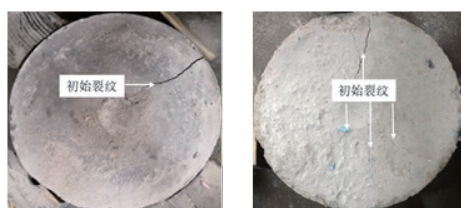


图2 终裂破坏

Fig.2 Final crack



图3 C80 贫铁矿石混凝土断面

Fig.3 Section of C80 grade poor iron ore concrete

由图3可见,贫铁矿石混凝土试件的表面裂缝近乎呈一条直线,实验过程中落锤锤击试件声音较为清脆。当出现初始裂纹后,锤击声音逐渐变小。基准混凝土的裂缝根据初始裂缝位置的不同,在试件表面随机扩展,呈现出不规则的放射状。

每组混凝土破坏后断面形态也各不相同,体现在断面上骨料断裂数量。这与两种混凝土的粗骨料本身特性是密不可分的,为研究骨料断裂程度对混凝土中裂缝发展及抗冲击性能影响,统计各组试件的骨料与硬化水泥浆体表观断裂表面比率,结果见表5。

表5 骨料与硬化水泥浆体表观断裂面比率

Table 5 Ratio of aggregate to apparent fracture surface of hardened cement paste

混凝土类别	C60	C70	C80	C90
A	1: 3	2: 3	3: 1	5: 2
B	3: 2	4: 3	2: 1	2: 1

表5结果可见，C80级贫铁矿石混凝土的骨料断裂数量较大。

破坏后的断面较为平整，断裂的骨料在断面呈明显对称状态。

C 60、C 70 级贫铁矿石混凝土骨料断裂数量较少，断面凹凸不平，破坏裂缝主要贯穿于硬化水泥浆体与骨料界面见图4、5。



图4 C 60级贫铁矿石混凝土断面

Fig.4 Section of C 60 grade poor iron ore concrete



图5 C 70级基准混凝土断面

Fig.5 Section of C 70 grade normal concrete

各等级基准混凝土破坏后的断面上基本相似，骨料断裂和骨料砂浆界面在断面处清晰可见，见图5。随着强度等级的提升，骨料与硬化水泥浆体表面断裂面比值也在逐渐提高。

2.2 实验结果

对48个试件进行自由式落锤冲击实验，为避免试件制备或加载时的人工操作不当等因素对结果影响，确保结果准确。取初裂冲击次数、终裂冲击次数的有效数据平均值作为结果数值，实验结果见表6，强度等级与冲击次数、能量指标的关系见图6、7。

表6 抗冲击实验结果
Table 6 Results of impact test

试件编号	初裂冲击次数 / 次	终裂冲击次数 / 次	初裂终裂次数差 / ΔN 次	初裂时试件吸收的能量 / J	破坏后共吸收的能量 / J
A1	91	110	19	1868	2259
A2	172	193	21	3526	3963
A3	386	393	7	7913	8069
A4	418	426	8	8569	8747
B1	84	107	23	1784	2197
B2	153	181	28	3137	3716
B3	196	233	37	4018	4784
B4	242	277	35	4961	5687

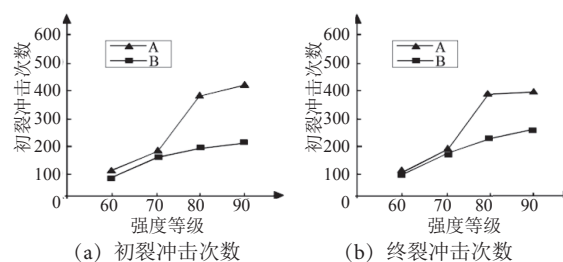


图6 强度等级与冲击次数关系

Fig.6 Relationship between strength grade and impact number

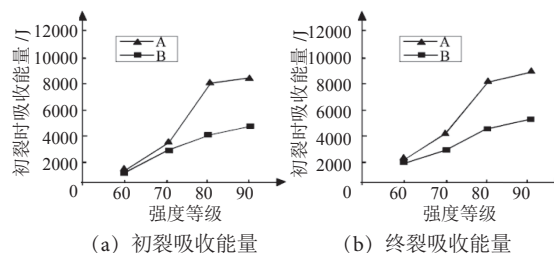


图7 强度等级与能量关系

Fig.7 Relationship between strength grade and energy

图6、7及表6结果可见，随着强度等级的提升，两种混凝土的初裂、终裂破坏次数、能量的指标均呈现出明显增加趋势且变化规律基本一致。数据显示各等级的贫铁矿石混凝土初裂、终裂次数及能量指标始终高于基准混凝土，数值上提高了约0.65~2.03倍。强度达到C90级时贫铁矿石混凝土 N_1 、 N_2 、 W 值最大。强度为C80级时提高的倍数最大，且在该等级时，图8中直线斜率呈现大趋势的增加，表5中骨料破坏程度也最大。说明了贫铁矿石混凝土骨料破坏对平衡试件吸收的冲击能量起到了决定性的作用。

