



移动扫码阅读

胡世杰,王方田,高翔,等.三向应力状态下超高水材料固结体损伤特征及力学特性研究[J].煤炭科学技术,2022,50(12):128-135.

HU Shijie, WANG Fangtian, GAO Xiang, *et al.* Damage characteristics and mechanical properties of superhigh-water material consolidated body under triaxial stress[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 128-135.

三向应力状态下超高水材料固结体损伤特征及力学特性研究

胡世杰^{1,2},王方田^{1,2},高翔^{1,2},任帅^{1,2},冯光明^{1,2}

(1.中国矿业大学矿业工程学院,江苏徐州 221116;2.中国矿业大学深部煤炭资源开采教育部重点实验室,江苏徐州 221116)

摘要:为研究超高水材料固结体在三向应力状态下的损伤特征及力学特性,进行不同养护时间(1、7、14、21、28 d)下超高水材料固结体的单轴压缩试验。借助 PFC^{3D} 的平行黏结模型建立不同养护时间下的单轴压缩模型,得出与单轴试验强度相符合的 5 组 PFC^{3D} 单轴压缩模拟试验强度。并统计各组平行黏结模型的细观物理力学参数,依据所得参数建立不同养护时间下超高水固结体的三轴压缩模型,施加与轴向应力相等的围压,记录不同养护时间下三轴试验过程中的应力-应变曲线及破坏时的力链分布。分析了超高水固结体在三向应力状态下的损伤特征,研究结果表明:①超高水材料固结体三向应力状态下的极限强度随养护时间的变化规律可由波尔茨曼方程表示。养护时间 1~14 d 时,极限强度增长最快;养护时间 28 d 时达到最大极限强度 3.1 MPa。②超高水材料固结体三轴压缩模型力链贯通程度随养护时间的变化规律为:养护时间 1~28 d,横向接触力链数目分别为 4 006、4 561、4 891、5 017、5 062;纵向接触力链数目为 4 029、4 439、4 716、4 917、5 123。表明超高水材料固结体的承载能力随养护时间的增加而增强,在养护时间 0~14 d 增长最快,14~28 d 时承载能力趋于稳定。③以受拉力链模拟超高水材料固结体三轴压缩模型破坏过程中的裂隙发育过程,得出养护时间为 1 d 的超高水材料固结体破坏时的裂隙主要集中在试样的上下两端。随着养护时间的增加,裂隙的发育程度增加,破坏时试样的中部开始出现裂隙,与上下两端的裂隙逐步贯通。

关键词:超高水固结体;三轴试验;岩石力学;损伤机制;充填浆料

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)12-0128-08

Damage characteristics and mechanical properties of superhigh-water material consolidated body under triaxial stress

HU Shijie^{1,2}, WANG Fangtian^{1,2}, GAO Xiang^{1,2}, REN Shuai^{1,2}, FENG Guangming^{1,2}

(1. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to study the damage characteristics of superhigh-water consolidated body under triaxial stress state, uniaxial experiments of superhigh-water consolidated body under different curing time (1, 7, 14, 21, 28 d) were carried out. Uniaxial compression models under different curing times were established by the parallel bonding model of PFC^{3D}, and five groups of uniaxial strength of PFC^{3D} simulation experiment were obtained, which were consistent with the uniaxial strength of the uniaxial experiment. Statistics each simulation experiment of uniaxial compression parallel bond, mesoscopic physical and mechanical parameters in the model on the basis of the parameters under different curing time, superhigh-water consolidation triaxial compression model body, the same confining pressure and axial stress is applied, record the triaxial experiments under different curing time in the process of stress-strain curve and the force when the damage distribution chain. Analyzed superhigh-water body of consolidation in the damage characteristics of three to the stress state, the

收稿日期:2022-02-08

责任编辑:朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0392

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51974297);中国博士后科学基金面上资助项目(2018M630634)

