

# 不同纤维掺量磷石膏胶结体损伤特性及本构模型研究\*

张卫中, 唐杰, 孔德华, 康钦容

(武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430060)

**摘要:** 为了提高磷石膏胶结体的强度及韧性, 开展了掺纤维提高磷石膏胶结体力学强度特性的试验, 对聚丙烯纤维含量分别为0、0.5%、0.75%、1%、1.25%的磷石膏基复合胶结体损伤规律进行了研究。研究发现: (1) 随着聚丙烯纤维掺量的增大, 磷石膏胶结体的峰值应变与抗压强度均呈现一定程度的提升, 抗压强度与弹性模量均呈先增大后减小的趋势, 最优纤维掺入量为0.75%; (2) 不同纤维掺量的胶结体试件其应力-应变曲线具有相似形态, 而掺纤维胶结体与普通磷石膏胶结体在应力-应变曲线上的差别表明, 纤维的掺入能提高胶结体的峰后残余强度以及韧性, 可明显改善磷石膏胶结体的抗压强度特性; (3) 基于应变等价理论、统计损伤理论, 引入了5种损伤修正系数, 推导出了掺纤维磷石膏胶结体单轴受压损伤本构模型, 建立了不同纤维掺量下磷石膏胶结体的单轴受压损伤本构方程及损伤演化方程; (4) 将理论曲线与试验曲线对比, 发现各曲线具有相似形态, 且二者在峰值处吻合度较好, 表明所建立的理论本构模型对不同纤维掺量磷石膏胶结体的分析和研究具有一定的参考价值。研究成果可为磷石膏基复合材料在固废胶结充填现场的应用提供一定的理论支撑。

**关键词:** 磷石膏胶结体; 聚丙烯纤维; 本构模型; 损伤演化; 抗压强度

**中图分类号:** TD853.34 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-2763(2024)06-0104-08

## 0 引言

随着对磷矿资源开发力度的加大以及磷化工产业的迅速发展, 副产品磷石膏大量堆积。大规模的磷石膏堆积不仅占用大量土地资源, 而且污染环境。将磷石膏和胶结材料按照特定比例混合后加水, 便能制成磷石膏胶结材料, 该材料可用于填充井下采空区, 不仅可以保障井下安全开采, 还

可以对磷石膏进行综合利用, 提高采空区治理的效果<sup>[1-2]</sup>。但磷石膏胶结体存在强度低、稳定性差、抗裂性能差等问题。为了提高充填体的力学性能, 将一些化学试剂和合成纤维添加到充填材料中, 改善充填体的力学性能<sup>[3-4]</sup>。在种类繁多的纤维材料中, 聚丙烯纤维作为一种价格低廉、性价比高的材料, 具有提升磷石膏胶结体的稳定性和抗裂性等的性能。

目前, 在采矿工程应用领域, 以水泥、粉煤灰、全尾砂等作为主要充填原料在充填采矿工艺中被广泛运用<sup>[5]</sup>。国内外不少学者通过对纤维增强尾砂胶结充填体的力学性能进行大量研究, 证明了纤维在尾砂胶结充填中的可行性, 并取得丰硕成果<sup>[6-7]</sup>。YI等<sup>[8]</sup>通过离心试验研究了掺聚丙烯纤维的膏体充填体的稳定性, 发现聚丙烯纤维能够减少充填体侧向揭露时的表面塌落程度。CHEN等<sup>[9]</sup>使用正交试验法, 基于水泥含量、固体质量浓度、聚丙烯纤维含量和长度等因素对尾砂胶结充填体的力学性能进行了研究, 发现在尾砂充填体中添加聚丙烯纤维能显著提高充填体的延展性和抗压强度。CAO等<sup>[10]</sup>通过研究玻璃纤维、聚丙烯纤维和聚丙烯腈纤维对早龄期尾砂胶结充填体微观作用机理及抗压强度的影响, 发现随着纤维掺量的提高, 尾砂胶结充填体的抗压性能得到了明显提升, 不同纤维类型对尾砂胶结充填体的增强效果不同。崔秀丽等<sup>[11]</sup>通过正交试验探究了聚丙烯纤维对水泥基充填体强度性能的影响, 发现在一定的充填体尺寸下, 适当的纤维掺量和长度能够提高充填体的力学性能。CHEN等<sup>[12]</sup>对尾砂胶结充填体的抗拉强度和延展性进行了研究, 发现

\* 收稿日期: 2023-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52174086)。

作者简介: 张卫中(1977—), 男, 河南驻马店人, 教授, 博士(后), 主要从事采矿技术和矿山安全方面的教学和科研工作, E-mail: wzzhang1120@126.com。

通信作者: 康钦容(1980—), 女, 重庆永川人, 博士, 副教授, 主要从事矿山安全方面的教学和科研工作, E-mail: kang801118@163.com。

聚丙烯纤维本身具有一定的抗拉强度,掺入后可有效提升试样的抗拉强度和延展性。上述研究成果为纤维增强磷石膏基胶结体力学性能的研究提供了方向,但由于磷石膏胶结材料与常规尾砂胶结材料有所不同,在磷石膏胶结复合材料中掺加纤维,是否能够有效提高胶结体强度和抑制裂缝的发育与扩展,还需进一步试验与论证。

目前,对于同时掺入纤维和矿物掺合料来替代部分水泥制备磷石膏胶结填充料的研究还不够深入和系统。因此,本文通过正交设计的单轴压缩试验,分析掺纤维磷石膏胶结体的力学特性变化,基于应变等价理论、统计损伤理论,构建不同纤维掺量磷石膏胶结体的损伤本构方程与损伤演变方程,并验证本构模型的正确性,分析聚丙烯纤维掺入量对磷石膏胶结体力学性能的影响。

