

中文引用格式:鲁义,谭嘉乐,邵淑珍,等. 防煤自燃的磷石膏自产气浆泡“微-细-宏”观力学模型[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1): 88-96.

英文引用格式:LU Yi, TAN Jiale, SHAO Shuzhen, et al. Multiscale (micro-meso-macro) mechanical model of phosphogypsum-based self-produced gas expansion slurry for preventing coal spontaneous combustion[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 88-96.

防煤自燃的磷石膏自产气浆泡“微-细-宏”观力学模型^{*}

鲁义^{1, 2, 3}教授, 谭嘉乐¹, 邵淑珍¹, 施式亮¹教授, 谷旺鑫¹, 刘蔚廷¹

(1 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2 地下空间防火防爆与装备湖南省工程研究中心, 湖南 湘潭 411201;

3 火灾爆炸防控与应急技术湖南省普通高等学校重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

中图分类号: X936

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0748

基金项目: 国家自然科学基金资助(52274196, 52374200, 52174180); 国家重大人才工程青年项目(2022QB06801); 湖南省科技创新领军人才项目(2024RC1063)。

【摘要】 为解决因裂隙漏风所致的煤自燃问题, 通常采取注浆方式来封堵裂隙。磷石膏自产气浆泡(PSES)是一种新型堵漏风材料, 其封堵效果的持久性和可靠性直接取决于材料自身的破坏过程; 采用单轴压缩试验结合单孔洞模型、半经验 Mori-Tanaka(M-T)模型及混凝土塑性损伤(CDP)模型, 从微观、细观与宏观多尺度开展其力学行为研究。结果表明: 微观尺度上, 泡孔内壁为 PSES 结构的薄弱点, 临界外压可表征其局部屈服的起始; 细观尺度上, 半经验 M-T 模型能准确预测 PSES 的等效有效模量, 验证其对孔隙率-刚度响应的刻画能力; 宏观尺度上, 经孔隙率修正的 CDP 模型能够高精度地拟合 PSES 的应力-应变曲线, 其平均绝对占比误差(MAPE)控制在 0.23%~2.69%。修正后的损伤因子与材料实际情况高度匹配, 可表征其损伤演化特征, 为评估堵漏风材料的长期服役性能提供依据。

【关键词】 磷石膏自产气浆泡(PSES); 煤自燃; 力学模型; 孔隙率; Mori-Tanaka(M-T)模型; 混凝土塑性损伤(CDP)模型

Multiscale (micro-meso-macro) mechanical model of phosphogypsum-based self-produced gas expansion slurry for preventing coal spontaneous combustion

LU Yi^{1, 2, 3}, TAN Jiale¹, SHAO Shuzhen¹, SHI Shiliang¹, GU Wangxin¹, LIU Weiting¹

(1 School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2 Hunan Engineering Research Center for Fire and Explosion Prevention Materials and Equipment in Underground Spaces, Xiangtan, Hunan 411201, China; 3 Key Laboratory of Fire and Explosion Prevention and Emergency Technology in Hunan Province, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: To address the issue of spontaneous coal combustion caused by air leakage from fissures, grouting is commonly employed to seal fissures. PSES is a new type of air-leakage plugging material,

whose durability and reliability of sealing performance depend directly on its intrinsic failure process. Uniaxial compression experiments, in conjunction with a single-hole model, the semi-empirical M-T model, and the CDP model, were employed to investigate the mechanical behavior of PSES across micro-, meso-, and macro-scales. The results reveal that at the microscale, the inner wall of the vesicle constitutes a primary weak point within the PSES structure, and the critical external pressure signifies the onset of localized yielding; at the mesoscale, the semi-empirical M-T model accurately predicts the equivalent effective modulus and confirms its capability to characterize the relationship between porosity and stiffness; at the macroscale, the porosity-corrected CDP model accurately fits the stress-strain curve, with the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) ranging from 0.23% to 2.69%. Furthermore, the corrected damage factor closely corresponds with the material's actual condition, effectively characterizing its damage evolution characteristics. This, in turn, provides a reliable basis for evaluating the long-term service performance of the air-leakage plugging material.

Keywords: phosphogypsum-based self-produced gas expansion slurry (PSES); spontaneous combustion of coal; mechanical model; porosity; Mori-Tanaka (M-T) model; concrete damaged plasticity (CDP) model

0 引言

煤自燃引起的火灾事故占煤矿火灾 90% 以上,煤岩裂隙漏风是引发采空区煤自燃的主要原因^[1],因此,封堵采空区煤岩裂隙是防止采空区煤自燃的必要措施。目前国内外常采用注浆的方式封堵裂隙。磷石膏自产气浆泡(Phosphogypsum-based self-produced gas expansion slurry, PSES)是一种新型的堵漏材料,该材料利用反应自生 CO₂ 膨胀,具有高膨胀、高堆积和双重扩散等特性,可有效封堵裂隙、阻隔漏风^[2-3]。PSES 作为孔隙分布随机的自发泡多孔材料,其破坏涉及多个尺度,微观上,晶体缺陷和微裂纹网络易导致结构稳定性下降^[4];细观上,孔隙坍塌和压碎加剧了材料的力学弱化^[5];宏观上,材料整体变形与压溃导致密封失效。因此,亟需系统研究材料在复杂应力下的力学响应特征与损伤演化机制,以保障其长效稳定。