作者简介:胡世杰(1999—),男,湖南泸溪人,硕士。E-mail: shijiehu2022@163.com

通讯作者:王方田(1984—),男,河南永城人,教授,博士生导师,博士。E-mail: wangfangtian111@163.com

results show that: ① the superhigh-water concretion body three to the stress state of the changing rule of the ultimate strength with curing time can be represented by the Bohr boltzmann equation. When curing time is 1 to 14 days, the ultimate strength increases fastest, and the maximum ultimate strength reaches 3.1 MPa when curing time is 28 days. ② The variation rule of the degree of penetration of force chains in the triaxial compression model of superhigh-water consolidated body with curing time is as follows: within curing time of 1-28 d, the number of transverse contact force chains is 4 006, 4 561, 4 891, 5 017, 5 062, respectively. The number of longitudinal contact force chains is 4 029, 4 439, 4 716, 4 917 and 5 123. The results show that the carrying capacity of the superhigh-water consolidated body increases with the increase of curing time, and increases fastest during the curing time from 0 to 14 days, and tends to be stable during 14 to 28 days. ③ The tensile chain was used to simulate the fracture development in the triaxial compression model of superhigh-water consolidated body. The results show that the cracks concentrate on the upper and lower ends of the specimen when the curing time is 1 d. With the increase of curing time, the cracks in the middle of the specimen begin to increase and finally connect with the cracks at the upper and lower ends of the specimen.

Key words: superhigh-water consolidated body; triaxial experiment; rock mechanics; damage mechanism; mechanical property

0 引言

超高水充填材料是中国矿业大学教授冯光明在对高水材料研究的基础上,研发的一种水体积分数可达 97% 的速凝材料^[1-3]。目前,超高水充填开采在解决“三下”压煤、预防深井动力灾害和提高煤炭采出率方面具有显著效果^[4-7]。在超高水充填开采中,充填体处于采空区顶底板、围岩以及前后充填体形成的封闭空间中。随工作面的持续推进、顶板破断下沉,充填体同时受顶板挤压与围岩的限制,处于三向受力状态。因此,研究三向应力状态下超高水充填体的损伤特征以及力学特性对于保障充填体稳定性实现安全开采至关重要^[8]。目前国内外学者在超高水充填体的力学特性方面取得了众多成果。丁玉等^[1]探究了不同水体积比的超高水材料力学性能(强度及体积应变性能)、流体力学性能(流变性、可泵性等)及化学性能(凝结时间、抗风化性能)随时间的变化规律。王旭峰等^[9]通过抗拉、抗剪、抗压等力学试验,揭示了 4 种不同类型的超高水充填胶结体的力学性能,并建立了“充填体-基本顶”力学模型,阐明了 4 类不同类型的超高水胶结体对基本顶的控制作用。贾凯军等^[10]基于充填体力学模型,提出了俯斜开采超高水充填体的失稳机理与防治方法。赵家巍等^[11]基于超高水材料固结体的侧限压缩室内试验,结合 Poyting-Thomson 模型,引入损伤变量,建立了可以描述超高水材料固结体侧限压缩条件下应力应变本构关系的 M|D|H 理论模型。文献 [12-15] 对高水充填材料有较为广泛的研究,但大多研究的是各种改性高水材料的基本力学及理化性质。文献 [16-17] 通过声发射测试及电阻率测试,研究了单轴压缩下不同尺寸的矽石胶结充填体的损伤演化及破坏特征。侯永强等^[18]通过霍普金森杆对尾砂充填

体进行冲击载荷试验,得出其在动态载荷下的力学响应及能量损伤规律。以上研究多针对充填体的基本力学性能、应力应变本构关系、单轴压缩下的损伤演化规律等,但较少涉及超高水充填体在三向应力状态下的损伤特征。超高水充填体在三向应力作用下,充填体内部原生裂隙不断演化,新生裂隙不断产生发育,各种裂隙相互贯通最终形成宏观裂隙,导致充填体破坏失稳^[19-20]。这一破裂演化规律是揭示充填体破坏机制、解决工程稳定性的基础^[21]。但室内试验无法观察到充填体内部裂隙的产生、发育、扩展及贯通等现象。基于颗粒流理论的 PFC^{3D} 程序,可以模拟充填体的基本力学特性,同时能监测材料内部裂隙产生、演化、扩展及贯通过程,探究损伤机制^[22]。基于此,对 5 组不同养护时间 (1、7、14、21、28 d) 的超高水材料固结体圆柱形试件进行单轴压缩试验。利用 PFC^{3D} 中的平行黏结接触模型对不同养护时间的超高水材料固结体试件进行单轴压缩模拟。得出各不同养护时间 PFC^{3D} 数值模拟的细观物理力学参数后,进行三轴压缩试验。从而得到三向应力状态下不同养护时间超高水材料固结体的损伤特征及力学特性。

1 工程背景

山东某矿 CG1312 工作面埋深 706~730 m,工作面倾斜长度 110 m,走向长度 867 m。该工作面地表对应位置大部分为农田和村庄,为保护地表耕地和建筑物,采用综合机械化走向长壁采煤方法进行开采,超高水材料袋式充填法处理采空区。超高水充填材料 A 浆体和 B 浆体分别在地面充填站搅拌均匀,分别通过两道管路输送至回采巷道,通过三通混合器混合均匀充入采空区充填袋中^[23-24]。该矿地面充填站如图 1 所示。



