

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.02.009

# 不同因素影响下混凝土立柱爆破效果的模型试验研究\*

费鸿禄 王明玉 魏世众 蒋安俊

辽宁工程技术大学爆破技术研究院(辽宁阜新,123000)

**[摘要]** 钢筋混凝土建(构)筑物爆破拆除过程中,混凝土立柱最终的破碎效果不仅与炸药单耗、孔网参数等有关,还与立柱的受力状态有关。为研究截面应力和单位面积炸药量对不同强度混凝土立柱破碎效果的影响,利用自主研发的力学试验系统进行了15组爆破试验,从碎块筛分和分形维数两方面分析爆破效果。结果表明:对于相同强度的试件,截面应力一定时,随着单位面积炸药量的增加,分形维数整体上不断递增;但单位面积炸药量超过 $0.18\text{ kg/m}^2$ 后,增势有所放缓,截面应力为2 MPa和4 MPa的立柱趋势变化最为明显。单位面积炸药量一定时,随着截面应力的增加,碎块分形维数不断增大,当单位面积炸药量小于 $0.15\text{ kg/m}^2$ 时,0~2 MPa之间的截面应力增加会对分形维数有一定的抑制作用;当单位面积炸药量大于 $0.15\text{ kg/m}^2$ 时,截面应力的增加对分形维数起到促进作用。可为拆除爆破中的参数设计及优化提供理论依据,达到了控制爆破危害、改善爆破效果的目的。

**[关键词]** 拆除爆破;模型试验;混凝土立柱;分形维数

**[分类号]** TU746.5

## Model Test Study on Blasting Effect of Concrete Column under Different Influencing Factors

FEI Honglu, WANG Mingyu, WEI Shizhong, JIANG Anjun

Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

**[ABSTRACT]** In the process of blasting demolition of reinforced concrete buildings (structures), the final crushing outcome of concrete columns is not only related to the factors such as unit consumption of explosive and mesh parameters, but also related to the stress state of columns. In order to study the crushing outcome of concrete columns with different strength under the influence of section stress and mass of explosive per unit area, 15 groups of blasting tests were carried out using the self-developed mechanical test system, and the blasting outcome was analyzed from fragment screening and fractal dimension. Results show that, for the specimens with the same strength, when section stress is constant, the fractal dimension increases with the increase of mass of explosive per unit area. However, when the mass of explosive per unit area exceeds  $0.18\text{ kg/m}^2$ , the increasing trend slows down, and the trend of column with section stress of 2 MPa and 4 MPa is the most obvious. When the mass of explosive per unit area is constant, the fractal dimension of fragments increases with the increase of the section stress. When the mass of explosive per unit area is less than  $0.15\text{ kg/m}^2$ , the increase of section stress between 0 and 2 MPa will show a certain inhibition effect on the fractal dimension. When the mass of explosive per unit area is greater than  $0.15\text{ kg/m}^2$ , the increase of section stress promotes the fractal dimension.

**[KEYWORDS]** blasting demolition; model test; concrete column; fractal dimension

## 0 引言

楼房、烟囱、冷却塔等废旧高耸建(构)筑物需

要进行爆破拆除。不同于人工拆除和机械拆除,爆破拆除效率高、周期短而且经济又环保。安全高效的爆破拆除技术需要对被爆介质的力学性能、爆破参数、炸药性能、承载情况以及周边所处的复杂环境

\* 收稿日期:2022-05-21

第一作者:费鸿禄(1963-),男,博士,教授,主要从事工程爆破和地下工程方面的教学与科研。E-mail:feihonglu@126.com

通信作者:王明玉(1998-),男,硕士研究生,主要从事结构方面的研究。E-mail:1752743228@qq.com

等有充分的了解,这就使得爆破拆除设计必须越来越精细化。

针对钢筋混凝土建(构)筑物的爆破拆除,国内外学者们进行了大量研究,并得出了许多具有重要意义的理论。李新平等<sup>[1]</sup>以三峡工程混凝土防渗墙爆破拆除为背景,将现场试验与数值模型相结合,分析了装药直径与不同装药结构影响下的爆破效果。何理等<sup>[2]</sup>为了验证不同布孔方式对钢筋混凝土支撑梁爆破拆除的影响,将实际工程与数值模拟相结合,通过比较垂直布孔和多向协同布孔下支撑梁的破碎效果,得出多向协同布孔法可有效改善拆除效果。贾永胜等<sup>[3]</sup>对不同强度的单根混凝土立柱通过试爆来模拟爆破拆除,得到了混凝土立柱在不同炸药单耗下的爆破效果。Jiang等<sup>[4]</sup>以12个不同参数混凝土构件为试验对象,研究化学拆除剂(soundless chemical demolition agents, SCDA)拆除混凝土梁的方法,并验证了混凝土梁的抗压强度、孔间距以及孔直径对爆破效果的影响。夏曼曼等<sup>[5]</sup>对两座相似结构的钢筋混凝土水塔进行爆破拆除,得到了不同预处理下的爆破拆除效果。Yang等<sup>[6]</sup>为了分析径向解耦装药对破碎效果的影响,结合模型试验并对碎块进行筛分和测量后,得到小孔径水解耦装药对爆破效果的影响最佳。何理等<sup>[7]</sup>为了分析箍筋对钢混支撑梁拆除爆破效果的影响,结合理论与工程实践,对比分析了箍筋约束解除前、后梁体破碎效果。

实际工程中,混凝土立柱上部载荷也会对爆破效果产生影响。鉴于此,采用相似准则设计试验模型,开展了承载立柱爆破模型试验,讨论单位面积炸药量与初始载荷衍生的截面应力对不同强度混凝土立柱爆破破碎效果的影响,为拆除爆破中不同承重立柱的爆破参数设计以及最佳单位面积炸药量的选取提供有效参考。

