

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2023.09.016

掺聚丙烯纤维尾砂充填体损伤及能量演化特征

张 龙¹, 付玉华^{1,2}, 管华栋³, 余炜杰¹, 宋学林¹

(1. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000;

2. 赣南科技学院, 江西 赣州 341000;

3. 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要:为了探究掺聚丙烯纤维充填体在受载状态下的损伤特性及能量演化规律,对掺不同质量含量的聚丙烯纤维充填体进行单轴压缩试验,得到了掺不同纤维含量充填体优化后的本构模型。结果表明:向充填体添加聚丙烯纤维能够有效提高充填体的力学性能,当纤维含量达到0.6%时,纤维增强充填体的效果最好;对现有的掺纤维充填体损伤本构理论模型进行优化,得到了优化后掺聚丙烯纤维充填体理论曲线,并将理论曲线与试验曲线和文献曲线进行对比验证,发现优化后的理论曲线与试验曲线拟合度更高;构建了损伤与应变能之间的关系,损伤-应变能关系曲线能更好地描述掺不同纤维含量充填体的损伤特性,发现纤维增强充填体力学特性的主要机理,即纤维不仅增强了充填体储存应变能的能力,还增大了充填体峰后储能的能力。试验结果对科学指导井下矿体安全开采及充填体灾害预防具有一定意义。

关键词:单轴压缩;力学特性;应变能;损伤本构模型;聚丙烯纤维

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2023)09-0130-09

Damage and Energy Evolution Characteristics of Cemented Tailings Filling Body Mixed with Polypropylene Fiber

ZHANG Long¹, FU Yuhua^{1,2}, GUAN Huadong³, SHE Weijie¹, SONG Xuelin¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. Gannan University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

3. School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to explore the damage characteristics and energy evolution law of the cemented tailings filling body mixed with polypropylene fiber under load, uniaxial compression tests were carried out on the filling body mixed with different mass contents polypropylene fiber, and the optimized constitutive model of the filling body with different content polypropylene fiber was obtained. The results showed that adding polypropylene fiber to backfill can effectively improve the mechanical properties of backfill. When the fiber content reached to 0.6%, the effect of fiber reinforced backfill was the best. The existing damage constitutive theory model of the fiber doped filling body was optimized, and the theoretical curve of the optimized filling body mixed with polypropylene fiber was obtained. The theoretical curve was compared with the experimental curve and the literature curve, and it was found

收稿日期:2023-06-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51464015);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ190499)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51464015); Supported by the Science and Technology Research Project of Jiangxi Provincial Department of Education(GJJ190499)

作者简介:张 龙(1997—),男,硕士研究生。

通信作者:付玉华(1977—),男,教授,硕士研究生导师。

引用格式:张龙,付玉华,管华栋,等. 掺聚丙烯纤维尾砂充填体损伤及能量演化特征[J]. 有色金属工程,2023,13(9):130-138.

ZHANG Long, FU Yuhua, GUAN Huadong, et al. Damage and Energy Evolution Characteristics of Cemented Tailings Filling Body Mixed with Polypropylene Fiber[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(9): 130-138.

that the optimized theoretical curve and the experimental curve had a higher fitting degree. The relationship between damage and strain energy was established. The damage-strain energy relationship curve could better describe the damage characteristics of filling body mixed with different contents of fiber, and the main mechanism of fiber enhancement of physical characteristics of filling was found, that is, fiber not only enhanced the capacity of filling body to store strain energy, but also increased the capacity of post-peak energy storage of filling body. The test results have certain significance for scientific guidance of safe mining of underground ore body and disaster prevention of backfill body.

Key words: uniaxial compression; mechanical properties; strain energy; damage constitutive model; polypropylene fibre

我国地表及浅部矿物资源已逐步被开发,进行深部开发已成为不可避免的趋势^[1-2]。胶结充填采矿法不仅能够有效地控制采场地压,减少矿柱回采的贫损率,还能缓解尾矿库堆存尾砂的压力。充填体作为一种多相复合型材料,其损伤特性比岩石材料更加明显,其力学强度也远不如岩石材料^[3-4],为了提高矿山开采的安全性,在保证矿山经济效益和满足工业试验要求的前提下,应尽量提高充填体的力学性能。在土建工程中,为了提高混凝土的力学强度,会对混凝土加入各种类型的外加剂。国内外学者借鉴掺纤维混凝土的思路,向充填体掺入纤维展开研究,并取得丰硕的研究成果^[5-12]。张春雷等^[6]对掺入混合纤维(钢纤维和聚丙烯纤维)充填体进行单轴压缩试验,并结合电镜扫描观测破坏后的充填体发现,混合纤维的加入对充填体的破坏模式有明显的影响,在单轴压缩破坏下,无纤维充填体试件主要以剪切破坏为主。而掺混合纤维充填体由于纤维的作用,会使试件在受压时的应力均匀分布,因此当掺混合纤维充填体发生破坏时,四周会产生许多微小次生裂纹。李源等^[7]向尾砂掺入不同含量的玄武岩纤维,对固化物进行抗压、微观以及干湿侵蚀响应实验,发现高黏尾砂掺入 0.5% 的玄武岩最合适。掺入纤维会导致固化物产生微细裂隙,增加固化物的持水能力。徐文彬等^[8]在制备充填体时掺入含量不同的聚丙烯纤维作为加筋材料,以此改善胶结充填体性能,对试件进行无侧限抗压实验并借助 SEM 进行分析。结果表明:掺入纤维会改变充填体的破坏方式,通过 SEM 发现:掺入纤维的加固效果主要通过纤维与尾砂-水泥基体界面之间的黏结和摩擦作用控制。ZHAO 等^[9-10]采用声发射(AE)监测技术,研究了不同配比和不同类型纤维的充填体在单轴压缩条件下,纤维对 CPB 材料的力学提升机制破坏过程中的比能特征。研究表明: PAN 纤维的止裂作用和桥联作用抑制了 CPB 内部断裂趋势的扩展,从而增强了 CPB 的抗压强度和峰后损伤韧性;试件中灰砂比越高,试件力学性能越强,材料破