图1 地面充填搅拌站

Fig.1 Ground filling and mixing station

工作面主采3号煤层,平均厚度2.6 m,煤层倾角6°,地质构造简单。顶板为中砂岩,厚23.1 m,灰白色,中厚层状,以石英、长石为主,硬度较大。直接底为泥岩厚1.79 m,深灰色,含有丰富的植物根部化石,硬度中等。基本底为细砂岩厚6.48 m,灰色,灰白色,薄层状,细粒砂状结构,以石英、长石为主,次棱角状,硬度大,分选较差,中部夹少量泥质条纹,如图2所示。

2 超高水材料固结体室内单轴试验

超高水材料固结体室内单轴压缩试验选用中国矿业大学SANS万能材料试验机进行,如图3a所示。试验方案如下:试验采取位移加载,设定加载速率0.5 mm/min,最大加载位移15 mm,同步记录超高水

材料固结体的载荷-位移曲线和最大破坏载荷。为更好贴合工程实践,便于分析对比,配制直径50 mm,高100 mm的圆柱体试件5组,每组3件,共15件。养护时长分别为1、7、14、21、28 d。利用如图3b所示的成型模制备试件。其中制作试件所用的水取自实验室常温自来水,所用材料取自山东某矿充填站,制作成型的试件利用图3c所示的养护箱养护。记录试验过程,并处理得到不同超高水材料固结体试样不同养护时间下的应力-应变曲线,如图3所示。

综合柱状	岩性	厚度/m	岩性特征
.....	细砂岩	10.60	上部浅灰色夹灰黑色,下部为灰白色,平行层理,以石英、长石为主,中上部具有裂隙,变质细砂状结构,致密块状结构,充填方解石,含有丰富的黑色结核,硬度较大
	粉砂岩	2.48	灰白色,块状,以石英、长石为主,硬度大,分选差
.....	细砂岩	23.10	灰白色,中厚层状,以石英、长石为主,局部含丰富的黄铁矿,泥质胶体,硬度大,分选中等
.....	3号煤	2.70	黑色、褐黑色条痕,暗煤次之,为半亮型煤,含少量镜煤及黄铁矿,有细小裂痕,性脆,阶梯状断口
.....	泥岩	1.79	深灰色,含有丰富的植物根部化石,含粉砂,参差状断口,硬度中等
.....	细砂岩	6.48	灰色,灰白色,薄层状。细粒砂状结构,以石英、长石为主,次棱角状,中部夹少量泥质条纹,硬度大,分选较差

图2 煤岩综合柱状

Fig.2 Comprehensive histogram of coal and rock



(a) SANS 万能材料试验机



(b) 成型模具



(c) 养护箱

图3 试验设备

Fig.3 Test equipment

由图4可知,超高水固结体的破坏过程基本可分为:I初始阶段;II游离水泌出阶段;III裂隙发育阶段;IV裂隙扩展阶段;V完全破坏阶段等5个阶段。其中I初始阶段发生在超高水材料固结体轴向应变0~0.04,此时超高水材料固结体试件刚初始受压,试件内的孔隙裂隙逐渐压密,外形无明显变化。II游离水泌出阶段处于轴向应变0.01~0.04,该阶段超高水

材料固结体应力-应变曲线斜率由陡变平,随试验机的位移加载,超高水材料固结体试件内游离水的压出对试件起到“卸压”的作用,试件内的轴向应力无明显增加;III裂隙发育阶段发生在轴向应变0.01~0.02,该阶段应力-应变曲线呈线性分布,超高水材料固结体表现为线弹性,相同的应力增量引起的应变增量最小,是抵抗变形能力最好的一个阶段。IV裂

隙扩展阶段发生在轴向应变 0.02~0.04, 该阶段裂隙扩展, 应力-应变曲线缓慢增长, 试件的抵抗变形能力降低且已经接近自身的破坏极限。V 完全破坏阶段, 试件受压破坏, 应力-应变曲线下降幅度缓慢, 说明超高水材料固结体在完全破坏后, 仍然保持有较好的承载能力, 试验过程如图 5 所示。

图 6 所示为超高水材料固结体单轴极限强度随养护时间的变化规律为: 随着养护时间加强, 超高水材料固结体的单轴承压极限强度在养护时间 7~14 d 内增长最快, 养护时间 14 d 后增长幅度逐渐减弱, 养护时间 28 d 极限强度最大为 2.51 MPa。