目前,学者们已从多个尺度开展了模型研究:微观尺度上,李方贤等^[6]基于多种理论模型,定量表征了泡沫混凝土中泡孔的几何尺寸、形状及排列模式。细观尺度上,采用数值单胞模拟^[7]和 Mori-Tanaka (M-T) 模型^[8]等模拟了内部损伤。彭鹏等^[9]基于分形理论与 M-T 模型建立了孔隙率-强度关系,GAO Yuan 等^[10]结合试验与数值模拟再现了泡沫混凝土的受压破坏全过程。JING Mao 等^[11]采用了响应面分析法(Response Surface Methodology, RSM)建立了强度与配比模型。宏观尺度上,DONG Kai 等^[12]通过单轴压缩试验,结合配比和孔隙率修

正模型参数,准确预测了材料的承载力与变形性能(误差<5%)。然而,现有研究多集中于单一尺度,且多侧重于宏观尺度分析,缺乏多尺度系统研究,其破坏机制与密封性能的关联尚不明确。

多尺度力学模型能有效联系微观、细观结构特征与宏观力学行为,提高预测精度并深化对破坏机制的理解。因此,笔者拟以 PSES 固化体的抗压性能为切入点,结合单孔洞模型、半经验 M-T 模型和混凝土塑性损伤(Concrete Damaged Plasticity, CDP)模型,从微-细-宏 3 尺度研究 PSES 的力学性能与损伤过程,探究孔隙率对强度及破坏行为的影响,以期 PSES 在充填工程中的应用,防止裂隙漏风导致的煤自燃提供理论依据。

1 “微-细-宏”观力学模型分析

1.1 微观尺度分析(单泡孔模型)

PSES 内泡孔具有高圆度,为分析单个泡孔的力学行为,假设泡孔为标准球形,且周围浆体为均质、各向同性的弹性材料,以及当材料仅受内外压力作用时,泡孔内任意点的径向应力和环向应力均相等。在此基础上转换 Cauchy 平衡方程,得到静力平衡方程:

$$\frac{dP_r}{dr} + \frac{2}{r}(P_r - P_\theta) = 0 \tag{1}$$

式中: P_r 为径向应力,MPa; r 为径向坐标,mm; P_θ 为环向应力,MPa; θ 为环向坐标,rad。在球对称、小变形的三维各向同性线弹性体中,广义 Hooke 定

律为^[13]:

$$\begin{cases} P_r = 2\mu\varepsilon_{rr} + \lambda(\varepsilon_{rr} + 2\varepsilon_{\theta\theta}) \\ P_\theta = 2\mu\varepsilon_{\theta\theta} + \lambda(\varepsilon_{rr} + 2\varepsilon_{\theta\theta}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: λ, μ 为拉梅常数, MPa; ε_{rr} 为径向应变; $\varepsilon_{\theta\theta}$ 为环向应变。

PSES 的泡孔微观结构在承压下的变形适用于小变形理论。球型坐标系下位移场 $u_r(r)$ 的几何关系为 $\varepsilon_{rr} = \partial u_r / \partial r$, $\varepsilon_{\theta\theta} = u_r / r$, 将其代入式(2), 并与式(1)联立得到下式:

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{2}{r^2} u_r = 0 \quad (3)$$

式中 u_r 为径向位移, mm。

在球对称问题中, 位移 $u_r(r)$ 常以幂函数表示^[14]。设定其形式为: $u_r(r) = Cr^n$, 式中: C 为待定常数; n 为待定指数。并将其代入式(3)可得幂函数的通解: $u_r(r) = C_1 r + C_2 / r^2$, 式中: C_1, C_2 为位移通解中的积分常数。联立通解和式(2), 可得 $P_r(r)$ 、 $P_\theta(r)$ 关于 A, B 和 r^{-3} 的表达式。

$$\begin{cases} P_r(r) = A - \frac{B}{r^3} \\ P_\theta(r) = A + \frac{B}{2r^3} \\ A = (2\mu + 3\lambda)C_1 \\ B = 4\mu C_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: A 为均压常数, MPa; B 为偏应力系数, MPa。设定压应力为负, 整理式(4)可得球壳中任意半径处的应力分布:

$$\begin{cases} P_r(r) = \frac{P_2 R_2^3 - P_1 R_1^3}{R_1^3 - R_2^3} - \frac{(P_2 - P_1) R_1^3 R_2^3}{r^3 (R_1^3 - R_2^3)} \\ P_\theta(r) = \frac{P_2 R_2^3 - P_1 R_1^3}{R_1^3 - R_2^3} - \frac{1}{2} \times \frac{(P_2 - P_1) R_1^3 R_2^3}{r^3 (R_1^3 - R_2^3)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_1 为球壳的内半径(泡孔中心点距离泡孔内壁的距离), mm; R_2 为球壳的外半径(泡孔中心点距离浆体外壁的距离), mm; P_1 为内表面压力, MPa; P_2 为外表面压力, MPa。

式(5)揭示了泡孔内外应力分布特征, 据此预测 PSES 内泡孔的失效位置。该式表明: $P_r(r)$ 随半径 r 增大呈 $1/r^3$ 衰减, $P_\theta(r) = P_r(r)/2$ 。对于各向同性材料, 根据 von Mises 屈服准则, 当等效应力 P_v 达到材料的屈服极限 P_y 时, 联立式(4)可得 $|P_r(r) - P_\theta(r)| = 3|B|/2r^3$ 。 P_y 随 r 增大而