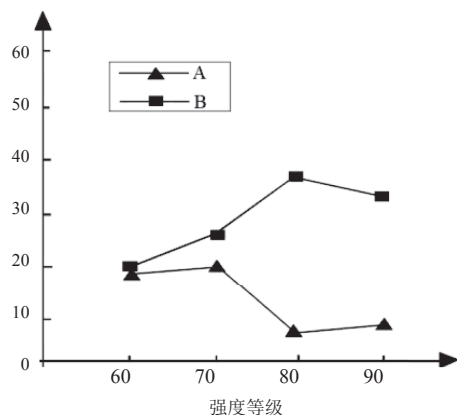


图 8 强度等级与初裂终裂冲击次数差关系

Fig. 8 Relationship between strength grade and impact times of first crack and final crack

图 8 中显示, 基准混凝土 ΔN 值始终高于贫铁矿石混凝土。随着强度等级的增加两种混凝土 ΔN 差值逐渐的增大, C80 级时的差值最大。实验过程中当发生初裂破坏后试件很快就达到最终破坏。证明了将超贫铁矿石应用于高强混凝土中虽可增强混凝土抗冲击性能, 但也提高了混凝土的脆性程度, 实验现象中锤击声响的变化也证实了这一点。为更加直观的体现出 ΔN 值对混凝土抗冲击性能的影响程度, 引用延性指标 β [11] 对性能进行评价。

$$\beta = \frac{\Delta N}{N_I} \quad (4)$$

其中: β_1 —贫铁矿石混凝土延性程度; β_2 —基准混凝土延性程度。经 (4) 式计算的结果见表 7。

表 7 延性指标
Table 7 Ductility index

强度等级	C60	C70	C80	C90
β_1	0.208	0.122	0.018	0.019
β_2	0.273	0.183	0.188	0.144

结果可见, 贫铁矿石混凝土较基准混凝土的延性程度降低了约 1.31 ~ 10.44 倍。但由于 ΔN 与 N_I 值相差较大, 使得两种混凝土 β 值的结果较小, 说明了与 N_I 值相比 ΔN 值对与贫铁矿石混凝土抗冲击性能影响较小。

表 8 抵抗破坏能力
Table 8 Resistance to damage

名称	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
抵抗初裂破坏能力 P_1	53.3	100.7	143.9	190.4	32.4	57.0	73.0	90.2
抵抗终裂破坏能力 P_2	15.0	22.6	46.1	50.1	10.5	18.5	23.9	25.8

通过已测量的裂缝长度、深度与宽度, 经 (2) 式计算得出试件抵抗初裂、终裂破坏能力值, 结果见表 8。对强度等级与抵抗破坏能力做相关性检验, 回归结果见表 9, 二者关系见图 10。

表 9 抵抗破坏能力线性回归结果

Table 9 Linear regression results of resistance to damage

评价指标	编号	α	β	R^2
P_1 、 N_1	A1~A4	4.545	-218.8	0.9970
	B1~B4	1.894	-78.9	0.9898
P_2 、 N_2	A1~A4	1.288	-63.15	0.9264
		0.513	-18.8	0.9337

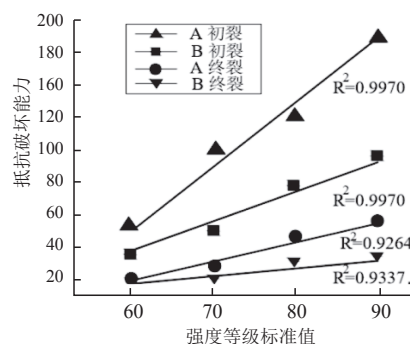


图 10 抵抗破坏能力与强度等级标准值关系

Fig. 10 Relationship between resistance to damage and strength grade standard value

图 10 表明抵抗破坏的能力指标与强度等级之间成一次线性关系。随着强度等级的提高, 两种混凝土抵抗破坏能力均在提升。与基准混凝土相比, 贫铁矿石混凝土的抵抗初裂、终裂破坏的能力均较强。相比较终裂破坏能力, 抵抗初裂破坏的能力提升的幅度较大, 且相关系数 R^2 值也最大。可以得出随着强度等级的提高, 贫铁矿石混凝土抗冲击性能的增强主要是依靠提升了抵抗初裂的破坏能力来实现。

3 结 论

(1) 与基准混凝土相比, 贫铁矿石混凝土的抗冲击性能有了显著的增强。当采用破坏次数以及能量指标评价混凝土抗冲击性能时, 贫铁矿石混凝土抗冲击性能增强约 0.67 ~ 2.03 倍。混凝土强度 C80 级时超贫铁矿石破坏程度最大, 平衡的冲击能量最大, 骨料特性被充分利用, 抗冲击性能增强幅度达到最大。