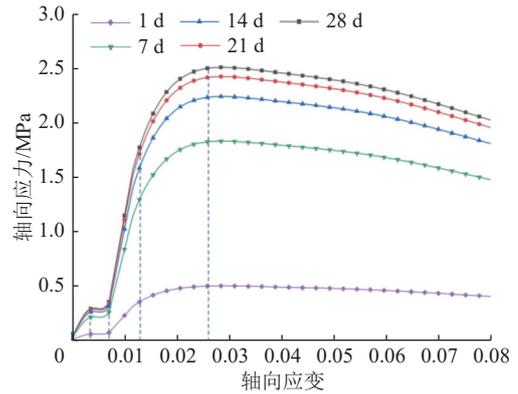


图 4 不同养护时间下的应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curve under different curing time

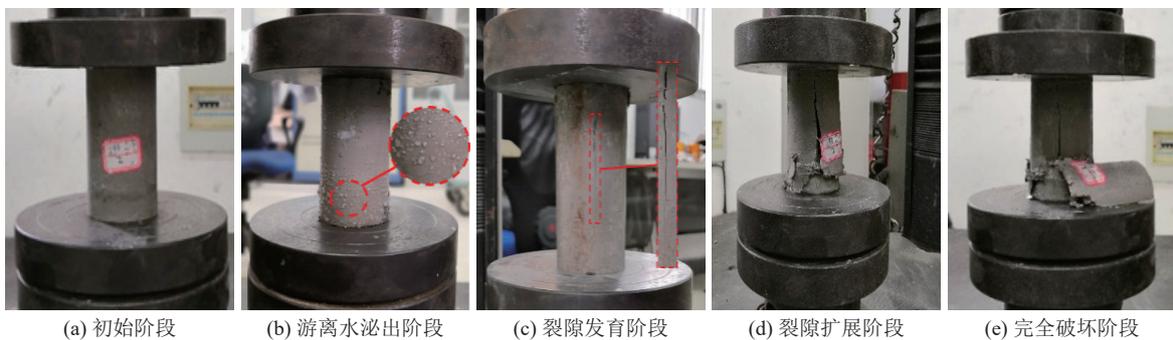


图 5 单轴压缩试验过程
Fig.5 Uniaxial compression test process diagram

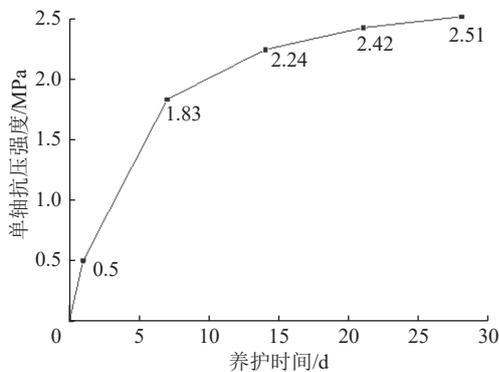


图 6 单轴抗压强度与养护时间关系
Fig.6 Relationship between uniaxial compressive strength and curing time

3 超高水材料数值模拟

3.1 数值模拟方案设计

3.1.1 数值试样的制备

为模拟不同养护时间 (1、7、14、21、28 d) 的超高水材料固结体室内单轴试验, 建立 5 组 PFC^{3D} 单轴压缩数值模型, 该数值模型主要由颗粒、墙体、颗粒与颗粒之间的接触以及颗粒与墙体之间的接触组

成。模拟步骤如下: ①生成与实际试样尺寸、形状相同的模型墙体, 在之中生成颗粒, 形成与实际试样相同尺寸的模型 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 如图 7 所示; ②通过对顶、底部墙体施加指向试样方向的法向速度, 并通过墙体与颗粒之间的接触实现速度的传递模拟对试样轴力的加载; ③记录整个试验过程中顶、底部墙体的位移、接触力, 通过 FISH 语言将所记录的墙体位移、接触力换算成轴向应力与轴向应变, 从而得出各组单轴压缩数值模型的极限强度; ④通过“试错法”反复调节各组数值模型的细观物理力学参数, 使之

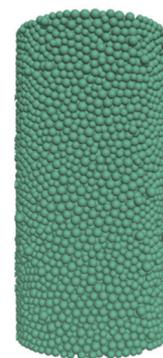


图 7 PFC 模型试样
Fig.7 PFC model sample diagram

与5组不同养护时间室内单轴试验的极限强度相符合^[21-22]。

3.1.2 颗粒参数的标定

数值试样制备选择 PFC^{3D} 中的球形颗粒, 由于超高水材料是钙矾石无序排列所组成的一种各向受力均匀的岩土类材料^[25-26]。因此, 选用球形颗粒, 可以使得试样内部各向受力均匀, 符合超高水材料固结体各向同性的力学性质。球形颗粒细观参数见表1。