表 1 聚丙烯纤维的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of polypropylene fibers

类型	长度/mm	直径/ $\mu\text{m}$	密度/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%	耐酸碱性	分散性
束状单丝	9	32.7	0.91	469	4.24	28.4	极强	极好

## 1.2 胶结体强度规律分析

不同纤维掺量胶结体试件的抗压强度  $R$  及相对于无掺纤维试件抗压强度的提高率  $\omega$  见表 2。由表 2 可知,不同纤维掺量胶结体抗压强度由高到低排序为  $R_{0.75\%} > R_{1\%} > R_{0.5\%} > R_{1.25\%} > R_0$ ,当纤维掺量为 0.75% 时,复合胶结体抗压强度最大。聚丙烯纤维对磷石膏胶结体的抗压强度具有明显的增强作用。随着纤维的加入,掺纤维胶结体试件的抗压强度相较于无纤维胶结体试件抗压强度呈现出一定的增长趋势,抗压强度呈现先增大后减小的趋势,纤维的最佳掺量为 0.75%,当掺量超过 0.75% 时,抗压强度有所下降。因此,合理的聚丙烯纤维掺量对于磷石膏胶结体的抗压强度影响至关重要,并不是掺量越大对胶结体抗压强度增强效果就越好。

表 2 磷石膏胶结体抗压强度测试结果

Table 2 Test results of compressive strength of phosphogypsum cementation body

纤维掺量/%	抗压强度 $R/\text{MPa}$	抗压强度提高率 $\omega/\%$
0	3.458	0
0.50	4.437	30.2
0.75	4.588	32.7
1.00	4.502	28.3
1.25	3.859	11.6

## 1 胶结体力学试验与损伤特性分析

### 1.1 磷石膏胶结体力学试验

试验采用磷石膏、P·O 42.5 硅酸盐水泥、粉煤灰、聚丙烯纤维、生石灰等材料配制磷石膏胶结体试件。聚丙烯纤维(PP)呈束状单丝状,具有良好的耐酸碱性能,其物理力学参数见表 1。

采用  $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的圆柱体模具,制备聚丙烯纤维掺量分别为 0、0.5%、0.75%、1%、1.25% 的复合磷石膏胶结体试件。料浆质量浓度为 68%,水泥:粉煤灰:磷石膏质量比为 1:1:6,试验纤维长度为 9 mm。将制备的试件置于标准养护箱(温度 20  $^{\circ}\text{C}$ ,湿度 95%)中养护 28 d 后,用 WAW-200 型微机控制的伺服压力试验机测定磷石膏胶结体的单轴抗压强度。

图 1 为不同纤维掺量下胶结体峰值强度与峰值强度所对应的应变之间的关系。峰值应变能够反映胶结体试件在极限强度条件下的变形特征。由图 1 可知,随着纤维掺量的增加,峰值应变呈逐渐增大的趋势,当纤维掺量为 1.25% 时达到最大,峰值应变为 0.035 70。最佳纤维掺量 0.75% 下的峰值应变(0.027 08)与普通磷石膏胶结体峰值应变(0.019 27)相比提高了 40.5%。

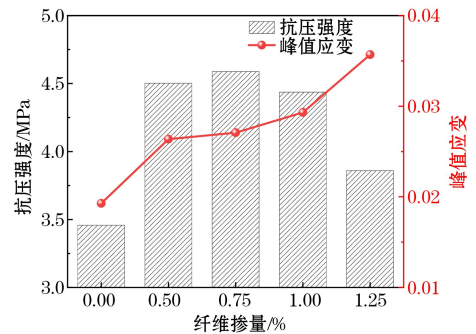


图 1 纤维掺量对峰值应变的影响

Fig. 1 Effect of fiber incorporation on peak strain

图 2 为不同纤维掺量下磷石膏基复合胶结体峰值强度与弹性模量之间的关系,试件的弹性变形程度可以通过弹性模量来衡量,当弹性模量值越大时,材料的刚度也就越高,因此试件发生变形所需的应

力也会更大。由图 2 可知,随着聚丙烯纤维掺量的增大,胶结体抗压强度与弹性模量呈先增大后减小的趋势,当纤维掺量达到 1.25% 时,掺纤维胶结体的弹性模量比无纤维胶结体的弹性模量更低。在最佳纤维掺量 0.75% 下弹性模量(237.29 MPa)与普通磷石膏胶结体弹性模量(203.98 MPa)相比提高了 16.3%。

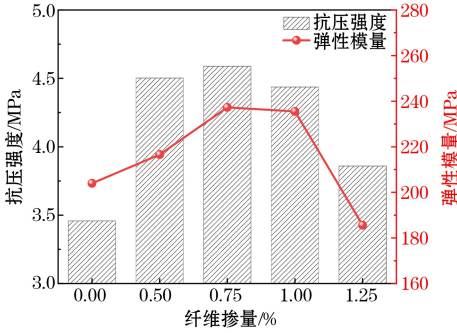


图 2 纤维掺量对弹性模量的影响

Fig.2 Effect of fiber incorporation on the elastic modulus

综上所述,纤维的加入能够明显提升磷石膏胶结体的峰值应变与抗压强度,宏观表现为胶结体在受压过程中,可明显延缓试件的压缩变形。而过量的纤维则会降低磷石膏胶结体的初始弹性模量,这是因为聚丙烯纤维本身具有一定的弹性模量,但掺入纤维的同时会降低胶结料浆的流动性,增大胶结体内部孔隙率和缺陷,从而削弱试件本身的弹性模量,当过量纤维加入时,胶结体试件本身的弹性模量被降低,综合呈现负效应。因此综合考虑经济性与实用性等因素,在本试验方案中设定的纤维掺量梯度范围,0.75% 的纤维掺量被证明为最佳选择。

