

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.015



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



碱激发矿渣-水泥注浆固结体单轴压缩力学特性 与破坏规律

郝文龙^a, 何文^{a,b}, 刘庆生^c

(江西理工大学 a. 矿业工程学院; b. 稀有金属资源安全高效开采江西省重点实验室; c. 冶金工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 为探究碱激发矿渣-水泥注浆固结体在单轴压缩条件下的力学特性和破坏规律, 采用室内试验与离散元数值模拟相结合的方法, 开展注浆量与岩石粒径双变量条件下固结体的单轴压缩试验, 基于离散元法对单轴压缩试验过程进行全流程模拟验证, 并分析岩石形状的圆度参数对固结体单轴抗压强度的影响规律。结果表明: 固结体的单轴抗压强度在注浆量 45%、岩石粒径 5~10 mm 时达到峰值(8 MPa), 弹性模量与峰值应变在注浆量 65% 时变化规律发生转变, 固结体承载从弱界面控制转向胶结骨架控制; 裂纹扩展表现为随注浆量呈分布式发展, 随岩石粒径呈岩石边界线条样式发展; 固结体单轴压缩的数值模拟与试验结果峰前高度相似, 峰后阶段应力差值控制在 0.6 MPa 左右, 其裂纹扩展及破坏模式也具有较好的相似性; 岩石形状的圆度参数与固结体的平均单轴抗压强度呈线性关系($R^2=0.96$), 圆度越接近 1, 固结体的单轴抗压强度越大。

关键词: 注浆加固; 碱激发矿渣; 岩石形状; 离散元; 力学特性; 破坏规律

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-13

Uniaxial compressive mechanical properties and failure patterns of alkali-activated slag-cement grout consolidation bodies

HAO Wenlong^a, HE Wen^{a,b}, LIU Qingsheng^c

(a. School of Mines; b. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Safe and Efficient Mining of Rare Metal Resources; c. School of Metallurgical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, P. R. China)

Abstract: To investigate the mechanical properties and failure patterns of alkali-activated slag-cement grout consolidation bodies under uniaxial compression, this study employs a combined approach of laboratory experiments and discrete element numerical simulations. Uniaxial compression tests were conducted on consolidation bodies under the dual variables of grout volume and rock particle size. The entire uniaxial compression process was simulated and validated using the discrete element method, and the influence of rock shape roundness parameters on the uniaxial compressive strength of the consolidation bodies was analyzed. The

收稿日期: 2025-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(52274350); 江西省重点研发计划(20202BBG73001)

作者简介: 郝文龙(2000-), 男, 主要从事岩石力学研究, E-mail: h15007082306@163.com。

何文(通信作者), 男, 副教授, E-mail: herman3@163.com。

Received: 2025-11-21

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52274350); Jiangxi Province Key R&D Program Project Funding (No. 20202BBG73001)

Author brief: HAO Wenlong (2000-), main research interest: rock mechanics, E-mail: h15007082306@163.com.

HE Wen (corresponding author), associate professor, E-mail: herman3@163.com.

results indicate that the uniaxial compressive strength reaches its peak of 8 MPa when the grout volume is 45% and the rock particle size is 5-10 mm. The evolution patterns of the elastic modulus and peak strain undergo a transition at a grout volume of 65%, marking a shift in the load-bearing mechanism from weak interface control to cemented skeleton control. Crack propagation is characterized by diffuse development as the grout volume increases, and by linear development along rock boundaries as the rock particle size increases. The numerical simulation results demonstrate high similarity with the experimental curves in the pre-peak stage, with the post-peak stress difference maintained at approximately 0.6 MPa; furthermore, the simulated crack expansion and failure modes are highly consistent with experimental observations. The rock shape roundness parameter exhibits a linear relationship ($R^2 = 0.96$) with the average uniaxial compressive strength, whereby higher roundness leads to greater uniaxial compressive strength of the consolidation bodies.

Keywords: grout reinforcement; alkali-activated slag; rock shape; discrete element method; mechanical properties; failure patterns

在岩土工程领域,巷道破碎岩体的加固一直是重要的研究课题^[1]。由于破碎岩体内部结构的复杂性及不稳定性,给工程安全带来了诸多挑战^[2]。注浆技术作为一种有效加固手段,能够有效改善岩体的力学性能,提高其承载力^[3]。近年来碱激发矿渣注浆材料因其优异的性能备受关注,碱激发矿渣注浆材料是一种以碱激发矿渣(Alkali-Activated Slag, AAS)为核心胶凝组分的高性能注浆材料,通过碱性激发矿渣硬化,产生C-(N)-A-S-H凝胶,降低注浆材料孔隙率,具有环保、卓越的早期强度、密实的内部结构及耐久性,在工程领域得到广泛应用^[4-6]。注浆固结体作为典型的非均质复合材料,其失效机制本质上是浆体-岩石界面细观损伤演化的宏观体现,室内试验测得固结体宏观强度规律难以实时描述固结体的细观损伤演化,借助PDC2D离散元法(Discrete Element Method, DEM),通过定义颗粒间细观黏结参数^[7],有效捕捉黏结键断裂后产生的非连续力学行为,直观再现固结体裂纹扩展规律及最终破裂形态的形成^[8-9]。

学者对碱矿渣注浆材料进行注浆加固进行了大量研究,在结构方面,刘红森等^[10]指出,碱矿渣地聚物强度的提升主要源于胶凝材料在碱激发剂作用下形成(C-A-S-H)凝胶,产生胶结作用,而孔隙填充为次要贡献因素。基于对细观结构填充的需要,Shen等^[11]进一步探讨了材料对比对固结体性能的影响,结果表明,提高碱浓度、增加矿渣掺量并选用适量模数的水玻璃,能同时缩短初凝时间、提升早期强度及流动度。在力学性能方面,Wang等^[12]探究了碱活化废料制备注浆材料的方法,并进行抗压试验,验证了碱活化注浆料在进行注浆加固后其固结体强度是水泥注浆材料加固强度的165%。然而宏观试验难以揭示细观损伤演化过程,为了从细观层面解释宏观破坏现象,李桂臣等^[13]、郝保钦等^[14]先后

利用离散元模拟水泥注浆加固效果,验证了该方法在参数标定与破坏预测中的可行性。在加固破碎岩体中,颗粒形状是导致应力场分布的重要因素,Han等^[15]通过重构复杂几何形貌,发现颗粒形状等细观特征会通过影响界面过渡带应力状态而改变裂纹扩展路径。

现阶段有关碱激发矿渣注浆材料在注浆加固试验和模拟方面的研究取得了重要进展,但针对碱激发矿渣-水泥注浆固结体的单轴压缩条件下的宏观力学响应,尤其是在注浆量及岩石粒径双变量作用下的强度变化规律及失效行为缺乏系统研究;此外,由于试验的局限性,固结体内部的损伤演化,尤其是裂纹的萌生、扩展过程难以捕捉,且岩石颗粒形状对固结体强度的量化规律仍不明确。笔者采用室内试验与离散元数值模拟相结合的方法,对注浆量与岩石粒径双变量影响下的碱激发矿渣-水泥注浆固结体开展单轴压缩试验,获取固结体宏观力学参数;并建立与之对应的细观离散元模型,再现其损伤演化全过程,从宏-细观层面系统阐明固结体的力学响应及损伤规律,在验证数值模拟可靠性的基础上,进一步揭示颗粒形状对固结体力学性能的影响规律。

