

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.004

材料弹性模量对爆破效果的影响*

颜思颖,段卫东,王子康,蒋培
(武汉科技大学理学院,武汉430065)

摘要: 在岩土爆破工程中,为了得到预期的爆破效果,需要根据岩体的性质确定炸药单耗,对于红砂岩等抗压强度较低的岩体,由于其抗拉强度较高,弹性模量较低,只根据坚固性系数来确定炸药单耗往往达不到良好的爆破效果。为了得到此类岩体爆破效果影响因素,优化爆破方案,使用加入橡胶粉的混凝土来作为相似材料模型模拟低抗压强度、低弹性模量的岩体进行爆破试验。在混凝土中加入比例为0%、2%、4%、6%、8%目数为20、60的橡胶粉,制作了不同弹性模量的混凝土试样。通过爆破试验,研究分析材料弹性模量对爆破效果的影响。试验结果表明:相同目数下,试样的大块质量比例大致随着橡胶粉的增加而增加,在混凝土抗压强度减小的情况下,随着混凝土试样的抗拉强度的增加和弹性模量的降低,炸药的单耗增加。在抗压强度和抗拉强度接近时,弹性模量越低,炸药的单耗越高。对于某些低弹性模量的介质,其抗压强度不能完全反映破坏所需炸药的单耗。材料弹性模量的降低提高了介质的韧性,对于一些完整性较好、弹性模量较低的介质,除了根据其抗压强度确定炸药单耗,还要考虑弹性模量的影响,弹性模量的降低会显著提高介质破坏所需的能量。因此,弹性模量降低会使介质爆破需要的炸药单耗增加。在实际工程中,可以根据介质的抗压强度和弹性模量综合确定炸药单耗。

关键词: 橡胶-纤维混凝土;爆破试验;炸药单耗;爆破块度;弹性模量

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)04-0033-07

Influence of Material Elastic Modulus on Blasting Effect

YAN Si-ying, DUAN Wei-dong, WANG Zi-kang, JIANG Pei

(College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: In rock blasting engineering, optimal explosive-to-rock mass ratios must be determined based on geo-mechanical properties to achieve superior fragmentation outcomes. For low-compressive-strength rock masses (e. g., red sandstone), characterized by high tensile strength and low elastic modulus, conventional approaches relying solely on strength coefficient-based primary explosive ratios often yield suboptimal blasting outcomes. To identify the critical factors influencing blasting performance in low-strength, low-modulus rock masses, rubberized concrete was employed as an analogous material to simulate blast-induced fracture propagation under controlled conditions. The concrete samples with varying elastic modulus were prepared by incorporating rubber powder at different percentages (0%, 2%, 4%, 6%, 8%) and particle sizes (20 mesh, 60 mesh). The blasting tests systematically investigated and analyzed the effects of the material's elastic modulus on blast performance. The experimental results demonstrate that the mass fraction of large fragments increases proportionally with rubber powder content for a given sieve size, and the powder factor of explosive exhibits a positive correlation with tensile strength but an inverse relationship with elastic

收稿日期 (Date of reception): 2024-12-31

网络首发日期 (Published online): 2025-05-15

作者简介: 颜思颖(2000-), 男, 硕士, 从事岩土爆破方面的研究, (E-mail) 2015712508@qq.com。

通信作者: 段卫东(1965-), 男, 博士、教授, 从事特种爆破方面的研究, (E-mail) 199377168@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52274136, 51904210)

About the author: YAN Si-ying (2000-), male, master, mainly engaged in research on geotechnical blasting, (E-mail) 2015712508@qq.com.

Corresponding author: DUAN Wei-dong (1965-), male, Ph. D, professor, mainly engaged in research on special blasting, (E-mail) 199377168@qq.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52274136, 51904210)

modulus under conditions of reduced concrete compressive strength. Meanwhile, experimental evidence reveals an inverse correlation between elastic modulus and explosive powder factor when compressive and tensile strength values are comparable. Notably, in low-modulus media, compressive strength alone fails to predict the energy required for material fragmentation reliably. The decreased elastic modulus enhances medium toughness. For intact, low-modulus media, the determination of explosive powder factor should account for elastic modulus effects beyond compressive strength alone, as modulus reduction substantially increases the energy required for medium fragmentation. Consequently, reduced elastic modulus directly increases the powder factor of explosive needed for effective medium fragmentation. For practical engineering applications, the powder factor of explosive can be determined comprehensively according to the compressive strength and elastic modulus of the medium.