### 1.3 应力-应变曲线分析

根据试验得出磷石膏胶结体单轴载荷下应力-应变曲线如图 3 所示。由图 3 可知,磷石膏胶结体变形损坏演化特征大致可分为以下 4 个阶段。

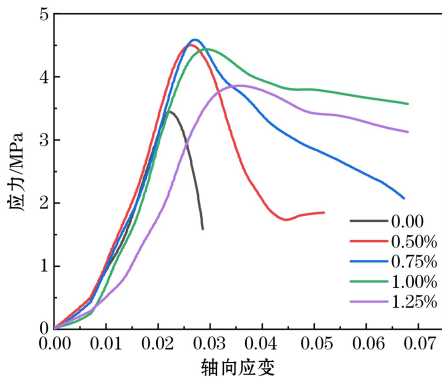


图 3 磷石膏胶结体受压应力-应变曲线  
Compressive stress-strain curves of  
phosphogypsum cementation body

第 1 阶段为压实阶段。该阶段曲线呈“下凹形”,为非线性。纤维掺量越多的胶结体应力-应变曲线在该阶段表现越明显,而少掺或未掺纤维的胶结体应力-应变曲线在此阶段表现的越不明显。这是因为纤维掺入过多后,纤维在胶结体内部出现团聚、交联,影响了试样的致密性。

第 2 阶段为弹性阶段。该阶段曲线呈近似直线形,掺纤维胶结体与普通胶结体压应力随着应变值的增加呈线性增加的趋势相似。掺少量纤维胶结体的曲线上升斜率比无纤维胶结体明显要大,其主要原因是该阶段胶结体内部裂纹已经开始萌生与扩展,少量纤维的加入在一定程度上提高了胶结体的强度。

第 3 阶段为发育阶段。该阶段曲线呈“上凸形”,曲线的斜率随着荷载的增加而逐渐减小至 0,该处为胶结体的峰值抗压强度。纤维的掺入可提高磷石膏基复合胶结体试块破坏时的峰值应力,掺量为 1% 的曲线明显高于其他 4 条曲线,说明掺量为 1% 对磷石膏基复合胶结体的增强效果最好。

第 4 阶段为峰后破坏阶段。此阶段普通胶结体的应力-应变曲线在峰值强度过后陡落,而掺纤维胶结体应力-应变曲线变得相对平缓,纤维掺量越多的胶结体在峰后维持较长应力不下降的变形越明显,这说明纤维能极大地增强胶结体的韧性。

## 2 胶结体损伤本构模型的构建

### 2.1 损伤方程建立

将磷石膏胶结体的破坏视为连续过程,在一维弹性情况下,根据 Lemaitre 应变等价原理<sup>[13-14]</sup>,建立损伤本构关系:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \quad (1)$$

式中, $\sigma$ 、 $E$ 、 $\varepsilon$  分别为磷石膏胶结体的应力、弹性模量、应变值; $D$  为磷石膏胶结体损伤值,当  $D=0$  时,表示胶结体无损伤,当  $D=1$  时,表示胶结体已经完全破坏。引入损伤修正系数  $\mu$  ( $0 < \mu \leq 1$ ) 来表征掺纤维磷石膏胶结体的峰后承载能力,在式(1)的基础上引入  $\mu$ ,可得:

$$\sigma^* = E\varepsilon(1 - \mu D) \quad (2)$$

式中, $\sigma^*$  为有效应力。

假定磷石膏胶结体的微元破坏概率服从 Weibull 分布,其概率密度函数  $P(F)$  为<sup>[15]</sup>:

$$P(F) = \frac{a}{b} \cdot \left(\frac{F}{b}\right)^{a-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{F}{b}\right)^a\right] \quad (3)$$

式中,  $a, b$  分别为 Weibull 分布中的形状参数和尺度参数( $a, b$  均大于 0);  $F$  为胶结体微元体强度分布变量, 本文以应变为变量。由式(3)可得出磷石膏胶结体的损伤值  $D$  [16]:

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{b}\right)^a\right] \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)可得到磷石膏胶结体统计损伤方程式:

$$\sigma^* = E\varepsilon(1 - \mu D) = E\varepsilon \left\{ 1 - \mu \left[ 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{b}\right)^a\right] \right] \right\} = E\varepsilon \left\{ 1 - \mu + \mu \cdot \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{b}\right)^a\right] \right\} \quad (5)$$

根据磷石膏胶结体试件单轴压缩试验得到的应力-应变关系曲线可知几何边界条件为:

$$\begin{cases} \varepsilon = 0, \sigma = 0 \\ \varepsilon = \varepsilon_p, \sigma = \sigma_p \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_p, \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0 \\ D = 0, \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\sigma_p$  为磷石膏胶结体应力峰值;  $\varepsilon_p$  为磷石膏胶结体应力峰值处的应变值。

将边界条件式(6)、式(7)和式(5)联立, 为方便运算, 可令 [17]:

$$l = \frac{\mu^2 - 2\mu + 1 + \mu \sigma_p / (E \varepsilon_p)}{\mu^2 - \mu + \mu \sigma_p / (E \varepsilon_p)} \quad (8)$$