坏所需能量越高,单位体积耗散的能量越大;振幅时间序列和 RA 时间序列均具有良好的分形特征,与无纤维充填体相比,纤维增强充填体的幅值和 RA 关联维数曲线对称性更明显,峰后分布更密集,关联维数和 b 值在峰值应力处均出现快速下降的趋势,可作为纤维加筋充填体破裂预测的前兆信息。杨晓炳等^[11]在制备含硫尾砂胶结充填体时掺入纤维,研究掺入不同纤维含量对增强充填体力学性能的影响,发现掺入纤维含量在 0.6% 为最佳值。赵康等^[12-13]对掺不同类型的纤维以及掺不同含量的玻璃纤维损伤本构模型进行了研究。

由上述研究成果可知,国内外学者虽对纤维增强充填体的力学性能开展了一定的研究,但有关于掺纤维充填体在受载过程中的能量演化特征和损伤规律方面研究较少。文献[14-17]中的研究表明:充填体在受载时,会出现不同阶段的损伤破坏,而在不同阶段的损伤破坏过程中,其能量耗散特点不尽相同。因此,研究掺纤维充填体在受载过程中的能量演化特征和损伤规律,对科学指导井下矿体安全开采及充填体灾害预防具有重要意义。本文拟对掺不同含量的聚丙烯纤维尾砂胶结充填体进行单轴压缩试验,分析掺不同含量纤维的尾砂胶结充填体,在压缩破坏各个阶段的损伤特性和能量耗散变化,构建掺聚丙烯纤维充填体的损伤本构方程,进一步揭示掺聚丙烯纤维尾砂充填体在受载过程中的能量损伤演化规律。

1 掺聚丙烯纤维尾砂充填体力学试验

1.1 试件制备及试验方案

1) 试件制备

本次试验基于矿山工程实际的充填配比,制备试件的灰砂比为 1:8,料浆浓度为 75%(尾砂质量为 1.51 kg,水泥质量为 0.19 kg,水质量 0.57 kg),养护龄期为 28 d。聚丙烯纤维(Polypropylene Fiber 简称 PF)掺量分为五组(PF 掺量为 CPB 试件的质量含量),依次为 0%、0.2%、0.4%、0.6%、

0.8%,结合马国伟等^[18]和柏青松等^[19]的研究,为使纤维更加均匀的分布在充填体中,故选用纤维长度为9 mm。每组制备五个试件,采用全尾砂、PC42.5的复合硅酸盐水泥作为胶凝材料,与自来水混合以制备50 mm×100 mm的圆柱型充填体试件。首先将尾砂和PF按试验设计量混合干拌,再将水泥按照设计量加入搅拌,搅拌至PF不再粘结成团,取下搅拌锅,将料浆浇注至50 mm×100 mm圆柱型模具中,用小搅拌棒搅拌料浆,使料浆密实,24 h后脱模,并用黑色记号笔做好标记,脱模后移至恒温恒湿养护箱,养护28 d(养护条件设置为:温度(20±1)℃,湿度95%左右)。

2) 试验方案

使用WDW-20电子万能试验机,对掺PF含量不同的五组充填体试件进行单轴压缩试验,每组五个试件,试件加载前先将试件上下两面用砂纸打磨平整,并涂上凡士林,确保试件与实验仪器接触界面完全接触。以0.5 mm/min的加载速率持续加载,加载期间系统每0.5 s自动记录此项数据,每组的加载数据需剔除每组强度最大和最小的试件数据,取余下三组数据的平均值作为有效分析数据。得出掺不同含量PF试件的应力-应变曲线与单轴抗压强度,试验流程见图1(聚丙烯纤维充填体试件简称PFCPB、未掺纤维充填体试件简称CPB)。