Key words: rubber-fiber concrete; blasting test; powder factor of explosive; blasting fragmentation; elastic modulus

目前,我国基础设施仍处于快速发展阶段,每年岩石的开挖工程量巨大。爆破是作为破碎岩的主要手段之一,在土建、采矿开挖、水利水电建设、国防、军事等领域得到了广泛的应用,带来了巨大的经济和社会效益。

在岩土爆破工程中,为了得到预期的爆破效果,需要根据岩体的性质决定炸药单耗,炸药单耗是指爆破单位体积岩石所需的炸药消耗量,反映了岩体的可爆性。在爆破工程中,确定岩石的炸药单耗有助于同时降低爆破成本和提升爆破效果。炸药单耗是爆破参数中最重要参数,对爆破工程的效果和成本有着决定性的影响。炸药单耗过小,会产生较多的大块,很可能会留下根底,爆破效果不佳;炸药单耗过大,会增加爆破成本,并产生较大的爆破振动、较远的爆破飞石等有害现象。传统工程爆破爆炸单耗依赖于经验和以往的爆炸分级,随着工程爆破规模的逐渐扩大,被爆岩石类型越来越多,面对不同的岩石,开展对岩石爆破机理的研究,完善岩石可爆性分级,对实际工程爆破控制具有重要意义。为了获得工程爆破时炸药单耗的影响因素,国内外学者进行了大量研究。刘美山通过水下爆破试验^[1],得到了水下与陆上对混凝土炸药单耗的影响。Ko Younghun 通过研究不同堵塞物对炸药单耗的影响^[2],实现了剪切增稠液基材料堵塞爆破对降低炸药单耗的应用。爆破中岩石在炸药作用下的破碎块度能直观显示该岩体的炸药单耗。常用的破碎岩体分布块度测量法有目测法、筛分法和图像分析法等,但都有不同的局限性。近年来,3D 爆堆图像测量方法、UAV 技术等新技术逐渐开始得到应用^[3]。刘永清等通过爆破试验研究爆破块度的分布规律^[4],得到了不同指标对确定爆破参数的作用。马东等通过模拟实验得到了约束条件对爆破块度分布的影响^[5]。Gao Pengfei 通过爆破试验^[6],得到了粉碎区尺寸、炸药性能对爆破块度的影响,优化了爆破参数

和装药结构。

对于红砂岩等抗压强度较低的岩体,由于其弹性模量较低,韧性较高,只根据坚固性系数来确定炸药单耗往往达不到良好的爆破效果,要获取一系列不同弹性模量的介质,测试其对于炸药单耗的影响^[7]。若采用天然岩石来制作实验试件难度很大,需要进行大量的选材和力学性能测试,成本极高。为了较为方便地进行对某样材料性质的研究,使用具有特点性的相似材料进行试验,通过相似材料的力学性质来反映原材料力学性质的相似材料模型已成为岩土爆破研究中的常用方法。郑庙华通过水泥等材料进行相似材料模型研究^[8],得到了改变不同成分比例后试件压力曲线变化规律,结果表明,水泥砂浆材料模型能模拟大体积岩石。李术才通过使用砂、水泥等材料组成新型流固耦合相似材料进行试验^[9],得到了该材料不同成分对材料强度、弹性模量、变形特性等性质的影响。李祥龙通过配比和单孔爆破漏斗试验^[10],得到了密度、强度等性质与煤矿岩体相似的混凝土模型,为高台阶抛掷爆破试验提供依据。目前,虽然对于爆破的效果和炸药单耗影响因素的研究很多,但关于介质弹性模量对于二者的影响研究较少,因此,本文主要使用相似模型粉改性混凝土来模拟低弹性模量岩体,通过爆破实验,研究介质的弹性模量变化对其可爆性和炸药单耗的影响。

1 材料制备和性能参数

在混凝土中加入不同细度、不同比例的橡胶粉可以获得不同弹性模量的混凝土试件^[11,12]。因此设计采用一系列不同比例、目数的橡胶粉混合混凝土,来模拟低抗压强度、低弹性模量的岩体制作爆破试件。