1 试验

1.1 试验材料

水泥为P·O 42.5级水泥,其平均粒径为27.5 μm ,生产于中国河南省巩义市;高炉矿渣的型号为S 95,密度为2.84 g/cm³,比表面积为472 m²/kg,烧失量为0.4%,平均粒径为22.7 μm ,生产于河南远恒环保工程有限公司。通过激光衍射分析仪测得水泥及矿渣粒径分布如图1所示,二者的化学组成基于前期实验数据整理,具体见表1。水玻璃为钠水玻璃,其分子式为 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$,生产于嘉善县

优瑞耐火材料有限公司,详细成分见表2。通过苛性碱(NaOH为白色均匀粒状固体,纯度 $\geq 96\%$)调节水玻璃模数。注浆加固岩石选用粒径为5~30 mm的石灰石。

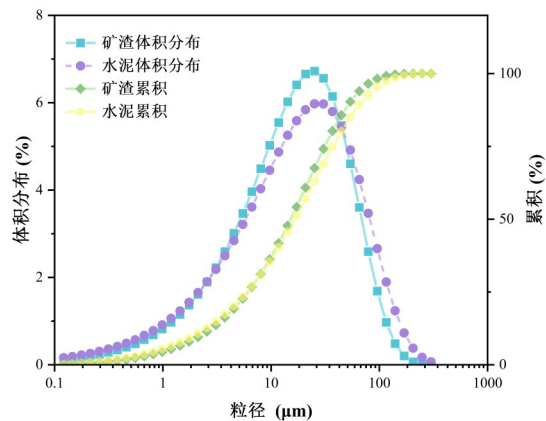


图1 水泥及矿渣粒径分布
Fig.1 Particle size distribution of cement and slag

表1 水泥与矿渣成分
Table 1 Composition of cement and slag

类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	其他
水泥	22.61	4.35	62.60	1.91	2.46	2.89	
矿渣	33.21	15.76	37.14	8.51	0.71		1.91

表2 水玻璃成分
Table 2 Parameters of water glass

波美度/Bé	模数	SiO ₂ /%	Na ₂ O/%	H ₂ O/%	密度/(g/cm ³)
50	2.3	30	13.5	56.5	1.51

1.2 试验方案及测试方法

1.2.1 试验方案

根据前期研究^[16],试验采用表3所示的碱激发矿渣-水泥注浆材料配合比,其中水泥与矿渣用量为1:1、水玻璃模数为1.5、碱浓度为1%、水灰比为0.8。

表3 材料配合比
Table 3 Material mix proportions

类型	水泥/(kg/m ³)	矿渣/(kg/m ³)	岩石/(kg/m ³)	水玻璃/(kg/m ³)	NaOH/(kg/m ³)	水/(kg/m ³)
GCB1-1、GCB1-2、GCB1-3	150	150	1 755	16.6	1.5	237
GCB2-1、GCB2-2、GCB2-3	193	193	1 485	21.3	2.0	305
GCB3-1、GCB3-2、GCB3-3	237	237	1 215	26.0	2.4	372
GCB4-1、GCB4-2、GCB4-3	279	279	945	30.8	2.9	440

为探究被加固岩石粒径与注浆量对固结体力学行为的调控作用,设计了双因素试验方案。3组被加固岩石粒径:5~10 mm、10~20 mm、20~0 mm,不同粒径岩石代表岩体破碎程度,即粒径越小破碎程度越大。结合前期预试验,当注浆量梯度小于7%时,单轴抗压强度变化率低于5%,难以区分显著性差异,而10%梯度下强度差异较为明显,能有效揭示注浆量的调控作用。因此,设定35%、45%、55%、65%四组注浆量,其中注浆量定义为在固定总体积条件下,基于岩石振实堆积孔隙,通过调节破碎岩石的体积分数,注入注浆液并完全填充总体积时所确定的体积分数^[17]。

试件制备严格遵循标准化流程:采用无水乙醇对岩石进行清洗,去除表面粉尘及杂质,确保注浆体与岩石间形成有效的化学胶结;为保证注浆体均匀填充孔隙,制备时充分插捣去除气泡。将制备好的 Φ 50 mm $\times$ H100 mm的圆柱体试件放入养护箱养护28 d,养护条件为温度(20 $\pm$ 5)℃,养护湿度不低于95%,待保养结束后进行单轴压缩试验。

1.2.2 单轴压缩试验

单轴压缩试验在RMT-150C岩石力学试验系统上进行,采用位移控制,加载速率设定为0.01

mm/s。试验前,对试样表面进行打磨并涂抹凡士林以减小端部摩擦,同时对微小凹陷进行填补以确保荷载均匀传递。启动岩石力学试验装置,将试样放置于压头中心并对准后,施加预载以消除初始间隙,随后以设定速率加载直至破坏,全程监测载荷与位移数据。

1.2.3 PFC离散元数值模拟

1)数值模型的建立

基于实际试样的尺寸,在PFC2D中建立二维颗粒流模型,单轴压缩模型尺寸为50 mm(宽度) $\times$ 100 mm(高度)。通过刚性墙体工具定义试样的边界条件:单轴压缩模拟中,顶部和底部墙体分别作为加载板和固定支座,其模型示意图如图2所示。

颗粒的生成采用随机分布方法,数值模拟选取2种颗粒粒径组,其中浆体颗粒粒径选取范围为0.015~0.028 mm,破碎岩石粒径选取范围为5~30 mm,并采用Clump刚性簇模拟注浆固结体中的岩石颗粒,根据试验材料密度及粒径,计算并赋予颗粒细观参数相应的属性,其详细颗粒参数见表4。在颗粒生成过程中,为满足级配要求,需多次尝试。颗粒生成后,通过迭代平衡计算使模型达到初始应力平衡状态,确保模拟的初始条件与实际试验一

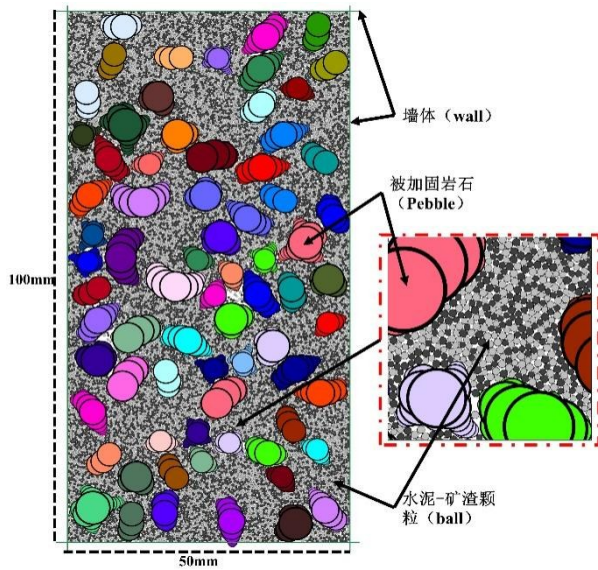


图2 建立PFC模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of PFC model establishment

致。其成样模型示意图如图3所示。

表4 数值模拟材料参数

Table 4 Numerical simulation material parameters

类型	密度/(g/cm ³)	粒径范围/mm	阻尼	孔隙率
水泥-矿渣	3 100	0.015~0.028	0.7	0.11
石灰石	2 700	5~30	0.7	

2) 接触模型的选择与参数标定

单轴压缩模拟预压平衡后,需分别考虑浆体颗粒间以及浆体颗粒与岩石颗粒间的接触力学行为。

针对岩石颗粒间的接触,由于宏观受压过程表现为点接触特征,且相互作用力与颗粒之间的重叠量呈线性关系,故选取线性接触模型表征^[18],该模型能有效捕捉岩石在受力过程中的压密及摩擦响应。对于浆体颗粒内部及浆体-岩石界面过渡区,其力学本质体现为浆体的化学胶凝与对岩石的强黏结及物理锚固,故选取平行黏结接触模型^[19],该模型可准确描述界面区在受力过程中黏聚力、摩擦响应及渐进破坏特征,从而更真实地反映实际界面过渡区有别于基体材料的力学性能。两类接触模型示意图如图4所示。