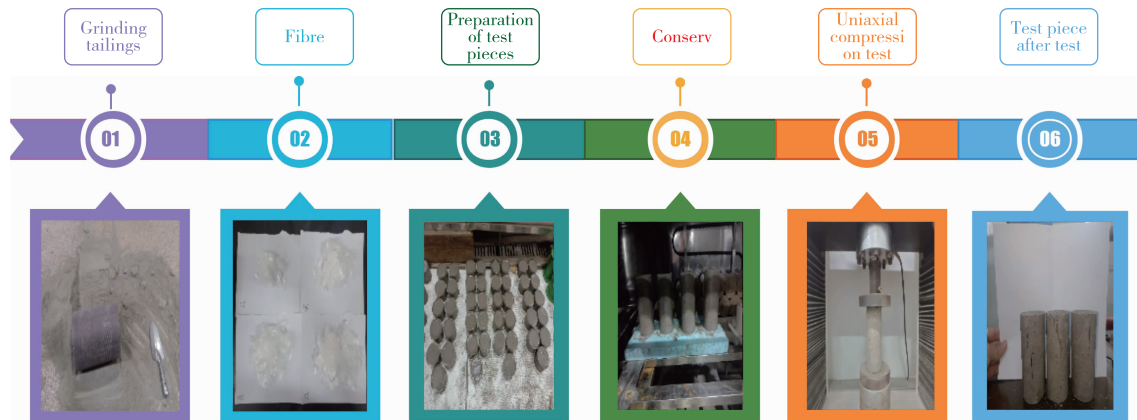


图1 试验流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test flow

1.2 力学试验结果分析

将强度最大值和最小值剔除后,再将各个不同类型试件的三组强度数据求平均值,试验数据见表1。

由表1可知,向尾砂胶结充填体掺入PF会提高充填体的力学性能,根据掺入PF含量不同,增强充填体试件强度效果也不一致,随着掺入PF含量的逐渐增加,充填体的强度先升高再降低,当掺入

0.6%的PF时效果最佳,此时试件强度达到1.38 MPa,掺入各个不同含量PF的试件较前一含量试件强度增幅也有差别,0.2PFCPB、0.6PFCPB两种试件强度增幅最佳,皆为21%。

究其原因,PF具有优良的物理力学性能,且化学性质稳定,将PF掺入胶结充填体试件中,PF会被水化产物紧紧包裹,并不会与充填体中的物质发生反应。PF将充填体中的裂隙连接起来,当添加PF

表1 试验数据

Table 1 Experimental data

Test piece number	Fiber content by mass/%	Peak intensity/MPa	Average peak intensity/MPa	Test piece number	Fiber content by mass/%	Peak intensity/MPa	Average peak intensity/MPa
A-0-1	0	0.88	0.89	A-0.6-1	0.6	1.46	1.38
A-0-2		0.87		A-0.6-2		1.29	
A-0-3		0.93		A-0.6-3		1.38	
A-0.2-1	0.2	1.08	1.08	A-0.8-1	0.8	1.31	1.19
A-0.2-2		1.16		A-0.8-2		1.07	
A-0.2-3		1.00		A-0.8-3		1.18	
A-0.4-1	0.4	1.16	1.14				
A-0.4-2		1.12					
A-0.4-3		1.15					

的充填体受载时,PF 会将试件受到的荷载有效地传递分散,减少应力集中,由此来减少微裂隙的产生及阻止裂纹的拓展。当 PF 达到最佳含量时,PF 之间会成立体的网状结构相互连接,使纤维在试件中更加均匀有效的传递分散荷载,形成一种等效围压的作用力,约束试件因在受载过程中产生的侧向变形,使试件的稳定性得到提高。

将试验数据进行处理,得到掺入不同 PF 含量的试件的全应力-应变关系曲线,如图 2 所示。

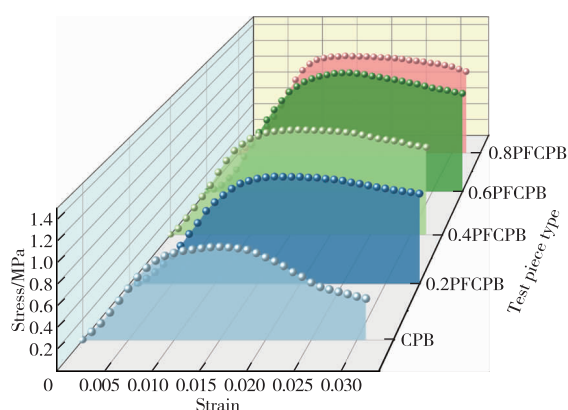


图 2 掺不同含量 PF 试件应力-应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain relation curve of filling body with different fiber content

由图 2 可知,CPB 与 PFCPB 试件在受载时都经历了孔隙压密阶段、线弹性变形阶段、塑性屈服阶段、峰后破坏阶段。CPB 与 PFCPB 试件在单轴加载条件下的变形破坏特征在峰值应变之前,无太大差别。在微孔隙压密阶段,随着荷载的增加,充填体中的微孔隙被压缩闭合,曲线呈现上凹形;在线弹性变形阶段,应力-应变曲线近似一条直线,由于纤维会提高充填体的强度与韧性,PFCPB 试件在线弹性变形阶段的曲线斜率普遍大于 CPB 试件;在塑性屈服阶段,曲线呈现下凹形,曲线斜率会逐渐减小直至为 0,达到峰值强度,在这个阶段,试件中的微裂隙开始逐渐发育,随着应变的不断增加,试件的体积不再被压缩而是转为扩容阶段;在峰后破坏阶段,CPB 与 PFCPB 试件区别较大,在达到峰值强度之后,PFCPB 试件应力-应变曲线斜率减小的趋势普遍小于 CPB 试件,PFCPB 试件峰后破坏阶段表现出一定的延性特征,而且试件会保持较高的残余强度。