可得出分布参数  $a$  和  $b$ :

$$a = -\frac{l}{\ln\left(\frac{\sigma_p}{E\varepsilon_p} + \mu - 1\right)} \quad (9)$$

$$b = \left(\frac{a \varepsilon_p^a}{l}\right)^{\frac{1}{a}} \quad (10)$$

将式(9)、式(10)代入式(5)进行验算, 检验符合要求, 最终得到损伤本构方程与损伤演变方程:

$$\sigma^* = E\varepsilon \left\{ 1 - \mu + \mu \cdot \exp\left[-\frac{l}{a} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}\right)^a\right] \right\} \quad (11)$$

$$D = 1 - \exp\left[-\frac{l}{a} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}\right)^a\right] \quad (12)$$

从式(11)和式(12)中可以看出, 只需测量磷石膏胶结体的峰值应力、峰值应变和弹性模量这 3 个值即可构造出不同纤维掺量磷石膏胶结体的损伤本构方程及演化方程。因此通过分析图 3 中磷石膏胶

结体单轴压缩试验应力-应变曲线的斜率, 可计算出弹性模量  $E$ 、峰值应力  $\sigma_p$  以及峰值应力所对应的应变值  $\varepsilon_p$ , 代入式(9)和式(10)得出 5 种不同修正系数  $\mu$  下的分布参数  $a$  和  $-l/a$ , 见表 3。

表 3 掺纤维磷石膏胶结体损伤本构模型参数

Table 3 Parameters of the constitutive model of phosphogypsum cementation body damage

纤维掺量/%	峰值应力/MPa	峰值应变	弹性模量/MPa	$\mu$	$a$	$-l/a$
0	3.458	0.019 27	203.98	1	7.599	-0.1316
0.50	4.503	0.026 37	216.58	1	4.207	-0.2377
				0.97	3.766	-0.2765
				0.94	3.433	-0.3169
				0.91	3.181	-0.3590
0.75	4.588	0.027 08	237.29	1	3.004	-0.3369
				0.97	2.751	-0.3798
				0.94	2.586	-0.4246
				0.91	2.458	-0.4716
1.00	4.437	0.029 31	235.47	1	2.263	-0.4418
				0.97	2.143	-0.4900
				0.94	2.057	-0.5397
				0.91	1.990	-0.5926
1.25	3.859	0.035 70	185.58	1	1.850	-0.5404
				0.97	1.780	-0.5933
				0.94	1.729	-0.6491
				0.91	1.696	-0.7083
				0.88	1.679	-0.7711

将表 3 中参数代入式(11)、式(12)中, 可得到单轴压缩下不同纤维掺量磷石膏胶结体的损伤本构方程和损伤演化方程, 见表 4。

## 2.2 理论模型验证与分析

根据表 4 绘制不同纤维掺量磷石膏胶结体应力-应变理论曲线, 如图 4 所示。由图 4 可以看出, 各掺量胶结体试样理论曲线和试验曲线在峰值处吻合度较好, 尽管在峰前部分的吻合度一般, 但由于胶结体在压密阶段的时间较短 [18], 整体上的变化趋势依然是一致的。不同纤维掺量的各修正系数模型曲线具有一定的相似性, 表现为在峰前阶段  $\mu$  对曲线无明显影响, 峰值处强度随着  $\mu$  的减小而减小, 峰后阶段残余强度随  $\mu$  的减小而增大。各纤维掺量胶结体在不同  $\mu$  下的残余强度相差较大, 说明  $\mu$  主要表征胶结体峰后强度阶段。

表 4 掺纤维磷石膏胶结体损伤本构及演化方程

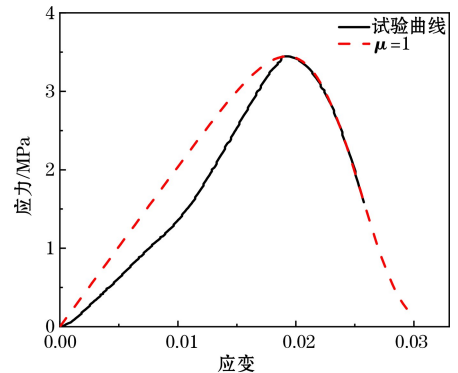
Table 4 Injury constitutive and evolution equations of fiber-doped phosphogypsum cementation body