数值模拟参数的标定遵循宏-细观响应匹配原则:首先,选择抗压强度等力学参数较为中间值的试件GCB 3-2作为参数标定的基准模型,参考PFC理论手册及《岩土工程手册》等^[20],设定细观参数初始值,随后基于颗粒材料与数值敏感性分析,对刚度比 k_n/k_s 、摩擦系数 μ 及内摩擦角 Φ 进行取值,再采用宏-细观对比法,对细观模量、内聚力及黏结强度等进行调试,将模拟得到的宏观应力-应变曲线、峰值强度、弹性模量等与实际的室内试验数据进行反复比对^[21-22],当两者误差相接近时,保持细观参数一致,将标定后的参数用于不同注浆量及岩石粒径的模型组别中,观测改变注浆量及岩石粒径大小时应力-应变的变化,此时由于试件内各颗粒位置形状等多因素影响,模拟后得到的曲线及破坏结果与试验

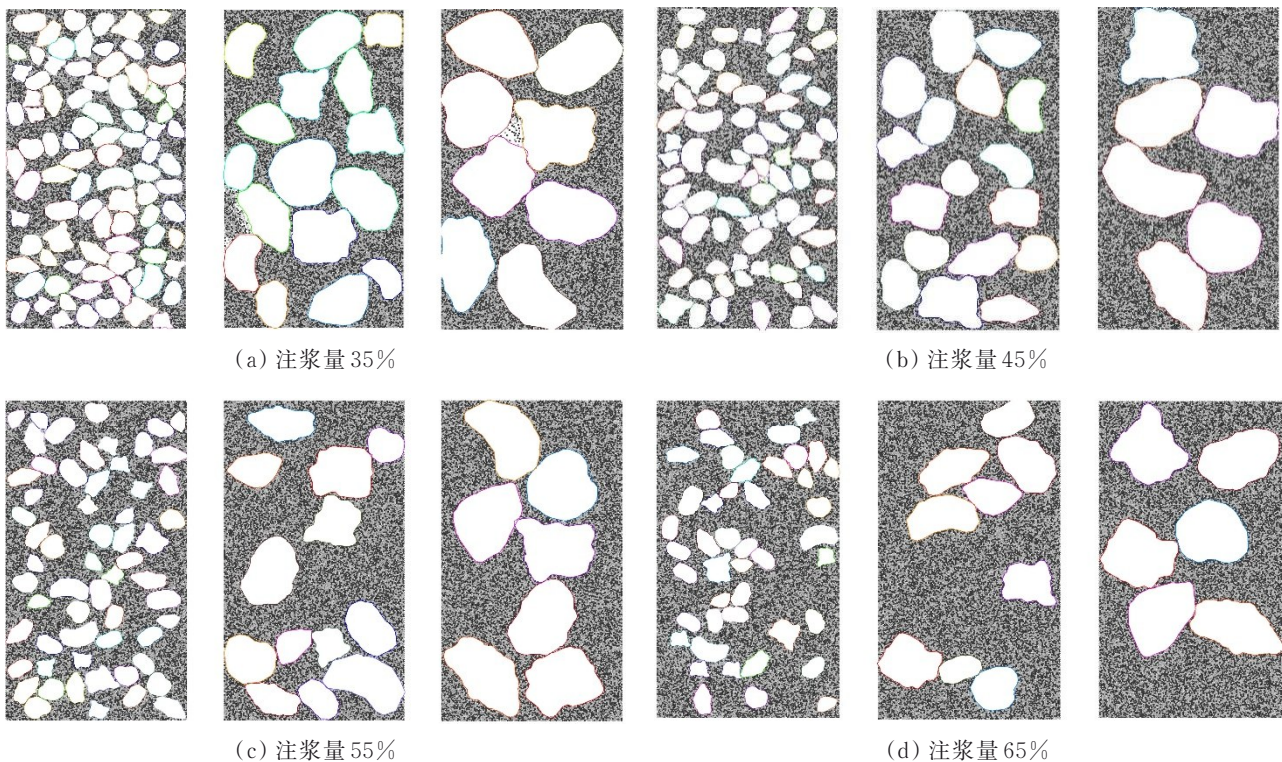


图3 各试件模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of test specimen models

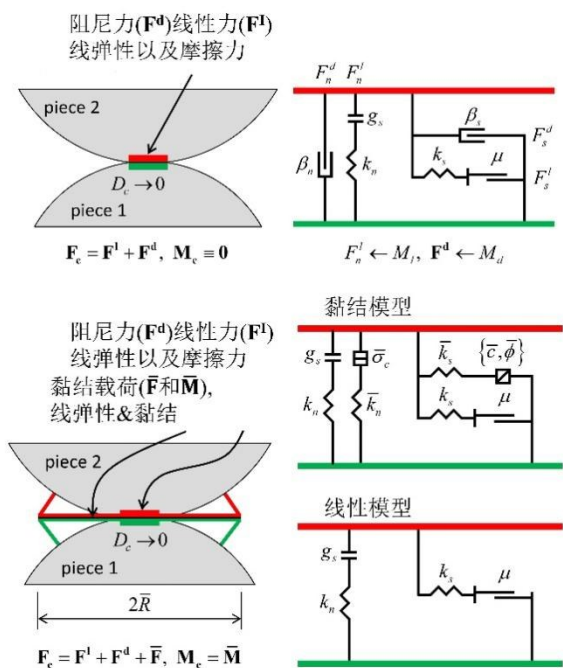


图 4 接触模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of contact mode

结果还存在偏差,因此需要在基准模型的基础上对细观参数再次进行调整,最终得到与实际曲线相接近时,停止标定,保存数据及曲线。线性接触模型及平行黏结模型参数如表 5、表 6 所示。表中, k_n/k_s 为浆体颗粒刚度比; k_n/k_s 为岩石颗粒刚度比; μ 为摩擦角; Φ 为内摩擦角; E_l 为线性接触模量; E_p 为平行黏结接触模量; c 、 δ 及 $\bar{c}$ 、 $\bar{\sigma}_t$ 分别为浆体颗粒间及浆体-岩石颗粒间内聚力及抗拉强度参数。

表 5 线性模型参数

类型	E_l/GPa	k_n/k_s	μ
注浆量 35%	1	1.3	0.5
注浆量 45%	1	1.3	0.5
注浆量 55%	1	1.3	0.5
注浆量 65%	1	1.3	0.5

在模拟单轴压缩试验中,固定底部墙体,顶部墙体以恒定速率(0.01 mm/s)向下移动施加压缩荷载,记录试样的轴向应力(通过顶部墙体的反力计算)和轴向应变(通过试样高度变化计算),生成应力-应变曲线。