2 掺聚丙烯纤维增强充填体损伤本构方程优化

刘志祥、赵树果等为了对尾砂胶结充填体在受

载损伤之后仍具有残余强度的情况进行修正,将有效损伤率 α 引入充填体常用的损伤模型^[20-21]。赵康等^[12]借鉴其思路,将有效损伤率 α 引入掺纤维的充填体,虽然取得了良好效果,但得出的损伤本构方程对于掺纤维尾砂胶结充填体强度描述与掺纤维尾砂胶结充填体实际强度相比,仍然有改进空间。损伤本构方程如下:

$$[\sigma] = \sigma(1 - \alpha D) = E\epsilon(1 - \alpha D) \quad (1)$$

式中, α 为有效损伤率,且 $0 < \alpha \leq 1$; σ 为有效应力; E 为材料弹性模量; ϵ 为应变; D 为损伤值。

假设充填体材料微元破坏服从 Weibull 分布,那将 α 有效损伤率引入 Weibull 分布概率密度方程,可以更好的描述掺纤维尾砂胶结充填体强度,方程为:

$$P(F) = \frac{m}{F_1} \left(\frac{F_0}{F_1} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{F_0}{F_1} \right)^m \right] \quad (2)$$

$$F_1 = \alpha F$$

式中, $P(F)$ 为密度函数; F_1 为有效强度; F 为平均强度; m 和 F_0 均为 Weibull 分布参数变量。

由于应变能更好地表达充填体裂纹变化的过程,故将 F_0 用 ϵ 代替,根据 Weibull 分布理论和损伤方程推导损伤变量为:

$$D = S_{Sn}/S_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\epsilon}{\alpha F} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中, S_{Sn} 和 S_n 分别是在一级荷载下破坏的微元面积数和微元总面积数, ϵ 为应变。

根据应力-应变曲线关系可知几何边界条件,如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma|_{\epsilon=0} &= 0 \\ \sigma|_{\epsilon=\epsilon_p} &= \sigma_p \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\epsilon}|_{\epsilon=\epsilon_p} &= 0 \\ \frac{d\sigma}{d\epsilon}|_{D=0} &= E \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\text{令 } \lambda = \frac{\alpha^2 - 2\alpha + 1 + \alpha\sigma_p/\epsilon_p E}{\alpha^2 - \alpha + \alpha\sigma_p/\epsilon_p E}, \text{ 并联立上述方程}$$

组可求得 m 和 F_0 等参数。

$$\left. \begin{aligned} F &= \left(\frac{m\epsilon_p}{\alpha^m \lambda} \right)^{\frac{1}{m}} \\ m &= - \frac{\lambda}{\ln \left(\frac{\sigma_p}{\epsilon_p E} + \alpha - 1 \right)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据这些参数可获得 PFCPB 试件的本构方程以及损伤演化方程。

$$D = 1 - \exp \left[- \frac{\lambda}{m\alpha} \left(\frac{\alpha\epsilon}{\epsilon_p} \right)^m \right] \quad (7)$$

$$\sigma = \epsilon E \left\{ 1 - \alpha + \alpha \exp \left[-\frac{\lambda}{m\alpha} \left(\frac{\alpha \epsilon}{\epsilon_p} \right)^m \right] \right\} \quad (8)$$

从图 2 可知,各个不同含量掺纤维充填体试件的 E 、 σ_p 、 ϵ_p ,分别为充填体的弹性模量、峰值应力、峰

值应变,根据式(6)求得 m 和 F_0 ,将求得的各个参数带入式(7)和式(8)得到不同类型试件的损伤应力方程以及损伤方程。各不同类型试件的损伤应力方程和损伤方程以及参数见表 2。

表 2 不同类型试件的损伤应力方程和损伤方程以及参数

Table 2 Damage stress equation, damage equation and parameters of different types of specimens

Test piece type	Peak strain	Peak stress/MPa	Elastic modulus E /MPa	α	m	Damage stress equation σ	Damage equation D
CPB	0.015	0.89	112.33	1.00 0.95 0.90	1.57 1.51 1.49	$\sigma = \epsilon E \{ \exp[-0.64(\epsilon/0.015)^{1.57}] \}$	$D = 1 - \exp[-0.64(\epsilon/0.015)^{1.57}]$
0.2PFCPB	0.017	1.08	119.11	1.00 0.95 0.90	1.40 1.37 1.54	$\sigma = \epsilon E \{ 0.05 + 0.95 \exp[-0.86(0.95\epsilon/0.019)^{1.37}] \}$	$D = 1 - \exp[-0.86(0.95\epsilon/0.019)^{1.37}]$
0.4PFCPB	0.016	1.14	127.7	1.00 0.95 0.90	1.72 1.63 1.59	$\sigma = \epsilon E \{ 0.05 + 0.95 \exp[-0.71(0.95\epsilon/0.016)^{1.63}] \}$	$D = 1 - \exp[-0.71(0.95\epsilon/0.016)^{1.63}]$
0.6PFCPB	0.018	1.38	143.33	1.00 0.95 0.90	1.60 1.53 1.50	$\sigma = \epsilon E \{ 0.05 + 0.95 \exp[-0.77(0.95\epsilon/0.018)^{1.53}] \}$	$D = 1 - \exp[-0.77(0.95\epsilon/0.018)^{1.53}]$
0.8PFCPB	0.015	1.19	150.93	1.00 0.95 0.90	1.56 1.50 1.48	$\sigma = \epsilon E \{ 0.05 + 0.95 \exp[-0.78(0.95\epsilon/0.015)^{1.50}] \}$	$D = 1 - \exp[-0.78(0.95\epsilon/0.015)^{1.50}]$