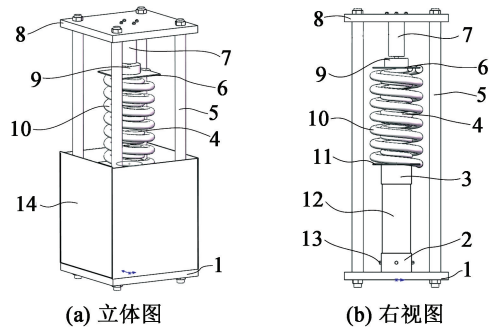
## 1 相似材料模型设计

### 1.1 立柱爆破试验装置

目前,模拟钢筋混凝土立柱上部载荷的试验装

置主要是静压爆破试验装置<sup>[8]</sup>。不足之处是,当模拟试件爆破破坏后,模拟试件与加载装置的接触平面立即分离,施加的载荷瞬间变为零,不能持续作用于试件,这与立柱爆破实际工况不符。

因此,为了克服上述试验模型设计的不足,自主研发了一种力学试验装置,并已申请发明专利<sup>[9]</sup>,如图1所示。



1 - 下反力钢板;2 - 下构件固定套;3 - 上构件固定套;4 - 内储能弹簧;5 - 立柱;6 - 上传力钢板;7 - 液压千斤顶;8 - 上反力钢板;9 - 压力传感器;10 - 外储能弹簧;11 - 下传力钢板;12 - 试验构件;13 - 构件辅助固定螺栓;14 - 缓冲吸能板。

图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device

本试验装置解决了传统的静压爆破试验装置只能施加静压载荷作用的缺陷,在整个爆破试验过程中,实现了立柱模型爆破过程中依然能承受上部载荷。该装置主要包括反力框架、载荷施加机构、储能机构、试验构件固定机构及防护机构。通过高刚度弹性件(圆柱螺旋压缩弹簧)对试件施加一个惯性动载作用,弹簧有关参数见表1。

### 1.2 试件制作与相似准则的建立

爆破相似模型试验<sup>[10]</sup>是爆破领域经常用到的一种方法,可以通过相似试验的结果推断拆除爆破过程中混凝土结构的破碎效果。本试验中,相似模型基于相似准则<sup>[11]</sup>进行设计。

1) 通过量纲分析与方案对比<sup>[11]</sup>,最终确定了原型与模型的几何相似比  $C_l = 6$ 。由于二者所处重力场环境相同,所以二者加速度相同。量纲分析及其他重要参数相似比见表2。

表1 圆柱螺旋压缩弹簧参数

Tab. 1 Parameters of cylindrical spiral compression spring

| 弹簧类别  | 直径 $d/\text{mm}$ | 中径 $D/\text{mm}$ | 极限载荷 $p_i/\text{N}$ | 极限载荷下单圈形变 $f_j/\text{mm}$ | 单圈刚度 $P_d/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$ |
|-------|------------------|------------------|---------------------|---------------------------|--|
| 外储能弹簧 | 40               | 200              | 70 931              | 22.73                     | 3 120                                      |
| 内储能弹簧 | 25               | 120              | 28 557              | 12.96                     | 2 204                                      |

表 2 爆破相似模型试验中的量纲

Tab. 2 Dimensions in blasting similar model test

| 编号              | 符号         | 名称     | 单位       | 量纲              |
|-----------------|------------|--------|----------|-----------------|
| 1 <sup>#</sup>  | $Q$        | 炸药质量   | kg       | M               |
| 2 <sup>#</sup>  | $v$        | 炸药爆速   | m/s      | $LT^{-1}$       |
| 3 <sup>#</sup>  | $\rho$     | 炸药密度   | $kg/m^3$ | $ML^{-3}$       |
| 4 <sup>#</sup>  | $R$        | 炸药半径   | m        | L               |
| 5 <sup>#</sup>  | $h$        | 炸药长度   | m        | L               |
| 6 <sup>#</sup>  | $\gamma_r$ | 材料容重   | $N/m^3$  | $ML^{-1}T^{-3}$ |
| 7 <sup>#</sup>  | $v_r$      | 材料波速   | m/s      | $LT^{-1}$       |
| 8 <sup>#</sup>  | $\sigma_r$ | 单轴抗压强度 | $N/m^2$  | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| 9 <sup>#</sup>  | $\mu$      | 泊松比    |          |                 |
| 10 <sup>#</sup> | $\sigma_s$ | 钢筋抗压强度 | $N/m^2$  | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| 11 <sup>#</sup> | $\rho_R$   | 配筋率    |          |                 |
| 12 <sup>#</sup> | $L$        | 试件宽度   | m        | L               |
| 13 <sup>#</sup> | $T$        | 平均块度   | m        | L               |
| 14 <sup>#</sup> | $F$        | 轴向载荷   | N        | $MLT^{-2}$      |

模型试验中炸药量受各因素的影响方程为

$$Q = f(v, \rho, R, h, \gamma_r, v_r, \sigma_r, \mu, \sigma_s, \rho_R, L, T, F) \quad (1)$$

式中:独立物理量有 14 个,其中  $\mu, \rho_R$  为无量纲量,其余 12 个为有量纲的独立物理量。

$Q$  是因变量,其他物理量为自变量,基本量纲为 3 个,取  $v, \rho, R$  为独立量纲。根据 II 定理和量纲分析法可求得下列量纲为 1 的相似判据:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_1 = \frac{R}{h}; \\ \pi_2 = \frac{R}{L}; \\ \pi_3 = \frac{R}{D}; \\ \pi_4 = \frac{\sigma_r}{\rho v^2}; \\ \pi_5 = \frac{\rho v}{\rho_r v_r}; \\ \pi_6 = \frac{Q}{\rho R^3}; \\ \pi_7 = \frac{\sigma_r}{\sigma_s}; \\ \pi_8 = \frac{F}{\sigma_r L^2} \end{array} \right. \quad (2)$$

