煤岩动力学相似准则下的相似材料配比研究

阚梓豪[1,2],袁　亮[3],窦林名[1,2],曹安业[1,2],马衍坤[3],闫晨龙[1,2],曹晋荣[1,2],南天琦[1,2]
(1. 中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州　221116;2. 中国矿业大学 江苏省矿山地震监测工程实验室,江苏 徐州　221116;3. 安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室,安徽 淮南　232001)

摘要: 冲击地压是一种动静载叠加作用下的突发性动力灾害,致灾机制复杂、破坏剧烈,严重威胁矿井安全. 为在实验室中真实再现冲击地压的破坏过程,亟需一种模拟冲击地压灾害的煤岩动力学相似准则. 因此,提出了一种以加速度相似比为核心的动力学相似准则系数,构建了以动力学相似准则系数为控制参量的煤岩动力学相似准则体系,分析了动力学相似准则系数与应力、弹性模量、时间及应变率相似比之间的耦合关系,规定了不同几何相似比下模型应力曲线的适用范围及动力学相似准则系数的取值范围,为冲击地压的动力学物理模拟提供了理论基础. 在相似材料方面,以氟硅酸钠、滑石粉和水玻璃为基础原料,通过正交试验的方法,设计了4组相似材料配比方案,制备了16种相似材料的标准试样并开展了单轴压缩试验与循环加卸载试验,系统分析了不同配比方案对相似材料力学性能的影响. 结果表明:增加氟硅酸钠和滑石粉的含量可显著提高材料密度、强度和刚度,增强模型的冲击倾向性. 通过多元线性回归的方法分析了材料占比与抗压强度、弹性模量、密度及动态破坏时间之间的定量关系,建立了一种可调控、多指标优化的相似材料设计方法. 以深部冲击危险煤层为例,结合动力学相似准则与相似材料回归结果,确定了模型物理参数及相似材料配比,分析了煤岩动力学相似准则与相似材料之间的匹配特性. 研究成果为冲击地压动力学物理模型的构建与相似材料选型提供了系统方法与实践参考.

关键词: 冲击地压;相似准则;相似材料;物理模型;动力学
中图分类号: TD 324　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)03-0617-19

Study on the proportioning of similar materials under the dynamic similarity criteria of coal

KAN Zihao[1,2], YUAN Liang[3], DOU Linming[1,2], CAO Anye[1,2], MA Yankun[3], YAN Chenlong[1,2], CAO Jinrong[1,2], NAN Tianqi[1,2]
(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Key Laboratory of Safe Mining of Deep Coal and Environmental Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: Coal burst is a sudden dynamic disaster induced by the superposition of dynamic and static loads. Its disaster-causing mechanism is complex and the resulting damage is severe, posing

收稿日期: 2025-08-12　　**修回日期:** 2025-12-24　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250323
基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(部门推荐)(52227901);国家重点研发计划项目(2022YFC3004603)
第一作者: 阚梓豪(1997—),男,辽宁省本溪市人,博士研究生. E-mail:kzhcumt@cumt.edu.cn
通信作者: 袁　亮(1960—),男,安徽省六安市人,中国工程院院士. E-mail:Yuanl_1960@sina.com
引用格式: 阚梓豪,袁　亮,窦林名,等. 煤岩动力学相似准则下的相似材料配比研究[J]. 中国矿业大学学报,2026,55(3):617-635.
KAN Zihao, YUAN Liang, DOU Linming, et al. Study on the proportioning of similar materials under the dynamic similarity criteria of coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 617-635.

a serious threat to mine safety. To realistically reproduce the failure process of coal burst in laboratory conditions, it is essential to establish a coal - rock dynamic similarity criterion capable of simulating coal burst disasters. Therefore, a dynamic similarity criterion coefficient with the acceleration similarity ratio as the core parameter was proposed, and a coal - rock dynamic similarity criterion system with this coefficient as the controlling parameter was established. The coupling relationships between the dynamic similarity criterion coefficient and the similarity ratios of stress, elastic modulus, time, and strain rate were analyzed. Furthermore, the applicable range of model stress curves under different geometric similarity ratios and the value range of the dynamic similarity criterion coefficient were specified, providing a theoretical basis for the dynamic physical simulation of coal burst. In terms of similar materials, sodium fluorosilicate, talc powder, and sodium silicate were selected as the basic raw materials. Using the orthogonal experimental method, four groups of similar material proportioning schemes were designed. Sixteen types of standard specimens of similar materials were prepared, and uniaxial compression tests as well as cyclic loading - unloading tests were conducted. The influence of different proportioning schemes on the mechanical properties of the similar materials was systematically analyzed. The results show that increasing the contents of sodium fluorosilicate and talc powder can significantly improve the density, strength, and stiffness of the materials, thereby enhancing the burst tendency of the model. Quantitative relationships between the material proportions and compressive strength, elastic modulus, density, and dynamic failure time are further analyzed using multiple linear regression, and a controllable and multi-objective optimized design method for similar materials is established. Taking a deep coal seam with coal burst risk as an example, the physical parameters of the model and the mix proportions of the similar materials are determined by combining the dynamic similarity criterion with the regression results of the similar materials. The matching characteristics between the coal - rock dynamic similarity criterion and the similar materials are further analyzed. The research results provide a systematic method and practical reference for the construction of dynamic physical models of coal burst and the selection of similar materials.

Key words: coal burst; similarity criteria; similar materials; physical model; dynamics

冲击地压是一种复杂的动静载叠加的致灾现象,其危害十分严重[1-4]. 为了在实验室再现冲击地压现象,学者一般采用物理模拟的方法还原冲击地压灾害[5-7]. 在使用物理模拟方法研究时,需首先解决冲击地压物理模拟的相似准则问题. 当前,大量关于冲击地压的相似模拟研究,普遍建立在传统静力学相似准则的基础之上,静力学相似准则包括:几何相似、时间相似和动力相似,其中动力相似指的是应力相似[8-10]. 该类方法主要依据几何、力学和材料属性之间的静态相似关系,通过设定几何相似比和密度相似比等基础参数,进一步推导出应力、弹性模量、时间等关键物理量的相似比. 例如,有研究通过设定几何相似比C_l与密度相似比C_ρ,建立了应力相似比$C_\sigma=C_\rho C_l$、弹性模量相似比$C_E=C_\sigma$、时间相似比$C_t=\sqrt{C_l}$等一系列控制关系,据此构建了深部冲击煤层的相似模型体系,并开展了多种工况下的物理模拟试验[11-14]. 此类研究有效地反映了煤岩体在深部静载条件下的破坏形态、裂隙扩展和应力转移机制. 近年来,部分学者在传统静力学相似框架基础上尝试引入能量相似比或冲击扰动参数,以期对冲击地压的动态特性进行补充模拟. 在试验过程中施加扰动能量,观察材料的冲击响应行为. 这些研究在一定程度上拓展了物理模拟试验的动态适应性,使得模型具备一定的冲击表现[15-18].

然而,冲击地压本质上是一种高应变率、强动态扰动驱动下的突发性动力灾害,其发生过程不仅涉及应力状态的剧烈变化,还伴随显著的惯性效应和能量释放行为[19-21]. 因此,单纯依赖静力学相似准则往往难以全面还原冲击地压的动态演化

特征，尤其是在模拟煤体破坏速度、冲击响应时间及应变破坏等方面存在较大局限性.

若要在实验室中准确复刻冲击地压灾害的发生过程与破坏特征，不仅需要建立符合煤岩动力学特征的相似理论体系，更需要制备能真实反映煤岩动力学特征的相似材料. 相似准则为模型提供了尺度、应力、时间、能量等物理量之间的匹配依据，相似材料直接决定了模型在冲击荷载下的响应程度与可靠性. 相似材料必须同时满足强度、刚度、脆性、耗能能力和动态响应时程等多项指标的耦合要求.

现阶段已有诸多研究围绕冲击地压相似材料的构建开展了广泛探索[22-23]，提出了包括环氧树脂类、松香类、砂浆类等多种配比方案[24-27]，总体来看，多数相似材料的设计仍停留在静力学参数（如强度、弹模、密度等）控制阶段，缺乏对动态响应特性（如动态破坏时间、冲击耗能能力、脆性破坏模式等）的系统考虑，难以真实还原冲击地压的突发性和高应变率特征. 目前常用材料体系在强度范围、刚度调控、破坏模式等方面调节空间较小，导致相似模型要么“太硬难以破坏”，要么“太软无法储能”.

因此，迫切需要发展一种低强度、高脆性的相似材料体系，以满足煤岩动力相似准则下大尺度试验模型的构建需求.

综上所述，为实现对冲击地压灾害过程的精准实验室模拟，必须同时依托科学合理的动力学相似准则与低强、高脆的相似材料. 动力学相似准则为物理模型提供了应力、时间、能量等物理量之间的比例控制基础，而相似材料则直接决定模型在冲击载荷作用下的响应行为和破坏模式. 本研究依据加速度相似比提出了动力学相似准则系数，建立了煤岩动力学相似准则，结合冲击地压“高能量积聚—瞬时释放—脆性破坏”的本质特征，设计了一套面向冲击响应的相似材料配比方法，通过调控材料配比，系统优化其强度、弹性模量、密度与动态破坏时间等关键力学参数，建立了低强度、高脆性、强冲击倾向性的新型相似材料的多元回归方程，从而为冲击地压动力致灾模型提供理论基础与试验支撑.

1　相似准则

1.1　量纲分析

相似模拟的基本原理包括：1）相似物理场及相似物理现象；2）相似准数及相似理论. 模型与原型之间必须满足相似定理，才能说明模型可以模拟原型的现象. 其中相似定理包括：①相似第一定理：模型和原型系统相似，那么它们的几何特征和相应物理量互成比例. ②相似第二定理：用量纲分析方法将描述类似现象的物理方程转化为π方程；2个相似系统的π方程必须是相同的. ③相似第三定理：如果具有相同的单值条件和由单值量所组成的相似判据在数值上相等，物理现象才互相相似[11].

模型与原型除满足相似定理以外，还必须满足：几何相似、运动相似和动力相似. 几何相似、运动相似和动力相似的表达公式分别如式（1），（2），（3）所示.

几何相似：

$$C_l=\frac{l}{l'}. \tag{1}$$

运动相似：

$$C_t=\frac{t}{t'}=\sqrt{C_l}. \tag{2}$$

动力相似：

$$C_\sigma=\frac{\sigma}{\sigma'}=\frac{\rho}{\rho'}C_l=C_\rho C_l, \tag{3}$$

式中：“′”表示模型的参数；C为原型与模型的相似比；C_l为原型与模型长度比；l为原型广义长度，m；l'为模型广义长度，m；C_t为时间相似比；t为原型运动所需时间，s；t'为模型运动所需时间，s；C_σ为应力相似比；σ为原型应力，MPa；σ'为模型应力，MPa；C_ρ为密度相似比；ρ为原型密度，kg/m^3；ρ'为模型密度，kg/m^3.