由于篇幅有限,故根据表 2 所示的参数选取纤维含量为 0.2% 充填体试件绘制试验曲线、文献模型曲线以及优化后模型曲线的对比图,如图 3 所示。

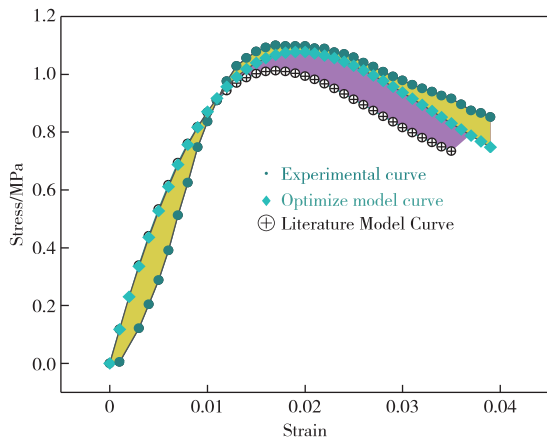


图 3 充填体试验曲线、文献曲线和优化后模型曲线

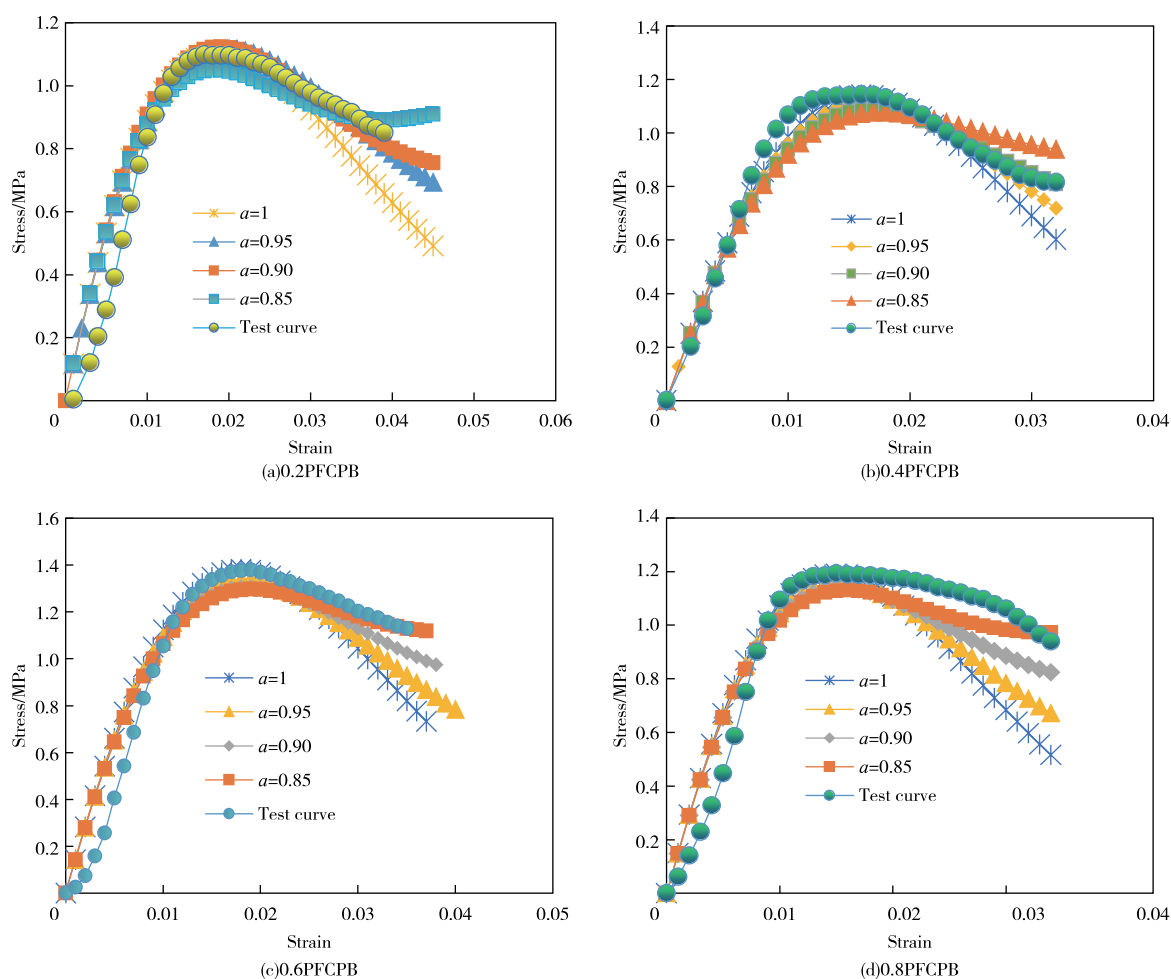
Fig. 3 Filling body experiment curve, literature curve and optimized model curve

由图 3 可知,优化模型与文献模型的曲线在峰值前阶段的曲线特征几乎是一致的,两模型曲线呈现近乎于一条直线,试验曲线中曲线却呈现上凹形。这是因为充填体试件里含有丰富的孔隙,试件在压缩过程中会经过孔隙压密阶段,在试件受载期间,充填体中的孔隙被压缩直至闭合,导致曲线呈现上凹形;峰值后,优化模型曲线皆大于文献曲线,且对于峰值强度的描

绘与试验曲线更加吻合;从整体上看,优化后的模型曲线与文献模型曲线相比,与试验曲线的吻合度更高。由于优化后本构模型曲线和试验曲线拟合度比文献模型曲线高,表明本文建立的优化充填体损伤本构模型更加适用于含掺 PF 充填体的本构关系中,能够更加准确地反映含掺 PF 充填体试件的受力过程,此优化模型对工程参数设计与分析具有一定的参考价值。