2 试验结果与讨论

2.1 单轴压缩试验结果

对固结体进行单轴压缩试验,得到其应力-应变曲线如图 5 所示,与常见的均质岩石或水泥基材料不同,固结体的峰前形态展示出独特的非均质复合体系特征。

表 6 平行黏结模型参数

Table 6 Parameters of parallel bonding model

类型	E_p/GPa	k_n/k_s	μ	$\Phi/(^\circ)$	c	δ	$\bar{c}/\text{MPa}$	$\bar{\sigma}_t/\text{MPa}$
GCB1-1	1.5	1.5	0.5	53	22.5	16.5	11.3	8.2
GCB1-2	1.2	1.5	0.5	51	15	8	7.5	4.7
GCB1-3	0.7	1.5	0.5	50	13	5	6	3
GCB2-1	1.4	1.5	0.5	52	25	18	13	10
GCB2-2	1.2	1.5	0.5	50	19	9.5	10	5
GCB2-3	0.6	1.5	0.5	49	14.5	7	5	3
GCB3-1	1.45	1.5	0.5	50	23	13	9	6
GCB3-2	0.8	1.5	0.5	48	17.6	8.5	9	4.5
GCB3-3	0.6	1.5	0.5	47	12.8	6	4.3	3
GCB4-1	0.7	1.5	0.5	48	10	6	5	3
GCB4-2	0.85	1.5	0.5	46	11.5	5	5	2.5
GCB4-3	0.9	1.5	0.5	45	12	5.7	5.5	3

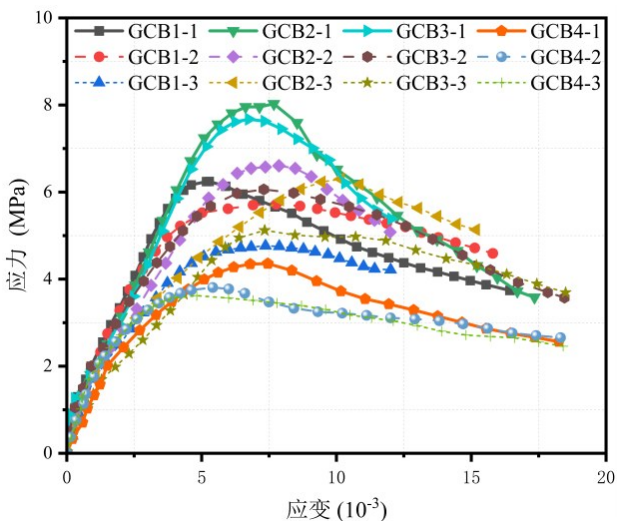


图 5 单轴压缩试验应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve for uniaxial compression test

1) 压密与损伤同步演化阶段:加载初期,曲线并未表现出明显的非线性上凹压密阶段,且出现上升段斜率略减的现象,这是注浆固结体非均质复合体系的典型力学响应。荷载作用下,岩石颗粒初始孔隙压实贡献应力增长,而浆体-岩石弱界面因颗粒接触区应力集中发生的早期微滑移抵消了部分应力增量,体现了非均质体系“孔隙压实与局部损伤同步演化”的受力本质。

2) 注浆量与岩石骨架主导的线弹性阶段:线弹性阶段的显著性与注浆量及岩石粒径密切相关,适中注浆量及较小粒径岩石可形成高强、均质的复合结构,其响应在峰值前由材料弹性刚度主导,因而呈现明显线弹性阶段;而随着岩石粒径增大,略低或过高的注浆量会分别在界面或浆体内引入薄弱区,导致细观损伤过早萌生并与弹性变形耦合,且大颗粒间应力分布不均匀,诱发胶结层提前屈服,致使线弹性阶段缩短并呈现早期非线性。

3)峰后应变软化与失效阶段:峰值后,固结体并未发生瞬时的脆性破坏,由于浆体-岩石界面过渡区及材料自身强度特性,裂纹的扩展并非瞬间完成,而是需要一定的应变积累。其次,注浆料C-(N)-A-S-H凝胶网络通过界面滑移耗能效应,有效延缓承载能力衰减,使固结体在峰值承载能力稍逊的情况下,仍能维持良好残余承载性能。对于峰值应力较低的试件,其内部缺陷较为均匀,峰后破坏以胶结键断裂及摩擦为主导,应变积累延长,展现出注浆材料加固后极强的稳定性和安全性。

试验得到的各固结体单轴抗压强度、弹性模量、峰值应变参数如表7所示。

表7 注浆固结体单轴压缩力学性能

Table 7 Uniaxial compressive mechanical properties of grout consolidation mass

类型	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	峰值应变/ 10^{-3}
GCB1-1	6.246	1.385	5.280
GCB1-2	5.724	1.001	7.970
GCB1-3	4.765	0.901	7.370
GCB2-1	8.029	1.251	7.677
GCB2-2	6.605	0.953	7.863
GCB2-3	6.300	0.657	10.153
GCB3-1	7.673	1.309	6.751
GCB3-2	6.061	0.958	7.300
GCB3-3	5.122	0.759	7.332
GCB4-1	4.355	0.541	7.449
GCB4-2	3.810	0.657	5.412
GCB4-3	3.623	0.966	4.819

1)单轴抗压强度:固结体的抗压强度受注浆量与岩石粒径的双重调控,随粒径增大,强度呈现明显劣化趋势,主要由于较大粒径岩石的比表面积较小,浆体-岩石有效胶结面积相应减少,且颗粒间易诱发应力集中,从而削弱整体承载能力。注浆量对强度的影响则呈先增后减的非单调趋势,在45%注浆量时强度达到峰值(破碎岩石粒径5~10 mm条件下可达8 MPa)。这反映了从胶结不足导致界面不连续向过量注浆引起的浆体收缩及微缺陷激增的演化过程。

2)弹性模量:在注浆量处于35%~55%时,固结体弹性模量随岩石粒径增大而逐渐降低,此时刚度受浆体-岩石界面质量影响,大粒径组的弱界面效应占主导地位。而注浆量达到65%时,则呈现相反规律,对于粗粒径组,浆体在较大孔隙中富集并形成厚实连续的胶结骨架,故刚度较高;细粒径组则因颗粒比表面积大,浆体分布相对稀疏、胶结薄弱,且缺陷更易产生,导致模量降低。

3)峰值应变:峰值应变则表现出与弹性模量具

有相反的变化规律。注浆量处于35%~55%时,峰值应变随岩石粒径增大而逐渐增加,在加载过程中,大粒径颗粒微滑移与转动更为显著,通过宏观应变调节内部应力集中,延性特性增强。注浆量65%时,峰值应变与粒径关系反转,充足的浆体充盈了空隙,且在岩石周围形成较厚的连续胶结层,增强了对颗粒变形的约束,提升了抗变形能力,使固结体在较小应变下达到强度峰值。

2.2 PFC离散元数值模拟结果

2.2.1 PFC应力-应变及破坏数值模拟

固结体数值模拟应力-应变曲线及模型破坏与试验曲线及试件破坏对比如图6所示。

1)应力-应变曲线:固结体数值模拟曲线与试验曲线在上升阶段和峰值强度部分表现出较强的一致性,模拟得到的峰值强度与试验值误差仅为3%,峰值应变误差也仅在2%以内,且弹性模量的变化趋势也高度吻合。表明所建立的离散元数值模型在描述固结体加载初期的力学行为方面有较强的准确性。在峰后阶段,数值模拟曲线下落速度较试验曲线更快,导致在相同应变水平下,模拟应力值低于实验值0.6 MPa左右,且模拟曲线的波动程度与试验曲线差异较大。这是由于数值模拟采用刚性簇来表征岩石颗粒,岩石破坏存在局限,并且由于模型中对颗粒几何形态及接触方式等细观结构的简化及假设与实际材料细观结构之间存在差异。