橡胶粉改性水泥混凝土是一种由混凝土和一定细度的橡胶粉按一定比例均匀混合制作的水泥基复

合材料。橡胶粉与固体颗粒混合不会改变材料的化学性质,可以看作是由水泥混凝土和橡胶集料组成的复合材料^[13]。

本实验对照组1号试件的水泥模型为C35,2至5号采用水泥和骨料制备试样,加入细度为20目且比例从0至8%逐渐增加的橡胶粉,6至9号采用水泥和骨料制备试样,加入细度为60目且比例从0至8%逐渐增加的橡胶粉,如表1。细骨料砂为中粗,粗骨料粒径在10 mm范围内。水泥、砂、石、水的质量比为396:659:976:132。9组混凝土试样尺寸均为300 mm×300 mm×300 mm,质量均为60 kg左右。所有试件如图1所示,中心预留直径1.2 cm的炮孔,炮孔深度为15 cm。所有试件同时养护28 d,之后再行爆破试验。



图1 爆破试件模型

Fig. 1 Blasting specimen

表1 爆破试件橡胶粉含量

Table 1 Rubber powder content of blasting specimens

试件序号 Serial number	橡胶粉细度/目 Fineness/ mesh	橡胶粉掺量 Addition amount/%	橡胶粉质量 Added mass/ kg
1	0	0	0
2	20	2	0.36
3	20	4	0.71
4	20	6	1.07
5	20	8	1.42
6	60	2	0.36
7	60	4	0.71
8	60	6	1.07
9	60	8	1.42

通过冲击试验可得^[14],随橡胶粉比例增加混凝土抗冲击韧性逐渐增加,测试试件1至9号的抗拉强度、抗压强度和弹性模量如表2所示。一定目数下,随掺入橡胶粉比例增加混凝土抗拉强度逐渐增加而抗压强度和弹性模量都逐渐降低。一定比例

下,橡胶粉目数对抗拉、抗压强度影响较小,目数增加,弹性模量增加。通过1至9号混凝土爆破效果来研究低抗压强度和低弹性模量岩体试样的爆破破坏效果影响规律。

表2 各试件力学性能

Table 2 Mechanical properties of each specimen

序号 Serial number	抗拉强度 Tensile strength/MPa	抗压强度 Compressive strength/MPa	弹性模量 Elastic modulus/GPa
1	1.90	40.15	3.68
2	2.19	38.76	3.33
3	2.31	35.15	2.80
4	2.49	34.21	2.57
5	2.67	32.91	2.13
6	2.25	36.66	3.44
7	2.36	35.95	3.05
8	2.51	34.02	2.73
9	2.74	33.07	2.56

实验采用2#乳化炸药。炸药性能如表3所示。每次试验选择4 g乳化炸药作为单孔爆破炸药。

表3 乳化炸药性能参数

Table 3 Performance parameters of the emulsion explosives

殉爆距离 Sympathetic detonation distance/cm	猛度 Brisance/ mm	爆速 Detonation velocity/ (m·s ⁻¹)	药卷密度 Density/ (g·cm ⁻³)
5	16	4 200	1.21

2 爆破试验与结果分析

在爆破工程中,大块的衡量标准一般由工程目的和工程中使用的挖运、破碎设备的型号和尺寸决定,超过设备尺寸要求的称为大块^[15]。本实验旨在比较不同弹性模量材料的爆破效果,为方便测量,确定采用爆破碎块的质量来作为大块的衡量标准,规定质量超过试件总质量10%的碎块为大块。

在4 g药量下,1号混凝土试的爆破效果如图2。混凝土完全损坏,爆破效果明显,大块较为完好,碎块数量和质量易于计数,故采用此药量较为合理,将雷管等效于1.5 g乳化炸药,炸药单耗为0.203 kg/m³。