减小, 故其最大值出现在内壁 $r = R_1$ 处, 屈服也首先发生于此。将 $r = R_1$ 代入并联立式(4)中的偏应力系数 B , 可得球壳内部的临界压力为:

$$P_i = P_2 - \frac{2P_y(R_1^3 - R_2^3)}{3R_2^3} \quad (6)$$

式中: P_i 为球壳内部的临界压力, MPa; P_y 为材料屈服极限, MPa。式(6)揭示了泡孔内壁是局部应力集中的最薄弱点和最先屈服区域。根据厚壁球壳理论, 当壁厚比 $t/R_1 > 0.05$ 时, 泡孔可视为厚壁球壳, 可采用式(6)求解球壳外部的临界压力 P_2 。假设泡孔整体破坏发生在内壁屈服后不久, 并整体近似为薄壳($t = (R_2 - R_1) \ll R_1$), $t/R_1 < 0.05$ 时, 在式(6)基础上, 将 $R_2 = R_1 + t$ 代入式(6)并保留一阶项, 得到薄壁的简化形式:

$$P_o = \frac{2P_y t}{R_1} \quad (7)$$

式中: P_o 为球壳外部的临界压力, MPa; t 为球壳壁厚, mm。式(7)可看作在 $t \ll R_1$ 条件下的特解。达到 P_o 标志着材料在微观尺度上出现不可恢复的损伤, 是堵漏风屏障完整性受到威胁的起点。

1.2 细观尺度分析(半经验 M-T 模型)

然而, PSES 的宏观刚度受大量泡孔影响, 单泡孔分析难以准确表征其整体力学行为^[6]。PSES 的孔隙率常为 30%~40%, 采用 M-T 模型评估宏观刚度。基体体积模量与基体剪切模量按下式计算:

$$K_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)} \quad (8)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (9)$$

式中: K_m 为基体体积模量, MPa; G_m 为基体剪切模量, MPa; E_m 为杨氏模量, MPa; ν_m 为泊松比。

M-T 经典理论需输入无孔隙、纯固相的 E_m 。而 PSES 难以制取纯固相试样, 为此采用半经验方法, 选取配方一致且孔隙率 f 较低($f \leq 2\%$)的 3 组样品, 对其主要承载阶段的应力-应变曲线做最小二乘法, 拟合得到有效杨氏模量 E_c ; 取 3 组 E_c 的平均值作为等效基体模量 E_p , 以 E_p 代替 E_m 输入 M-T 模型, 结合 f 预测等效有效杨氏模量 E ; 基体泊松比 ν_m 取实测典型值。

对于球形夹杂的情况, 将等效体积模量和等效剪切模量总结为^[15]:

$$K = K_m + \frac{f(K_z - K_m)}{1 + (1 - f) \frac{K_z - K_m}{K_m + 4G_m/3}} \quad (10)$$

$$G = G_m + \frac{f(G_z - G_m)}{1 + (1-f) \frac{G_z - G_m}{G_m + \Gamma_m}} \quad (11)$$

式中: K 为等效体积模量, MPa; G 为等效剪切模量, MPa; K_z 为夹杂的体积模量, MPa; G_z 为夹杂的剪切模量, MPa; f 为孔隙率; Γ_m 为剪切模量等效化时的剪切影响参数, MPa。将式(8)、式(9)代入 $\Gamma_m = G_m \{ (7 - 5\nu_m) / [15(1 - \nu_m)] \}$, 可将 Γ_m 表示为 K_m 与 G_m 的函数。已知浆泡的夹杂为基体夹杂空洞, 因此 K_z 、 G_z 均为 0, 由此可得:

$$K = \frac{(4G_m K_m / 3) \times (1 - f)}{4G_m / 3 + K_m f} \quad (12)$$

$$G = \frac{G_m \Gamma_m (1 - f)}{\Gamma_m + f G_m} \quad (13)$$

故等效有效杨氏模量和等效有效泊松比为:

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (14)$$

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (15)$$

式中: E 为等效有效杨氏模量, MPa; ν 为等效有效泊松比。 E 和 ν 是评价 PSES 宏观力学响应的基础。 E 越高刚度越大, 受压更能保持形状与尺寸, 从而抑制漏风裂隙产生。 ν 表征横向变形能力, 影响裂隙内的填充密度与界面的密封, 从而影响堵漏效果。

1.3 宏观尺度分析(CDP模型)

M-T 模型主要适用于弹性阶段, 难以表征非弹性行为及整体力学响应^[16], 为此引入 CDP 模型建立宏观本构框架。在一维单轴压缩下, 其一般式为:

$$\sigma = (1 - d) \times E_0 \times \varepsilon \quad (16)$$

式中: σ 为应力张量, MPa; d 为损伤变量; E_0 为初始杨氏模量, MPa, ε 为应变张量。为表征不同 f 下的损伤退化, 设定经验因子 α, q 。采用 f 修正的损伤模型见下式, 峰后损伤因子 $d(\varepsilon)$ 的演化形式见下:

$$d(\varepsilon, f) = 1 - \frac{\sigma(\varepsilon)}{(1 - \alpha f^q) E_0 \varepsilon} \quad (17)$$