2)破坏模式:观察固结体的破坏对比图可知,两者在破坏模式上也具有相似性,试件裂纹扩展及破坏位置较为相似,但两者在宏观破裂形态上仍存在差异,主要源于两个方面:实际试件内部存在材料非均匀性、初始缺陷分布以及浆液-岩石界面复杂应力集中,这些因素会诱发局部裂纹相互作用与偏转;数值模型基于理想化的颗粒组装与均匀黏结假设,难以完全复现真实材料中的随机细观缺陷与渐进损伤过程。尽管如此,所建立的离散元模型在反映碱激发矿渣-水泥注浆固结体的主要力学响应、峰值强度特征及破裂发展趋势方面仍具有较好的可靠性,能够从细观机制上解释宏观力学行为。

2.2.2 PFC裂纹扩展数值模拟

数值模拟得到的不同注浆量与破碎岩石粒径固结体从加载初期至失稳破坏的裂纹演化过程见图7。通过对数值模拟裂纹发展规律进行分析发现,低注浆量的固结体在单轴压缩过程中更容易形成多条且不均匀裂纹,这是由于模型中胶结键数量有限且分布不均,应力无法有效传递,在多个薄弱点处同时诱发弥散式微裂纹,产生更严重的破坏。而随着注浆量的增大,固结体模型中胶结网络趋于

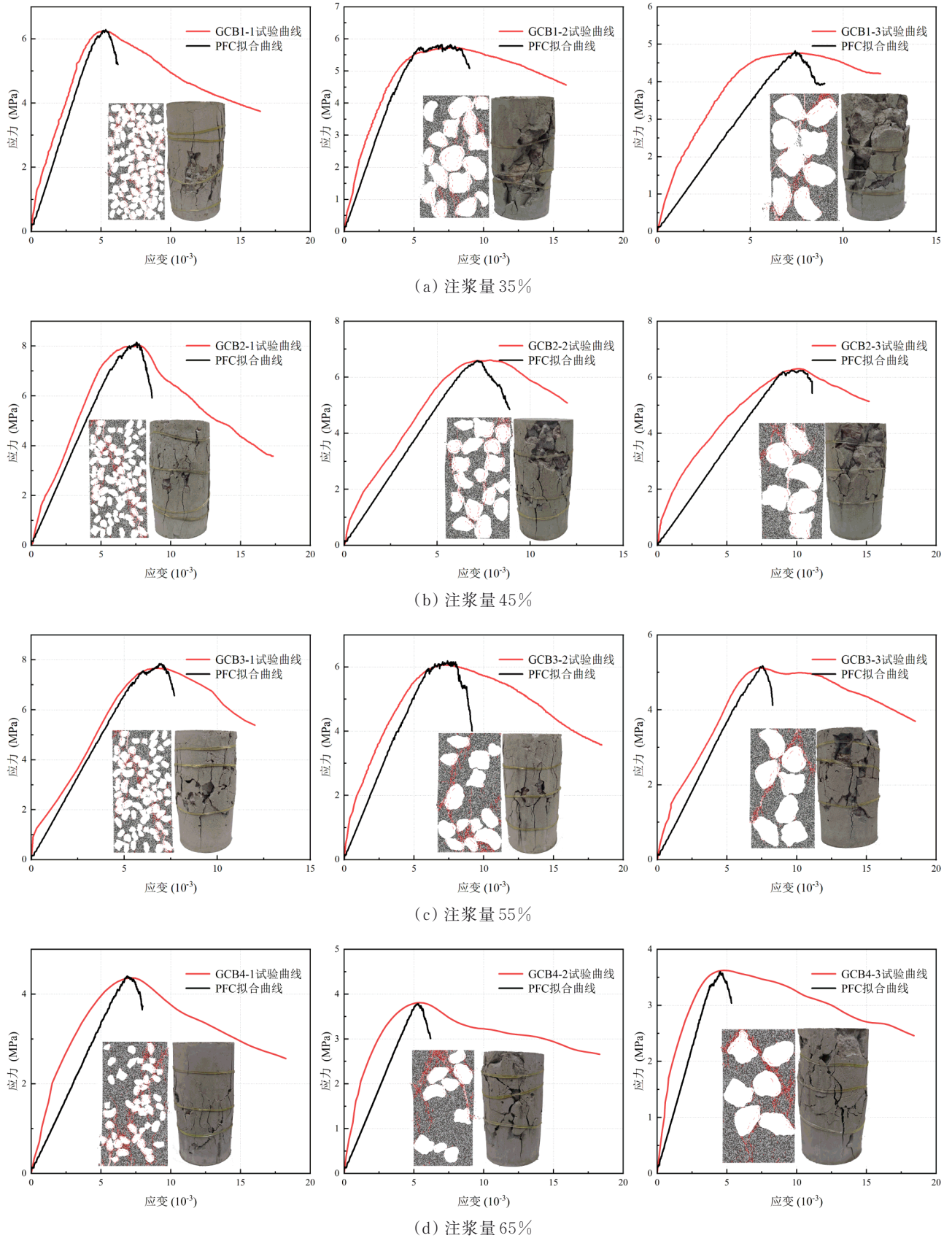


图 6 单轴压缩试验与 PFC 应力-应变曲线及试件破坏规律对比

Fig.6 Comparison of uniaxial compression test results with PFC stress-strain curves and specimen failure patterns

连续,应力得以通过更集中的路径传递,损伤逐渐从弥散化转变为局部化,应力集中于少数主裂纹,尽管局部裂纹总数可能增加,但结构整体性得到改

善,破坏程度减轻。这与实际试验的情况吻合,且与现有的研究结果相似^[23-24],验证了数值模拟的准确性。当保持注浆量不变,分析固结体模型内部的

岩石粒径大小变化时,岩石粒径为5~10 mm时,固结体浆体-岩石界面密集,预设的界面黏结成为力学薄弱环节,导致裂纹沿密集界面萌生与扩展,裂纹的分布较为分散。岩石粒径为10~20 mm时,模型中孔隙尺寸增加使形成的胶结层尺寸相应增大,应力在大尺度胶结区域显著集中,促使损伤从弥散状

向若干优势路径汇聚。岩石粒径为20~230 mm时,固结体模型中岩石颗粒骨架稀疏,应力沿颗粒边界高效传递并快速累积,形成明显的岩石边界线条样式的裂纹带,裂纹逐渐集中在一块区域,并发展成类似人字形或V字形的主裂纹带。