这些量纲满足:

表 4 2<sup>#</sup>岩石乳化炸药的性能参数

Tab. 4 Performance parameters of 2<sup>#</sup> rock emulsion explosive

| 殉爆距离/cm  | 猛度/mm     | 爆速/( $m \cdot s^{-1}$ ) | 做功能力/mL    | 药卷密度/( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 波阻抗/( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ) |
|----------|-----------|-------------------------|------------|----------------------------|--|
| $\geq 3$ | $\geq 12$ | $\geq 3.2 \times 10^3$  | $\geq 260$ | 1.00                       | $32 \times 10^{-6}$                    |

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8) = 0 \quad (3)$$

具体含义如表 3 所示。

表 3 相似律各参数的数值及含义

Tab. 3 Values and meanings of parameters of similarity law

| 参数      | 数值       | 定义              |
|---------|----------|-----------------|
| $\pi_1$ | 0.050 0  | 模型和原型的装药尺寸相似比   |
| $\pi_2$ | 0.173 0  | 模型与原型爆破的尺寸相似比   |
| $\pi_3$ | 0.220 0  | 模型与原型爆破的爆破碎块相似比 |
| $\pi_4$ | 0.003 9  | 炸药爆轰压力与混凝土强度相似比 |
| $\pi_5$ | 0.290 0  | 炸药与混凝土的波阻抗相似比   |
| $\pi_6$ | 46.875 0 | 装药量与装药半径的相似比    |
| $\pi_7$ | 0.048 0  | 混凝土和钢筋强度的相似比    |
| $\pi_8$ | 1.000 0  | 截面应力与立柱承重能力的相似比 |

为了保证本模型与原型在整个试验过程中力学变形性能相同,选取与原型结构相同的材料,以典型结构中钢筋混凝土立柱为原型,4 根直径 8 mm 的 HRB400 级热轧带肋钢筋沿试件周边对称布置,配筋率为 0.9%,满足轴心受压立柱配筋率要求。箍筋为直径 4 mm 的光圆钢筋,箍筋距立柱两端的距离为 75 mm,相邻箍筋间距为 150 mm,沿立柱轴线方向均匀布置,采用 135° 弯钩搭接,弯钩长度为 40 mm。根据相似准则进行炮孔尺寸设计,采用单炮孔爆破,炮孔位于试件中心,炮孔直径 14 mm,炮孔深 120 mm。

试件具体构造如图 2 所示。

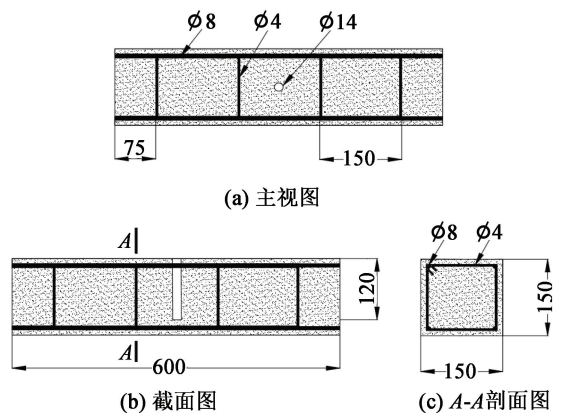


图 2 试件具体结构设计(单位:mm)

Fig. 2 Detailed structural design of the specimen (unit:mm)

采用 2<sup>#</sup>岩石乳化炸药,具体性能如表 4 所示。

因为试验所用炸药与实际完全相同,所以炸药爆速相似比取1。为了达到与实际工程爆破同样的效果,待液压加载长时间稳定后,进行耦合装药。炸药触底后,利用泡沫封堵炮孔。试验的起爆方式为中心起爆。

2)对于柱状装药结构的爆破相似模型试验来说,一般只要做到几何相似与材料相似即可。如果想要使模型试验完全接近原型爆破效果,还需要同时满足动力相似<sup>[12]</sup>。满足动力相似即保证模型与原型的3个无量纲相似参数 $e/\sigma H^2$ 、 $e/\rho g H^3$ 、 $\sigma/\rho D^2$ 相等<sup>[13]</sup>。

其中, $e$ 为是柱状装药单位长度的能量; $\rho$ 表示试件密度; $\sigma$ 为试件强度; $H$ 为碎块最大尺寸; $D$ 表示爆轰速度。则3个无量纲相似参数分别对应炸药能量与试件应变能、炸药能量与模型构件势能、试件强度与炸药爆轰压力之间的关系。

在柱状爆破模型相似试验中:参数 $\sigma/\rho D^2$ 一般情况下可自动满足;参数 $e/\rho g H^3$ 满足爆破相似律;但表示炸药能量与构件应变能的参数 $e/\sigma H^2$ 不能同时得到满足,由数学推导出参数的相对误差公式为

$$\Delta = (1 - n) \times 100\% = (1 - \frac{1}{C_1}) \times 100\%。 (4)$$

分析得出,相似比 $C_1$ 越小,相对误差越小。爆破工程中,炸药爆炸所产生的能量只作用在炮孔附近,对于整个装药爆破体而言,能量作用范围占比很小。因此,对于爆破模型试验来说,是否满足动力相似对最终效果影响在此不予考虑。