根据表 2 所示的损伤应力方程绘制不同 α 值下对损伤变量进行修正后理论曲线以及试验曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知,整体上理论描绘的应力-应变曲线与试验应力-应变曲线基本一致,有效损伤率(α)不同几乎不会影响峰值应变前的曲线, α 主要对 PFCPB 试件峰值后表现的残余强度影响较大,峰值后表征的残余强度会随着 α 增加而减小。不同类型的 PFCPB 试件的试验曲线与之对应的 α 不同的理论曲线相比,峰值后的理论曲线随 α 的变化分布的更加合理,从而使选取的 α 值绘制出来的曲线与试验曲线吻合度更高。由图 3 可知,PF 含量的不同并不会影响有效损伤率对 PFCPB 试件理论曲线与试验曲线的吻合度,当 α 为 0.95 时,理论曲线与试验曲线吻合度最佳。结合赵康等^[12]研究可知,掺同种纤维最佳有效损伤率并不会随掺纤维含量不同而发生改变,即每种纤维都有一个最佳的有效损伤率。

图4 不同 α 值下的理论曲线与试验曲线Fig. 4 Theoretical curve and experimental curve under different α values

3 掺聚丙烯纤维增强充填体能量损伤演化规律

结合现有研究可知^[4,22],掺入的纤维不会与充填料浆发生化学反应,利用纤维改善充填体的力学性能,是物理作用的结果。掺入充填体的PF被水泥与尾砂水化产物所包裹,在受载期间,被包裹的PF与水泥尾砂胶结体界面产生摩擦作用,提升了充填体储存应变能的能力,从而改善充填的力学性能。因此,对PFCPB试件在受载时试件发生变形、破坏的能量演化规律进行分析,能进一步阐述PFCPB试件在单轴压缩时能量损伤演化过程。根据能量守恒定律,充填体发生变形、破坏是能量积累和释放的结果,充填体吸收的总能量主要转化为弹性能和耗散能^[11]。在进行单轴压缩试验时做功仅是轴向应力,根据能量守恒定律,假设卸载弹性模量(E_u)可近似等于弹性模量 E ,充填体试件在受载时各部分应变能可表示为:

$$\left. \begin{aligned} U &= U^e + U^d \\ U &= \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 \\ U^e &= \frac{1}{2E_u} \sigma_1^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, ϵ_1 为上限应变; U 、 U^e 、 U^d 分别为总应变能、弹性应变能和耗散应变能; σ_1 为应力。将式(7)、(8)带入式(9)中,可得有关 U 与 D 的关系方程:

$$U = \int_0^{\epsilon_1} -\alpha E \left(-\frac{1}{\alpha} + D \right) d\epsilon_1 \quad (10)$$

式(10)中, α 取与试验曲线吻合度较高的值,由表2和图3可知 α 为0.95。利用origin软件对不同类型充填体理论应力-应变曲线进行分析,求出单轴加载下充填体在峰值应力点的应变能,如图5所示。

由图5可知,在进行单轴压缩试验时,当试验压缩至试件的峰值强度时,所消耗的总能量会随着PF含量的增加先增大再减小,由此可见PF能增强充填体的力学性能;与未掺入PFCPB试件相比,掺入PFCPB试件破坏时所需的单位体积应变能皆有提

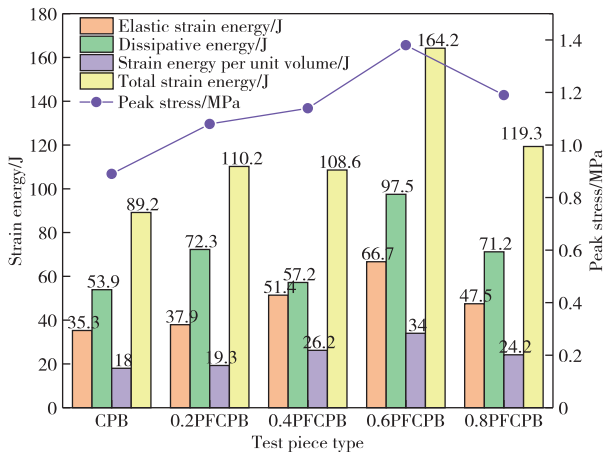


图5 充填体在峰值应力点时各部分的应变能

Fig. 5 Strain energy of each part of filling body at peak stress point

高,PF含量与充填体的承载能力并不是呈现线性正相关。随着PF含量的增加,充填体的承载能力先增大再减小,当PF含量为0.6%时,充填体承载能力最佳。在试件的峰值点前,PFPCPB试件的耗散能普遍高于CPB试件,说明PF能提高充填体在屈服破坏时需消耗的能量,体现了向充填体掺入PF能增加充填体的屈服强度。

图6为不同纤维含量充填体试件应变与弹性应变能关系曲线。由于弹性应变能可视为充填体在受载情况下充填体储存的应变能,峰值点前纤维含量不同的充填体在受载过程中弹性应变能皆随着应变的增加而增加,即试件储存的应变能增加;在峰值点处也为充填体的储能极限;峰值点之后,PF含量不同的充填体存储的应变能皆会随着应变的增加而减小,而CPB试件存储的应变能会下降,逐渐趋于0;PFPCPB试件虽然随着应变的增加也会逐渐减小,但