(2) 抵抗破坏能力与强度等级之间成一次线

性关系,贫铁矿石混凝土主要是以提升抵抗初裂破坏的能力增强混凝土的抗冲击性能。超贫铁矿石应用于高强混凝土中虽可增强混凝土抗冲击性能,但也提高了混凝土的脆性程度。

(3) 将超贫铁矿石应用于高强混凝土中,既提升了固废物利用率,降低了运输消耗等经济成本,又解决土地资源占用问题。同时,这对预制管桩(嵌岩桩)、机场路面、桥面等有高抗冲击性能要求的结构部位,有一定的指导和借鉴意义。

参考文献:

- [1] 黄勇刚. 我国铁尾矿资源的利用现状及展望 [J]. 资源与产业, 2013, 15(3): 40-44.
- [2] 张宝虎, 余天航, 韩先瑞, 等. 铁尾矿砂石骨料沥青混凝土性能研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2019, 43(3): 481-485.
- [3] 宁波, 闫艳, 左夏伟, 等. 铁尾矿砂混凝土力学特性实验研究 [J]. 矿产综合利用, 2021 (4): 159-164.
- [4] 包惠明, 傅涛. 赤泥的综合利用现状分析 [J]. 矿产综合利用, 2018(5): 6-12.
- [5] BAO H M, FU T. Analysis of the current situation of comprehensive utilization of reamud [J]. Multipurpose

Utilization of Mineral Resources, 2018 (5): 6-12.

- [6] 何良玉, 谯理格, 赵日煦, 等. 钢渣作胶凝材料和细集料制备高性能砂浆的研究 [J]. 矿产综合利用, 2019(6): 94-100.
- [7] HE L Y, QIAO L G, ZHAO R X, et al. Study on the preparation of high-performance mortar with steel slag as cementitious material and fine aggregate [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6): 94-100.
- [8] 朱向红, 卢文运, 季娟, 等. 褐铁矿制备水泥的实验研究 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47(6): 30-32+55.
- [9] ZHU X H, LU W Y, JI J, et al. Experimental study on the preparation of cement from limonite [J]. New Building Materials, 2020, 47(6): 30-32+55.
- [10] 郑永超, 倪文, 郭珍妮, 等. 铁尾矿制备高强结构材料的实验研究 [J]. 新型建筑材料, 2009, 36(3): 4-6.
- [11] ZHENG Y C, NI W, GUO Z N, et al. Experimental study on the preparation of high-strength structural materials from iron tailings [J]. New Building Materials, 2009, 36(3): 4-6.
- [12] 范秀雯, 田帅, 马虹波. 贫铁围岩碎石的路用性能研究 [J]. 科技风, 2018(27): 123.
- [13] FAN X W, TIAN S, MA H B. Research on the road performance of iron-poor surrounding rock and gravel [J]. Technology Wind, 2018(27): 123.
- [14] 马士宾, 徐文斌, 许艳伟, 等. 聚丙烯纤维高性能混凝土抗冲击性能研究 [J]. 混凝土, 2018(4): 26-29.
- [15] MA S B, XU W B, XU Y W, et al. Research on impact resistance of polypropylene fiber high performance concrete [J]. Concrete, 2018(4): 26-29.
- [16] [10] ACI Committee 544. Measurement of properties of fiber reinforced concrete [J]. ACI Materials Journal, 1988, 85(6): 583-593.
- [17] 李丹, 陶俊林, 贾彬. 玄武岩纤维混凝土抗冲击性能的试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2012, 39(12): 47-51.
- [18] LI D, TAO J L, JIA B. Experimental study on the impact resistance of basalt fiber concrete [J]. New Building Materials, 2012, 39(12): 47-51.

Experimental Study on a Poor Iron Ore Concrete with High Impact Resistance

Miao Zhenkun, Tian Shuai, Chen Zhonghang, Sun Bo

(School of Civil Engineering, University of Science and Technology of Liaoning, Anshan, Liaoning, China)

Abstract: A concrete with high impact resistance was made of extremely poor iron ore as coarse aggregate in the mine, which was called poor iron ore concrete. A self-made drop hammer impact test device was adopted which conducted impact resistance test and the impact resistance of poor iron ore concrete was analyzed according to the results and the phenomenon that compared with normal concrete. The results showed that compared with normal concrete, the impact resistance of poor iron ore concrete is enhanced by 0.67 ~ 2.03 times. The damage of poor iron ore is the greatest, and the energy of balance is maximum, the property of extremely poor iron ore is fully utilized and the enhancement range of impact resistance rises to the summit when the strength is C80. The results of correlation test indicated a linear correlation between strength grade and resistance to damage, concrete with extremely poor iron ore mainly improve the ability of resist first cracking damage to enhance impact resistance.

Keywords: Extremely poor iron ore; Concrete; Hammer impact test; High impact resistance