## 2 试验过程

在满足相似准则的前提下,进行15个钢筋混凝土承载立柱的爆破相似模型试验。受上部载荷与柱体结构等因素影响,单个炮孔炸药对柱体的爆破范围不确定。因此,使用炸药单耗作为爆破参数并不合适。根据拆除爆破设计的基本原理,设计装药量一般与柱体的材料和横截面尺寸有关。所以,材料相同时,引入爆破立柱单位横截面面积所需的炸药量(简称单位面积炸药量) $M$ 作为爆破参数更符合实际。各试件炸药量的选取<sup>[14]</sup>

$$Q = MA。 (5)$$

式中: $M$ 为单位面积炸药量; $Q$ 为所需炸药量; $A$ 为立柱的横截面积。

试验中,对试件上部所加载荷为均布载荷,所加载荷的大小通过设计的截面应力并采用式(6)进行计算:

$$F = ZA。 (6)$$

式中: $F$ 为上部所加载荷; $Z$ 为设计的截面应力; $A$ 为立柱横截面积。

爆破试验的具体工况如表5所示。一共对15个钢筋混凝土立柱试件进行爆破试验。其中,12根试件(1#~12#)的混凝土强度等级为C30,另外3根试件(13#~15#)的混凝土强度等级为C40。填装孔内的炸药首先要装入模具中,以便于雷管插入,每种装药规格的模具尺寸固定。但乳化炸药装入模具的过程中,半封闭式模具内部的空气无法完全排出,以

表5 钢筋混凝土试件爆破试验工况

Tab. 5 Blasting test conditions of reinforced concrete specimens

| 序号  | 试件编号      | 混凝土强度/MPa | 截面应力 Z/MPa | 单位面积炸药量 M/(kg·m <sup>-2</sup> ) | 炸药量 Q/g |
|-----|-----------|-----------|------------|---------------------------------|---------|
| 1#  | C30-Z0M11 | 33.3      | 0          | 0.11                            | 2.5     |
| 2#  | C30-Z0M23 | 33.3      | 0          | 0.23                            | 5.2     |
| 3#  | C30-Z0M27 | 33.3      | 0          | 0.27                            | 6.1     |
| 4#  | C30-Z2M13 | 33.3      | 2          | 0.13                            | 3.1     |
| 5#  | C30-Z2M18 | 33.3      | 2          | 0.18                            | 4.1     |
| 6#  | C30-Z2M23 | 33.3      | 2          | 0.23                            | 5.2     |
| 7#  | C30-Z3M18 | 33.3      | 3          | 0.18                            | 4.1     |
| 8#  | C30-Z3M23 | 33.3      | 3          | 0.23                            | 5.2     |
| 9#  | C30-Z3M32 | 33.3      | 3          | 0.32                            | 7.2     |
| 10# | C30-Z4M13 | 33.3      | 4          | 0.13                            | 3.1     |
| 11# | C30-Z4M18 | 33.3      | 4          | 0.18                            | 4.1     |
| 12# | C30-Z4M23 | 33.3      | 4          | 0.23                            | 5.2     |
| 13# | C40-Z0M23 | 44.8      | 0          | 0.23                            | 5.2     |
| 14# | C40-Z3M32 | 44.8      | 3          | 0.32                            | 7.2     |
| 15# | C40-Z4M18 | 44.8      | 4          | 0.18                            | 4.1     |

及炸药密度不均匀,在装药完成后称重时,装药量会出现一定偏差,最终设计了 6 种单位面积炸药量,分别为 0.11、0.13、0.18、0.23、0.27、0.32 kg/m<sup>2</sup>。

选取较为平整、开阔的地区,将力学模型试验装置按照设计拼装完成。对试件进行预加载操作,由千斤顶提供上部载荷,使弹簧处于压缩状态并维持一段时间,达到装置间隙充分闭合,增强模型材料的整体性;确定液压加载值长时间稳定后装药,并用提前制好的防护网对整个装置进行防护,防止碎块飞出伤人、伤物。如此操作,更换试件后开展下一轮试验,现场装置如图 3 所示。

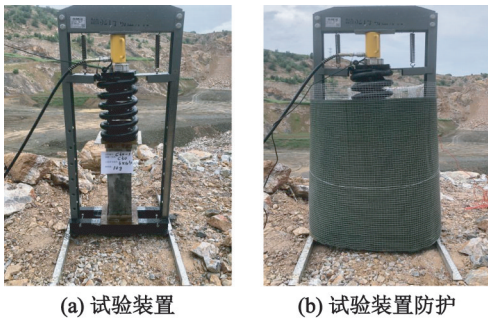


图 3 野外爆炸试验  
Fig. 3 Field explosion test

试爆结束后,选用标准方孔套筛,对收集的爆破后碎块进行筛分。筛孔尺寸设为 9 级,分别以 0、9.5、13.2、16.0、19.0、26.5、31.5、37.5、63.0 mm 为参考值。对 C30、C40 各列举一组筛分结果照片,如图 4 所示。

图 4 中,每一排碎块的粒径范围从左至右依次减小,从上至下依次降低。

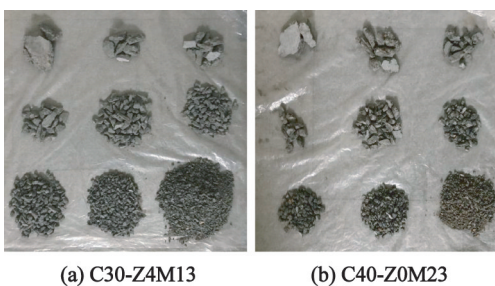


图 4 爆破后不同粒径范围的碎块

Fig. 4 Fragments with different particle sizes after blasting

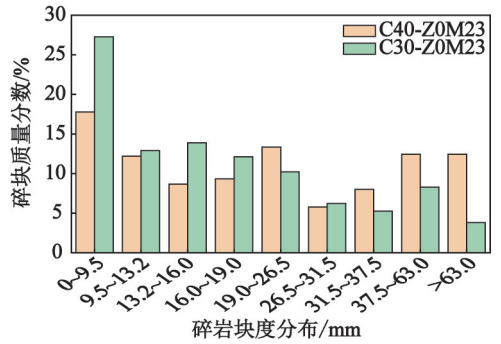
### 3 碎块分布特征与影响因素分析

为了能够更直观地体现各个试件对应的碎石块度分布情况,根据筛分统计结果绘制成碎石块度分布柱状图。以碎块的质量分数作为块度的评判标准,即每级粒径范围相对应的碎块质量占试样总质

