

任玉琦,李戡,覃洪杰,等.河砂-石灰-石膏相似材料配比规律试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(4):416-425.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20260102
Ren Yuqi,Li Jian,Qin Hongjie,et al.Experimental study on mix proportion law of river sand-lime-gypsum similar materials[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2026,45(4):416-425.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20260102

河砂-石灰-石膏相似材料配比规律试验研究

任玉琦^{1,2,3}, 李 戡^{1*}, 覃洪杰¹, 张 磊^{1,2,3}

(1. 山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同 037003; 2. 山西大同大学 煤矿水射流技术与装备厅市共建山西省重点实验室 培育基地, 山西 大同 037003; 3. 山西省矿区综合监测与应急减灾技术创新中心, 山西 大同 037003)

摘 要: 为完善现有河砂-石灰-石膏相似材料配比体系数据, 设定砂胶质量比(1:1~9:1)和灰膏质量比(1:1~9:1)两个因素, 开展81组全因子配比试验, 测试相似材料试样的单轴抗压强度。结果表明: 石膏掺量是影响试样抗压强度的主导因素, 石膏掺量由10%提高至90%时, 试样强度最高增加8.23倍; 骨料掺量与试样抗压强度呈负相关, 骨料掺量由2份增至9份时, 强度最大降低80.66%。在此基础上, 建立河砂-石灰-石膏相似材料在0.031~0.543 MPa强度区间的配比数据库, 提出“岩性定区间、区间选路径”的优选原则。工程应用表明, 所选配比能较好模拟实际岩层力学行为, 可为相似模拟试验材料配比选取提供数据支撑和理论依据。

关键词: 相似材料配比; 全因子配比; 砂胶质量比; 灰膏质量比; 单轴抗压强度; 相似模拟试验

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)04-0416-10

Experimental study on mix proportion law of river sand-lime-gypsum similar materials

Ren Yuqi^{1,2,3}, Li Jian^{1*}, Qin Hongjie¹, Zhang Lei^{1,2,3}

(1. School of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China; 2. The Cultivation Base of Shanxi Key Laboratory of Coal Mine Water Jet Technology and Equipment, Shanxi Datong University, Datong 037003, China; 3. Shanxi Provincial Technical Innovation Center for Comprehensive Monitoring and Emergency Disaster Mitigation in Mining Areas, Datong 037003, China)

Abstract: To supplement perfect the existing mix proportion of river sand-lime-gypsum similar material ratio system, 81 groups of full factor proportion tests were carried out to test the uniaxial compressive strength of similar material samples by setting two factors of sand-binder mass ratio (1:1~9:1) and lime-gypsum mass ratio (1:1~9:1). The results show that the gypsum content is the dominant factor affecting the compressive strength of the sample. Increasing the gypsum content from 10% to 90% yielded up to an 8.23 times of strength increase. Conversely, the aggregate content is negatively correlated with the compressive strength of the sample. When the aggregate content is increased from 2 parts to 9 parts, the strength is reduced by 80.66%. On this basis, the mix proportion database of river sand-lime-gypsum similar materials in the strength range of 0.031~0.543 MPa was established, and the optimization principle of “lithology interval and interval selection path” is put forward. The engineering application shows that the selected ratio can better simulate the mechanical behavior of the actual rock strata, offering robust data support and theoretical guidance for the selection of similar simulation test materials.

Keywords: similar material ratio; full factor ratio; sand-binder mass ratio; lime-gypsum mass ratio; uniaxial compressive strength; similar simulation test

收稿日期: 2026-03-07 修回日期: 2026-04-27 接受日期: 2026-05-02 责任编辑: 焦丽

基金项目: 山西省基础研究计划(自由探索类)项目(202403021222261); 大同市科技局项目(2025006); 山西省矿区综合监测与应急减灾技术创新中心开放基金项目(KQJC2025-02)

作者简介: 任玉琦(1993-), 男, 山西 大同人, 博士, 讲师, 主要从事煤层群开采矿山压力与岩层控制方面的研究。

E-mail: ryq2019cumtb@126.com

通信作者: 李 戡(2000-), 男, 四川 南充人, 硕士, 主要从事矿井智能控制与煤层群开采方面的研究。E-mail: lj2024cumtb@163.com

0 引言

相似模拟试验是探究覆岩结构演化规律的重要室内试验手段,其以相似理论为基础,依据矿井的实际地质条件与开采条件,按照一定相似比构建物理模型并开展试验。开展相似模拟试验之前,需要试配满足相似比的基岩模型^[1-3]。目前,相似模拟试验多采用河砂-石灰-石膏相似材料配比体系确定不同强度的基岩模型。不同配比体系中,河砂、石灰、石膏掺量的不同,相似材料的强度也不同,因此,探究骨料(河砂)与胶结料(石灰、石膏)对比对相似材料试样单轴抗压强度的影响规律,建立完整的河砂-石灰-石膏相似材料配比体系,确定合理的相似材料配比,对实验室相似模拟试验的结果可比性与准确性具有重要意义。