对2~5号含20目橡胶粉且比例为2%、4%、6%和8%的样品分别用4 g炸药进行爆破试验,爆破效果如图3所示。

所有试件均完全破碎,并伴有部分碎石粉末。2号试件大部分碎块较均匀,并可将大部分碎块拼接为完整立方体。3~5号试件均产生了大量不同大

小的碎块。



图 2 4 g 药量下素混凝土爆破效果

Fig. 2 Blasting effect of plain concrete with 4 g of explosive

在爆破工程中,被爆材料会在冲击载荷下破碎

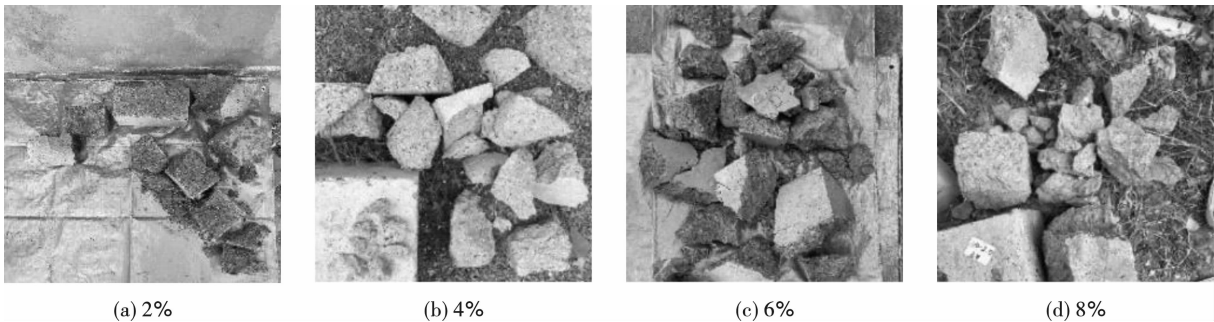


图 3 不同比例 20 目橡胶混凝土 4 g 药量爆破效果

Fig. 3 Blasting effect of 20 mesh rubber concrete with 4 g of explosive

根据 R-R 函数得到具体的分布函数,并改为线性回归方程,得到块度分布参数,整理得到

$$\ln \left[\ln \left(\frac{100}{100 - Y} \right) \right] = n \ln X - n \ln X_0 \quad (2)$$

令 $y = \ln \left[\ln \left(\frac{100}{100 - Y} \right) \right]$, $x = \ln X$, $a = n$, $b = -n \ln X_0$,则上述式子为: $y = ax + b$,可通过实验数据得到块度分布的线性回归拟合函数。

由于爆破块尺寸不容易统计,故选用爆破碎块的质量作为判断指标,使用质量代替粒度,绘制块体级配曲线,当曲线通过率为 50% 时相应质量为平均破碎质量,通过率为 100% 时相应质量为极限破碎质量,以样品质量的十分之一作为大小碎块边界,即质量大于 6 kg 时定为大块。

采集 1~5 号的爆破碎块称重,得到不同试件爆破碎石质量表如表 4,根据收集的爆破碎块的质量分布,整理得到素混凝土试件和比例为 2%、4%、6% 和 8% 的 20 目橡胶粉混凝土试样的块体级配曲线和爆破结果特征尺寸表,如图 4、表 5 所示。

将上述数据进行 R-R 函数拟合,得到的块度分布拟合函数如表 6 和图 5 所示。

成不同尺寸的碎块并具有一定的分布规律。破碎后的材料碎块可以看作是一个多粒度体系或颗粒群进行研究。为了对破碎试样进行粒度分布划分,本文采用罗申-拉莫勒函数筛分法测定破碎试样的粒径。

罗申-拉莫勒(R-R)函数^[16]

$$Y = 100 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{X}{X_0} \right)^n \right] \right\} \quad (1)$$

式中: Y 为粒度为 X 的筛下百分率; X 为粒度; n 、 X_0 为块度分布特征有关常数。在爆破工程中, n 的取值在 1~1.5 之间。

爆破试验结束后,对爆破产生的混凝土碎片进行收集和统计。先分别收集各组产生的爆破混凝土碎片,去除质量小于 0.5 g 的碎片,对碎片进行处理和称重,然后对数据进行汇总和归纳分析。通过质量数据研究混凝土试样的爆破效果。