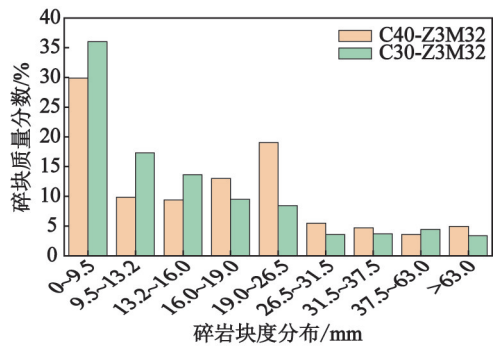
量的百分比。进而得到单位面积炸药量、截面应力、试件混凝土强度等因素对爆破效果的影响规律。

#### 3.1 立柱强度的影响

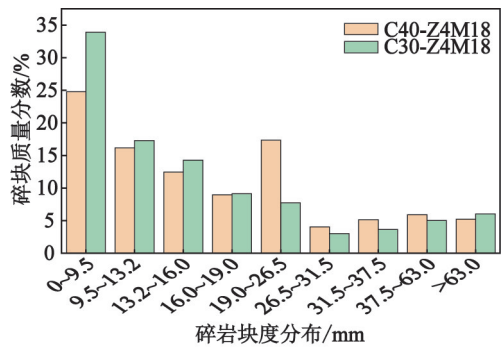
对于两种不同混凝土强度的试件,在截面应力  $Z$  和单位面积炸药量  $M$  相同的情况下,将不同粒径块度的分布情况绘制成柱状图并进行对比分析,如图 5 所示。



(a)  $Z=0$  MPa,  $M=0.23$  kg/m<sup>2</sup>



(b)  $Z=3$  MPa,  $M=0.32$  kg/m<sup>2</sup>



(c)  $Z=4$  MPa,  $M=0.18$  kg/m<sup>2</sup>

图 5 不同强度立柱爆破后碎块的分布

Fig. 5 Distribution of fragments after blasting of columns with different strength

由图 5 可发现,当单位面积炸药量和截面应力一定时,C30 试件最小粒径范围(0 ~ 9.5 mm)的质量分数更高;图 5(a) ~ 图 5(c)中,分别高出 C40 试件 9.49%、6.11%、9.13%。由此说明,高强度试件内部颗粒间的黏性大,孔隙率更低。由于试件相同

剖面上的有效承载面积随着孔隙率的增加而降低,而且孔隙会加剧应力波能量的耗散,这使得混凝土内部的动应力加大,更容易发生损伤破碎<sup>[15]</sup>。所以,对于低孔隙率的高强度混凝土试件来说,抗破碎能力更好。

### 3.2 单位面积炸药量的影响

取混凝土强度同为 C30 的试件。将截面应力和混凝土强度相同而单位面积炸药量不同的试件分为一组,绘制不同粒径块度分布情况柱状图,如图 6 所示。

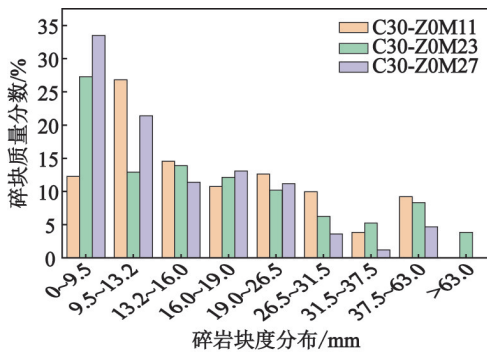
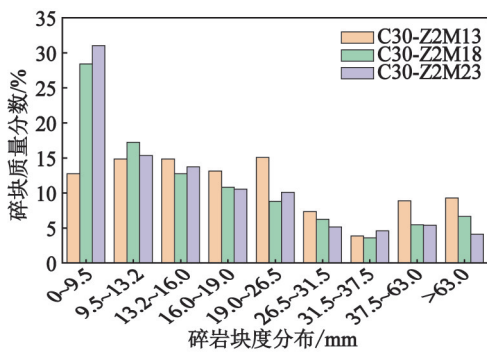
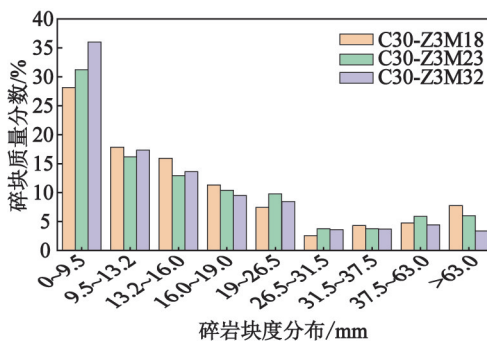
(a)  $Z = 0 \text{ MPa}$ (b)  $Z = 2 \text{ MPa}$ (c)  $Z = 3 \text{ MPa}$ 

图 6 不同单位面积炸药量下爆破后碎块的分布

Fig. 6 Distribution of fragments after blasting under different mass of explosive per unit area

由图 6 可发现,当同强度混凝土试件在截面应力一定时,随着单位面积炸药量不断增加,小粒径范

围(0~9.5 mm)碎块的质量分数逐渐增大,而大粒径范围(>37.5 mm)碎块的质量分数逐渐减小。分析认为:炸药在爆炸时,爆炸应力波从装药中心向周围传递,使得介质粒子产生径向位移。应力波在自由表面反射后可形成拉伸波,在固体介质内部均会产生拉伸应力,即使拉伸应力很小,反射波造成的破碎区域也很大。随着爆生气体的作用,固体介质中的裂缝不断膨胀断裂,最终混凝土立柱破坏。