表1 颗粒细观参数

Table 1 Particle microparameter

养护时间/d	最小颗粒半径/mm	粒径比	孔隙率	阻尼	密度/(kg·m ⁻³)
1	0.1	1.5	0.35	0.7	2 600
7	0.1	1.5	0.35	0.7	2 650
14	0.1	1.5	0.35	0.7	2 700
21	0.1	1.5	0.35	0.7	2 750
28	0.1	1.5	0.35	0.7	2 800

3.1.3 接触模型的选择与参数标定

超高水材料固结体应力-应变曲线既有类岩性质, 又有独特的峰后力学特征^[11], 故选用平行黏结模型来表征颗粒之间胶结物的存在。平行黏结模型的宏观刚度由接触刚度和黏结刚度组成, 黏结破坏会立即导致宏观刚度的下降。因此, 平行黏结通过在拉伸, 或剪切断裂时刚度相应的降低可更逼真地模拟类岩材料^[20]。

平行黏结模型的特点是当黏结破坏后退化为线性接触模型, 因此设置参数时, 平行黏结接触部分在受拉、受压条件下同时起作用, 但受压、受拉时变形模量不一样。而线性接触部分只在受压时起作用, 受拉时没有影响^[27]。因为 PFC^{3D} 颗粒流数值模拟软件是通过颗粒与颗粒之间的细观物理力学参数来表现所建模型的宏观物理力学性质, 所以通过试错法^[22], 反复调节平行黏结模型细观参数的值使之能与超高水材料固结体室内单轴压缩试验极限强度相符, 从而得到具体的细观参数的值。线性接触部分的细观参数与平行黏结部分的细观参数见表2。

3.2 拟合结果分析

根据室内单轴压缩试验所得的不同养护时间超高水材料固结体应力-应变曲线中的极限强度, 将其与单轴压缩数值模拟中所得的极限强度进行拟合对比如图8所示。

根据图8可以看出单轴压缩数值模拟所得出的

极限强度与超高水材料固结体室内试验的极限强度基本吻合。为了进一步说明室内试验与数值模拟所得出的极限强度的吻合度, 对其拟合出来的2条曲线进行拟合数据对比, 所得出的 *F*-test 检验如下, 在 0.05 显著水平下, 2组数据在统计意义上是相同的。

<i>F</i>	0.007 9
自由度	3
分母	6
概率> <i>F</i>	0.998

表2 平行黏结模型细观参数

Table 2 Parallel bonding model microscopic parameters

养护时间/d	有效模量/GPa	刚度比	摩擦因数	平行黏结有效模量/GPa	拉强度/MPa	黏结强度/MPa
1	0.110	1.5	0.23	0.110	0.179	1.45
7	0.181	1.6	0.25	0.181	0.189	1.55
14	0.215	1.7	0.27	0.215	0.198	1.61
21	0.247	1.8	0.28	0.247	0.217	1.73
28	0.275	1.9	0.30	0.275	0.259	1.95

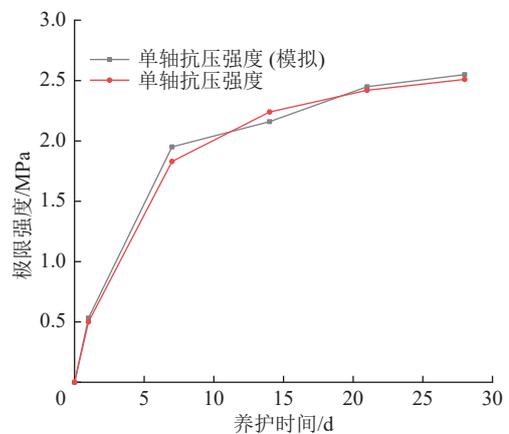


图8 室内试验与数值模拟强度拟合

Fig.8 Strength fitting of laboratory experiment and numerical simulation

3.3 三轴压缩数值模拟的构建及结果分析

以不同养护时间下室内单轴压缩试验与数值模拟的极限破坏强度的拟合结果为基础, 构建超高水材料固结体三轴压缩数值模型。将单轴模型的细观物理力学参数运用于三轴模型, 通过 PFC^{3D} 中的 Fish 语言施加与轴向应力相等的围压, 模拟不同养护时间下超高水材料固结体三轴压缩试验。