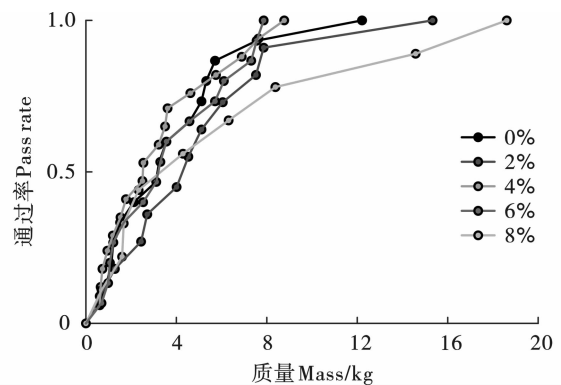


图 4 1~5 号试件块体级配曲线

Fig. 4 Block grading curve of specimens No. 1~5

从爆破效果来看,除了 2 号试件由于试验误差出现特殊大块,大块率偏高外,试样的大块质量比例大致随着橡胶粉的增加而增加。与 1 号混凝土相比,2~5 号损伤效应并不随抗压强度的降低而完全增大,相反,抗压强度最低的 5 号试样比 1 号试样的碎片更少,大块碎石多且尺寸更大,损伤更不完全,说明抗拉强度的增加和弹性模量的降低会使混凝土破坏所需的能量增加,只使用抗压强度来确定炸药

单耗无法适用于所有情况。

表4 1~5号试件爆破碎石质量

Table 4 Fragment weight of specimen #1 ~ #5

编号 Serial number	碎石质量 Fragment weight/kg					
	1	0.65	0.92	1.13	1.21	1.51
	3.09	3.24	3.56	4.59	5.11	5.32
	5.71	7.55	12.21	小于0.5 kg的质量未计入统计(约为1.48 kg) Fragment weights less than 0.5 kg are not counted(approximately 1.48 kg)		
	0.61	1.28	2.44	2.71	4.01	4.53
	5.11	6.05	7.52	7.86	15.33	
2	小于0.5 kg的质量未计入统计(约为1.95 kg) Fragment weights less than 0.5 kg are not counted(approximately 1.95kg)					
	0.61	0.65	0.73	0.95	1.19	1.53
	1.77	2.50	2.54	3.22	3.50	3.61
3	4.62	5.75	6.89	7.63	8.77	
	小于0.5 kg的质量未计入统计(约为2.94 kg) Fragment weights less than 0.5 kg are not counted(approximately 2.94 kg)					
	0.69	0.98	1.06	1.21	1.67	2.53
	3.11	3.29	3.56	4.58	5.71	6.10
4	7.31	7.55	7.86	小于0.5 kg的质量未计入统计(约为2.19 kg) Fragment weights less than 0.5 kg are not counted(approximately 2.19 kg)		
	0.69	1.60	1.67	2.33	4.29	6.31
	8.38	14.58	18.61	小于0.5 kg的质量未计入统计(约为0.94 kg) Fragment weights less than 0.5 kg are not counted(approximately 0.94 kg)		