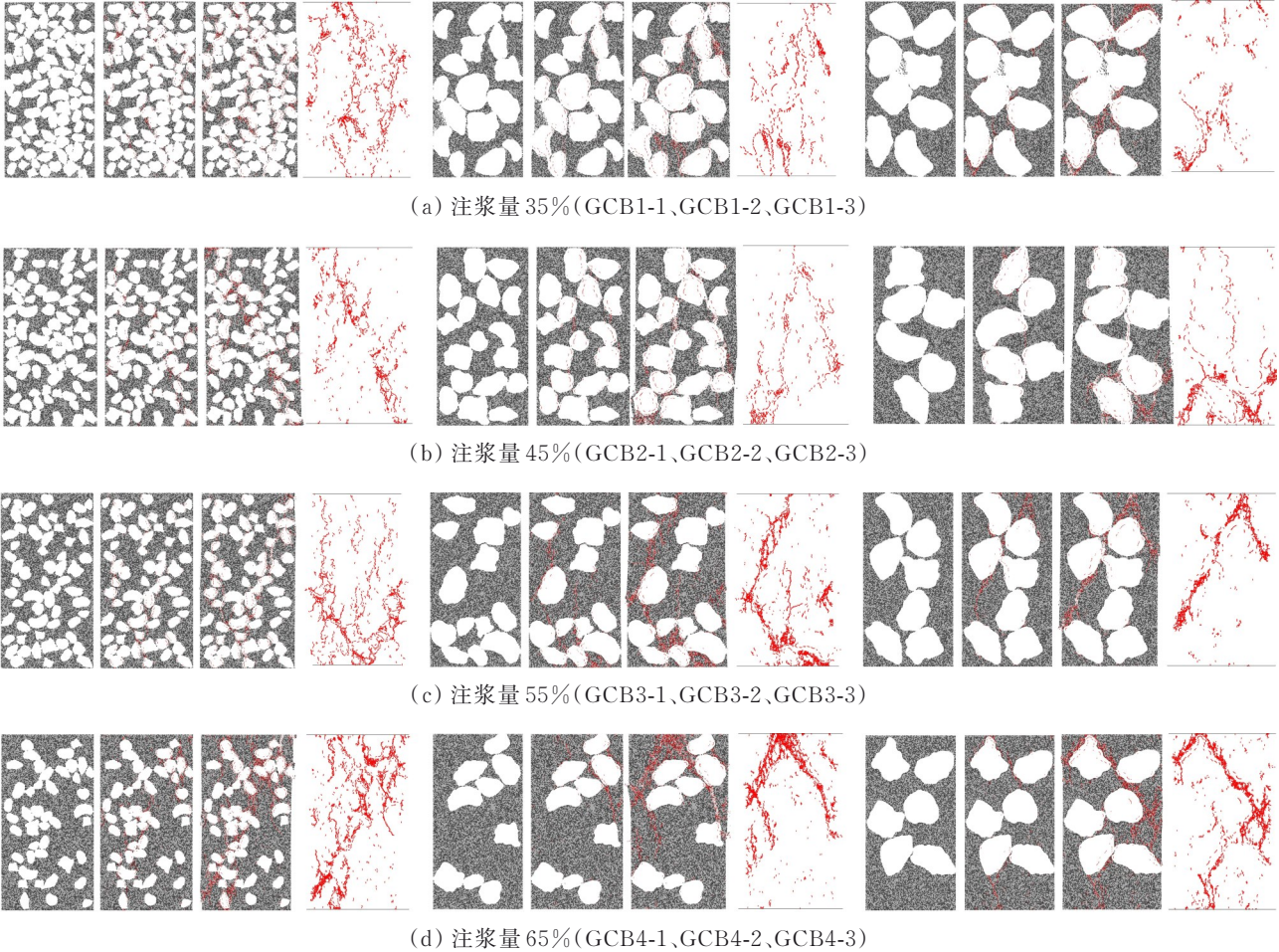


图7 单轴压缩数值模拟试件裂纹发展规律

Fig.7 Crack development patterns in numerically simulated specimens under uniaxial compression

2.3 岩石形状对固结体抗压强度的影响

2.3.1 岩石形状的确定

岩石骨架作为碱激发矿渣-水泥注浆固结体的承载主体,其形状通过调控颗粒间的机械咬合与互锁效应,显著影响固结体的宏观稳定性与破坏模式。此外,注浆量、岩石粒径与岩石形状三者共同构成了“注浆-颗粒-胶结”复合体系的关键控制变量,协同支配着固结体的最终力学响应。在自然状态下,岩石的形状具有高度随机性与复杂性,导致其在受力过程中的应力分布和变形机制存在显著差异,进而影响材料的整体力学性能^[25]。因此,研究岩石形状对固结体单轴压缩力学性能的影响具有重要的科学和实际意义。在研究过程中,通过对石灰石形状的观察和分析,提取出现频率最高的6类

代表性岩石形状,根据岩石大概形状,划分为类尖锥形、类三角形、类椭圆形、类十字架形、类方形、类圆形,如图8所示。

通过圆度计算方程(式(1))得到岩石的圆度参数,其圆度参数见表8。

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (1)$$

式中: C 为圆度; A 为形状的面积; P 为形状的周长。对于圆形 $C=1$;对于其他形状, $C<1$ 。

为在数值模型中准确表征岩石颗粒的非球形特征,基于图8所示的圆度样本,提取其轮廓并构建对应的刚性簇Clump模型。在保持模型其他细观参数一致的前提下,通过系统替换不同圆度的Clump,实现了对注浆加固过程中岩石形状变量的



图 8 岩石形状
Fig.8 Rock shapes

表 8 各岩石形状圆度参数

Table 8 Roundness parameters for various rock shapes					
类尖锥	类十字	类三角	类椭圆形	类方形	类圆形
0.69	0.74	0.8	0.82	0.85	0.92

独立控制与影响分析。

2.3.2 不同岩石形状固结体的应力-应变曲线

不同岩石形状固结体单轴压缩模拟的应力-应变曲线如图 9 所示。各曲线均描述了固结体从初期承载到最终破裂的全过程,但是在强度与变形上对岩石形状的变化表现出明显的差异性。由图 9 可知:岩石形状的变化对曲线峰前斜率影响微弱,各曲线间斜率的变化差值低于 10%,表明在当前细观参数体系下,岩石几何形态对刚度的改变相对有限。然而,单轴抗压强度对岩石形状变化有显著的敏感性。当模拟中采用单一形状岩石时,黏结键受力均衡,延缓了局部断裂的发生,其单轴抗压强度得到明显增强,最大增幅可达 30%,表明单一的岩石形状能够有效改善固结体的强度。但是这种增强效应受到注浆量的制约,当注浆量过低或过高

时,模型内部黏结键分布稀疏或胶结层尺寸过大导致应力传递路径不稳,使其强度降低约 22%,这说明注浆量的控制对于被加固岩石形状的优化或对其强度的增强效应至关重要。此外,岩石形状的圆度参数对固结体的变形硬化路径有着重要的调控作用,由图中曲线可见,当圆度较低或较高时,模型内部易产生局部接触滑移或应力突变,颗粒集合体难以快速构建稳定的应力传输路径,需要通过持续的转动或滑移进行调整,从而延长了应变硬化的时间。然而,岩石形状的圆度参数介于两者之间时,曲线会更快地达到峰值点,颗粒间的位移与转动阻力达到平衡,能更快地建立稳定的受力骨架,表现为较小的应变与更快的硬化速率。因此,岩石形状对固结体的力学性能具有显著的调控作用,对优化注浆加固后的力学性能具有重要意义^[26]。

2.3.3 不同岩石形状固结体的单轴抗压强度

数值模拟得到的不同圆度的固结体的单轴抗压强度见表 9。由表 9 可见:岩石圆度参数对固结体的单轴抗压强度具有显著影响。低圆度组中,颗粒尖端导致接触力链发生突变,使黏结键在较低荷载下达到强度阈值,诱发缺陷的萌生,为裂纹的扩展提供明显的路径,裂纹沿着尖端扩展,导致低圆度模型承载能力过早丧失。而高圆度岩石边界有助于接触力链的排布及应力释放,使得裂纹扩展路径更为复杂,裂纹的形成与扩展更加艰难,抑制裂纹的产生与扩展,从而提高了固结体的单轴抗压强度^[27]。