3.3.1 应力-应变的强度特征

不同养护时间超高水材料固结体三轴压缩试验的极限强度变化规律如图9所示。

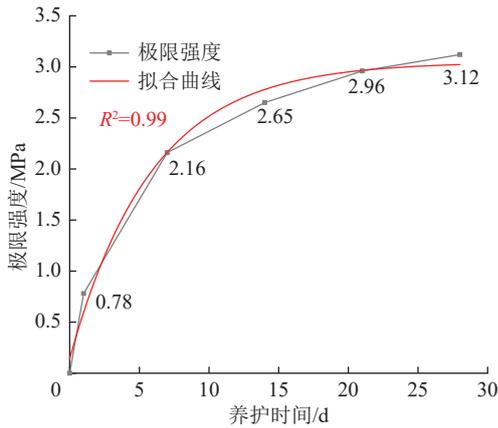


图 9 三轴极限强度与养护时间的关系

Fig.9 Relationship between triaxial ultimate strength and curing time

超高水材料固结体三轴压缩试验的极限强度随养护时间的变化规律,经拟合后可用玻尔兹曼方

程表示,即:

$$\sigma_p = A_2 + (A_1 - A_2) / [1 + \exp((t - x_0) / K)] \quad (1)$$

式中:参数 A_1 、 A_2 、 x_0 、 K 的值分别为-5 135.23、3.04、-43.97、5.88; σ_p 为极限强度, MPa; t 为养护时间, d。

当养护时间在 0~14 d 时,超高水材料固结体三向应力下的极限强度从 0 增加到 2.65 MPa,极限强度增长快而迅速,表明超高水材料三向应力下的承载性能以 0~14 d 增强最快;养护时间 14~28 d 时,超高水材料固结体三向应力下的极限强度分别为 2.65、2.96、3.12 MPa,极限强度的增长幅度逐渐降低,表明超高水材料固结体三向应力下的承载性能在养护时间 14 d 后开始趋于稳定。

3.3.2 超高水材料固结体的破坏规律

超高水材料固结体在养护 1、7、14、21、28 d 条件下当应力达到其破坏强度时,试样内部颗粒间接触力链分布情况以及试样内部接触力链总数见表 3。

表 3 不同养护时间下的力链分布

Table 3 Distribution of force chain under different curing time

养护时间/d	1	7	14	21	28
横向力链分布	接触力链接触数 (4 006) 裂隙区域集中	接触力链接触数 (4 561) 裂隙增加中程	接触力链接触数 (4 891) 中部增加区域	接触力链接触数 (5 017) 上下两端发展	接触力链接触数 (5 062) 上下贯通
纵向力链分布	接触力链接触数 (4 029) 裂隙区域集中	接触力链接触数 (4 439) 裂隙增加中程	接触力链接触数 (4 716) 中部增加区域	接触力链接触数 (4 917) 上下两端发展	接触力链接触数 (5 123) 上下贯通

由表 3 可得,超高水材料固结体三向应力状态下不同养护时间(1、7、14、21、28 d)的横向接触力链数目分别为 4 006、4 561、4 891、5 017、5 062,纵向接触力链数目为 4 029、4 439、4 716、4 917、5 123。如图 10 所示,接触力链数目的多少反映试样内部力链的贯通程度^[27],接触力链数目越多,说明试样内部的力链贯通程度越大,承载能力越强,反之亦然。

超高水固结体数值试样的接触力链数目在 1~14 d 内增长最快说明,超高水材料固结体三向应力下的承载能力在 1~14 d 内增强最快;在 14~28 d 内,接触力链数目与养护时间的关系曲线趋于平缓,说明超高水材料固结体三向应力下的承载能力在养护时间 14~28 d 趋于稳定。