对6~9号含60目橡胶粉且比例为2%、4%、6%和8%的样品分别用4g炸药进行爆破试验,爆破效果及试件爆破碎石质量表如图6、表7所示。

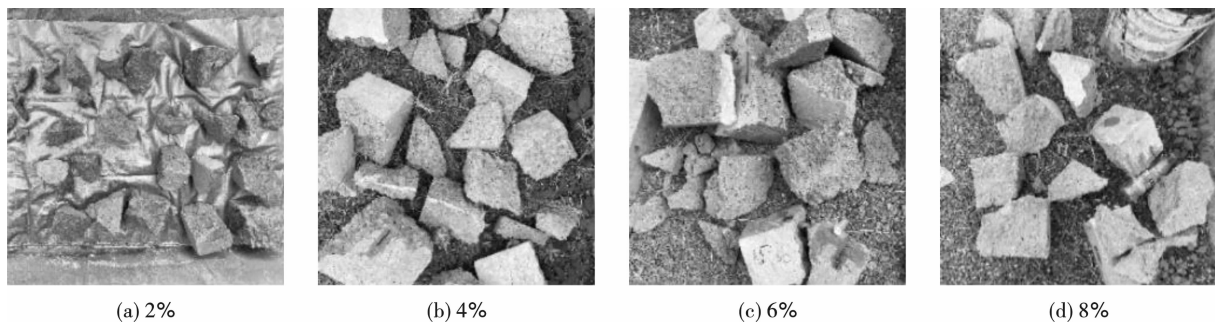


图6 不同比例60目橡胶混凝土4g药量爆破效果

Fig. 6 Blasting effect of 60 mesh rubber concrete with 4 g of explosive

表5 1~5号试件爆破破碎效果指标

Table 5 Blasting effect of specimens No. 1 ~ 5

试件编号 Serial number	橡胶粉掺量 Addition amount/%	平均破碎质量 Average fragment weight/kg	极限破碎质量 Maximum fragment weight/kg	大块(>6 kg) Boulder yield/%
1	0	5.72	7.81	33.26
2	2	4.50	15.00	61.11
3	4	2.45	8.77	39.20
4	6	3.20	7.86	48.14
5	8	4.29	18.61	80.60

表6 1~5号试件块度分布拟合函数

Table 6 Block size distribution fit function of specimens 1 ~ 5

试件编号 Serial number	块度分布拟合函数 Fragmentation distribution fitting function	拟合优度 Goodness of fit
1	$y = 1.33x - 1.75$	0.97
2	$y = 1.20x - 1.94$	0.97
3	$y = 1.24x - 1.50$	0.96
4	$y = 1.28x - 1.79$	0.96
5	$y = 0.94x - 1.61$	0.97

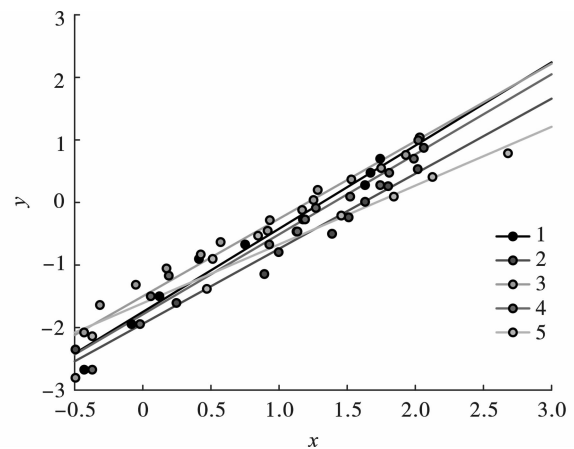


图5 1~5号试件块度分布拟合函数

Fig. 5 Fragmentation distribution fit function of specimens 1 ~ 5

表 7 6~9 号试件爆破碎石质量

Table 7 Fragment weight of specimens 6~9

编号 Serial number	碎石质量 Fragment weight/kg						
6	0.53	0.69	0.74	0.88	1.02	1.12	
	1.22	1.30	1.37	1.42	1.44	1.51	
	1.54	1.99	2.12	2.53	3.11	3.47	
	4.01	5.52	5.81	6.85	7.11		
	小于 0.5 kg 的质量未计入统计(约为 2.10 kg) Fragment weights less than 0.5 kg are not counted(approximately 2.10 kg)						
	0.51	0.57	0.63	0.79	1.11	1.38	
7	1.78	2.21	2.31	2.68	2.76	3.51	
	3.56	3.89	4.31	4.38	5.89	6.43	
	7.72						
	小于 0.5 kg 的质量未计入统计(约为 2.98 kg) Fragment weights less than 0.5 kg are not counted(approximately 2.98 kg)						
	0.54	0.56	0.71	0.98	1.23	1.38	
	1.86	2.39	2.52	3.17	3.41	3.98	
8	4.77	5.77	6.79	7.98	8.52		
	小于 0.5 kg 的质量未计入统计(约为 2.84 kg) Fragment weights less than 0.5 kg are not counted(approximately 2.84 kg)						
	0.52	0.55	0.90	1.26	2.54	2.7	
	3.74	4.35	5.28	5.38	6.20	6.45	
	9	7.49	9.47				
		小于 0.5 kg 的质量未计入统计(约为 2.57 kg) Fragment weights less than 0.5 kg are not counted(approximately 2.57 kg)					