在满足上述相似模拟的基本原理之外，应结合冲击地压发生特点，进一步对相似准则进行研究. 根据冲击地压的动静载叠加原理，选取应力、时间、应变率和弹性模量等作为冲击地压致灾的基础相似准则参数.

运用前文所述的相似第二定理对煤岩物理力学参数的相似准则进行推导. 利用量纲分析法，并选取质量（M）、长度（L）和时间（T）作为特征值进行分析，那么描述煤岩动力学现象可由下述方程表示：

$$f(t,\sigma,E,\dot{\varepsilon},M,L,T)=0, \tag{4}$$

式中：E为弹性模量；$\dot{\varepsilon}$为应变率.

选择M，L，T作为3个基本量纲，使用量纲矩阵分析方法表示物理量. 物理参数量纲如表1所示.

表 1 物理参数的量纲表

Table 1 Dimensional expressions for physical properties

物理参数	量纲
t	T
σ	$ML^{-1}T^{-2}$
E	$ML^{-1}T^{-2}$
$\dot{\varepsilon}$	T^{-1}
M	M
L	L
T	T

相似第二定理中的π方程可表示为式(5)：

$$\pi = t^{\alpha}\sigma^{\beta}E^{\gamma}\dot{\varepsilon}^{\lambda}M^{\delta}L^{\zeta}T^{\eta}, \tag{5}$$

式中：$\alpha,\beta,\gamma,\lambda,\delta,\zeta,\eta$ 分别表示 $t,\sigma,E,\dot{\varepsilon},M,L,T$ 的指数.

那么π方程可由如下矩阵表示为：

$$\begin{bmatrix} \alpha & \beta & \gamma & \lambda & \delta & \zeta & \eta \\ t & \sigma & E & \dot{\varepsilon} & M & L & T \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & -2 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{6}$$

物理量与它们的指数之间的关系可表示为：

$$\begin{cases} \delta = -\beta - \gamma, \\ \zeta = \beta + \gamma, \\ \eta = -\alpha + 2\beta + 2\gamma + \lambda. \end{cases} \tag{7}$$

其π方程可表达为：

$$\pi = \begin{bmatrix} & M & L & T & t & \sigma & E & \dot{\varepsilon} \\ \pi_1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_2 & -1 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \pi_3 & -1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \pi_4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

使用 M,L,T 表示的基础相似准则如下所示：

$$\begin{cases} \pi_1 = T^{-1}t, \\ \pi_2 = M^{-1}T^2L\sigma, \\ \pi_3 = M^{-1}T^2LE, \\ \pi_4 = T\dot{\varepsilon}. \end{cases} \tag{9}$$

式(9)的物理意义为：π_1 体现了加载速率、振动周期等动力过程的时间缩放关系. π_2 反映模型与原型在应力分布与强度特征上的比例关系，是动力学相似的核心参数之一. π_3 表征模型与原型在变形刚度或抗变形能力方面的相似关系，说明模型与原型的应力-应变关系曲线的形状保持一致，对应静力与动力加载下的材料力学响应相似. 保持 π_4 相等意味着模型与原型的变形速率效应保持相似. 在动态问题中尤为重要，因为应变率直接影响煤岩体的强度、断裂模式与能量释放行为.

通过相似第二定理，模型与原型的现象一致，则可以推导式(10)，即

$$\begin{cases} T = t, \\ M = T^2L\sigma, \\ M = T^2LE, \\ T^{-1} = \dot{\varepsilon}. \end{cases} \tag{10}$$

将各个参数以相似比的形式表示，则可以得到下式：

$$\begin{cases} C_T = C_t, \\ C_M = {C_T}^2C_LC_\sigma, \\ C_M = {C_T}^2C_LC_E, \\ C_{T^{-1}} = C_{\dot{\varepsilon}}. \end{cases} \tag{11}$$

M 的相似比可以进一步简化为密度相似比和长度相似比的乘积，L 的相似比可以进一步简化为速度相似比和时间相似比的乘积；T 的相似比可以进一步简化为速度相似比和加速度相似比倒数的乘积，如式(12)～(14). 简化过程如下：

$$C_M = C_\rho C_v = C_\rho {C_l}^3, \tag{12}$$

$$C_L = C_vC_T, \tag{13}$$

$$C_T = \frac{C_v}{C_a}, \tag{14}$$

式中：C_M 为质量相似比；C_v 为速度相似比；C_L 为长度相似比；C_T 为时间相似比；C_a 为加速度相似比.

将式(12)，(13)，(14)带入式(11)则可以推导出冲击地压动力学的基础相似准则，如下所示：

$$\begin{cases} C_t = \sqrt{\dfrac{C_l}{C_a}}, \\ C_\sigma = C_lC_\rho C_a, \\ C_E = C_lC_\rho C_a, \\ C_{\dot{\varepsilon}} = \sqrt{\dfrac{C_l}{C_a}}^{-1}, \end{cases} \tag{15}$$

式中：C_E 为弹性模量相似比；$C_{\dot{\varepsilon}}$ 为应变率相似比.

式(15)中加速度相似比的物理含义可解释如下：加速度相似比用于刻画模型与原型在惯性效应方面的对应关系，是动力学相似准则中的核心控制参数. 对于冲击地压等典型高应变率问题，引入加速度相似比是动力学相似与传统静力学相似准则的根本区别所在. 时间相似比体现了模型与原型在动态过程持续时间上的比例关系.

当煤层处于静力学状态下，整个系统是由重力为主导影响因素，需考虑重力做为主导的相似性，此时整个系统满足弗劳德准则(Froude Number)，弗劳德准则通常是用于描述动力学问题中惯性力与重力之间关系的一个重要无量纲数，它的推导式为式(18).

$$F_{if}=\rho v^2 L, \tag{16}$$

$$F_g=\rho g L^2, \tag{17}$$

$$\begin{cases} Fr=\dfrac{F_{if}}{F_g}=\dfrac{v^2}{gL}, \\ Fr=Fr', \end{cases} \tag{18}$$

式中：F_{if}为惯性力；F_g为重力；Fr为弗劳德准数；v为速度；g为重力加速度.

弗劳德准则最终可得到速度相似比$C_v=\sqrt{C_l}$.

将速度相似比带入式(15)，则可得出静力学相似准则，如下所示：

$$\begin{cases} C_t=\sqrt{C_l}, \\ C_\sigma=C_l C_\rho, \\ C_E=C_l C_\rho, \\ C_{\dot\varepsilon}=\sqrt{C_l}^{-1}. \end{cases} \tag{19}$$

1.2　煤岩动力学相似准则原理

煤岩物理参数均可通过应力相似比和时间相似比推导得出，依据式(19)建立冲击地压物理模型时，模型往往难以再现典型的冲击破坏现象. 究其原因在于，当几何相似比过大时，煤岩的应力相似比以几何相似比与密度相似比的乘积发生变化，这就导致模型强度过小，不具备冲击破坏特征，通过数值模拟研究，模型以静力学状态的相似准则进行缩小时，模型的冲击能指数逐渐减小，说明随着几何相似比的增加，模型的冲击倾向性减小，无法模拟出真实的冲击状态[28-30]. 具体如图1所示，由图可知，当模型的单轴抗压强度以相似比缩小时，模型的应变保持不变，导致模型的弹性模量逐渐减小，模型的刚度逐渐减小，因此静力学相似准则下的模型无法模拟出原型所具有的动力学现象[31].

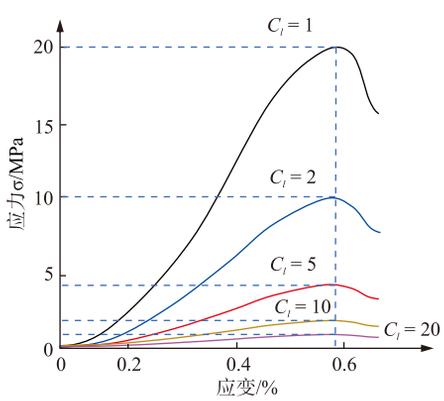


图1　静力学相似准则下的应力-应变曲线

Fig. 1　Stress-strain curve under the similarity criterion of statics

综上，需要一种可以模拟出原型冲击倾向性的煤岩动力学相似准则. 经过学者对动力学状态下的煤岩破坏规律研究可知，当煤岩处于动态破坏时，其强度要大于静力学状态下的强度，并且动态破坏时间也小于静力学状态下的动态破坏时间. 利用煤岩动力学相似准则得到的模型需满足上述2个要求. 并且动力学状态下的相似准则必须满足式(15).

在利用量纲分析法推导动力学相似准则的过程中发现，相较于传统的静力学相似准则，动力学相似准则需引入一个新的关键控制参数——加速度相似比. 这是因为冲击过程属于典型的高应变率与强惯性响应行为，只有将加速度或动量因素纳入相似体系，才能准确描述其动力特征. 而传统静力学相似准则通常默认加速度相似比为1，从而在相似分析中忽略了惯性效应的影响.

加速度相似比可通过煤矿冲击动载进行推导，震动波动载如式(20)所示：

$$\sigma_{dP}=\rho v_P v_{PP}, \tag{20}$$

式中：σ_{dP}为P波动载，MPa；v_P为震动波的传播速度m/s；v_{PP}为质点的震动速度，m/s.

设矿震震源位于坐标原点O，震动波以传播速度v_P向外扩散. 在沿X轴方向距离震源一定位置处，取长度为dX的微小单元进行分析. 于某一时刻t，该单元两端A，B的质点振动速度分别为v_A与v_B. 在随后极短的时间间隔dt内，震动波在该单元中产生的附加应变ε可表示为式(21).

$$\varepsilon=\frac{(v_B\mathrm{d}t+\frac{1}{2}v_B'\mathrm{d}t^2)-(v_A\mathrm{d}t+\frac{1}{2}v_A'\mathrm{d}t^2)}{\mathrm{d}X}, \tag{21}$$

式中：v_A'和v_B'分别为A，B质点震动速度的变化率，m/s^2.

则dt时段内，应变的平均变化速率公式为：

$$\overline{\varepsilon}_t=\frac{(v_B\mathrm{d}t+\frac{1}{2}v_B'\mathrm{d}t^2)-(v_A\mathrm{d}t+\frac{1}{2}v_A'\mathrm{d}t^2)}{\mathrm{d}X\mathrm{d}t}=\frac{(v_A-v_B)+\frac{1}{2}(v_B'-v_A')\mathrm{d}t}{\mathrm{d}X}. \tag{22}$$

当dt趋近于0时，t时刻dX段的应变率$\dot\varepsilon$表达式为：

$$\dot\varepsilon=\frac{v_B-v_A}{\mathrm{d}X}. \tag{23}$$

即震动波传播方向上速度的空间变化率为质点的应变率，震动波传播示意如图2所示.