式中 α, q 为经验因子。

$$d(\varepsilon) = \begin{cases} 0, & (\varepsilon < \varepsilon_0) \\ \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_f - \varepsilon_0} & (\varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_f) \\ 1, & (\varepsilon > \varepsilon_f) \end{cases} \quad (18)$$

式中: ε_0 为损伤起始应变; ε_f 为破坏应变。鉴于 PSES 孔隙率高、孔结构复杂且软化快, 且半经验 M-T 模型表明刚度/强度随 f 增大而降低, 在 CDP 中引

入由 M-T 派生的孔隙率稀释项以表征多孔结构对损伤演化及屈服行为的影响, 修正后的刚度公式见下:

$$E(f) = (1 - \alpha f^q) \times E_0 \quad (19)$$

PSES 的产气膨胀与晶体再沉积等复杂效应, 使现有 CDP 模型难以精确表征。为校正由此产生的系统误差, 引入无量纲结构协同失稳削弱项代入模型, 整合后模型见下式:

$$\sigma(\varepsilon, f) = \gamma(f) \times (1 - d(\varepsilon, f)) \times (1 - \alpha f^q) \cdot E_0 \cdot \varepsilon \quad (20)$$

式中 $\gamma(f)$ 为额外刚度削弱项, 表示为:

$$\gamma(f) = 1 - \beta f^m \quad (21)$$

式中 β, m 均为经验因子。

1.4 PSES 的制备

取 pH=2~3, 大小 40 目的磷石膏。按质量分数 59.1% 磷石膏、19.9% NaHCO₃、20.5% 水泥、0.5% 聚丙烯酰胺配置材料。在 150 r/min 下预混 3 min。按水灰比 1:2.5 加入不同温度的水, 在 300 r/min 搅拌 1 min 得到 PSES, 30 s 内浇注于 100 mm × 100 mm × 100 mm 模具。在温度为 25 ℃, 相对湿度为 70% 的条件下静置 24 h 脱模, 随后于温度为 20 ℃、相对湿度为 95% 的恒温恒湿养护箱中养护 3 天。

1.5 PSES 孔隙率的测量

取新鲜浆泡注入半径为 10 mm, 高 50 mm 的圆柱形模具中, 养护条件与试块一致。测试前, 试样在 30 ℃ 烘箱中干燥 24 h, 并经真空饱水处理。随后将饱水试样置于低场核磁共振分析仪内, 测试孔隙率 f 及孔径分布。

2 PSES“微-细-宏”观力学模型分析与验证

2.1 单泡孔微观力学分析

不同 f 下 PSES 的内部结构如图 1 所示。由图 1 可知: PSES 呈多孔结构, 泡孔接近圆形, 主要由细小泡孔构成(大泡孔为辅), 排列致密且孔壁相连, 延长气体扩散路径, 提升整体气密性。该结构使小泡孔区域分散应力, 延缓破坏。由式(5)可知: 泡孔的半径越小, 越难达到屈服条件。因此, 选取体系内较大的泡孔为代表分析。

由图 1 可知: 部分泡孔虽近似球形, 但存在不规则性。按圆度 $\Phi = 4\pi A / L^2$ (式中: Φ 为圆度; A 为泡孔面积, mm²; L 为泡孔周长, mm) 评估, 非理想球形

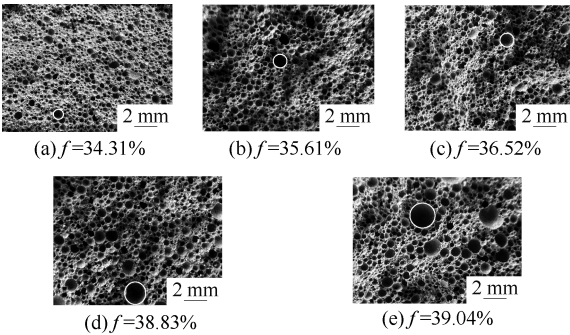


图1 不同f下PSES的内部结构

Fig. 1 Internal structure of PSES for different f

占比约3%,其 P_o 均高于最大泡孔。对圆度稍低的 $f=34.31\%$ 和 $f=35.61\%$ 2组样品的最大泡孔进行椭圆修正计算:① $a=0.49\text{ mm}$, $b=0.45\text{ mm}$, $A=0.70\text{ mm}^2$, $L=2.97\text{ mm}$;② $a=0.60\text{ mm}$, $b=0.56\text{ mm}$, $A=1.06\text{ mm}^2$, $L=3.65\text{ mm}$ 。

$$\begin{cases} P_H = \frac{2P_y}{3} \left[1 - \left(\frac{R_e}{R_e + t} \right)^3 \right] & \frac{t}{R_e} \geq 0.05 \\ P_L = P_y t \left(\frac{1}{b} + \frac{b}{a^2} \right) & \frac{t}{R_e} < 0.05 \end{cases} \quad (22)$$

式中: P_H 、 P_L 分别为厚/薄壁临界外压,MPa; R_e 为等效半径,mm。 $(R_e = 2a^2b/(a^2+b^2))$,其中 $a>b$ 为长轴)。椭圆修正后与原模型差异极小, $P_H=0.214\text{ MPa}$ (原 0.213 MPa)、 $P_L=0.1263\text{ MPa}$ (原 0.1260 MPa)。说明临界承载力主要由孔径决定,形态不规则性引入的误差有限。不同f下PSES中最大泡孔的几何参数见表1。