纤维掺量/%	修正系数 $\mu$	损伤本构方程 $\sigma$	损伤演化方程 $D$
0	1.00	$\sigma = 203.98\epsilon \cdot \exp[-0.1316(\epsilon/0.019\ 27)^{7.599}]$	$D = 1 - \exp[-0.1316(\epsilon/0.019\ 27)^{7.599}]$
0.5	1.00	$\sigma = 216.58\epsilon \cdot \exp[-0.2377(\epsilon/0.026\ 37)^{4.207}]$	$D = 1 - \exp[-0.2377(\epsilon/0.026\ 37)^{4.207}]$
	0.97	$\sigma = 216.58\epsilon[0.03 + 0.97\exp[-0.2765(\epsilon/0.026\ 37)^{3.7655}]]$	$D = 1 - \exp[-0.2765(\epsilon/0.026\ 37)^{3.7655}]$
	0.94	$\sigma = 216.58\epsilon[0.06 + 0.94\exp[-0.3169(\epsilon/0.026\ 37)^{3.433}]]$	$D = 1 - \exp[-0.3169(\epsilon/0.026\ 37)^{3.433}]$
	0.91	$\sigma = 216.58\epsilon[0.09 + 0.91\exp[-0.3590(\epsilon/0.026\ 37)^{3.181}]]$	$D = 1 - \exp[-0.3590(\epsilon/0.026\ 37)^{3.181}]$
	0.88	$\sigma = 216.58\epsilon[0.12 + 0.88\exp[-0.4029(\epsilon/0.026\ 37)^{2.988}]]$	$D = 1 - \exp[-0.4029(\epsilon/0.026\ 37)^{2.988}]$
0.75	1.00	$\sigma = 237.29\epsilon \cdot \exp[-0.3369(\epsilon/0.027\ 08)^{3.004}]$	$D = 1 - \exp[-0.3369(\epsilon/0.027\ 08)^{3.004}]$
	0.97	$\sigma = 237.29\epsilon[0.03 + 0.97\exp[-0.3798(\epsilon/0.027\ 08)^{2.751}]]$	$D = 1 - \exp[-0.3798(\epsilon/0.027\ 08)^{2.751}]$
	0.94	$\sigma = 237.29\epsilon[0.06 + 0.94\exp[-0.4246(\epsilon/0.027\ 08)^{2.586}]]$	$D = 1 - \exp[-0.4246(\epsilon/0.027\ 08)^{2.586}]$
	0.91	$\sigma = 237.29\epsilon[0.09 + 0.91\exp[-0.4716(\epsilon/0.027\ 08)^{2.458}]]$	$D = 1 - \exp[-0.4716(\epsilon/0.027\ 08)^{2.458}]$
	0.88	$\sigma = 237.29\epsilon[0.12 + 0.88\exp[-0.5209(\epsilon/0.027\ 08)^{2.361}]]$	$D = 1 - \exp[-0.5209(\epsilon/0.027\ 08)^{2.361}]$
1	1.00	$\sigma = 235.47\epsilon \cdot \exp[-0.4418(\epsilon/0.029\ 31)^{2.263}]$	$D = 1 - \exp[-0.4418(\epsilon/0.029\ 31)^{2.263}]$
	0.97	$\sigma = 235.47\epsilon[0.03 + 0.97\exp[-0.4900(\epsilon/0.029\ 31)^{2.143}]]$	$D = 1 - \exp[-0.4900(\epsilon/0.029\ 31)^{2.143}]$
	0.94	$\sigma = 235.47\epsilon[0.06 + 0.94\exp[-0.5397(\epsilon/0.029\ 31)^{2.057}]]$	$D = 1 - \exp[-0.5397(\epsilon/0.029\ 31)^{2.057}]$
	0.91	$\sigma = 235.47\epsilon[0.09 + 0.91\exp[-0.5926(\epsilon/0.029\ 31)^{1.990}]]$	$D = 1 - \exp[-0.5926(\epsilon/0.029\ 31)^{1.990}]$
	0.88	$\sigma = 235.47\epsilon[0.12 + 0.88\exp[-0.6484(\epsilon/0.029\ 31)^{1.945}]]$	$D = 1 - \exp[-0.6484(\epsilon/0.029\ 31)^{1.945}]$
1.25	1.00	$\sigma = 185.58\epsilon \cdot \exp[-0.5404(\epsilon/0.0357)^{1.850}]$	$D = 1 - \exp[-0.5404(\epsilon/0.0357)^{1.850}]$
	0.97	$\sigma = 185.58\epsilon[0.03 + 0.97\exp[-0.5933(\epsilon/0.0357)^{1.780}]]$	$D = 1 - \exp[-0.5933(\epsilon/0.0357)^{1.780}]$
	0.94	$\sigma = 185.58\epsilon[0.06 + 0.94\exp[-0.6491(\epsilon/0.0357)^{1.729}]]$	$D = 1 - \exp[-0.6491(\epsilon/0.0357)^{1.729}]$
	0.91	$\sigma = 185.58\epsilon[0.09 + 0.91\exp[-0.7083(\epsilon/0.0357)^{1.696}]]$	$D = 1 - \exp[-0.7083(\epsilon/0.0357)^{1.696}]$
	0.88	$\sigma = 185.58\epsilon[0.12 + 0.88\exp[-0.7711(\epsilon/0.0357)^{1.679}]]$	$D = 1 - \exp[-0.7711(\epsilon/0.0357)^{1.679}]$

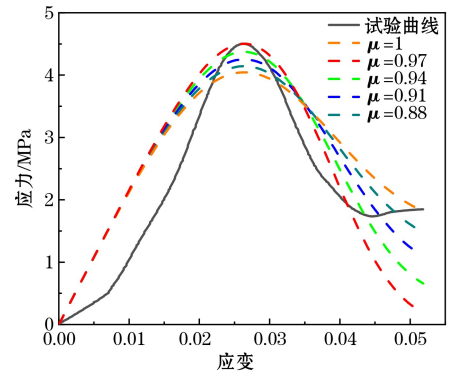
从图 4(a)和图 4(c)中可以看出,普通磷石膏胶结体在  $\mu=1$  时,峰值处与峰后阶段的理论曲线与试验曲线完全吻合。但掺纤维磷石膏胶结体在  $\mu=1$  时,不同纤维掺量磷石膏胶结体的应力应变理论曲线与试验曲线吻合度一般,随着  $\mu$  从 1 减小到 0.88,理论曲线峰值应力逐渐减小,0.75% 纤维掺量磷石膏胶结体峰值强度从 4.588 MPa 降至 4.130 MPa,降幅为 9.98%。在峰后阶段,理论曲线的变化趋势与峰值处表现完全相反,残余强度与  $\mu$  成反比关系,残余强度随着  $\mu$  的减少而增大,主要呈现出明显的“尾巴”翘起幅度较大的趋势。在  $\mu=1$  时,普通磷石膏胶结体与掺纤维磷石膏胶结体峰后强度曲线末尾值降到接近零,不再具有残余强度,与试验所得磷石膏胶结体应力-应变曲线相差很大。0.75% 纤维掺量磷石膏胶结体的  $\mu$  从 1 变化至 0.88 时,残余强度增至 2.077 MPa,与试验结果基本吻合。可知  $\mu$  对于胶结体应力-应变曲线的峰后阶段影响显著,但在弹性变形阶段并未产生明显变化。