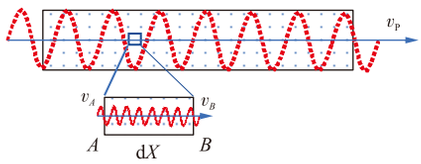


图 2 震动波传播示意

Fig. 2 Schematic diagram of stress wave propagation in coal and rock mass

由弹性波理论，任何震动波均可采用若干正弦波经傅利叶变换合成．因此正弦波为震动波的基本形式．

沿 X 方向传播的正弦震动波，质点震动速度 $v(X,t)$ 可写为：

$$v(X,t)=v_{pp_{max}}\sin\left[2\pi f\left(t-\frac{X}{v_P}\right)\right], \tag{24}$$

式中：v_{PPmax} 为质点的峰值振动速度，m/s；f 为震动波频率，Hz.

震动波产生的动载荷加载速率主要与频率和质点峰值速度相关；频率越大，则震动周期越短，质点从零速度变化到峰值速度所用时间越短，则加速度越大，质点瞬间受到的力也越大．应变率可表示为：

$$\dot{\varepsilon}(X,t)=\frac{\partial[v(X,t)]}{\partial X}=-\frac{2\pi f v_{pp_{max}}}{v_p}\cos\left[2\pi f\left(t-\frac{X}{v_p}\right)\right]. \tag{25}$$

应变率的极大值为：

$$\dot{\varepsilon}_{max}=\frac{2\pi f v_{pp_{max}}}{v_p}. \tag{26}$$

由式(26)可得，震动波在介质中传播时产生的最大应变率 $\dot{\varepsilon}_{max}$ 与震动波频率 f 及介质质点的峰值振动速度 v_{PPmax} 成正比，而与波速 v_p 成反比．该关系揭示了震动波加载速率的主要控制因素．在实际矿震过程中，v_p 主要取决于介质的物理参数(如密度与弹性模量)，其变化范围较小，因此震动波引起的动载应变率主要受 f 与 v_{pp} 的共同作用．

依据震动传播的动载可表示为：

$$\sigma_{dP}=\rho v_P v_{PP}=\frac{\rho {v_P}^2\dot{\varepsilon}_{max}}{2\pi f}. \tag{27}$$

同时，震动传播动载可根据牛顿第二定理表示为：

$$\sigma_{dP}=\rho l a. \tag{28}$$

则动力学加速度可表示为：

$$a=\frac{v_P^2\dot{\varepsilon}_{max}}{2\pi f l}. \tag{29}$$

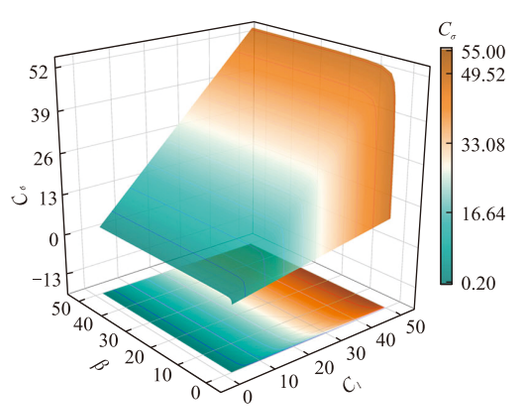
动力学加速度的相似比可表示为：

$$C_a=\frac{a}{a'}=C_{v_P^2}C_{\dot{\varepsilon}}C_L^{-1}C_t=\beta. \tag{30}$$

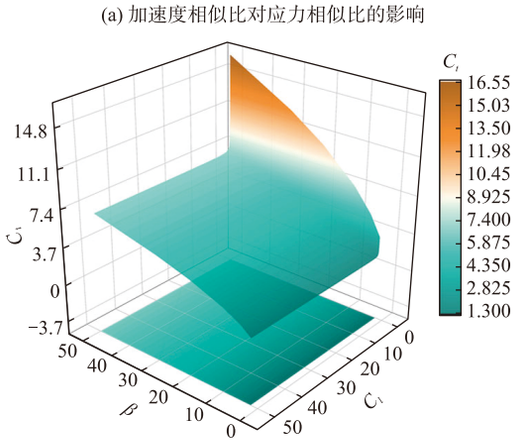
由式(30)可知，当煤体处于静力学状态时，$C_{v_P}=\sqrt{C_l}$ $C_{\dot{\varepsilon}}=\dfrac{1}{C_t}$，则 $C_a=1$，符合静力学状态下的加速度相似比，形成了动力学相似准则与静力学相似准则的统一．将式(30)中的 β 定义为动力学相似准则系数(Y-D 系数)．将式(30)代入式(15)即可得到冲击地压的煤岩动力学相似准则．

Y-D 系数的物理意义为用于保证模型与原型在惯性效应上的动态相似．它表征模型加速度相对于原型的缩放关系，是冲击地压动力学问题中保持惯性力比例一致的关键参数．通过调控动力学相似准则系数，可确保模型试验中载荷传播与能量释放过程与原型保持一致．

动力学相似准则系数 β 对煤岩物理力学参数的影响较大，如图 3 所示为动力学相似准则系数对应力和时间的影响．由图 3 可知，随着动力学相似准则系数的增加，应力相似比逐渐增加，时间相似比逐渐减小．随着几何相似比增加，应力相似比与时间相似比的变化范围逐渐增大．



(a) 加速度相似比对应力相似比的影响

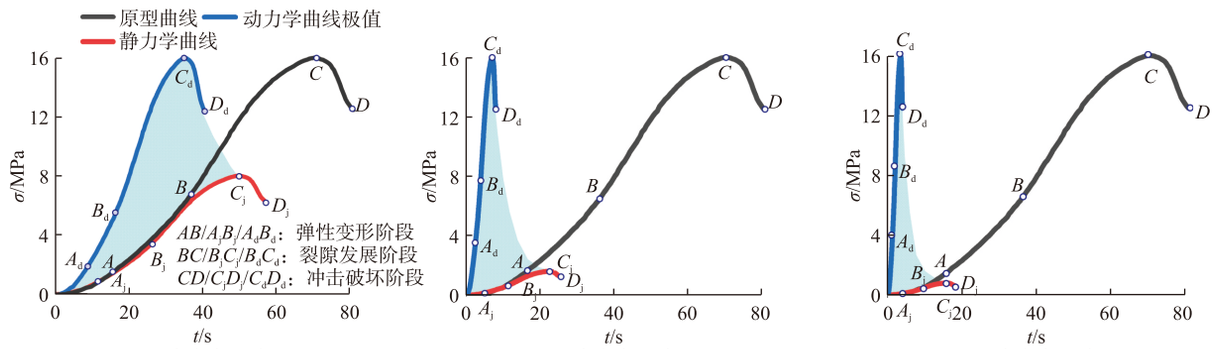


(b) 加速度相似比对时间相似比的影响

图 3 加速度相似比对应力和时间相似比的影响

Fig. 3 The influence of acceleration similarity ratio on stress and time similarity ratio

在高应变率加载条件下，动力学相似准则下的煤体峰值强度显著高于静力学下的强度，且破坏持续时间更短，表现出典型的应变率强化效应与脆性增强特征，如图 4 所示．以原型为准，以静力学相似准则计算，可得到下方红色曲线；以动力学相似准则计算可得到蓝色曲线，蓝色曲线为动力学状态下的曲线极值；当曲线在红色和蓝色曲线范围内时，可认定为满足动力学相似准则的应力时间曲线．曲线的范围如图中浅蓝色范围所示．相比于静力学曲线，动力学曲线的弹性变形阶段、裂隙发育阶段和冲击破坏阶段的时间均小于静力学曲线．



(a) 几何相似比为2　　(b) 几何相似比为10　　(c) 几何相似比为20

图 4　不同几何相似比下动力学应力-应变曲线

Fig. 4　Dynamic stress-strain curves under different geometric similarity ratios

由图 4 可以看出，在动力学加载条件下，应力-时间曲线的极值（蓝色曲线）斜率 k'_{dmax} 明显高于原型曲线（黑色曲线）的斜率 k 以及静力学加载状态下的斜率（红色曲线）k'_{j}．应力-时间曲线的斜率反映了煤体受载时应力增长的速率，是表征其冲击响应强度的重要参数．因此，可将动力加载条件下的应力-时间曲线斜率 k'_{d} 作为冲击倾向性判断的关键指标．若模型试样的 k'_{d} 介于静力学斜率 k'_{j} 与原型斜率 k 之间，说明其具备一定的冲击响应能力，但尚未达到原型煤体的剧烈程度，可归类为弱冲击倾向性模型；当 k'_{d} 大于原型斜率 k 且低于极值斜率 k'_{dmax} 时，表明其动态响应显著增强，接近于真实煤体的破坏特征，可判定为强冲击倾向性模型．该划分方法有效克服了传统静力学指标在动态判别中的局限性，为冲击地压相似模拟中的模型冲击倾向性提供了定量判据，其表达式如式(31)和(32)所示．

$$k < k'_{\mathrm{d}} < k'_{\mathrm{dmax}}, \tag{31}$$

$$k'_{\mathrm{j}} < k'_{\mathrm{d}} < k. \tag{32}$$

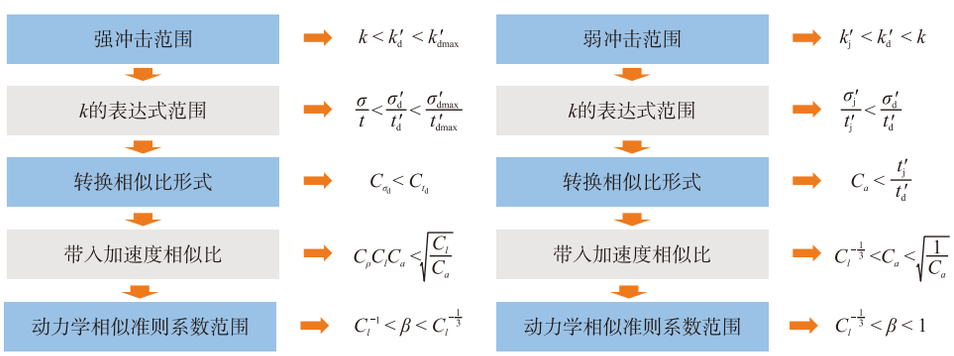
依据强冲击倾向性模型试样的不等式进行求解，推导过程如图 5 所示，可得到下式：

$$C_l^{-1} < \beta < C_l^{-\frac{1}{3}}. \tag{33}$$

依据弱冲击倾向性模型试样的不等式进行求解，可得到式(34)：

$$C_l^{-\frac{1}{3}} < \beta < 1. \tag{34}$$

强和弱冲击倾向性下的动力学相似准则系数的取值范围计算过程如图 5 所示．图中，σ'_{d} 为模型动力学强度，MPa；t'_{d} 为模型动力学时间，s；σ'_{dmax} 为模型动力学强度最大值，MPa；t'_{dmax} 为模型动力学时间最大值，s；σ'_{j} 为模型静力学强度，MPa；t'_{j} 为模型静力学时间，s．