根据收集的爆破碎块的质量分布,整理得到试件的块体级配曲线和爆破结果特征尺寸表,如图 7、表 8 所示。

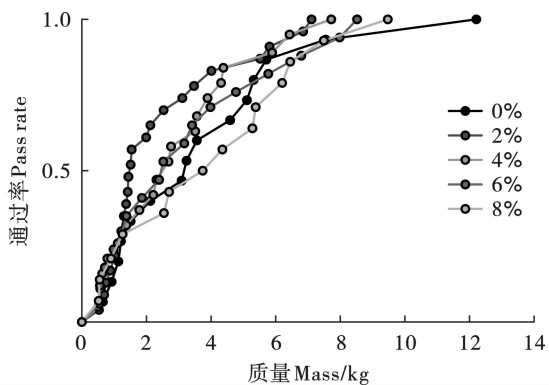


图 7 6~9 号试件块体级配曲线

Fig. 7 Block grading curve of specimens No. 6~9

表 8 6~9 号试件爆破破碎效果指标

Table 8 Blasting effect of specimens No. 6~9

试件 编号 Serial number	橡胶粉 掺量 Addition amount/%	平均破碎质量 Average fragment weight/kg	极限破碎质量 Maximum fragment weight/kg	大块 (>6 kg) Boulder yield/%
6	2	1.50	7.11	23.40
7	4	2.48	7.72	23.82
8	6	2.92	8.52	39.20
9	8	3.74	9.47	49.84

将上述数据进行 R-R 函数拟合,结果如表 9、图 8 所示。

表 9 6~9 号试件块度分布拟合函数

Table 9 Fragmentation distribution fit function of specimens 6~9

试件编号 Serial number	块度分布拟合函数 Fragmentation distribution fitting function	拟合优度 Goodness of fit
6	$y = 1.47x - 1.36$	0.91
7	$y = 1.31x - 1.47$	0.96
8	$y = 1.19x - 1.44$	0.97
9	$y = 1.06x - 1.54$	0.94

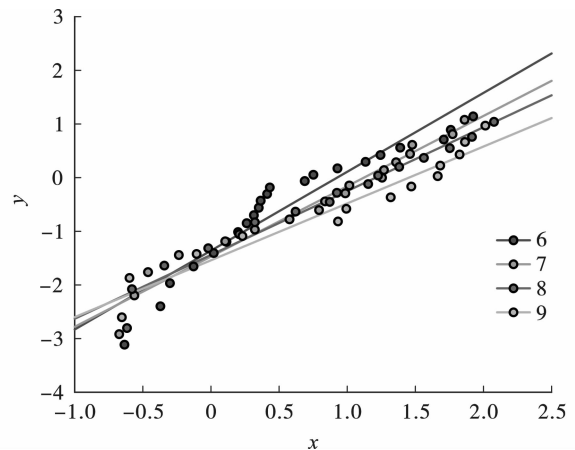


图 8 6~9 号试件块度分布拟合函数

Fig. 8 Fragmentation distribution fit function of specimens 6~9

从爆破效果来看,同样随着橡胶粉比例增加,同一质量以下的碎块所占比例降低,大块尺寸和质量比例增加。当橡胶粉比例一定时,60 目橡胶粉的抗拉强度和抗压强度与 20 目相差不大,而弹性模量高于 20 目,混凝土碎块的大块率低于 20 目,爆破效果更好。这表明,当混凝土抗压强度不变时,弹性模量越低,达到抗压强度的应变越大,破坏时吸收的能量更大,相同炸药单耗下大块率越高,因此,低弹性模

量混凝土达到相同破坏效果需要更大的能量。在实际爆破工程中,对于红砂岩类弹性模量较低的介质,除了根据其抗压强度确定炸药单耗,根据介质的弹性模量,可以提高或减少爆破所需的炸药单耗。

3 结论

1)加入橡胶粉会降低混凝土的抗压强度和弹性模量,提高混凝土的抗拉强度。与素混凝土相比,当橡胶粉比例达到8%时,抗压强度降低了18%,弹性模量降低了48%,抗拉强度增加了56%。可使用橡胶粉混凝土来模拟低抗压强度、低弹性模量岩体试样进行爆破试验。

2)橡胶粉的增加导致混凝土的弹性模量的降低和抗拉强度的增加,提高了混凝土的韧性,有效防止裂纹的产生和扩展,增加相同药量爆破试验下的大块质量比例和最大爆破块度,降低炸药爆破效果,使混凝土可爆性下降,显著提高破坏混凝土所需的能量,即炸药的单耗。