图 5 为不同纤维掺量磷石膏胶结体损伤-应变关系曲线。从图 5 可以看出,普通磷石膏胶结体与掺纤维磷石膏胶结体的损伤发展曲线变化趋势相同,均呈近似于“S”形增长。即在达到峰值应变之前,损伤值增长速率较为缓慢,一旦达到峰值应变处

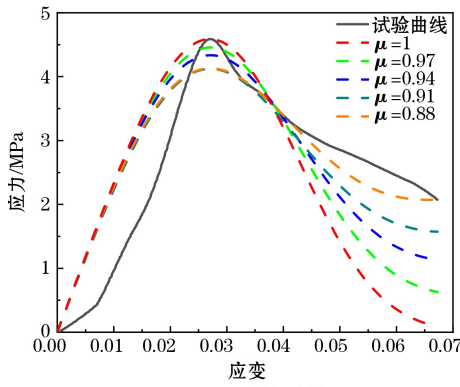
损伤值迅速增长,直到试件发生明显破坏,损伤曲线才趋于平缓,直至损伤值趋近于 1,磷石膏胶结体完全破坏;随着  $\mu$  的减小,胶结体峰值应变处的损伤值逐渐增大。



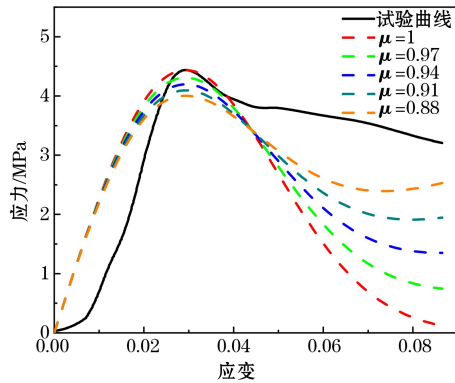
(a) 普通胶结体



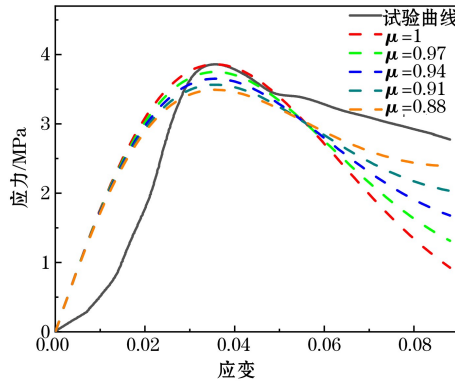
(b) 0.50% 纤维掺量



(c) 0.75% 纤维掺量



(d) 1.00% 纤维掺量



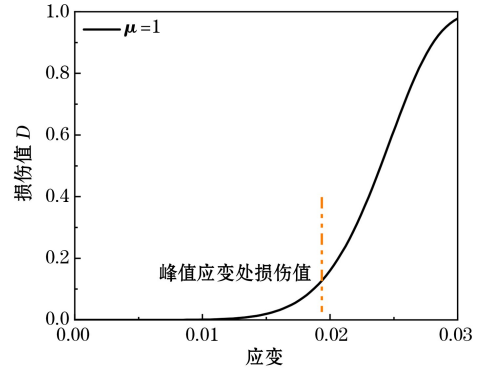
(e) 1.25% 纤维掺量

图 4 不同纤维掺量磷石膏胶结体应力-应变曲线

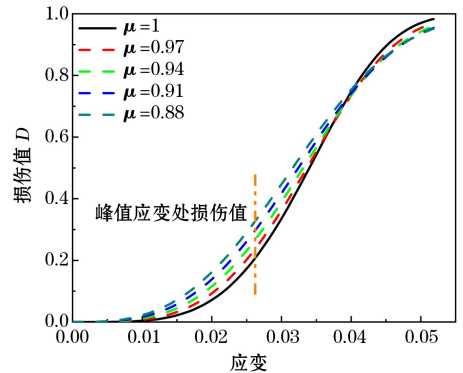
Fig.4 Stress-strain curves of phosphogypsum cementation body with different fiber contents

纤维掺量不同,磷石膏胶结体变形过程中的损伤程度也不相同。以  $\mu=0.88$  为例,0.5%纤维掺量磷石膏胶结体损伤值趋近于 1 时,应变值接近于 0.052,此时试件会发生显著的宏观破坏;0.75%纤维掺量磷石膏胶结体损伤值趋近于 1 时,应变接近于 0.074;而当 1%、1.25%纤维掺量磷石膏胶结体试件在应变达到 0.074 时,虽试件开始出现明显变形,但离损伤值 1 还有一定差距,可以看出试件仍具有一定的承载能力。由此可以看出,纤维增