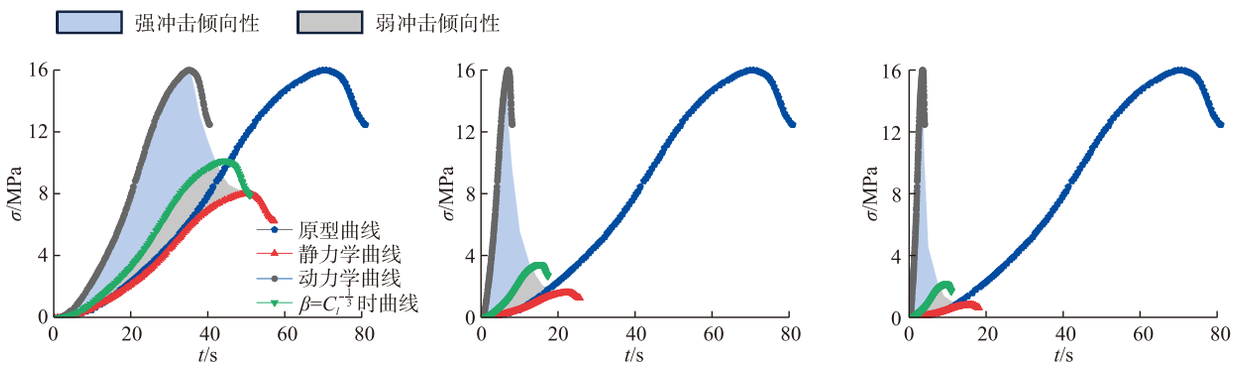
(a) 强冲击下动力学相似准则系数范围　　(b) 弱冲击下动力学相似准则系数范围

图 5　强弱冲击倾向性下 β 取值范围

Fig. 5　The range of β values under strong and weak impact tendencies

以动力学相似准则系数的取值范围作为判定模型冲击倾向性的条件时，不同几何相似比下的应力-时间曲线如图 6 所示.

根据煤体在动力学状态下的要求可计算出，动力学相似准则系数β在不同几何相似比下的取值范围，如图 7 所示. 动力学相似准则系数在此范围内取值时，皆可满足煤体在动力学状态下的要求.



(a) 几何相似比为2 (b) 几何相似比为10 (c) 几何相似比为20

图 6 不同几何相似比下强弱冲击倾向性范围

Fig. 6 Range of strong and weak impact tendencies under different geometric similarity ratios

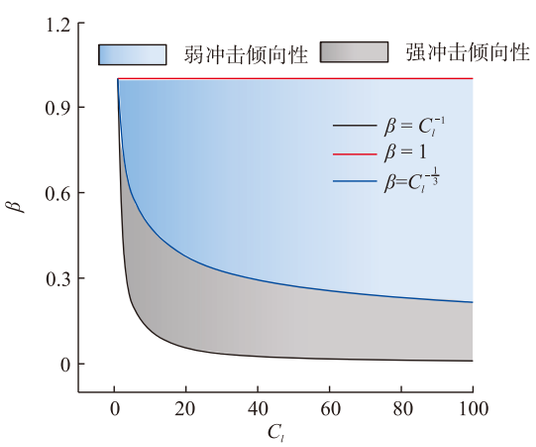


图 7 β在不同几何相似比下的取值范围

Fig. 7 The range of values for β under different geometric similarity ratios

2 试验材料与试验方案

2.1 相似材料配比方案

依据动力学相似准则构建相似材料配比体系是冲击地压物理模拟的重要一环. 相似准则为材料设计提供了理论依据，通过确定密度、弹性模量、强度等关键相似比，可明确模型材料应满足的物理力学指标范围，从而指导配比设计. 配制出的材料应满足低强、高脆的特性，并保证相似试样的时间、应力、弹性模量和应变率与原型参数呈固定比例缩小. 同时，根据动力学相似准则系数β确定模型的各项参数，从而在动力学条件下实现模型与原型的相似对应. 在此基础上，通过试验验证各配比方案与相似准则计算结果的符合程度，对材料配比进行优化，使其更好地满足动力学相似要求.

如若判断相似试样是否满足高脆低强的性质，可根据国家标准 GB/T 25217.2—2010《冲击地压测定、监测与防治方法 第 2 部分：煤的冲击倾向性分类及指数的测定方法》规定的试样冲击倾向性标准来进行判别，但是相似试样经过几何相似比缩小后，国标规定的判据也应按照相似准则进行修改，满足相似试样的冲击倾向性标准如表 2 所示[32]. 动态破坏时间的相似比与时间相似比一致，冲击倾向性指标中的弹性能指数和冲击能指数的计算方式如图 8 所示.

表 2 模型的冲击倾向性指标

Table 2 Bursting liability of coal model

判别指标	公式	倾向性		
		无	弱	强
弹性能量指数	$W_{ET}=\frac{\Phi_{SE}}{\Phi_{SP}}$	<2	$2\sim5$	>5
冲击能量指数	$K_E=\frac{A_s}{A_x}$	<1.5	$1.5\sim5$	>5
动态破坏时间	$t_D'=t_D\sqrt{\frac{C_a}{C_l}}$	$>500\sqrt{\frac{C_a}{C_l}}$	$50\sim500\sqrt{\frac{C_a}{C_l}}$	$<50\sqrt{\frac{C_a}{C_l}}$
单轴抗压强度	$\sigma_c'=\frac{\sigma_c}{C_lC_\rho C_a}$	$<\frac{7}{C_lC_\rho C_a}$	$\frac{7}{C_lC_\rho C_a}\sim\frac{14}{C_lC_\rho C_a}$	$>\frac{14}{C_lC_\rho C_a}$

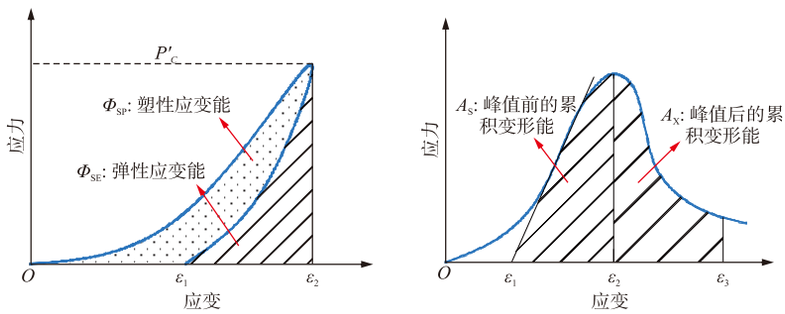


图 8　弹性能指数与冲击能指数

Fig. 8　Calculation methods for elastic energy index and impact energy index

选用的原材料为氟硅酸钠、滑石粉和水玻璃. 选择上述 3 种材料的原因在于，水玻璃遇到酸性硬化剂（氟硅酸钠）可迅速发生反应，生成硅酸凝胶，具有良好的黏结力和固化能力，胶接后形成致密结构，提高材料的整体强度和刚度，可满足冲击倾向性煤体相似材料的脆性模拟需求. 滑石粉作为惰性填充骨料不参与主要的化学反应，主要用于调节相似材料的密度与力学参数. 表 3 为氟硅酸钠、滑石粉和水玻璃 3 种材料的详细参数.

表 3　相似材料性质

Table 3　Similar material properties

材料	氟硅酸钠	滑石粉	水玻璃
成分	氟硅酸钠	硅酸镁	纯碱、石英砂
状态	粉末状	粉末状	液体
粒径/μm	75	75	3.2
分子式	Na_2SiF_6	$Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$	Na_2SiO_3
反应方程	$2Na_2SiO_3 + Na_2SiF_6 + 6H_2O = 6NaF + 3Si(OH)_4$		

设计的试验方案如表 4 所示，左侧为材料各组分的质量，右侧为材料各组分的质量分数，将氟硅酸钠的质量分别设置为 0.20，0.30，0.40 和 0.50 kg；将滑石粉质量设置为 0，0.15，0.30 和 0.60 kg，水玻璃质量均为 1.00 kg. 利用 3 种原材料设计正交试验可得到 16 组试验方案[33].

图 9 为正交试验中相似材料的质量占比示意，在同一组内水玻璃和氟硅酸钠的质量分数逐渐减小，滑石粉的质量分数逐渐增加.

图 10 为相似试样制备流程，以编号 8 材料配比方案为例进行阐述. 首先，称取 0.3 kg 氟硅酸钠、0.6 kg 滑石粉、1.0 kg 水玻璃置于烧杯中. 随后，将 3 种原材料按配比混合，并置于搅拌机中充分搅拌，直至混合物内部无明显团聚块体. 为消除混合过程中产生的气泡，将混合物置于振动台上进行水平振动，使内部气体充分释放. 混合均匀的材料静置 2～3 h，以确保氟硅酸钠与水玻璃的酸碱反应充分进行并形成硅酸凝胶骨架结构.