为描述岩石形状圆度参数与固结体平均单轴抗压强度之间的关系,将得到的不同岩石形状固结体单轴压缩数值模拟结果,进行线性拟合分析,其拟合方程见式(2)。

表 9 各岩石形状单轴抗压强度

Table 9 Uniaxial compressive strength of various rock shapes						
类型	类尖锥/MPa	类十字/MPa	类三角形/MPa	类椭圆/MPa	类方形/MPa	类圆形/MPa
GCB1-1	5.93	4.82	5.85	6.02	4.87	6.32
GCB1-2	6.30	5.16	5.30	7.52	8.00	7.55
GCB1-3	4.50	6.18	4.93	5.04	6.03	5.60
GCB2-1	8.34	9.27	9.44	8.62	9.46	8.00
GCB2-2	7.86	7.47	7.29	8.54	9.55	8.91
GCB2-3	5.84	6.65	7.17	6.77	7.05	7.38
GCB3-1	6.94	7.38	8.08	8.24	6.46	8.78
GCB3-2	6.11	7.08	6.58	6.32	6.05	5.90
GCB3-3	5.65	5.00	6.55	5.98	6.20	6.10
GCB4-1	4.18	4.28	4.47	4.13	4.10	4.54
GCB4-2	3.66	4.07	3.35	3.84	3.42	4.15
GCB4-3	3.10	2.98	2.84	2.70	3.14	3.14
均值	5.70	5.86	5.99	6.14	6.19	6.36

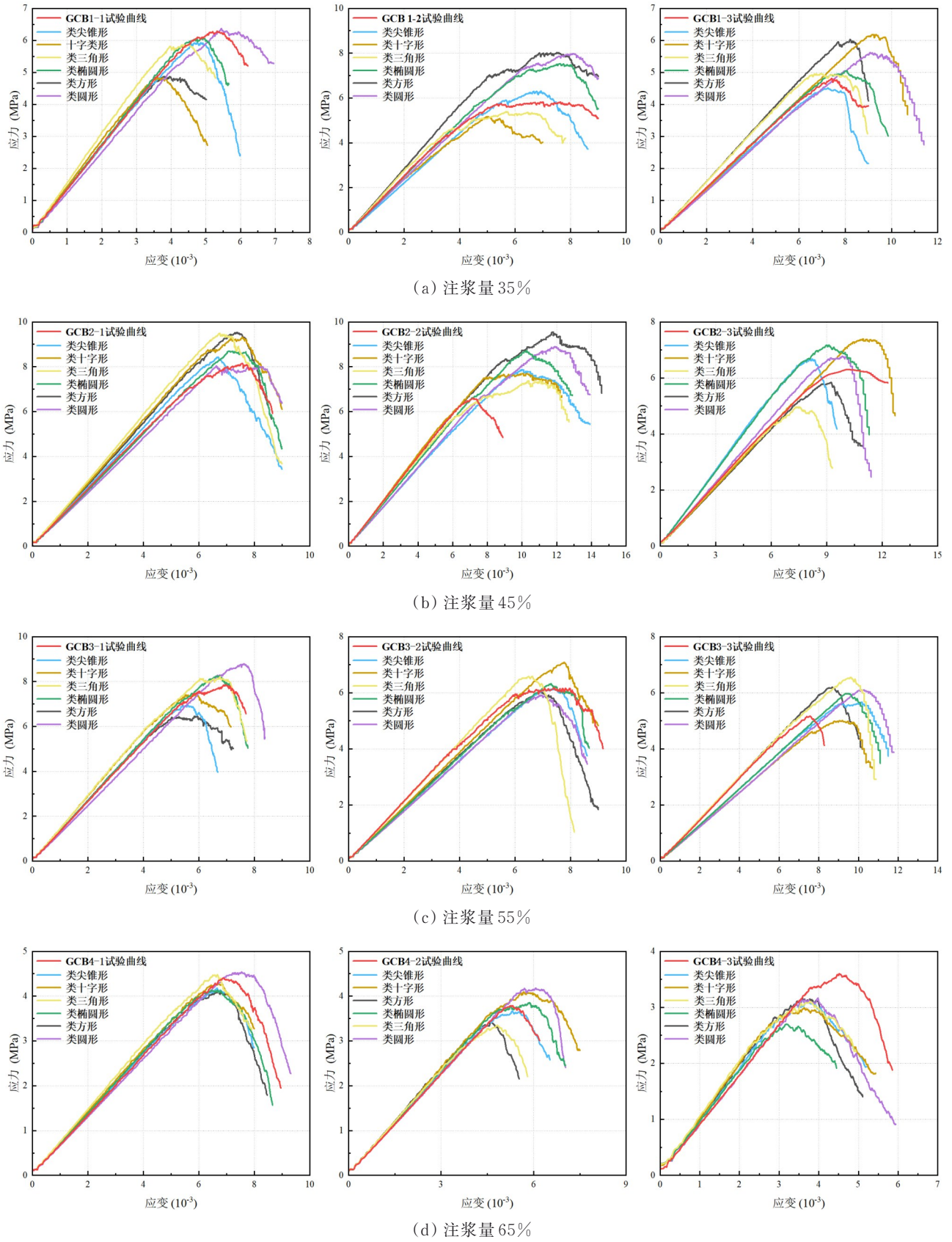


图9 各岩石形状应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of various rock shapes

$$\sigma = 3.93 + 2.61C \quad (R^2 = 0.96) \quad (2)$$

式中: σ 为平均单轴抗压强度; C 为岩石形状的圆度。
拟合结果见图 10, 固结体的平均单轴抗压强度

与岩石形状圆度参数之间存在明显的线性关系, 其精度达到 0.96, 为预测单轴抗压强度与圆度参数之间的关系提供了定量依据。

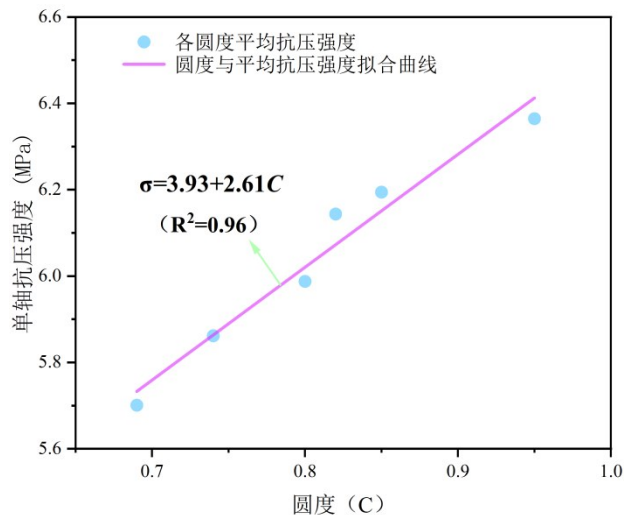


图 10 平均单轴抗压强度与圆度关系拟合

Fig.10 Average uniaxial compressive strength and roundness relationship fitting

3 结论

对碱激发矿渣-水泥注浆材料加固破碎岩石后形成的注浆固结体进行单轴压缩试验并进行离散元数值模拟,通过数值模拟定义岩石形状圆度参数,研究注浆量与岩石粒径双变量影响下固结体的力学行为及破坏过程,得到以下结论:

1) 固结体的单轴抗压强度随注浆量先增大后降低,并随岩石粒径增大而降低,注浆量为 45%、粒径 5~10 mm 时,强度最高;弹性模量与峰值应变在注浆量 65% 时发生规律反转,在注浆量 35%~55% 时,模量随粒径增大而降低,注浆量 65% 时,模量随粒径增大而升高,峰值应变则呈现相反的变化趋势,揭示了固结体承载从浆体-岩石界面控制向胶结骨架控制的转变。

2) 固结体数值模拟曲线与实际试验曲线在上升段和峰值强度部分具有良好的一致性,峰后阶段因岩石刚性簇假设导致模拟曲线与试验曲线应力存在约 0.6 MPa 的偏差,但离散元模型仍能较好地模拟固结体在单轴压缩条件下的力学响应与破坏。