表1 不同f下PSES中最大泡孔的几何参数

Table 1 Geometrical parameters of maximum bubbles in PSES at different f

序号	温度/℃	f/%	R_1/mm	R_2/mm	t/mm	t/ R_1
1	25	34.31	0.49	0.52	0.03	0.06
2	30	35.61	0.60	0.62	0.02	0.03
3	35	36.52	0.63	0.65	0.02	0.03
4	40	38.83	0.97	0.99	0.02	0.02
5	45	39.04	1.01	1.03	0.02	0.02

最大泡孔 R_1 、 R_2 均随f增大而增大,t越薄。由表1可知:当f为34.31%时, $t/R_1>0.05$ 。而f为35.61%~39.04%时, $t/R_1<0.05$ 。因此,组1适用厚壁球壳模型,组2—组5适用薄壁球壳模型。假设外壁受到各向等压为 P_2 ,内壁压力 P_1 为0。PSES属脆性材料,可利用其破坏载荷表征最大承载能力 P_y ,将不同f下的 P_y 、 R_1 、 R_2 分别代入式(6)、式(7),计算结果见表2。

表2 不同f下的 P_y 及 P_o

Table 2 P_y and P_o at different f MPa

序号	P_y	厚壁 P_o	薄壁 P_o
1	1.96	0.213	0.240
2	1.89	0.118	0.126
3	1.76	0.105	0.112
4	1.48	0.058	0.061
5	1.47	0.056	0.058

由式(6)可知:PSES的泡孔内壁作为结构薄弱区将率先屈服。表2和图2显示:随着制备温度升高, P_y 由1.96 MPa降至1.47 MPa(降幅25%), P_o 由0.213 MPa降低至0.058 MPa(降幅72.8%)。孔径增大、壁厚减小使 P_o 降低,导致整体屈服前已出现局部(von Mises)屈服,而 P_o 反映的是这一局部起始的屈服条件。当外应力低于 P_o 时,材料处于孔隙压密阶段;达到 P_o 时,“最弱”泡孔屈服,压密阶段终止,其后续扩展若向邻域扩展,易形成孔间微通道,使密封性下降。

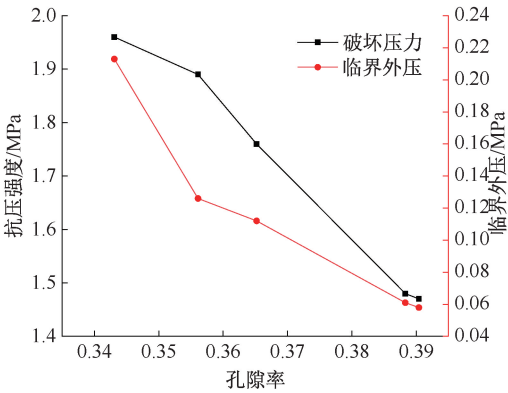


图2 破坏压力 P_y 与临界外压 P_o 对比

Fig. 2 Comparison between yield strength P_y and critical external pressure P_o

2.2 半经验 M-T 力学模型分析

为获取相关参数验证半经验 M-T 模型,对f较低的PSES进行单轴压缩试验(图3)。

得到的应力-应变曲线如图4所示。图4中组I—组III为同配方、同工艺的PSES固结3 d的应力-应变曲线。

曲线划分为4阶段:①孔隙压密阶段;②弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段;③非稳定破裂发展阶段;④破裂后阶段。对曲线I—曲线III处于阶段②取前5个数据点进行线性回归拟合。其斜率定义为 E_c 。

经过最小二乘法计算所得的 E_c 和 E_p 见表3。根据1.2节所建立的半经验 M-T 模型框架,将表3

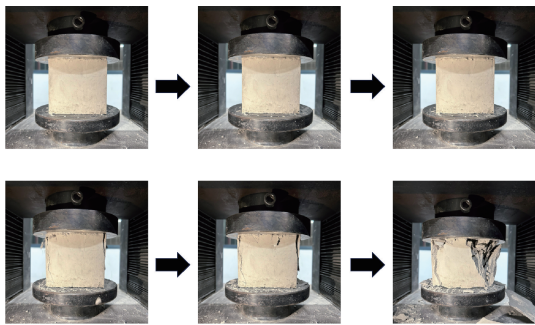


图 3 PSES 单轴压缩试验

Fig. 3 Uniaxial compression test of PSES

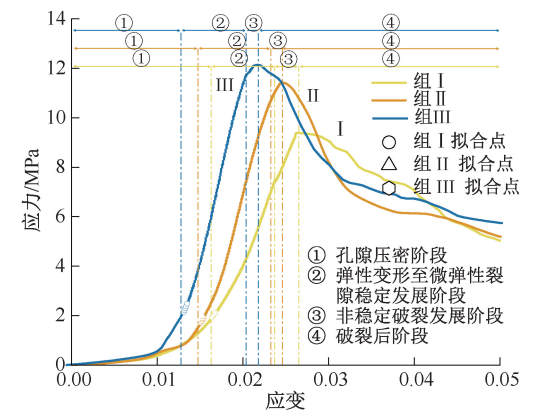


图 4 低 f 下 PSES 典型应力-应变曲线

Fig. 4 Typical stress-strain curves of low-porosity PSES

中得到的 E_p 用于后续模型验证与分析。

表 3 低 f 下 PSES 的 E_c 及 E_p

Table 3 E_c and E_p of PSES under low-porosity MPa		
序号	E_c	E_p
1	456.80	652.47
2	667.20	
3	833.40	