表 4　相似材料配比方案

Table 4　Proportions of Similar Materials

组	编号	质量/kg			质量分数/%		
		氟硅酸钠	滑石粉	水玻璃	氟硅酸钠	滑石粉	水玻璃
1	1	0.20	0	1.00	16.67	0	83.33
	2	0.20	0.15	1.00	14.81	11.11	74.07
	3	0.20	0.30	1.00	13.33	20	66.67
	4	0.20	0.60	1.00	11.11	33.33	55.56
2	5	0.30	0	1.00	23.08	0	76.92
	6	0.30	0.15	1.00	20.69	10.34	68.97
	7	0.30	0.30	1.00	18.75	18.75	62.50
	8	0.30	0.60	1.00	15.79	31.58	52.63
3	9	0.40	0	1.00	28.57	0	71.43
	10	0.40	0.15	1.00	25.81	9.68	64.52
	11	0.40	0.30	1.00	23.53	17.65	58.82
	12	0.40	0.60	1.00	20.00	30	50.00
4	13	0.50	0	1.00	33.33	0	66.67
	14	0.50	0.15	1.00	30.30	9.09	60.61
	15	0.50	0.30	1.00	27.78	16.67	55.56
	16	0.50	0.60	1.00	23.81	28.57	47.62

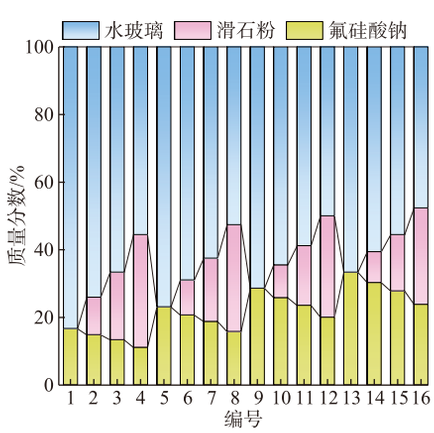


图 9　相似材料质量占比示意

Fig. 9　Schematic diagram of the mass proportion of similar materials

待反应完成后，将混合物装入直径 50 mm、高度 100 mm 的模具中成型，并在避光、通风的环境中静置 7 d 以完成初步硬化．脱模后，将试样转入恒温恒湿养护箱中养护 14 d，以确保试样内部结构致密且力学性能稳定．养护完成后，将试样置于避光通风条件下静置 3～4 d，直至表面完全干燥．最终，使用岩石切割机将试样端面加工至平整光滑，获得尺寸为∅50 mm × 100 mm 的标准相似试样．

每个编号的试样按照材料比例制备 4 个，分别用于单轴压缩试验和循环加卸载试验．单轴压缩试验主要用于测定单轴抗压强度、动态破坏时间及冲击能指数；循环加卸载试验用于测定试样的弹性能指数，以全面评估相似材料的力学性能与冲击响应特征[34-36]．

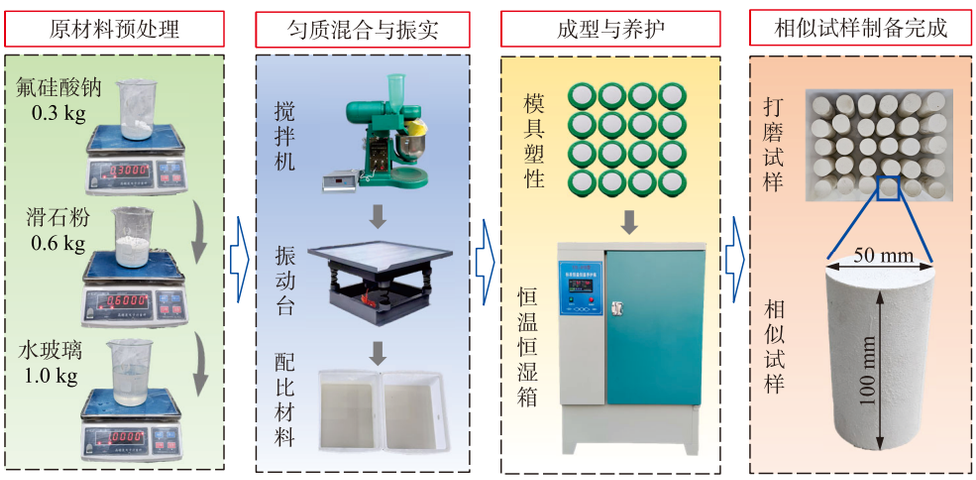


图 10 相似试样制备流程

Fig. 10 Preparation process of similar samples

2.2 试验方案

依据 GB/T 25217.2—2010 规定的加载方式对相似试样进行单轴压缩试验．加载时，一组采用力加载控制方式，将试样缓慢加载至 0.1 kN 使其与设备加载端预接触，随后以 0.5 MPa/s 的速度对相似试样进行应力加载直至破坏，通过力加载的方式测定试样破坏瞬间的动态破坏时间和单轴抗压强度，依据全应力-应变曲线计算冲击能指数．另一组采用循环加卸载的方式，最多施加 8 个循环加卸载，第 1 个加载阶段中，在试样表面以 0.5 MPa/s 的速度施加应力，当应力达到 4 MPa 时停止施加，以 0.5 MPa/s 的速度进行卸载，当应力卸载至 0.25 MPa 时停止卸载，再进行第 2 次加载阶段，每次加载阶段的应力最大值为 4，5，6，7，8，9，10 和 11 MPa，卸载阶段均卸载至 0.25 MPa，加卸载的速度均为 0.5 MPa/s．

试验仪器选择 MTS 电液伺服万能试验机，仪器的性能指标：最大试验力为 1 MN；试验力测量精度为±0.5%；采样频率为 1 kHz；位移测量精度为±0.5%；变形测量精度为±0.5%．试验设备如图 11 所示．

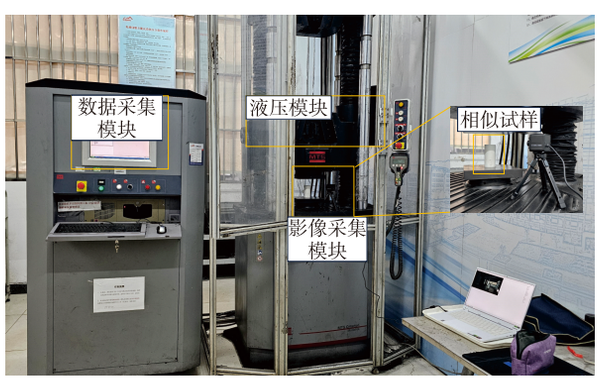


图 11 试验设备

Fig. 11 Experimental equipment

3 试验结果

3.1 试验现象

经过多组试验得出 16 种配比方案下试样的基础物理力学参数，包括：尺寸、密度、单轴抗压强度、动态破坏时间、弹性能指数和弹性模量．具体参数如表 5 所示．将几何相似比设定为 10，密度相似比为 1，动力学相似准则系数通过计算为 0.46，将参数带入动态破坏时间和单轴抗压强度公式，如表 6 所示．

表 5　试验结果

Table 5　Experimental result

组别	编号	尺寸/(mm×mm)	密度/(kg·m^{-3})	单轴抗压强度/MPa	冲击能指数	动态破坏时间/ms	弹性能指数	弹性模量/MPa
1	#1	49.1×99.2	1 022.4	1.66	2.04	1 100	1.01	231
	#2	49.6×99.0	1 119.2	2.75	3.30	700	3.03	382
	#3	49.7×99.5	1 296.4	9.96	3.78	80	2.70	841
	#4	49.5×99.0	1 569.1	14.15	21.60	180	1.51	1 034
2	#5	49.3×99.4	1 180.3	3.67	3.03	730	1.56	356
	#6	49.7×99.6	1 286.2	5.00	3.45	790	3.02	537
	#7	50.0×99.0	1 338.9	6.73	4.58	90	10.45	609
	#8	50.0×99.3	1 468.7	9.30	6.72	110	1.64	847
3	#9	49.4×99.4	1 302.5	4.72	2.97	810	1.22	433
	#10	49.3×99.0	1 407.7	4.95	6.58	210	4.65	834
	#11	49.5×99.0	1 446.5	9.10	19.44	120	5.19	857
	#12	49.5×99.2	1 631.5	12.88	24.23	80	6.10	1 119
4	#13	49.6×99.6	1 332.1	5.02	3.56	450	2.13	478
	#14	49.8×99.0	1 418.9	9.99	11.69	90	6.13	745
	#15	49.8×99.2	1 537.6	12.70	16.03	80	10.74	938
	#16	49.8×99.1	1 605.7	13.46	21.11	80	3.84	1 230

表 6　C_l=10 时的模型冲击倾向性指标

Table 6　The impact propensity index of the model under C_l=10

判别指标	公式	倾向性		
		无	弱	强
弹性能量指数	$W_{ET}=\dfrac{\Phi_{SE}}{\Phi_{SP}}$	<2	2～5	>5
冲击能量指数	$K_E=\dfrac{A_s}{A_x}$	<1.5	1.5～5	>5
动态破坏时间	$t'_D=t_D\sqrt{\dfrac{C_a}{C_l}}$	>105	10.5～105	<10.5
单轴抗压强度	$\sigma'=\dfrac{\sigma_c}{C_lC_\rho C_a}$	< 1.52	1.52 ～ 3.04	> 3.04

依据表 6 建立的模型冲击倾向性指标，可以判断相似试样的单轴抗压强度、冲击能量指数均具有冲击倾向性；弹性能指数中除#1，#4，#5，#8 和#9 之外，其余组相似试样具有冲击倾向性；动态破坏时间中#3，#12，#14，#15 和#16 具有冲击倾向性，其余均小于动态破坏时间的指标．可判定配比方案#3，#12，#14，#15 和#16 具有强冲击倾向性，其余配比方案具有弱冲击倾向性．

如图 12 所示为 16 种配比方案相似试样的单轴压缩曲线，由图可知 16 种相似试样中的大部分具有冲击倾向性，试样破坏的方式具有剪切破坏、劈裂破坏和剥离分层破坏的特征，相似试样破坏时表面具有剥离、弹射等现象，符合冲击倾向性煤体的破坏规律．由应力-应变曲线可知，相似试样的曲线峰前表现出试样经历了线弹性阶段和裂隙发育阶段，当试样达到极限强度时，局部或整体失稳，内部的微裂隙转化成宏观裂隙，在曲线峰后应力迅速下降，应变持续增长，失去了承载能力且破坏具有瞬时性，相似试样表现出了冲击倾向性煤体的脆性破坏特征．