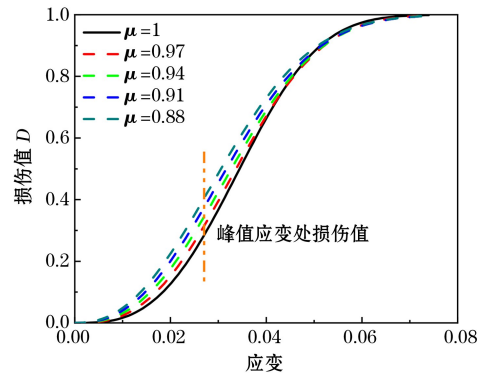
强了磷石膏胶结体的承载能力,进一步表明磷石膏胶结体峰后残余强度受聚丙烯纤维掺量的影响。



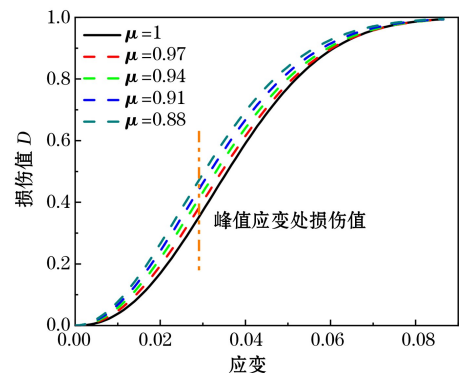
(a) 普通胶结体



(b) 0.50% 纤维掺量



(c) 0.75% 纤维掺量



(d) 1.00% 纤维掺量

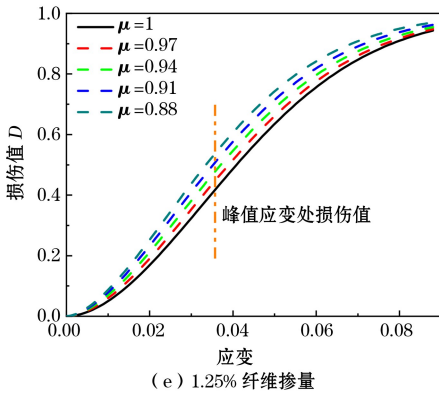


图5 不同纤维掺量磷石膏胶结体损伤-应变曲线

Fig.5 Injury-strain curves of different fiber contents of phosphogypsum cementation body

### 3 结论

本文通过对不同纤维掺量磷石膏胶结体损伤特性及本构模型进行了系统研究,得出主要结论如下。

(1) 在添加聚丙烯纤维的情况下,不同掺量纤维胶结体相较于无纤维胶结体的抗压强度和峰值应变都有一定程度提升,但过量的纤维则会降低其初始弹性模量,弹性模量呈先增大后减小的趋势。试验表明,0.75%的纤维掺量为最佳选择。

(2) 不同纤维掺量的胶结体试件应力-应变曲线具有相似形态。而掺纤维胶结体应力-应变曲线与普通磷石膏胶结体的差别表明,纤维的掺入能提高胶结体的峰后残余强度以及韧性,可明显改善磷石膏胶结体的抗压强度特性。

(3) 基于应变等价理论、统计损伤理论,引入了5种损伤修正系数,推导出了掺纤维磷石膏胶结体单轴受压损伤本构模型,建立了不同纤维掺量下磷石膏胶结体的单轴受压损伤本构方程及损伤演化方程。

(4) 对于含有不同纤维掺量的胶结体试件,在修正损伤系数相同的条件下,各曲线具有相似形态。损伤修正系数数值越小,胶结体的峰后强度表现就越强;各纤维掺量胶结体损伤呈“S”形增长趋势,纤维掺量高的胶结体能够承受更大的变形,更好地发挥其承载能力。

(5) 通过对比分析试验曲线与理论曲线发现,在纤维掺量不变时,引入的损伤修正系数 $\mu$ 在峰前阶段对应力-应变曲线无明显影响,在峰值处强度随着 $\mu$ 的减小而减小;峰后阶段残余强度随 $\mu$ 的减小而增大,说明 $\mu$ 主要表征胶结体的峰后强度阶

段。随着损伤修正系数 $\mu$ 的减小,胶结体峰值应变处的损伤值逐渐增大。进一步表明了聚丙烯纤维增强了磷石膏胶结体的承载能力,且影响着磷石膏胶结体的峰后残余强度。而且,二者在峰值处吻合度较好,验证了所建立的不同纤维掺量下磷石膏胶结体的单轴受压损伤本构方程的准确性。

### 参考文献(References):

- [1] 刘星,张建飞.磷石膏对水泥基复合充填料浆的影响及水化机理研究[J].矿业研究与开发,2022,42(10):40-45.  
LIU Xing, ZHANG Jianfei. Effect of phosphogypsum on cement-based composite filling slurry and its hydration mechanism[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(10):40-45.
- [2] CHEN Q S, ZHANG Q L, QI C C, et al. Recycling phosphogypsum and construction demolition waste for cemented paste backfill and its environmental impact[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 186:418-429.
- [3] YANG L, YILMAZ E, LI J, et al. Effect of superplasticizer type and dosage on fluidity and strength behavior of cemented tailings backfill with different solid contents[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187:290-298.
- [4] YI X W, MA G W, FOURIE A. Compressive behaviour of fibre-reinforced cemented paste backfill[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2015, 43(3):207-215.
- [5] 陈杰,褚运凯,黄庆亨,等.高沙充填材料的流变特性研究[J].矿业研究与开发,2021,41(12):109-113.  
CHEN Jie, CHU Yunkai, HUANG Qingxiang, et al. Study on rheological characteristic of high-aeolian-sand filling materials[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(12):109-113.
- [6] 石静,王强.玻璃纤维增强水泥基尾砂胶结充填体力学性能试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(10):51-57.  
SHI Jing, WANG Qiang. Experimental study on mechanical properties of glass fiber reinforced cement-based tailings cemented backfill[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(10):51-57.
- [7] 赵康,宋宇峰,于祥,等.不同纤维作用下尾砂胶结充填体早期力学特性及损伤本构模型研究[J].岩石力学与工程学报, 2022, 41(2):282-291.  
ZHAO Kang, SONG Yufeng, YU Xiang, et al. Study on early mechanical properties and damage constitutive model of tailing-cemented backfill with different fibers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(2):282-291.
- [8] YI X W, MA G W, FOURIE A. Centrifuge model studies on the stability of fibre-reinforced cemented paste backfill stopes[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2018, 46(4):396-401.