综上,选取统一的基体材料参数($E_p=652.47$ MPa、 $\nu_m=0.26$),结合式(8)一式(15),计算可得不同 f 下的 E 和 ν ,各组结果见表 4。

表 4 PSES 参数汇总

Table 4 PSES parameter summary					
序号	E_p /MPa	ν_m	f /%	E /MPa	ν
1	652.47	0.26	34.31	318.65	0.24
2			35.61	309.33	0.24
3			36.52	302.92	0.24
4			38.83	287.02	0.24
5			39.04	285.60	0.24

结果表明:随着 f 由 34.31% 增加至 39.04%,半经验 M-T 模型预测的 E 从 318.65 MPa 下降至 285.60 MPa,表明孔隙显著削弱了材料刚度。相比

之下, ν 维持在 0.24,变化较小,说明 f 的变化对材料横向变形能力影响较小。

不同 f 下 PSES 材料的应力-应变曲线如图 5 所示。对图 5 中②阶段应力-应变曲线段进行线性回归拟合,得到各组实测有效杨氏模量 E_s 。图 6 给出了 E_s 与 E 的对比结果,5 组误差均控制在合理范围内(最大为 5.85%,最小仅为 0.01%),说明 f 增大显著削弱了刚度, f 为宏观刚度的决定性因素。其中, $f=34.31\%$ 与 36.52% 时,误差较高(5.85%、4.09%);其余组较小。主要误差来自模型的细观理想化:未计入孔径分布、孔形不规则与孔壁非均匀,且弹性阶段也可能存在微小非弹性损伤;制备温度虽部分由 f 所反映,仍可能间接影响误差。

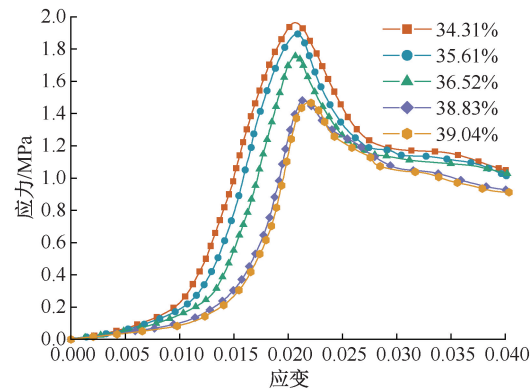


图 5 不同 f 下 PSES 材料的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of PSES at different f

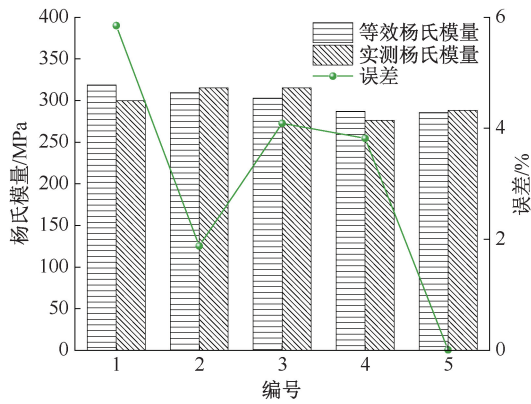


图 6 不同 f 下的 E 与 E_s 对比

Fig. 6 Comparison of E and E_s at different f

2.3 CDP 力学模型分析

图 7 展示了 f 与 E 曲线,利用式(19)对其进行非线性拟合,得到拟合曲线:

$$E(f) = 862.95 \times (1 - 1.03x^{0.46}) \quad (23)$$

拟合结果显示,该模型与半经验 M-T 模型数据高度吻合(决定系数 $R^2 = 99.99\%$);拟合参数 $E_0 =$

862.95 MPa($f=0$ 下的名义基体模量); $\alpha = 1.03$, $q=0.46$ 。以式(23)修正 CDP 模型中的初始模量, 作为损伤前刚度输入。依据图 5 的应力-应变曲线并结合式(23)反演损伤变量 $d(\varepsilon)$; 鉴于峰前损伤很小, 取峰值处应变为损伤起点计算损伤变量。

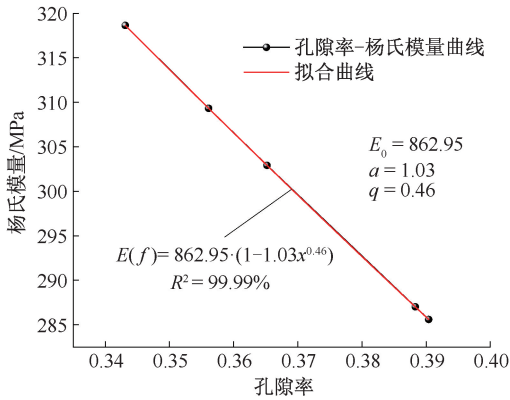


图 7 孔隙率-杨氏模量曲线

Fig. 7 Porosity-Young's modulus curve

采用 f 修正的 CDP 损伤因子模型计算 PSES 的 $d(\varepsilon)$ 时出现初值偏高, 与标准 CDP 模型 (初始损伤=0) 不一致, 由于泡孔生长导致的空间不均匀性与尺度分布特征, 对 $d(\varepsilon)$ 归一化, 见下式:

$$d^*(\varepsilon) = \frac{d(\varepsilon) - d_p}{1 - d_p} \quad (24)$$

式中: $d^*(\varepsilon)$ 为归一化损伤变量; d_p 为初始损伤。图 8 展示了不同 f 下的 $d^*(\varepsilon)$ 。

由图 8 可知: 随着 ε 增大, $d^*(\varepsilon)$ 由 0 向 1 靠近, 增速趋缓, 表明损伤演化趋于平稳; $d^*(\varepsilon)$ 上升对应