3) 注浆量 35% 或粒径为 5~10 mm 时,裂纹以浆体-岩石界面弥散式扩展,随注浆量增大,裂纹向主裂纹带汇聚,破坏程度减轻;随粒径增大,裂纹逐渐从上下贯通转为沿主裂纹带扩展,形成岩石边界线条样式的集中裂纹带,并分化出“人字形”或“V 字形”主裂纹。

4) 固结体的平均单轴抗压强度与岩石形状圆度参数呈显著的线性关系,圆度 C 越接近 1,即岩石形状越接近圆形,固结体的单轴抗压强度越大。

参考文献

- [1] 许宏发,耿汉生,李朝甫,等.破碎岩体注浆加固强度估计[J].岩土工程学报,2013,35(11):2018-2022.
Xu H F, Geng H S, Li C F, et al. Estimating strength of grouting reinforced bodies in broken rock mass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (11): 2018-2022. (in Chinese)
- [2] 董红娟,张金山,姚贺瑜,等.不同参数大尺度注浆体试件力学特性与失稳机制[J].中国矿业大学学报,2021,50(1):79-89.
Dong H J, Zhang J S, Yao H Y, et al. Mechanical properties and instability mechanism of large scale grouting specimens with different parameters [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50 (1): 79-89. (in Chinese)
- [3] 吴爱祥,刘超,韩斌,等.软弱破碎矿体化学注浆浅孔留矿法试验研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(1):150-155.
Wu A X, Liu C, Han B, et al. Experimental research on chemical grouting short hole shrinkage for weak-broken orebody [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(1): 150-155. (in Chinese)
- [4] 陈友治,蒲心诚.新型碱矿渣水泥研究[J].重庆建筑大学学报,1998(4):9-13.
Chen Y Z, Pu X C. A study on the new alkali-activated slag cement [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1998(4): 9-13. (in Chinese)
- [5] Wang L N, Fu H Y, Gao Q F, et al. Engineering performance and mechanism of alkali-activated ground granulated blast furnace slag-zeolite powder grouting materials [J]. Applied Sciences, 2025, 15(6): 3345.
- [6] Li K, Zhu L S, Wu Z H, et al. Properties of cemented filling materials prepared from phosphogypsum-steel slag-blast-furnace slag and its environmental effect [J]. Materials, 2024, 17(14): 3618.
- [7] 张洪伟,姜汉,刘世奇,等.基于D-Rb-C耦合模型的破碎岩体注浆加固作用机制与规律[J].煤炭学报,2023,48(4):1464-1475.
Zhang H W, Jiang H, Liu S Q, et al. Mechanism of grouting diffusion and consolidation of rock mass based on D-Rb-C coupled model [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1464-1475. (in Chinese)
- [8] 石崇,张强,王盛年.颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[J].岩土力学,2018,39(增刊2):36.
Shi C, Zhang Q, Wang S N. Numerical simulation technology of particle flow (PFC5.0) and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup 2): 36. (in Chinese)
- [9] 秦鹏飞.不良地质体注浆细观力学模拟研究[J].煤炭学报,2020,45(7):2646-2654.
Qin P F. Study on meso-mechanical simulation of

- grouting in bad geo-body [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2646-2654. (in Chinese)
- [10] 刘红森, 王一博, 张媛媛, 等. 碱激发矿渣-粉煤灰改良湿陷性黄土力学特性及微观机理[J]. 工程科学学报, 2026, 48(1): 1-13.
- Liu H S, Wang Y B, Zhang Y Y, et al. Mechanical properties and microscopic mechanisms of alkali-activated slag/fly ash-modified collapsible loess [J]. Chinese Journal of Engineering, 2026, 48(1): 1-13. (in Chinese)
- [11] Shen Y R, Kang S X, Cheng G G, et al. Effects of silicate modulus and alkali dosage on the performance of one-part electric furnace nickel slag-based geopolymer repair materials [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02224.
- [12] Wang Z J, Li H J, Duan S S, et al. Investigation and utilization of alkali-activated grouting materials incorporating engineering waste soil and fly ash/slag [J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4915.
- [13] 李桂臣, 孙长伦, 孙元田, 等. 基于“两介质-三界面”模型的散煤注浆固结宏观规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 427-434.
- Li G C, Sun C L, Sun Y T, et al. Macroscopic and microcosmic consolidation law of loose coal grouting based on the “two media-three interfaces” model [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 427-434. (in Chinese)
- [14] 郝保钦, 张昌锁, 王晨龙, 等. 岩石 PFC2D 模型细观参数确定方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 132-141.
- Hao B Q, Zhang C S, Wang C L, et al. Study on determination micro-parameters of rock PFC2D model [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 132-141. (in Chinese)
- [15] Han A L, Ilhan N, Yanuar S. The effect of aggregate shape and configuration to the concrete behavior [J]. Smart Science, 2014, 2(2): 85-90.
- [16] 黄崇杰. 基于碱激发材料的破碎岩体注浆加固与锚注支护试验研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- Huang C J. Experimental study on grouting reinforcement and bolting-grouting support of broken rock mass based on alkali-activated materials [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [17] ASTM C29/C29M-23 Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate [S].
- [18] 杨小龙, 王刚. 滑坡堆积体反粒序现象的离散元数值分析[J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 1941-1950.
- Yang X L, Wang G. Dem study of inverse grading phenomenon in landslide deposits [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 1941-1950. (in Chinese)
- [19] 刘桂林. PFC2D 平行黏结模型细观参数标定[J]. 甘肃水利水电技术, 2024, 60(11): 38-42.
- Liu G L. Calibration of mesoscopic parameters of PFC2D parallel bonding model [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2024, 60(11): 38-42. (in Chinese)
- [20] 约翰·伯兰德. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- BURLAND J B. ICE manual of geotechnical engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024. (in Chinese)
- [21] XU Z H, WANG W Y, LIN P, et al. A parameter calibration method for PFC simulation: Development and a case study of limestone [J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 22(1): 97-108.
- [22] 陈鹏宇, 余宏明. 平直节理黏结颗粒材料宏观参数关系及细观参数的标定[J]. 土木建筑与环境工程, 2016(5): 74-84.
- Chen P Y, Yu H M. Relationship between macroparameters and microparameters of flat-jointed bonded-particle material and calibration of microparameters [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2016(5): 74-84. (in Chinese)
- [23] Yang L F, Pathirage M, Su H Z, et al. Computational modeling of expansion and deterioration due to alkali-silica reaction: Effects of size range, size distribution, and content of reactive aggregate [J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 234/235: 111220.
- [24] 陈燕伟, 冯吉利, 朱天宇, 等. 不同骨料体积分数下混凝土增韧机制及细观断裂模拟[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 4972-4987.
- Chen Y W, Feng J L, Zhu T Y, et al. Toughening mechanism and meso-scale fracture simulation of concrete with different aggregate volume fractions [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(10): 4972-4987. (in Chinese)
- [25] Zhao N N, Zhang Z T, Ren C C, et al. Finite element simulation of the effect of particle shape and thermal residual stress on the tensile properties of NbCp/Fe composites [J]. Materials Today Communications, 2024, 41: 110381.
- [26] Khairandish M I, Chopra A, Singh S, et al. Effect of gradation and morphological characteristics of aggregates on mechanical properties of bituminous concrete and dense bituminous macadam [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2022, 46(1): 293-307.
- [27] 杜晓奇, 司政, 黄灵芝, 等. 粗骨料颗粒形态和体积分数对混凝土单轴压缩性能的影响研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4): 1828-1834, 1879.

Du X Q, Si Z, Huang L Z, et al. Study on the influence of coarse aggregate particle shape and volume fraction on the uniaxial compressive properties of concrete [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(4): 1828-1834, 1879. (in Chinese)

(编辑 XXX)