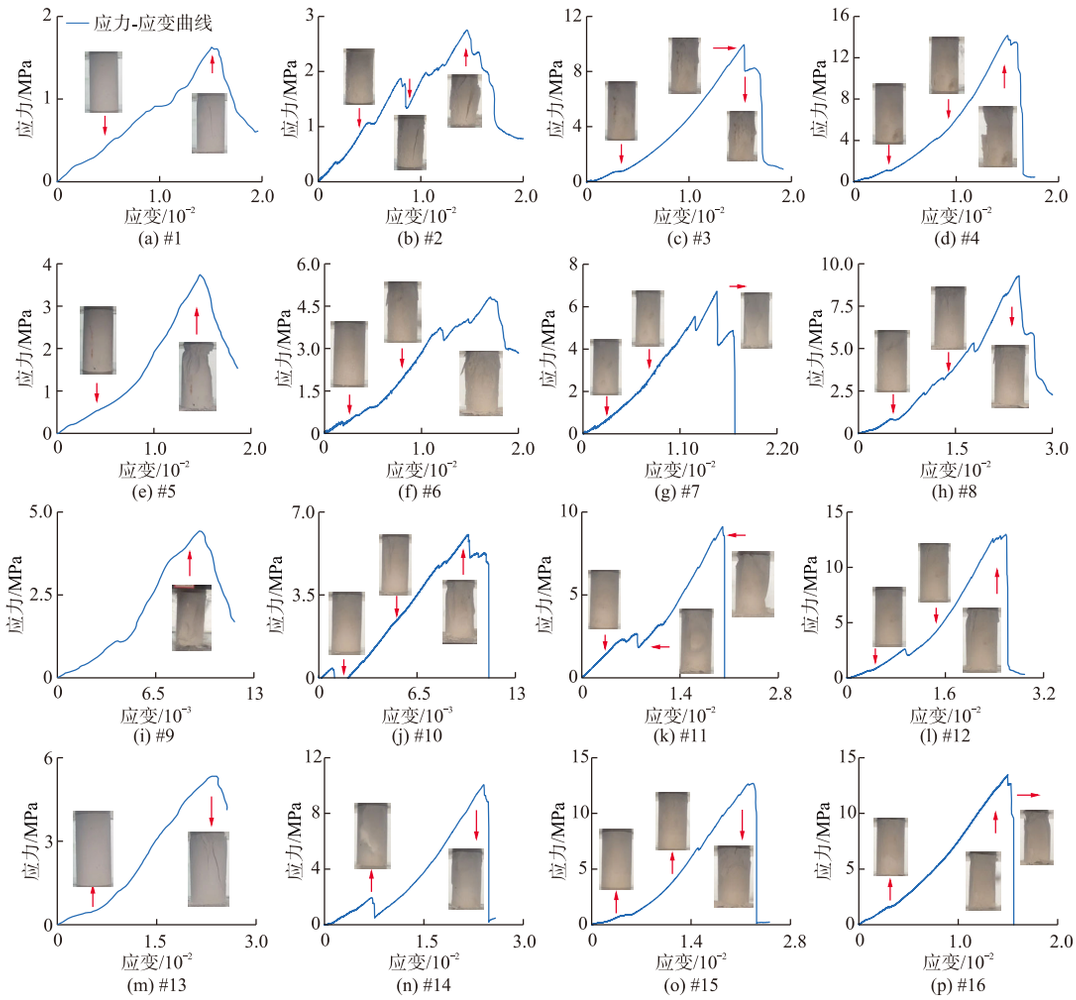


图 12 相似试样单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 12 Uniaxial compression stress-strain curve of similar specimens

如图 13 所示为 16 种相似试样的循环加卸载曲线. 由图可知,相似材料的配比编号为#1,#5,#9 和#13 时循环次数为 1,具有滑石粉含量越多,循环次数越多的趋势. 由破坏方式可知在循环加卸载前期应力-应变曲线近似线性,试样完整无明显裂隙,当循环次数增加时试样应变滞回环扩大,有的表面出现裂纹,在卸载阶段伴有碎屑脱落,当循环次数再次增加时,试样突然破坏伴随着碎片飞出,呈现出典型的冲击破坏特征.

3.2 材料配比对参数的影响

如图 14 所示,为不同材料配比下各参数的变化趋势柱状图. 试验结果表明,随着氟硅酸钠和滑石粉用量的增加,材料密度和强度总体呈上升趋势,材料表现出更高的刚度与抗压强度[33]. 典型如#16 样品,其氟硅酸钠与滑石粉质量分别为 0.50 和 0.60 kg,表现出最高的单轴抗压强度(13.46 MPa)与弹性模量(1 230 MPa),同时具有较高的冲击能指数(21.11)和合理的动态破坏时间(80 ms),显示出良好的相似性与冲击倾向性. 同时,不同配比下材料的动态响应存在显著差异,如#4 样品在仅有 0.20 kg 氟硅酸钠和 0.60 kg 滑石粉配比下,尽管强度达到 14.15 MPa,但弹性能指数偏低(1.51),且动态破坏时间仅 180 ms,表明其强度较高,但冲击倾向性较弱;而如#7 样品尽管强度不高(6.73 MPa),但弹性能指数高达 10.45,具备一定的低强高脆特性. 综合比较各组数据,#15 和#16 材料配比在各项指标中均表现优异,具备良好的相似性参数匹配特性,推荐作为冲击倾向性煤体性质的相似模拟试验的代表材料. #7 和#10 的材料配比符合低强高脆的特性,可作为冲击倾向性煤体的相似试样的代表材料. 通过冲击能指数来看,16 组试样的冲击能指数均大于 1.5,当氟硅酸钠质量比较小时为弱冲击倾向性,滑石粉的质量比增加时冲击能倾向性逐渐增加.

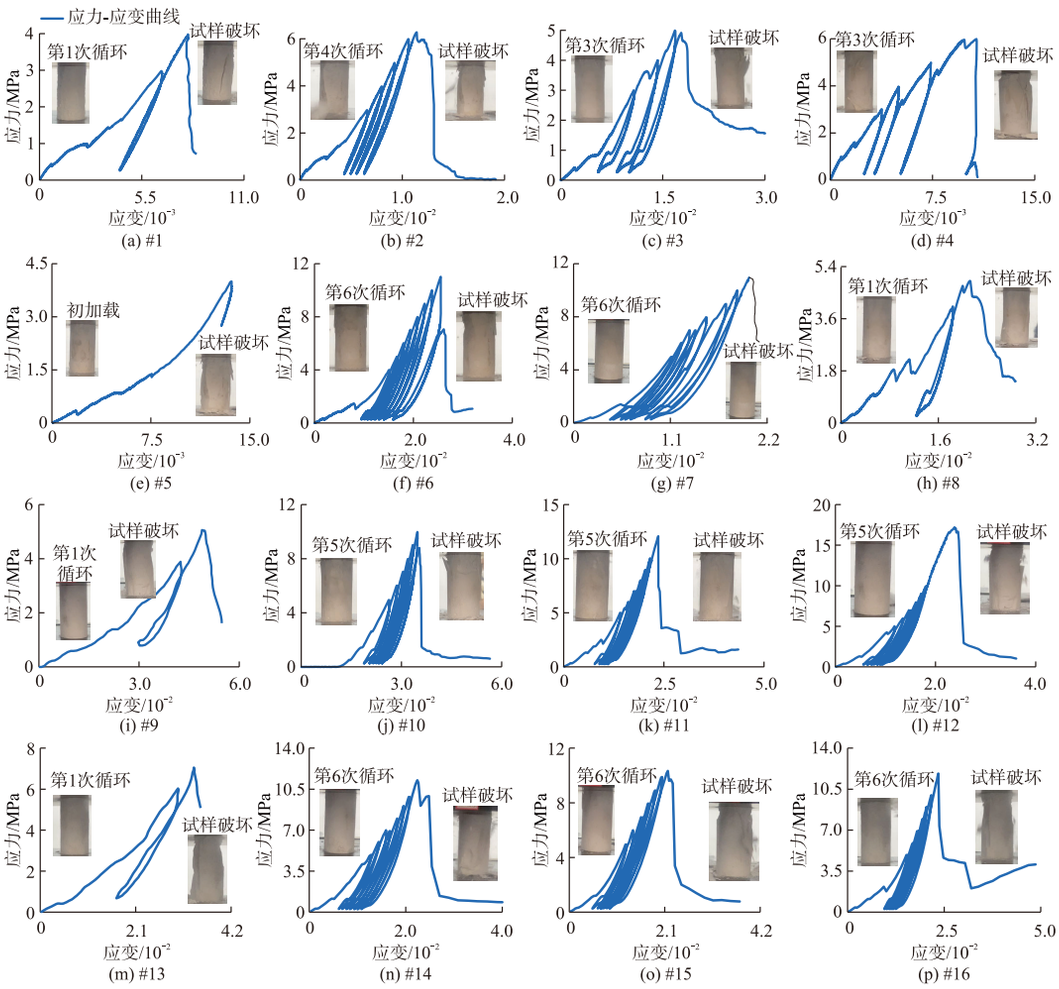


图 13　相似试样循环加卸载应力-应变曲线

Fig. 13　Stress-strain curves of similar specimens subjected to cyclic loading and unloading

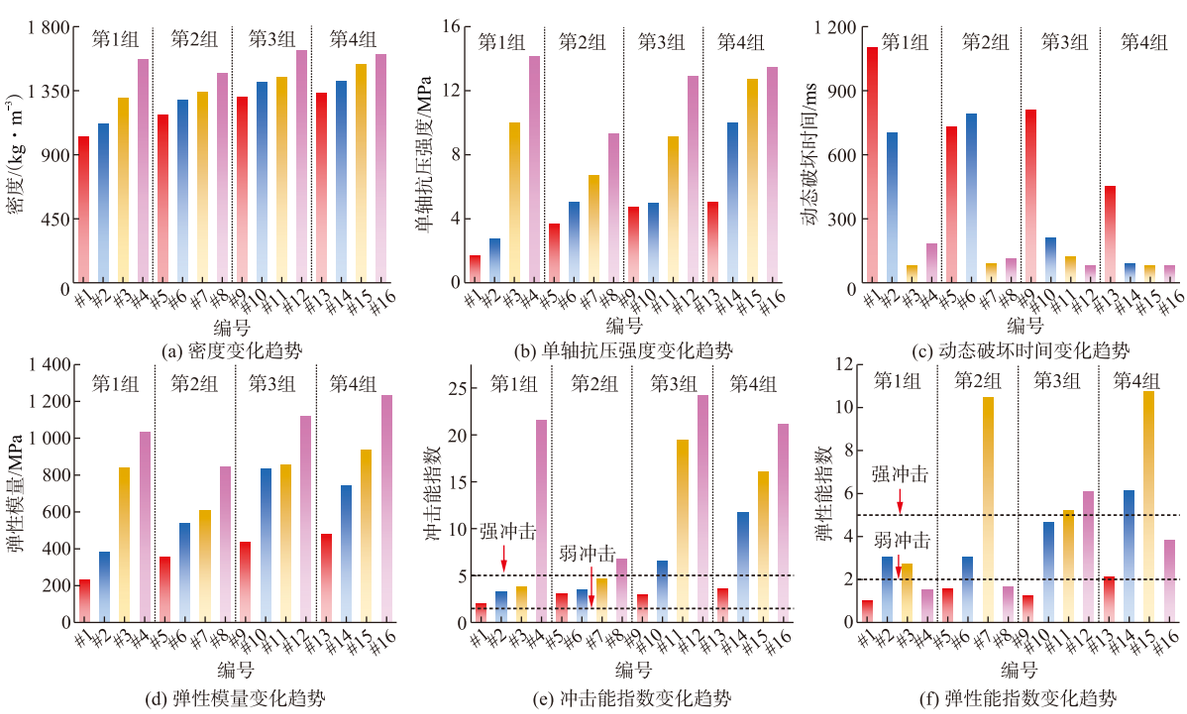


图 14　不同相似材料配比方案对物理参数的影响

Fig. 14　The influence of different proportions of similar materials on physical parameters

1)材料配比对密度的影响

表7展示了氟硅酸钠与滑石粉在不同质量组合下材料密度变化率的规律.结果表明,2种组分均对密度具有显著的正向调控作用,且联合作用下的致密化效果更明显.以滑石粉质量为0.3 kg为例,密度变化率随氟硅酸钠质量的增加从127%提升至150%;在氟硅酸钠质量为0.4 kg时,滑石粉由0提升至0.60 kg,密度变化率由127%升至160%.说明滑石粉和氟硅酸钠均能有效提高材料的结构致密度与整体压实性.