### 3.3 截面应力的影响

取混凝土强度同为 C30 的试件。将单位面积炸药量相同而截面应力不同的试件分为一组,绘制不同粒径块度的分布情况柱状图,如图 7 所示。

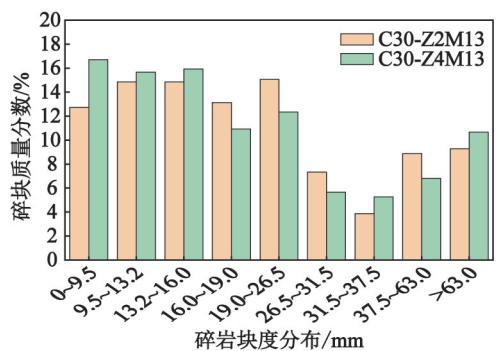
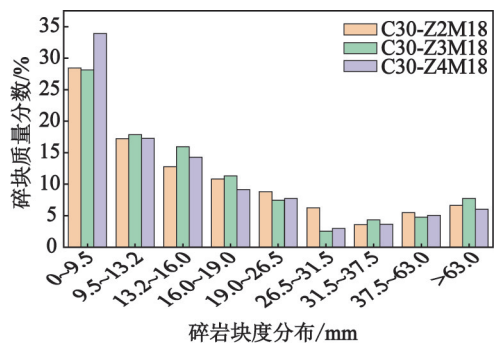
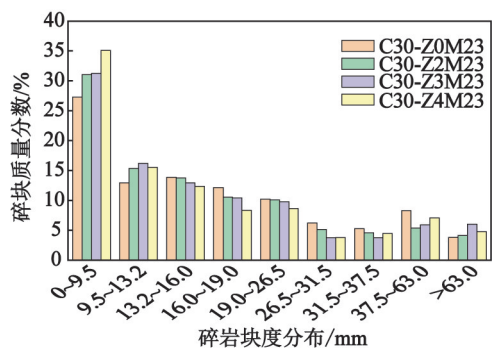
(a)  $M = 0.13 \text{ kg/m}^2$ (b)  $M = 0.18 \text{ kg/m}^2$ (c)  $M = 0.23 \text{ kg/m}^2$ 

图 7 不同截面应力下爆破后碎块的分布

Fig. 7 Distribution of fragments after blasting under different section stresses

由图 7 可发现,在单位面积炸药量一定时,随着截面应力不断增加,C30 试件大块碎石质量分数几乎不变,小块碎石质量分数由低到高明明显递增。分析认为:炸药爆炸产生裂纹,在上部载荷作用下,随着截面应力不断增加,应力集中在裂纹尖端处,裂纹继续沿着爆炸应力波传递的方向扩展,至失稳扩展和交汇,使混凝土立柱破坏。此时,截面应力对立柱破碎起到促进作用。

### 4 块度的分形分析

研究表明,固体介质的各种断裂几何形状都具有统计自相似性,即局部的断裂形状经放大后可以得到整体的断裂形状。爆破后所产生的碎块是大量断裂面相互贯通的结果。所以,在爆破碎块研究方面,可以引用分形理论作为混凝土立柱爆破效果的指标。

由分形的统计定义可知,如果大于特征线尺寸  $x$  的破碎碎块的数目  $N$  满足关系式

$$N = Cx^{-D} \tag{7}$$

式中: $C$  为比例常数; $D$  为分形维数,反映碎块大小和均匀性,用以描述碎块的分形分布特性<sup>[16]</sup>, $D$  值越大,碎块粒径分布越均匀。

对式(7)求导后,结合 G-G-S (Gate-Gaudin-Schuhman 粒度分布函数)公式<sup>[17]</sup>可得

$$Y = X \cdot X_m^{-1} \tag{8}$$

式中: $Y$  为筛下碎块累积率; $X$  为筛网孔径; $X_m$  为碎块的特征尺寸(最大尺寸)。

Turcotte 从碎块体积服从 Weibull 分布出发,经过等式变换,推得碎块的分形维数  $D$  与体积分布的均匀性指数  $k$  之间有如下关系<sup>[18]</sup>:

$$D = 3 - k \tag{9}$$

因为爆破试验后产生的碎石块数过多,很难从碎块的数量来考虑,而从筛孔下相应的碎块质量关系分析更为方便。具体计算公式如下:

$$k = \frac{\lg(M_R/M)}{\lg R} \tag{10}$$

式中: $M_R$  为直径小于  $R$  的碎块累计质量; $M$  为碎块总质量。

通过筛分结果计算出均匀性系数  $k$ ,并代入式(9)中,得到相对应的分形维数  $D$ ,具体计算结果如表 6 所示。

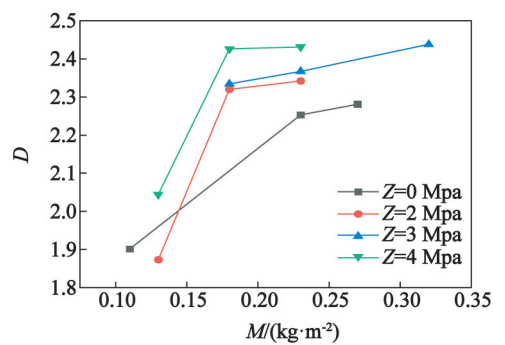
由表 6 可知,混凝土强度、单位面积炸药量和试件截面应力等因素均会影响试件碎块的分形维数。整体来看,在截面应力和单位面积炸药量一定时,混