- [9] CHEN X, SHI X Z, ZHOU J, et al. Compressive behavior and microstructural properties of tailings polypropylene fibre-reinforced cemented paste backfill [J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 211-221.
- [10] CAO S. Fiber type effect on strength, toughness and microstructure of early age cemented tailings backfill [J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 44-54.
- [11] 崔秀丽, 刘庆, 李广洲. 聚丙烯纤维对水泥基充填复合材料强度性能及破坏形态的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(8): 119-124.
- CUI Xiuli, LIU Qing, LI Guangzhou. Study of strength properties and damage morphology of polypropylene fibers on cement-based composite filling materials [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(8): 119-124.
- [12] CHEN X, SHI X Z, ZHOU J, et al. Influence of polypropylene fiber reinforcement on tensile behavior and failure mode of tailings cemented paste backfill [J]. IEEE Access, 2019(7): 69015-69026.
- [13] LEMAITRE J. Evaluation of dissipation and damage in metals submitted to dynamic loading [C]// Proceeding of International Conference of Mechanical Behavior of Materials, 1972.
- [14] 汪杰, 宋卫东, 谭玉叶, 等. 水平分层胶结充填体损伤本构模型及强度准则 [J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1731-1739.
- WANG Jie, SONG Weidong, TAN Yuye, et al. Damage constitutive model and strength criterion of horizontal stratified cemented backfill [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1731-1739.
- [15] 李树春, 许江, 王鸿, 等. 岩石损伤统计本构模型及其参数确定的研究 [J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(2): 6-8.
- LI Shuchun, XU Jiang, WANG Hong, et al. Research on statistical damage constitutive model of rock and determination of its parameters [J]. Mining Research and Development, 2007, 27(2): 6-8.
- [16] 周科平, 刘维, 周彦龙, 等. 不同渗透力的类充填体力学特性及损伤软化本构模型研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3724-3732.
- ZHOU Keping, LIU Wei, ZHOU Yanlong, et al. Mechanical properties and damage-softening constitutive model of backfill with different osmotic pressures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 3724-3732.
- [17] 赵康, 赵康奇, 严雅静, 等. 不同含量玻璃纤维维尼砂充填体损伤规律与围岩匹配关系 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(1): 144-153.
- ZHAO Kang, ZHAO Kangqi, YAN Yajing, et al. Damage law of cemented tailings backfill with different contents of glass fiber and its match with rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1): 144-153.
- [18] 郭育霞, 赵永辉, 冯国瑞, 等. 矽石胶结充填体单轴压缩损伤破坏尺寸效应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2434-2444.
- GUO Yuxia, ZHAO Yonghui, FENG Guorui, et al. Study on damage size effect of cemented gangue backfill body under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2434-2444.

### Study on Damage Properties and Constitutive Model of Phosphogypsum Cementation Body with Different Fiber Content

ZHANG Weizhong, TANG Jie, KONG Dehua, KANG Qinrong

(School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430060, China)

**Abstract:** In order to improve the strength and toughness of phosphogypsum cementation body, the experiment of adding fiber to improve the mechanical strength characteristics of phosphogypsum cementation body was carried out. The damage law of phosphogypsum-based composite cement with polypropylene fiber content of 0, 0.5%, 0.75%, 1% and 1.25% was studied. The results are as follows. Firstly, with the increase of polypropylene fiber content, the peak strain and compressive strength of phosphogypsum cementation body increase to a certain extent, and the compressive strength and elastic modulus increase first and then decrease. The optimal fiber incorporation amount is 0.75%. Secondly, the stress-strain curves of cement specimens with different fiber contents have similar shapes, and the differences between the stress-strain curves of fiber-doped cements and ordinary phosphogypsum cements show that the incorporation of fibers can improve the post-peak residual strength and toughness of the cements, and obviously improve the compressive strength of the phosphogypsum cements. Thirdly, based on the strain equivalence theory and statistical damage theory, five kinds of damage correction coefficients were introduced, and the uniaxial compression damage constitutive model of fiber-doped phosphogypsum cementation body was derived. The uniaxial compression damage constitutive equation and damage evolution equation of phosphogypsum cementation body with different fiber content were established. Finally, comparing the theoretical curve with the experimental curve, it is found that each curve has a similar shape and the two are in good agreement at the peak, indicating that the established theoretical constitutive model has certain reference value for the analysis and research of phosphogypsum cementation body with different fiber contents. The research results can provide some theoretical support for the application of phosphogypsum-based composite materials in the field of solid waste cemented filling.

**Key words:** Phosphogypsum cementation body, Polypropylene fibre, Constitutive model, Damage evolution, Compressive strength