表7 密度变化率

Table 7 Density change rate

m(氟硅酸钠)/kg	密度变化率/%			
	m(滑石粉)=0	m(滑石粉)=0.15 kg	m(滑石粉)=0.30 kg	m(滑石粉)=0.60 kg
0.2	100	109	127	153
0.3	115	126	131	144
0.4	127	138	141	160
0.5	130	139	150	157

2)材料配比对单轴抗压强度的影响

表8显示,氟硅酸钠与滑石粉在不同的质量组合下,材料单轴抗压强度均显著提升.氟硅酸钠对强度的增强作用更为明显,其质量由0.2 kg增至0.5 kg时,强度提升幅度达数倍;而滑石粉在一定范围内也能提高试样强度,但当质量超过0.6 kg时,部分组别出现下降趋势,说明过量滑石粉可能削弱材料的结合性能.总体而言,氟硅酸钠的质量是影响单轴抗压强度的主要因素.

表8 单轴抗压强度变化率

Table 8 Uniaxial compressive strength change rate

m(氟硅酸钠)/kg	单轴抗压强度变化率/%			
	m(滑石粉)=0	m(滑石粉)=0.15 kg	m(滑石粉)=0.30 kg	m(滑石粉)=0.60 kg
0.2	100	166	600	852
0.3	221	301	405	560
0.4	284	298	548	776
0.5	302	602	765	811

3)材料配比对动态破坏时间的影响

表9结果表明,滑石粉和氟硅酸钠对动态破坏时间均具有负向调控作用.随两者质量的增加,试样的动态破坏时间明显缩短,最大降幅分别达84%和59%.这表明2种组分质量的增加可加速应力集中与能量释放过程,使材料在冲击载荷下表现出更强的脆性特征.

表9 动态破坏时间变化率

Table 9 Dynamic destruction time change rate

m(氟硅酸钠)/kg	动态破坏时间变化率/%			
	m(滑石粉)=0	m(滑石粉)=0.15 kg	m(滑石粉)=0.30 kg	m(滑石粉)=0.60 kg
0.2	100	64	7	16
0.3	66	72	8	10
0.4	74	19	11	7
0.5	41	8	7	7

4)材料配比对弹性模量的影响

表10显示,氟硅酸钠与滑石粉的质量总体上对材料弹性模量具有正向调控作用,但在滑石粉质量为0.15~0.30 kg时,部分组别出现随氟硅酸钠质量增加而弹性模量略降的现象.这可能与内部结构由致密转向脆化的变化有关.总体来看,适量掺入氟硅酸钠与滑石粉均有助于提升材料刚度与变形抗力.

表10 弹性模量变化率

Table 10 Elastic modulus change rate

m(氟硅酸钠)/kg	弹性模量变化率/%			
	m(滑石粉)=0	m(滑石粉)=0.15 kg	m(滑石粉)=0.30 kg	m(滑石粉)=0.60 kg
0.2	100	165	364	448
0.3	154	232	264	367
0.4	187	361	371	484
0.5	207	323	406	532

3.3 多元线性回归分析

为明确氟硅酸钠、滑石粉对相似材料宏观物理力学参数的影响关系,构建材料设计的预测模型,基于试验获得的16组材料配比及其性能数据,采用多元线性回归方法建立各物理指标与组分含量之间的数学关系.由于水玻璃在各组中质量保持恒定(1.00 kg),不具备回归辨识条件,以氟硅酸钠质量分数U_F与滑石粉质量分数V_H作为自变量,分别建立对密度ρ、单轴抗压强度σ_c、动态破坏时间t_D和弹性模量E的回归模型.

多元线性回归模型的一般形式为:

$$Y=\beta_0+\beta_1U_F+\beta_2V_H+w, \tag{35}$$

式中：Y为目标预测变量(如密度、强度等)；β_0为截距；β_1，β_2为回归系数；w为误差项．回归分析在95%置信水平下进行，采用最小二乘法估计各参数．

回归分析结果如下：

1)密度，回归方程如下：

$$\rho = 938.4 + 793.93U_F + 597.01V_H. \quad (36)$$

模型拟合优度R^2=0.904，说明回归模型能解释90%以上的样本方差，U_F，V_H均对密度具有显著正向影响，且p值均远小于0.01，统计显著性高．

2)单轴抗压强度，回归方程如下：

$$\sigma_c = 0.036 + 11.23U_F + 14.91V_H. \quad (37)$$

模型R^2=0.801，表明该线性关系拟合较好，滑石粉的影响系数略高于氟硅酸钠，说明滑石粉含量对提高强度的贡献更显著．

3)动态破坏时间，回归方程如下：

$$t_D = 1\,039.25 - 1\,145.00U_F - 1\,075.24V_H. \quad (38)$$

模型R^2=0.641，表明U_F和V_H对破坏时间均具有显著负相关性，配比中刚性组分(如滑石粉)增加会缩短试样的动态破坏响应时间，材料更脆，更容易突发破坏．

4)弹性模量，回归方程如下：

$$E = 109.99 + 900.75U_F + 1\,111.19V_H. \quad (39)$$

模型R^2=0.872，拟合程度良好，滑石粉对弹性模量的增益效应更加显著，说明其在材料刚度提升中起主导作用．

上述分析表明，氟硅酸钠和滑石粉在复合材料中协同影响了材料的致密性、承载能力与冲击倾向性．其中滑石粉对刚度和强度的增强作用更加突出，而氟硅酸钠在调控材料密度和冲击延性方面具有积极作用．该回归模型可为后续材料定向设计与力学性能快速预测提供理论基础与数值依据．

4　案例应用

前文叙述了煤岩动力学相似准则和相似材料配比试验，如何应用动力学相似准则指导相似材料的配比是煤岩物理模拟的关键问题．具体的应用流程如图15所示．首先，收集原型的冲击地压参数与物理力学参数，之后确定几何相似比，计算动力学相似准则系数与各项参数的动力学相似比，推导出模型的各项物理参数，将模型的物理力学参数带入多元线性回归方程计算相似材料的各组分占比，最后制备相似材料进行试验．

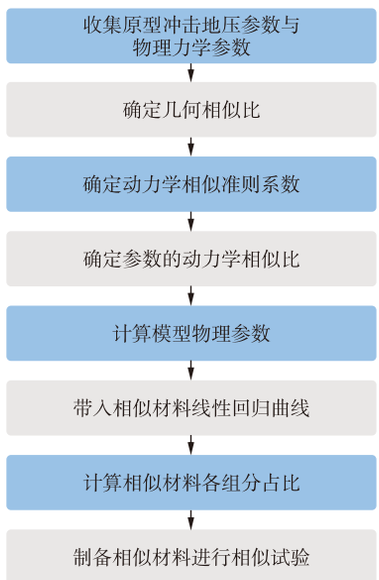


图15　动力学相似准则的应用流程

Fig. 15　Application procedure of the dynamic similarity criterion

以赵楼煤矿为例，发生冲击地压时的各项参数与煤样重要物理参数如表11和表12所示．

表11　冲击地压的物理力学参数

Table 11　Physical and mechanical parameters of coal burst

参数	垂直应力/MPa	水平应力/MPa	冲击能量/MJ
取值	49.6	35	80

表12　煤体的物理力学参数

Table 12　Physical and mechanical parameters of impact-prone coal

参数	σ_c/MPa	t_D/ms	ρ/(kg·m^{-3})	E/MPa
取值	14	330	1 340	2 750

将几何相似比设定为10，密度相似比设定为1，依据式(33)～(34)即可计算出动力学相似准则系数的范围，如式(40)所示．

$$\begin{cases} \text{强冲击：} 0.1 < \beta < 0.46, \\ \text{弱冲击：} 0.46 < \beta < 1. \end{cases} \quad (40)$$

当β=0.46时模型的冲击倾向性与原型一致，因此设定动力学相似准则为0.46，将其带入动力学相似准则，可得到模型的冲击地压力学参数与煤体的物理力学参数．

冲击的能量相似比可表示为：

$$C_Q = C_l^4 C_\rho \beta, \quad (41)$$

式中　Q为能量，J.

模型的冲击地压物理力学参数和煤体相似模型的物理力学参数分别如表13和14所示.

表13 模型冲击地压的物理力学参数

Table 13 Physical mechanical parameters of the model for coal burst

参数	垂直应力/MPa	水平应力/MPa	冲击能量/J
取值	10.78	7.61	17 391.3

表14 煤体模型的物理力学参数

Table 14 Physical and mechanical parameters of impact prone coal similarity model

参数	σ_c'/MPa	t_D'/ms	ρ/(kg·m^{-3})	E/MPa
取值	3.04	70.8	1 340	597.8

依据煤体模型参数,可以计算出相似材料的配比方案,将密度1 340 kg/m^3、单轴抗压强度3.04 MPa、动态破坏时间70.8 ms、弹性模量597.8 MPa代入材料的回归模型即可得出相似材料的配比方案,如表15所示.

表15 煤体的相似材料配比

Table 16 Proportions of similar materials for impact prone coal

材料	氟硅酸钠	滑石粉	水玻璃
质量/kg	0.18	0.10	1.00

依据上述配比方案得到的物理力学参数的平均值(实际参数)如表16所示,同时计算了其与理论参数的误差率.

表16 煤体的实际参数及与理论参数的误差率

Table 16 Actual parameters of coal body and error rate between theoretical parameters

实际参数	数值	与理论参数的误差率/%
σ_c/MPa	3.08	1.3
t_D/ms	69	1.8
ρ/(kg·m^{-3})	1 119	16.4
E/MPa	542	9.3

经过测定,依据相似材料配比方案得到的相似模型的物理力学参数与理论值相差较小,除密度外,其余差值均在10%以内,应力和动态破坏时间与理论差值仅为1.3%和1.8%. 该相似材料配比方案得到相似模型具有冲击倾向性,满足冲击地压物理模拟试验材料需要的脆性特征.

5 结 论

1)引入加速度相似比作为动力学相似准则关键参数并提出了动力学相似准则系数,建立了涵盖应力、时间、弹性模量和应变率的煤岩动力学相似准则体系,明晰了动力学相似准则系数对煤岩物理参数的影响,分析了不同几何相似比下动力学相似准则系数的取值范围与模型的应力曲线范围,为冲击地压动力学物理模拟试验提供了理论基础.

2)选取了氟硅酸钠、滑石粉和水玻璃为相似模型原材料,设计了16种相似材料配比方案,制备了多组煤岩模型的标准试样. 通过单轴压缩试验和循环加卸载试验得到,氟硅酸钠与滑石粉用量对相似材料的密度、强度、弹性模量及冲击倾向性具有显著影响. 随着两者用量的增加,相似材料的密度、抗压强度及刚度整体呈上升趋势,表现出更强的力学承载能力和冲击响应能力.