由于超高水材料固结体为类岩材料,抗拉强度

远小于抗压强度,本文根据 PFC^{3D} 数值模型中受拉力链的分布分析三向应力状态下超高水材料固结体

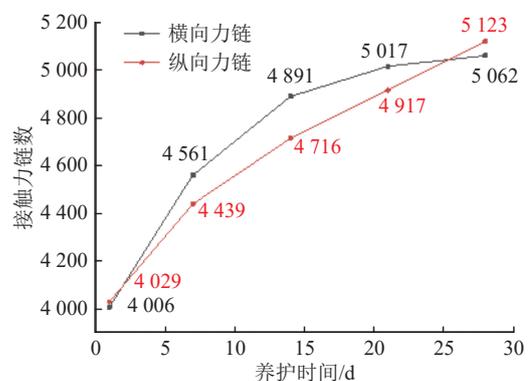


图 10 接触力链与养护时间的关系

Fig.10 Relationship between contact force chain and curing time

试样的破坏特征。当养护时间为1 d时,试样的裂隙集中在上下两端;当养护时间为7 d时,试样的裂隙同样主要分布在试样的上下两端,但其裂隙的密集程度与养护时间为1 d时的试样相比有所增加;当养护时间为14 d时,试样中部开始出现少量的裂隙;当养护时间为21 d时,中部的裂隙与试样上下两端的裂隙贯通,上下两端的受拉区域开始向试样中部发展;当养护时间为28 d时,中部裂隙继续发育,导致上下两端的裂隙完全贯通。

4 结 论

1) 超高水材料固结体的三向应力下的极限强度随养护时间的变化规律可由玻尔兹曼方程表示,养护时间0~14 d,极限强度从0增长到2.65 MPa,增长最快;养护时间14~28 d内的极限强度分别为2.65、2.96、3.12 MPa,增长幅度缓慢。

2) 超高水材料固结体PFC^{3D}三轴压缩数值模拟在养护时间(1、7、14、21、28 d)的横向力链数目为4 006、4 561、4 891、5 017、5 062;纵向力链数目为4 029、4 439、4 716、4 917、5 123,说明超高水材料固结体三向应力下的承载能力在1~14 d内增强最快,在14~28 d内超高水固结体三向应力下的承载能力趋于稳定。

3) 养护时间为1 d的超高水材料固结体破坏时的裂隙主要集中在试样的上下两端。随着养护时间的增加,裂隙的发育程度增加,破坏时试样的中部开始出现裂隙,与上下两端的裂隙逐步贯通。

参考文献(References):

- [1] 丁 玉,冯光明,王成真. 超高水充填材料基本性能试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1087-1092.
DING Yu, FENG Guangming, WANG Chengzhen. Experimental research on basic properties of superhigh-water packing material[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(7): 1087-1092.
- [2] 孙春东,刘树轮,李继升. 超高水材料在煤矿的系列应用技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 42-47.
SUN Chundong, LIU Shulun, LI Jisheng. Application technology of ultra high-water material in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(8): 42-47.
- [3] 冯光明,丁 玉,朱红菊,等. 矿用超高水充填材料及其结构的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 813-819.
FENG Guangming, DING Yu, ZHU Hongju, et al. Experimental research on a superhigh-water packing material for mining and its micromorphology[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(6): 813-819.
- [4] 郭文兵,马志宝,白二虎. 我国煤矿“三下一上”采煤技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 16-26.
- GUO Wenbing, MA Zhibao, BAI Erhu. Current status and prospect of coal mining technology under building, waterbodies and railways, and above confined water in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 16-26.
- [5] 王方田,李 岗,班建光,等. 深部开采充填体与煤柱协同承载效应研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 311-318.
WANG Fangtian, LI Gang, BAN Jianguang, et al. Synergistic bearing effect of backfilling body and coal pillar in deep mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(2): 311-318.
- [6] 杜兆文,陈绍杰,尹大伟,等. 氯盐侵蚀环境下膏体充填体稳定性试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 532-538,547.
DU Zhaowen, CHEN Shaojie, YIN Dawei, et al. Experimental study of the stability of paste backfill under chlorine erosion environment[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 532-538,547.
- [7] 任 帅,王方田,李少涛,等. 深井超高水充填工作面小煤柱稳定性规律及控制技术[J]. 煤矿安全, 2021, 52(6): 243-249,254.
REN Shuai, WANG Fangtian, LI Shaotao, et al. Stability law and control technology of small coal pillar in super high water backfilling face with deep mining depth[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(6): 243-249,254.
- [8] 李召峰,张 晨,张 健,等. 不同水饱和度充填体力学性能及损伤机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 1063-1069, 107.
LI Zhaofeng, ZHANG Chen, ZHANG Jian, et al. Study on mechanical properties and damage mechanism of backfill with different water saturation[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 1063-1069, 107.
- [9] 王旭锋,孙春东,张东升,等. 超高水材料充填胶结体工程特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 852-856.
WANG Xufeng, SUN Chundong, ZHANG Dongsheng, et al. Experimental study on engineering characteristics of super-high water filling body[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(6): 852-856.
- [10] 贾凯军,冯光明,王誉钦,等. 俯斜开采超高水材料袋式充填体失稳机理及防治[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 409-415.
JIA Kaijun, FENG Guangming, WANG Yuqin, et al. Instability mechanism and prevention of bag filling body constructed by super-high-water material under the condition of down-dip mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(3): 409-415.
- [11] 赵家巍,苏 腾,荣腾龙,等. 超高水充填材料侧限压缩应力应变本构关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 394-400.
ZHAO Jiawei, SU Teng, RONG Tenglong, et al. A constitutive model of superhigh-water filling material under confined compression[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(2): 394-400.
- [12] 苏承东,张振华. 大理岩三轴压缩的塑性变形与能量特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 273-280.