3)炸药单耗相同时,在材料的抗压强度相近的情况下,材料的弹性模量对于爆破效果起着决定性的。因为抗压强度、抗拉强度接近的介质,如果其弹性模量越小,介质破坏时其延伸率就越大,达到破坏强度时需要的能量就越多,爆破中需要的药量就越多。因此对于一些完整性较好、弹性模量较低的材料,除了根据其抗压强度确定炸药单耗,还要考虑对弹性模量的影响,对于相同抗压强度的材料,弹性模量低会使岩体爆破需要的炸药单耗增加。

参考文献 (References)

- [1] 刘美山,吴新霞,张恒伟. 混凝土水下爆炸炸药单耗试验分析[J]. 爆破,2007,24(1):10-13,20.
- [1] LIU Mei-shan, WU Xin-xia, ZHANG Heng-wei. Experimental analysis on specific charge of underwater explosion of concrete [J]. Blasting, 2007, 24(1): 10-13, 20. (in Chinese)
- [2] YOUNGHUN K, KISEOK K. Blast effects of a shear thickening fluid-based stemming material [J]. Mining, 2022, 2(2):330-349.
- [3] 王鑫瑀,曹鹏飞. 岩石爆破破碎块度分布测量方法综述[J]. 化工矿物与加工,2020,49(6):47-49.
- [3] WANG Xin-yu, CAO Peng-fei. Method for measuring distribution of fragmentation of rock by blasting [J]. Industrial Minerals and Processing, 2020, 49(6):47-49. (in Chinese)
- [4] 刘永清,贺福明,陈亚宇. 爆破破碎度及块度分布的试验研究[J]. 煤炭工程,2005(4):58-60.
- [4] LIU Yong-qing, HE Fu-ming, CHEN Ya-yu. Test and study on blasting crush rate and lump rate distribution [J]. Coal Engineering, 2005(4):58-60. (in Chinese)
- [5] 马东,胡世超,宫国慧,等. 爆破荷载作用下不同约束条件的矿石破碎响应研究[J]. 现代矿业,2022,38(10):108-110.
- [5] MA Dong, HU Shi-chao, GONG Guo-hui, et al. Study on ore breaking response under different constraint conditions under blasting load [J]. Modern Mining, 2022, 38(10):108-110. (in Chinese)
- [6] GAO Peng-fei, PAN Cheng, ZONG Qi, et al. Rock fragmentation size distribution control in blasting: a case study of blasting mining in Changjiu Shenshan limestone mine [J]. Frontiers in Materials, 2023, 10:145-154.
- [7] 盛屹,范华,毛帅,等. 改善红砂岩爆破效果试验研究[J]. 四川建材,2021,47(12):52-54.
- [7] SHENG Yi, FAN Hua, MAO Shuai, et al. Experimental study on improving blasting effect of red-sandstone [J]. Sichuan Building Materials, 2021, 47(12):52-54. (in Chinese)
- [8] 郑庙华,周杰,杨剑峰. 大体积岩石模型相似材料试验研究[J]. 现代矿业,2016,32(7):15-17,42.
- [8] ZHENG Miao-hua, ZHOU Jie, YANG Jian-feng. Test of similar material of massive rock model [J]. Modern Mining, 2016, 32(7):15-17, 42. (in Chinese)
- [9] 李术才,周毅,李利平,等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1128-1137.
- [9] LI Shu-cai, ZHOU Yi, LI Li-ping, et al. Development and application of a new similar material for underground engineering fluid-solid coupling model Test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6):1128-1137. (in Chinese)
- [10] 李祥龙,刘俊轩,胡涛,等. 黑岱沟露天煤矿高台阶抛掷爆破混凝土模型的相似材料配比试验研究[J]. 煤炭学报,2015,40(S2):359-366.
- [10] LI Xiang-long, LIU Jun-xuan, HU Tao, et al. Proportioning test study on similar material of concrete model of high bench cast blasting in Heidaigou open pit [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2):359-366. (in Chinese)
- [11] 赵琴. 改性橡胶再生混凝土力学性能试验[D]. 郑州:华北水利水电大学,2017.
- [11] ZHAO Qin. Mechanical properties text of modified rubber-recycled concrete [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017. (in Chinese)