凝土强度等级较大的试件更不容易产生小碎块。以 C30 试件为例,单位面积炸药量和截面应力对分形维数的影响见图 8。

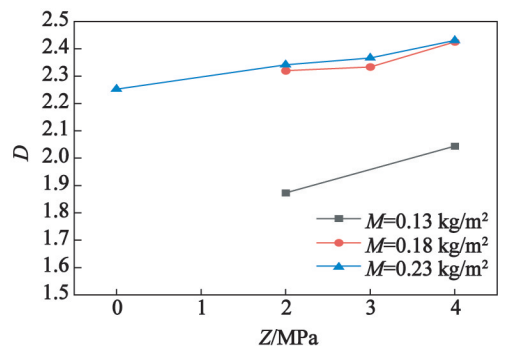
表 6 不同试件爆破后碎块的分形维数计算结果

Tab. 6 Calculation results of fractal dimension of fragments after blasting of different specimens

| 试件编号      | $k$   | $D$   |
|-----------|-------|-------|
| C30-Z0M11 | 1.099 | 1.901 |
| C30-Z0M23 | 0.747 | 2.253 |
| C30-Z0M27 | 0.619 | 2.384 |
| C30-Z2M13 | 1.127 | 1.873 |
| C30-Z2M18 | 0.680 | 2.320 |
| C30-Z2M23 | 0.658 | 2.342 |
| C30-Z3M18 | 0.666 | 2.334 |
| C30-Z3M23 | 0.633 | 2.367 |
| C30-Z3M32 | 0.562 | 2.438 |
| C30-Z4M13 | 0.956 | 2.044 |
| C30-Z4M18 | 0.574 | 2.426 |
| C30-Z4M23 | 0.569 | 2.431 |
| C40-Z0M23 | 0.930 | 2.070 |
| C40-Z3M32 | 0.747 | 2.253 |
| C40-Z4M18 | 0.786 | 2.214 |



(a) 不同单位面积炸药量



(b) 不同截面应力

图 8 碎块分形维数的影响因素

Fig. 8 Influence factors of fractal dimension of fragments

由图 8(a) 可发现, 截面应力一定时, 随着单位面积炸药量的增加, 分形维数整体呈增加趋势, 但增加趋势在  $M = 0.18 \text{ kg/m}^2$  后明显放缓。其中, 截面应力为 2 MPa 和 4 MPa 的趋势变化最明显。趋势放缓说明爆破损失的能量占比在增加, 而且增加炸药量只会增加破碎后的动能等有害效应; 比如, 由于炸药爆破产生的高动能作用, 会促使碎屑以高速向环境扩散。因此, 对于不同的承载立柱都有最佳单位面积炸药量。

由 8 图(b) 可发现, 单位面积炸药量一定时, 随着试件截面应力的增大, 分形维数不断递增, 表明试件在截面应力和拉伸应力的耦合作用下得到充分破碎, 块度分布较为均匀。从另一个方面来看, 拆除爆破工程中, 承重较大的立柱要想实现良好的爆破效果, 可以适当增加炸药量。

由以上分析可知, 单位面积炸药量和截面应力对爆破碎块存在着相互制约和影响的关系。所以, 综合考虑两种因素对于碎块分形维数的影响, 更容易得出爆破碎块分布特征在二者共同作用下的变化规律, 相关参数见表 7。

表 7 中的数据为 C30 混凝土试件爆破后碎块的分形维数。采用 Matlab 软件对表 7 中在单位面积炸药量和截面应力双因素影响下的碎块分形维数进行曲面拟合, 得到拟合公式为

$$D = 45.880M - 191.000M^2 - 0.154Z + 0.025Z^2 + 0.348MZ + 258.000M^3 - 1.222. \quad (11)$$

相对应的三维拟合图, 如图 9 所示。

如图 9 可见, 大部分的散点都集中在曲面上, 表明该拟合的相关性极强。由曲面可知, 当单位面积炸药量小于  $0.15 \text{ kg/m}^2$  时,  $0 \sim 2 \text{ MPa}$  之间的截面应力对碎块的分形维数几乎没有影响; 而当单位面积炸药量大于  $0.15 \text{ kg/m}^2$  时, 碎块的分形维数随截面应力的增加而增大。可以说明: 在某一个区间内, 截面应力的增加对爆破效果影响较小, 并表现出一定的抑制作用; 当截面应力从一个区间跨越到另一个区间时, 爆破效果会出现明显的提升。从影响程

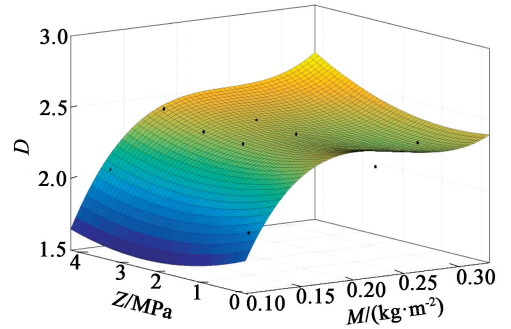


图 9 三维拟合图

Fig. 9 Three dimensional fitting diagram

度来看, 单位面积炸药量对分形维数的影响更大。

## 5 结论

1) 混凝土立柱的破碎效果主要受控于单位面积炸药量与立柱承重衍生的截面应力, 二者对爆破效果存在着相互制约和影响的关系。从整体来看, 单位面积炸药量对爆破效果的影响更大。

2) 截面应力一定时, 随着单位面积炸药量的增加, 分形维数增加趋缓。其中, 以截面应力为 2 MPa 和 4 MPa 的立柱在单位面积炸药量为  $0.18 \text{ kg/m}^2$  前后变化最为明显。这种趋势表明, 过度增加单位面积炸药量只会增加破碎后的动能等有害效应。所以, 对于不同承载的立柱都要确定最佳的单位面积炸药量。

3) 单位面积炸药量一定时, 随着截面应力的增加, 分形维数趋势递增。具体表现为: 当单位面积炸药量小于  $0.15 \text{ kg/m}^2$  时,  $0 \sim 2 \text{ MPa}$  间的截面应力增加对碎块分形维数几乎没有影响, 并表现出一定的抑制作用; 当单位面积炸药量大于  $0.15 \text{ kg/m}^2$  时, 截面应力的增加对分形维数影响较大, 爆破效果出现明显提升。所以, 在拆除爆破工程中, 承重较大立柱要想取得与承重较小立柱相同的爆破效果, 可以适当增加炸药量。为拆除爆破设计中不同承重立