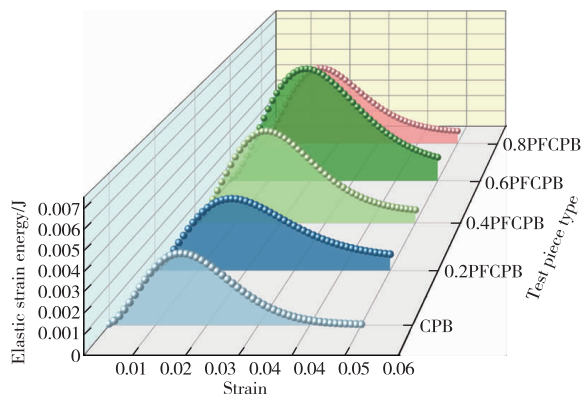


图6 掺不同含量纤维充填体试件应变与弹性应变能关系曲线

Fig. 6 Relationship between strain and elastic strain energy of filling body with different content of fiber

不会降至0,某一阶段会趋于稳定,具有一定的储存应变能的能力,说明向充填体掺入PF会增加试件在峰后阶段存储应变能的能力,这也间接证明了PFPCPB试件发生宏观破坏后会有一定的残余强度。

由于各不同类型的充填体试件强度大小较为集中,相差强度范围在0.5 MPa以内,传统的应变-损伤曲线在进行不同PF含量的损伤特性进行对照时,很难体现其区别,故本文结合式(10),利用origin软件做出不同PF含量的充填体试件总能耗与损伤关系图,见图7。

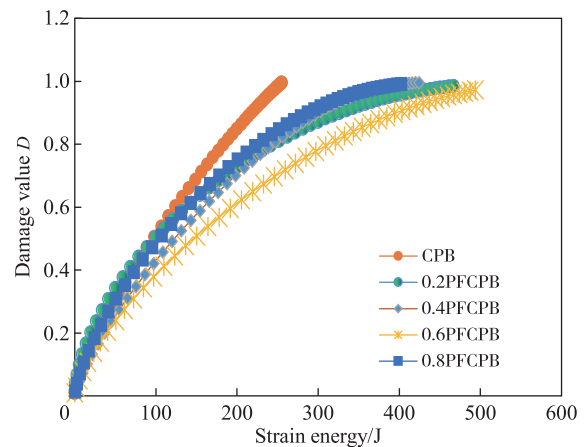


图7 不同PF含量试件总能耗与损伤关系

Fig. 7 Relationship between total energy consumption and damage of specimens with different PF content

图7中各个不同类型试件的能量-损伤发展曲线大致相同,皆呈现“抛物线”形线性增长。当D趋近于1时,试件发生宏观破坏,CPB试件的损伤曲线与PFPCPB试件损伤曲线相比,发生宏观破坏所消耗能量更小;当PF含量为0.6%时所消耗的能量最大,曲线也最为平缓;随着应变能的增加,CPB试件损伤增长速度最快,PFPCPB试件损伤增长速度明显要低于CPB试件,说明PF的存在增加了试件的韧性,向充填体添加PF能够有效抑制充填体在受载时发生的损伤破坏,进而提高充填体的力学性能及抗变形破坏的能力。

4 结论

主要探究了掺聚丙烯纤维充填体在受载状态下的损伤特性以及能量演化规律,优化了有关聚丙烯纤维充填体本构方程,构建了掺聚丙烯纤维充填体损伤值与应变能之间的关系,但受限于试验相关条件,只在静态受压状态下对掺聚丙烯充填体进行了研究。

1) 掺入纤维的充填体力学性能普遍高于无纤维充填体,向充填体掺入纤维的含量有最优值,充填体掺入 0.6% 的纤维增强效果最好。

2) 将 α 有效损伤率引入 Weibull 分布概率密度方程,可以更好地描述掺纤维尾砂胶结充填体强度。由此建立的本构方程与试验应力-应变曲线的吻合度比文献所建立的本构方程与试验应力-应变曲线的吻合度更高。

3) 根据文中所建立的本构方程与能量守恒定律,构建了掺纤维充填体损伤值与应变能之间的关系,损伤-应变能关系曲线能更好地描述对于掺不同含量纤维充填体的损伤特性;向充填体掺入纤维能增强充填体储存应变能的能力,使充填体在峰值强度之后仍然有较强的承载能力。

4) 而对于掺纤维充填体,仍可深入探讨以下问题:

(1) 向充填体掺入的纤维不同,其充填体的力学性能也不一致,因此可深入研究掺其他纤维充填体的力学性能。

(2) 在实际开采中,充填体会受到爆破荷载的频繁扰动,因此可对掺纤维充填体在动态荷载状态下的力学特性进行研究。

(3) 掺入纤维能增强混凝土的力学性能,抗拉性能的提升比抗压性能更加显著。充填体作为水泥基材料,相较于混凝土,两者在强度、适用范围以及制备方法等方面有较大区别,因此可对掺纤维充填体的动静态抗拉性能进行探究。

参考文献:

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 程海勇, 吴爱祥, 吴顺川, 等. 金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J]. 工程科学学报, 2022, 44(1): 11-25.
CHENG Haiyong, WU Aixiang, WU Shunchuan, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1): 11-25.
- [3] 侯永强, 尹升华, 曹永, 等. 单轴压缩下不同养护龄期尾砂胶结充填体损伤特性及能量耗散分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(7): 1955-1965.
HOU Yongqiang, YIN Shenghua, CAO Yong, et al. Analysis of damage characteristics and energy dissipation of cemented tailings backfill with different curing ages under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(7): 1955-1965.
- [4] 陶博识, 刘卫星. 掺纤维加筋水泥基充填材料力学性能及流动性能研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(3): 94-101.
TAO Boshi, LIU Weixing. Study on mechanical properties and flow properties of cement-based filling materials with fiber reinforcement[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(3): 94-101.
- [5] 阮竹恩, 吴爱祥, 付豪, 等. 秸秆纤维对含硫尾砂膏体充填体单轴抗压强度的影响机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 837-848.
RUAN Zhuen, WU Aixiang, FU Hao, et al. Influence mechanism of straw fiber on uniaxial compressive strength cemented paste backfill body of sulfur-bearing tailings [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 837-848.
- [6] 张春雷, 宋学林, 付玉华, 等. 含混杂纤维尾砂胶结充填体静态力学性能试验研究[J]. 有色金属工程, 2023, 13(6): 96-104.
ZHANG Chunlei, SONG Xuelin, FU Yuhua, et al. experimental study on static mechanical properties of cemented tailings back fill with hybrid fiber [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(6): 96-104.
- [7] 李源, 魏明俐, 刘磊, 等. 纤维加筋高钙地聚物固化高黏尾砂的强度特性及机制分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 43-53.
LI Yuan, WEI Mingli, LIU Lei, et al. Strength characteristics and mechanism analysis of fiber reinforced highly cohesive tailings solidified using high-calcium geopolymer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 43-53.
- [8] 徐文彬, 李乾龙, 田明明. 聚丙烯纤维加筋固化尾砂强度及变形特性 2019(12): 1618-1626. [J]. 工程科学学报, 2019, 41(12): 1618-1626.
XU Wenbin, LI Qianlong, TIAN Mingming. Strength and deformation properties of polypropylene fiber-reinforced cemented tailings backfill [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(12): 1618-1626.
- [9] ZHAO K, LAI Y M, HE Z W, et al. Study on energy dissipation and acoustic emission characteristics of fiber tailings cemented backfill with different ash-sand ratios [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 174: 983-996.
- [10] ZHAO K, ZHAO K Q, YAN Y J, et al. Influence of

- different fibers on compressive toughness and damage of early age cemented tailings backfill[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 30(13):37449-37461.
- [11] 杨晓炳,侯永强,尹升华,等.纤维增强含硫尾砂胶结充填体的力学性能及能量分配演化特征[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(11):4435-4448.
YANG Xiaobing, HOU Yongqiang, YIN Shenghua, et al. Mechanical properties and energy distribution evolution characteristics of fiber-reinforced cemented sulfur tailings backfill[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(11):4435-4448.
- [12] 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.
- [13] 赵康,赵康奇,严雅静,等.不同含量玻璃纤维尾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.
- [14] 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[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(8):119-124.
- [15] 刘瑛,陈德鹏,刘梦水.考虑加载速率效应的尾砂胶结充填体细观声发射特征研究[J].有色金属工程,2022,12(12):109-122.
LIU Ying, CHEN Depeng, LIU Mengshui. Study on mesoscopic acoustic emission characteristics of tailings cemented backfill considering loading rate effect[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(12):109-122.
- [16] 张友锋,付玉华.组合受力胶结充填体力学特性及能耗特征研究[J].有色金属工程,2022,12(1):107-114.
ZHANG Youfeng, FU Yuhua. Study on mechanical properties and energy consumption characteristics of cemented backfill under combined loading [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(1):107-114.
- [17] 于辉,刘少伟,贾后省,等.不同围压下闭合单裂隙砂岩力学响应及能量耗散机制研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(2):385-393.
YU Hui, LIU Shaowei, JIA Housheng, et al. Mechanical response and energy dissipation mechanism of closed single fractured sandstone under different confining pressures[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(2):385-393.
- [18] 马国伟,李之建,易夏玮,等.纤维增强膏体充填材料的宏细观试验[J].北京工业大学学报,2016,42(3):406-412.
MA Guowei, LI Zhijian, YI Xiawei, et al. Macro-meso experiment of fiber-reinforced cement paste filling material [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, 42(3):406-412.
- [19] 柏青松,汪玲,董叶顺.玻璃纤维长度和掺量对普通混凝土力学性能的影响[J].河南科技,2021,40(22):78-80.
BAI Qingsong, WANG Ling, DONG Yeshun. Influence of glass fiber length and content on the mechanical properties of ordinary concrete[J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(22):78-80.
- [20] 刘志祥,刘青灵,党文刚.尾砂胶结充填体损伤软-硬化本构模型[J].山东科技大学学报(自然科学版),2012,31(2):36-41.
LIU Zhixiang, LIU Qingling, DANG Wengang. On softening-hardening intrinsically constitutive model for damage of tailings-cemented filling body[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2012, 31(2):36-41.
- [21] 赵树果,苏东良,吴文瑞,等.基于分布的充填体单轴压缩损伤模型研究[J].中国矿业,2017,26(2):106-111.
ZHAO Shuguo, SU Dongliang, WU Wenrui. Study on damage model of backfill based on Weibull distribution under uniaxial compression [J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(2):106-111.
- [22] 陶博识,刘卫星.不同纤维调控水泥基胶结充填体强度性能研究[J].矿业研究与开发,2022,42(9):122-128.
TAO Boshi, LIU Weixing. Study on strength performance of cementitious back fill regulated by different fiber[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(9):122-128.

(编辑 郭文晶)