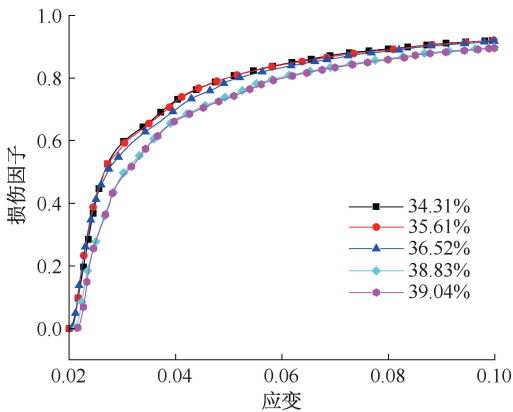


图 8 损伤因子-应变曲线

Fig. 8 Damage factor-strain curve

微裂纹扩展并可能贯通, 开启渗流通道、降低密封性。为表征多孔结构的协同弱化, 引入 $\gamma(f)$ 见下式:

$$\gamma(f) = 1 - 1.515f^{0.733} \quad (25)$$

将式(23)一式(25)代入式(20), 可得 PSES 后的 CDP 损伤曲线模型, 损伤模型见下式:

$$\sigma(\varepsilon, f) = (1 - 1.515f^{0.733}) \times (1 - d^*(\varepsilon)) \times (1 - 1.03f^{0.46}) \times 862.95 \times \varepsilon \quad (26)$$

图 9 比较了不同 f 下的孔隙-损伤耦合 CDP 模拟破坏曲线(虚线)与试验曲线(实线)。两者整体下降趋势高度吻合, 峰值相对误差 (Peak Relative Error, PRE) 均 < 3% (0.23% ~ 2.76%), 由表 5 可知: 5 组均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) < 0.03 MPa, 平均绝对百分比误差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) < 3% (0.23% ~ 2.69%), 表现出良好的模型相关性, 式(26)能在不同 f 下准确再现应力-应变历程。

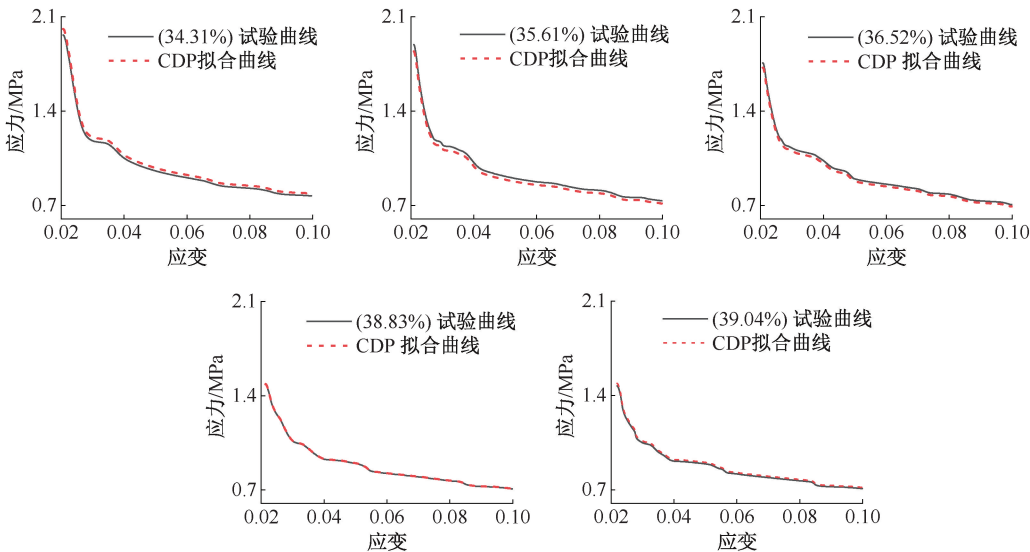


图 9 不同 f 下的 CDP 模拟破坏曲线与试验曲线对比

Fig. 9 Experimental curves vs. CDP-simulated failure curves for PSES under different f

表 5 试验曲线与 CDP 拟合误差

Table 5 Experimental curves and CDP fitting errors				
序号	MSE	PRE/%	RMSE/MPa	MAPE/%
1	6.57×10^{-4}	2.24	0.026	2.29
2	8.59×10^{-4}	2.76	0.029	2.69
3	5.81×10^{-4}	2.02	0.021	1.98
4	5.07×10^{-6}	0.23	0.002	0.23
5	3.55×10^{-4}	1.27	0.019	1.28

3 结 论

1) 微观分析表明:泡孔内壁为 PSES 结构中的薄弱结构,其临界外压反映的是最薄泡孔在外压作用下发生的局部早期屈服行为,可作为微观响应的

起始指标,用于判断结构稳定状态,并为堵漏材料在微观层面的性能评估与寿命预测提供理论基础。

2) 基于半经验 M-T 模型所得 PSES 的预测等效有效模量与实测误差较小。尽管孔隙率增加会降低刚度,但泊松比基本稳定,表明其横向变形能力受限较小。刚度与泊松比协同决定结构致密性,该模型可为堵漏风性能评估与材料设计提供细观层面理论支撑。