表 7 不同单位面积炸药量和截面应力时 C30 试件的碎块分形维数

Tab. 7 Fractal dimension of fragments of Specimen C30 caused by different mass of explosive per unit area and section stress

| Z/<br>MPa | D                         |                           |                           |                           |                           |                           |
|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|           | $M = 0.11 \text{ kg/m}^2$ | $M = 0.13 \text{ kg/m}^2$ | $M = 0.18 \text{ kg/m}^2$ | $M = 0.23 \text{ kg/m}^2$ | $M = 0.27 \text{ kg/m}^2$ | $M = 0.32 \text{ kg/m}^2$ |
| 0         | 1.901                     |                           |                           | 2.253                     | 2.384                     |                           |
| 2         |                           | 1.873                     | 2.320                     | 2.342                     |                           |                           |
| 3         |                           |                           | 2.334                     | 2.367                     |                           | 2.438                     |
| 4         |                           | 2.044                     | 2.426                     | 2.431                     |                           |                           |

柱的炸药量选取提供更可靠的理论参考依据。

### 参 考 文 献

- [1] 李新平, 代翼飞, 刘金焕, 等. 钢管爆炸破坏的数值模拟分析与试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊): 5-9.  
LI X P, DAI Y F, LIU J H, et al. Test study and numerical simulation analysis of explosion in steel tubes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Suppl.): 5-9.
- [2] 何理, 钟冬望, 李琳娜, 等. 布孔方式对支撑梁爆破拆除的影响机制[J]. 爆破, 2018, 35(3): 85-91, 119.  
HE L, ZHONG D W, LI L N, et al. Influence mechanism of blasthole arrangement on explosive demolition of support beam [J]. Blasting, 2018, 35(3): 85-91, 119.
- [3] 贾永胜, 谢先启, 李欣宇, 等. 建(构)筑物控制爆破拆除的仿真模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 285-288.  
JIA Y S, XIE X Q, LI X Y, et al. Numerical simulation for demolition of structures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 285-288.
- [4] JIANG Z S, ZHENG W Z, LI S, et al. Equation of hole arrangement for concrete beam demolition using soundless chemical demolition agent [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103311.
- [5] 夏曼曼, 郑德明, 戴春阳, 等. 不同预处理方法对钢筋混凝土水塔爆破拆除效果的影响[J]. 爆破, 2021, 38(2): 136-140.  
XIA M M, ZHENG D M, DAI C Y, et al. Effect of different pretreatment methods on blasting demolition of reinforced concrete water-tower [J]. Blasting, 2021, 38(2): 136-140.
- [6] YANG D Q, AN H M, LEI Z. Experimental study on radial decoupling charge blasting with air and water [J]. Mining Science, 2020, 27: 265-281.
- [7] 何理, 钟冬望, 涂圣武, 等. 箍筋对深基坑支撑梁爆破拆除的影响机制[J]. 金属矿山, 2018(8): 45-50.  
HE L, ZHONG D W, TU S W, et al. Influence mechanism of stirrups on blasting demolition of support beams in deep foundation pit [J]. Metal Mines, 2018(8): 45-50.
- [8] 张羽强. 一种新型物理相似模拟实验架结构设计[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.  
ZHANG Y Q. Structure design of one new device of plane physical simulation [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.
- [9] 费鸿禄, 魏世众, 蒋安俊, 等. 一种承受上部惯性动载作用的爆破相似模拟实验装置: CN113324782A [P]. 2021-08-31.
- [10] 单仁亮, 黄博, 耿慧辉, 等. 爆破动载作用下新喷射混凝土累积损伤效应的模型实验[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3): 289-296.  
SHAN R L, HUANG B, GENG H H, et al. Model experiment to study cumulative damage effects of young shotcrete under blasting load [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(3): 289-296.
- [11] WANG X Q, ZHANG S M, LIAO J, et al. Research and development on similarity principle of model pile [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 580/581/582/583: 3106-3110.
- [12] 单仁亮, 黄宝龙, 蔚振廷, 等. 岩巷掘进准直眼掏槽爆破模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 256-264.  
SHAN R L, HUANG B L, WEI Z T, et al. Model test of quasi-parallel cut blasting in rock drivage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 256-264.
- [13] 霍永基. 爆破相似原理和模拟方法若干问题[C]//工程爆破文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 27-36.
- [14] FUJIKAKE K, AEMLAOR P. Damage of reinforced concrete columns under demolition blasting [J]. Engineering Structures, 2013, 55: 116-125.
- [15] 梁志坚, 吴亮, 杨旭风, 等. 爆破冲击荷载作用下宏观孔隙混凝土损伤演化的近场动力学模拟[J]. 爆破, 2022, 39(1): 22-28, 60.  
LIANG Z J, WU L, YANG X F, et al. Peridynamic simulation of damage evolution of macro-porous concrete under blasting load [J]. Blasting, 2022, 39(1): 22-28, 60.
- [16] YANG R S, XIAO C L, DING C X, et al. Prediction model of fractal dimensions of rock roadway formation by blasting based on Weibull distribution [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14: 2824.
- [17] 王韶辉. 露天煤矿煤岩爆破块度分布规律及爆破参数优化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
WANG S H. Study on blasting fragmentation distribution law and blasting parameters optimization in open-pit coal mines [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [18] LIU L, WANG X G, YANG Y, et al. Experimental method study on emulsion explosives under hydrostatic pressure in models blasting [J]. Advanced Materials Research, 2012, 524/525/526/527: 569-574.