3)采用多元线性回归方法,建立了相似材料配比与模型单轴抗压强度、弹性模量、密度及动态破坏时间等关键力学参数之间的定量关系,为材料设计与性能调控提供了有效工具.

4)以深部冲击危险煤层为例,为准确再现其冲击破坏过程及演化机制,基于动力学相似准则,确定了赵楼煤矿工程原型与试验模型之间的几何相似比、应力相似比、时间相似比和能量相似比等关键物理量关系;同时结合相似材料回归分析结果,选取氟硅酸钠、滑石粉和水玻璃为主要组分,按质量比0.18∶0.10∶1.00进行配比,制备出了满足强度、弹模、密度和冲击响应等多项相似指标的模型材料,并分析了实际参数与理论参数的误差率,为冲击地压动力学相似模拟试验提供了理论-材料的设计基础.

参考文献:

[1] 袁 亮,王恩元,马衍坤,等.我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J].煤炭学报,2023,48(5):1825-1845.
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825-1845.

[2] 窦林名,何学秋,REN Ting,等.动静载叠加诱发煤岩瓦斯动力灾害原理及防治技术[J].中国矿业大学学

报，2018，47(1)：48-59.
DOU Linming, HE Xueqiu, REN Ting, et al. Mechanism of coalgas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 48-59.

[3] 窦林名，曹晋荣，曹安业，等.煤矿矿震类型及震动波传播规律研究 [J].煤炭科学技术，2021，49(6)：23-31.
DOU Linming, CAO Jinrong, CAO Anye, et al. Research on types of coal mine tremor and propagation law of shockwaves[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 23-31.

[4] 高明仕，赵世帆，席国军，等.重复冲击特厚煤层巷道围岩裂隙演化及破坏特征[J].中国矿业大学学报，2024，53(4)：634-646.
GAO Mingshi, ZHAO Shifan, XI Guojun, et al. Fracture evolution and failure characteristics of roadway surrounding rock in extra-thick coal seams subjected to multiple coal bursts[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2024，53(4)：634-646.

[5] 康红普，高富强，王晓卿，等.煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统研制与试验验证[J].煤炭学报，2024，49(9)：3701-3710.
KANG Hongpu, GAO Fuqiang, WANG Xiaoqing, et al. Development and experimental validation of a test system for simulation of fault-slip rockbursts in coal mine roadways [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(9): 3701-3710

[6] 齐庆新，王守光，王美美，等.煤矿冲击地压数值物理模拟方法与应用研究[J].矿业安全与环保，2025，52(1)：1-13.
QI Qingxin, WANG Shouguang, WANG Meimei, et al. Research on numerical-physical simulation methods and applications for coal mine rock burst[J].Mining Safety & Environmental Protection, 2025, 52(1): 1-13

[7] 卢志国，高富强，杨　磊，等.深埋巷道动静载叠加诱冲物理模拟试验系统研制与应用[J].中国矿业大学学报，2025，54(5)：959-970.
LU Zhiguo, GAO Fuqiang, YANG Lei, et al. Development and application of a novel physical simulation test system for deep coal burst roadway with dynamic-static combined loading [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(5): 959-970.

[8] CAO W X, LIU H L, HANG Y J, et al. Similarity simulation on the movement characteristics of surrounding rock and floor stress distribution for large-dip coal seam[J]. Sensors, 2022, 22(7): 2761.

[9] LIU P Z, GAO L, ZHANG P D, et al. Physical similarity simulation of deformation and failure characteristics of coal-rock rise under the influence of repeated mining in close distance coal seams [J]. Energies, 2022, 15(10): 3503.

[10] KAN Z H, DOU L M, CAI W, et al. Establishment and analysis of impact coal physical analog similarity criteria in coal burst [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(7): 7605-7630.

[11] 李鸿昌.矿山压力的相似模拟试验[M].徐州：中国矿业大学出版社，1987.
LI Hongchang. Similar simulation experiment of mine pressure [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1987.

[12] 林韵梅.实验岩石力学[M].北京：煤炭工业出版社，1984.
LIN Yunmei. Experimental rock mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House，1984.

[13] 张强勇，段　抗，任明洋，等.深部工程物理模拟与数值模拟[M].北京：科学出版社，2022.
ZHANG Qiangyong, DUAN Kang, REN Mingyang. Physical and numerical simulations of deep engineering[M]. Beijing: Science Press, 2022.

[14] 朱小景，潘一山，李　祁，等.巷道冲击地压软化区能量极值判别准则及试验研究[J].中国矿业大学学报，2021，50(5)：975-982.
ZHU Xiaojing, PAN Yishan, LI Qi, et al. Study on the proportioning of similar materials under the dynamic similarity criteria of coal[J] Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(5): 975-982.

[15] 唐巨鹏，张　昕，潘一山，等.深部巷道煤与瓦斯突出及冲击演化特征试验研究[J].岩石力学与工程学报，2022，41(6)：1081-1092.
TANG Jupeng, ZHANG Xin, PAN Yishan, et al. Experimental study on the characteristics of deep coal and gas outburst and impact evolution in roadway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1081-1092.

[16] 王爱文，潘一山.深部残采区域下冲击危险易突出煤层开采的相似模拟试验[J].煤炭学报，2012，37(4)：578-584.
WANG Aiwen, PAN Yishan. Similar simulation test on mining of rockburst danger and easy outburst coal seam under deep residual area [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 578-584.

[17] 潘一山，吕祥锋，李忠华，等.高速冲击载荷作用下巷道动态破坏过程试验研究[J].岩土力学，2011，32(5)：1281-1286.

PAN Yishan, LYU Xiangfeng, LI Zhonghua, et al. Experimental study of dynamic failure process of roadway under high velocity impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1281-1286.

[18] 蔡 武.断层型冲击矿压的动静载叠加诱发原理及其监测预警研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
CAI Wu. Fault rckburst induced by static and dynamic loads superposition and its monitoring and warning[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

[19] 谢和平, 高 峰, 鞠 杨.深部岩体力学研究与探索[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. China Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.

[20] 吴拥政,周鹏赫,付玉凯,等.动静载作用下锚杆托板选型及力学性能试验研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(6):1074-1084.
WU Yongzheng, ZHOU Penghe, FU Yukai, et al. Study on the selection and mechanical properties of bearing plate of rock bolt under dynamic and static loading[J] Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1074-1084.

[21] 袁 亮,马衍坤,黄勤豪,等.煤岩动力灾害模型试验灾变地层模拟材料研制现状与展望[J].中国矿业大学学报,2024,53(5):827-856.
YUAN Liang, MA Yankun, HUANG Qinhao, et al. Development status and prospects of simulation materials for catastrophic prone strata in the physical model experiments on coal and rock dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(5): 827-856.

[22] 张强勇, 李术才, 郭小红, 等. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J].岩土力学, 2008, 29(8): 2126-2130.
ZHANG Qiangyong, LI Shucai, GUO Xiaohong, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2126-2130.

[23] 战新宇,高 林,赵芳昊,等.大相似比模型试验用超高强相似材料配比试验研究[J].煤田地质与勘探,2023,51(11):109-118.
ZHAN Xinyu, GAO Lin, ZHAO Fanghao, et al. Experimental study on proportioning of ultrahigh strength similar materials for large similarity ratio model tests[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(11): 109-118.

[24] 朱珍德, 林恒星, 孙亚霖.透明类岩石内置三维裂纹扩展变形试验研究[J].岩土力学, 2016, 37(4): 913-921.
ZHU Zhende, LIN Hengxing, SUN Yalin. An experimental study of internal 3D crack propagation and coalescence in transparent rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 913-921.

[25] 石晓燕, 郭 鹏, 范俊奇, 等.泥岩相似材料配制及力学性能试验研究[J]. 防护工程, 2023, 45(2): 16-23.
SHI Xiaoyan, GUO Peng, FAN Junqi, et al. Experimental study on preparation and mechanical properties of mudstone similar materials[J]. Protective Engineering, 2023, 45(2): 16-23.

[26] 戴银所.高容重低强度岩石模型试验相似材料研究[J]. 防护工程, 2023, 45(1): 16-20.
DAI Yinsuo. Study on high bulk density and low strength similarity materials for rock model test[J]. Protective Engineering, 2023, 45(1): 16-20.

[27] WANG Y Z, YUAN C L, SHI X Y, et al. Study on dynamic failure characteristics of coal and rock in stope induced by dynamic load of steep horizontal sublevel mining[J]. Processes, 2022, 10(9): 1684.

[28] LIU X S, FAN D Y, TAN Y L, et al. New detecting method on the connecting fractured zone above the coal face and a case study[J], Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(8): 4379-4391.

[29] WENG L, LI X B, TAHERI A, et al. Fracture evolution around a cavity in brittle rock under uniaxial compression and coupled static-dynamic loads[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 51(2): 531-545.

[30] 鞠明和,姚宝山,窦林名,等.冲击地压物理相似模拟中煤的冲击倾向性影响规律研究[J].岩石力学与工程学报, 2024,43(12): 2940-2955.
JU Minghe, YAO Baoshan, DOU Linming, et al. Influence of coal bursting liability on physical similarity simulation of coal/rock burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(12): 2940-2955.

[31] 张文清,穆朝民,李重情.冲击荷载下煤的动态力学性质研究[J].煤炭科学技术, 2019, 47(10): 198-204.
ZHANG Wenqing, MU Chaomin, LI Zhongqing. Study on dynamic mechanical properties of coal under impact loading[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 198-204

[32] 窦林名,阚梓豪,曹安业,等.冲击地压的煤岩动力

学物理模拟相似原理[J].煤炭学报，2026，51(1)：274-292.
DOU Linming，KAN Zihao，CAO Anye，et al. Physical similarity principles of coal-rock dynamics simulation for coal burst[J]. Journal of China Coal Society，2026，51(1)：274-292.

[33] LI Y H，BAI J B，WANG X Y，et al. Development and performance study on low strength and high rockburst tendency similar simulation material of coal[J]. Construction and Building Materials，2023，404：133230.

[34] KAN Z H，DOU L M，HE H，et al. Advances and trends in multi-field coupling induced disaster similarity theory within deep ground engineering[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources，2024，10(1)：187.

[35] KAN Z H，DOU L M，CAI W，et al. Impact coal internal block size effect on physical and mechanical parameters′ similarity criteria validity：Numerical simulation and adjustment[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2025，35(4)：659-675.

[36] 王汉鹏，张　冰，袁　亮，等.超低渗气密性岩层相似材料特性分析[J].中国矿业大学学报，2021，50(1)：99-105.
WANG Hanpeng，ZHANG Bing，YUAN Liang，et al. Property analysis of rock-like material with ultra-low permeability and air tightness[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2021，50(1)：99-105.

（责任编辑　沈　菊　宋　爽）