3) 基于孔隙率修正的 CDP 模型在宏观尺度上再现了 PSES 的应力-应变破坏曲线,可用于复杂井下应力条件下判断堵漏风材料的密封适用性与损伤演化,从而为 PSES 在堵漏风工程中的安全设计提供可靠依据,确保有效防治煤自燃。

参 考 文 献

[1] 鲁义, 陈健, 邵淑珍, 等. 再生顶板煤自燃漏风裂隙控制机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2):795-805.
LU Yi, CHEN Jian, SHAO Shuzhen, et al. Control mechanism of air leakage cracks at regenerated roof with coal spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2):795-805.

[2] 吴芳华, 施式亮, 鲁义, 等. 磷石膏基自产气膨胀浆体防灭火性能研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 148-154.
WU Fanghua, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Fire prevention and extinguishing performance of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3):148-154.

[3] 丁仰卫, 杨海龙, 鲁义, 等. 磷石膏自产气膨胀浆体自膨胀扩散特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(7): 82-90.
DING Yangwei, YANG Hailong, LU Yi, et al. Study on spontaneous expansion and diffusion characteristics of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7):82-90.

[4] 温小韵, 童雄, 尚江涛, 等. 磷石膏基胶凝材料的力学性能及应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(3): 953-969.
WEN Xiaoyun, TONG Xiong, SHANG Jiangtao, et al. Progress on application and mechanical properties of phosphogypsum cementitious materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(3):953-969.

[5] 周程涛, 陈波, 高志涵, 等. 考虑异形孔的泡沫混凝土单轴压缩离散元模拟[J]. 复合材料学报, 2024, 41(7): 3 726-3 736.
ZHOU Chengtao, CHEN Bo, GAO Zhihan, et al. Discrete element simulation of foam concrete under uniaxial compression considering nonspherical pores[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(7):3 726-3 736.

[6] 李方贤, 余其俊, 罗云峰, 等. 泡沫混凝土气孔结构数学表征及其分析[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(6): 1 205-1 210.
LI Fangxian, YU Qijun, LUO Yunfeng, et al. Mathematical description and analysis on characteristics of pore structure for foam concrete[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(6):1 205-1 210.

[7] 刘子琦, 陈刚, SU Zhoucheng, 等. 基于细观力学和机器学习的纤维增强复合材料热-力多物理性能预测[J/OL]. 复合材料学报:1-17. [2025-03-12]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250312.001>.
LIU Ziqi, CHEN Gang, SU Zhoucheng, et al. Thermo-mechanical multiphysical properties prediction of fiber-reinforced

- composites based on micromechanics and machine learning[J/OL]. *Acta Materiae Compositae Sinica*;1-17. [2025-03-12]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250312.001>.
- [8] MORI T, TANAKA K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions[J]. *Acta Metallurgica*, 1973, 21(5):571-574.
- [9] 彭鹏, 彭峰, 孙振宇, 等. 基于分形理论和 Mori-Tanaka 方法的颗粒土渗透注浆加固性能预测方法及应用[J]. *力学学报*, 2022, 54(11):3 099-3 112.
- PENG Peng, PENG Feng, SUN Zhenyu, et al. Property prediction methods of granular soil penetration grouting reinforced body based on fractal theory and Mori-Tanaka method[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(11):3 099-3 112.
- [10] GAO Yuan, CHENG Yin, CHEN Jianzhuang. Experimental study and 3-D meso-scale discrete element modeling on the compressive behavior of foamed concrete[J]. *Buildings*, 2023, 13(3):DOI:10.3390/buildings13030674.
- [11] JING Mao, NI Guanhua, XU Yuhang, et al. Modeling and optimization of mechanical properties of drilling sealing materials based on response surface method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 377:DOI:10.1016/j.jclepro.2022.134452.
- [12] DONG Kai, NI Guanhua, XU Yuhang, et al. Effect of optimized pore structure on sealing performance of drilling sealing materials in coal mine[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 274:DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121765.
- [13] 杨澜, 蹇开林, 张亮. 凹凸边界形状热弹性问题的自适应无网格法[J]. *重庆大学学报*, 2022, 45(12):36-47.
- YANG Lan, JIAN Kailin, ZHANG Liang. Adaptive meshless method for thermoelastic problems with concave convex boundary[J]. *Journal of Chongqing University*, 2022, 45(12):36-47.
- [14] XIE Jun, SHI Pengpeng, LI Fengjun. Exact solutions for the symmetric elastoplastic response of functionally graded pressure vessels[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 192:DOI:10.1016/j.tws.2023.111165.
- [15] QU Jianmin, CHERKAoui M. *Fundamentals of Micromechanics of Solids*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd, 2006: 154-195.
- [16] 苏杰. 原位自生颗粒增强铝基复合材料细观力学行为研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2022.
- SU Jie. *Research on micromechanics behavior of in-situ particle reinforced aluminum matrix composites*[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2022.



作者简介: 鲁义 (1986—),男,江西新干人,博士,教授,主要从事矿山防灭火方面的研究。E-mail: luyijx@163.com。