- SU Chengdong, ZHANG Zhenhua. Analysis of plastic deformation and energy property of marble under pseudo-triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(2): 273-280.
- [13] 刁兆丰, 刘长武, 张连卫, 等. 掺污泥改性高水材料典型加载方式下的变形特征和力学响应[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(10): 262-266.
- DIAO Zhaofeng, LIU Changwu, ZHANG Lianwei, *et al.* Deformation characteristics and mechanical response of modified high water material mixed with sludge under typical loading methods[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(10): 262-266.
- [14] 冯波, 刘长武, 谢辉, 等. 改性高水材料尺寸与形状效应研究[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(S2): 121-127.
- FENG Bo, LIU Changwu, XIE Hui, *et al.* Experimental study on the size and the shape of high-water-content material that modified[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(S2): 121-127.
- [15] 张钊, 刘长武, 王一冰, 等. 改性高水材料抗压、抗剪强度特征及对比分析[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(4): 552-560.
- ZHANG Zhao, LIU Changwu, WANG Yibing, *et al.* Characteristic and comparative analysis of compressive and shear strengths of modified high-water materials[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(4): 552-560.
- [16] 冯波, 刘长武, 谢辉, 等. 粉煤灰改性高水材料力学性能试验研究及机理分析[J]. *工程科学学报*, 2018, 40(10): 1187-1195.
- FENG Bo, LIU Changwu, XIE Hui, *et al.* Experimental study and analysis of the mechanical properties of high-water-content materials modified with fly ash[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(10): 1187-1195.
- [17] 赵永辉, 冉洪宇, 冯国瑞, 等. 单轴压缩下不同高宽比矽石胶结充填体损伤演化及破坏特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(4): 674-682.
- ZHAO Yonghui, RAN Hongyu, FENG Guorui, *et al.* Damage evolution and failure characteristics of cemented gangue backfill body with different height-width ratios under uniaxial compression[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(4): 674-682.
- [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.
- [19] 侯永强, 尹升华, 杨世兴, 等. 动态荷载下胶结充填体力学响应及能量损伤演化过程研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(S1): 145-156.
- HOU Yongqiang, YIN Shenghua, YANG Shixing, *et al.* Mechanical response and energy damage evolution process of cemented backfill under impact loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(S1): 145-156.
- [20] 张学朋, 王刚, 蒋宇静, 等. 基于颗粒离散元模型的花岗岩压缩试验模拟研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(S1): 99-105.
- ZHANG Xuepeng, WANG Gang, JIANG Yujing, *et al.* Simulation research on granite compression test based on particle discrete element model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(S1): 99-105.
- [21] 石崇颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [22] Itasca Consulting Group Inc. Manual of particle flow code in 2-dimension (Version 3.10)[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2004.
- [23] 冯光明, 李乃梁, 丁玉. 煤矿超高水材料充填工艺系统与实践[J]. *矿业工程研究*, 2019, 34(1): 13-22.
- FENG Guangming, LI Nailiang, DING Yu. Process system of filling with super high-water materials and practice in coal mine[J]. *Mineral Engineering Research*, 2019, 34(1): 13-22.
- [24] 胡炳南, 刘鹏亮, 崔锋, 等. 我国充填采煤技术回顾及发展现状[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(9): 39-47.
- HU Bingnan, LIU Pengliang, CUI Feng, *et al.* Review and development status of backfill coal mining technology in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 39-47.
- [25] 冯光明. 超高水充填材料及其充填开采技术研究与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- FENG Gangming. Research on the superhigh-water packing material and filling mining technology and their application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [26] 李博. 超高水材料开放式充填固结体承载特性试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- LI Bo. Experimental study on bearing capacity of open filling consolidation of super high water materials[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [27] 罗怀廷, 李俊孟, 黄艳利, 等. 露天矿排放矽石三轴压缩宏-细观力学特性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(1): 170-178.
- LUO Huaiting, LI Junmeng, HUANG Yanli, *et al.* Study on macro and microcosmic mechanical properties of crushed gangue from pit mine under triaxial compression[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(1): 170-178.