诸多学者对岩石力学相似材料配比试验开展研究^[4-7]。赵鹏翔等^[8]研究了新型“固-气”耦合相似材料的渗透性影响因素,揭示了不同配比条件下材料渗透性的变化规律。张杰^[9]测试了相似模拟实验材料的流固耦合参数,为相似材料在水-岩相互作用条件下的力学行为研究提供依据。陈帅等^[10]采用正交试验法,研究水泥-石膏胶结相似材料中骨胶比、石膏比和重晶石粉份数对材料密度、单轴抗压强度与弹性模量的影响规律。夏婷等^[11]通过三因子三水平的正交试验,研究以河砂/重晶石粉为骨料、石膏/水泥为胶结料的砂岩相似材料配比方案,结果表明:胶结料与骨料的质量比是控制材料单轴抗压强度、黏聚力及内摩擦角的主导因素。何春雨等^[12]采用对比试验研究自然养护、标准养护、75℃蒸养对磷石膏-石灰-水泥胶结材料强度的影响规律。刘树龙等^[13]综合运用X射线衍射仪(XRD)、场发射扫描电子显微镜(SEM)、X射线能谱仪(EDS)、傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)、同步热分析仪(DSC-TG),研究石膏-矿渣-石灰复合胶凝体系的早期水化机理,结果表明主要水化产物为钙矾石和水化硅酸钙凝胶。在石膏与生石灰的协同激发下,钙矾石生成量不断增加,与水化硅酸钙凝胶共同填充孔隙,成为充填体早期强度的主要来源。该研究揭示了石膏对早期强度提升具有重要作用。

上述研究表明,石灰-石膏作为成熟的胶结料,在相似材料领域展现出显著的系统性与可控性。但现有研究多采用正交试验设计,虽能确定关键影响因素和最佳配比范围,但难以全面覆盖从低到高的全配比区间。此外,在工程应用层面,Yang等^[14]针对厚煤层开采条件下断层活化的响应

机理进行研究,结果表明合理选取相似材料对比对准确模拟复杂地质条件下的岩层移动具有重要意义。

本文以河砂为骨料、石灰与石膏为胶结料,采用全面试验设计方法,设计81组相似材料配比试验,研究不同砂胶比与灰膏比条件下相似材料试样的单轴抗压强度特征。通过测试全配比范围内相似材料试样的单轴抗压强度,揭示各因素对相似材料试样抗压强度的敏感性,建立完整的相似材料试样强度体系,为相似模拟试验中相似材料配比的合理选择提供充分的数据支撑与理论依据。

1 试验准备

1.1 原材料

试验主要材料为天然河砂、石灰和石膏,天然河砂(粒径小于2mm)作为骨料,石灰与石膏作为胶结料。其中石灰比表面积为 $0.493\text{ m}^2/\text{g}$,中值粒径 d_{50} (累计粒径分布达到50%时对应的粒径)为 $7.440\text{ }\mu\text{m}$ 、石膏比表面积为 $0.164\text{ m}^2/\text{g}$,中值粒径 d_{50} 为 $50.17\text{ }\mu\text{m}$ 。胶结料的粒径分布特征见图1。

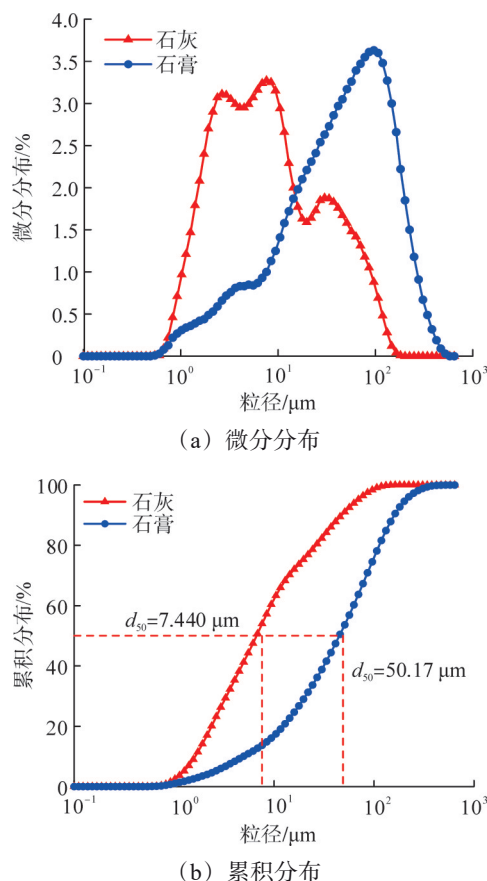


图1 胶结料颗粒粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of cementitious material

1.2 试样制作

相似材料试样以全面试验设计为基础,控制砂胶比(骨料与胶结料的掺入质量比)和灰膏比(胶结料中石灰与石膏的掺入质量比),制作标准相似材料试样。其中,砂胶比(因素A)设计9个水平(1:1~9:1),灰膏比(因素B)设计9个水平(1:9~9:1),共设计81组不同配比的相似材料试样,材料配比方案见表1。

表1 相似材料配比方案
Tab.1 Scheme of similar material proportion

系列号	配比号								
1	191	182	173	164	155	146	137	128	119
2	291	282	273	264	255	246	237	228	219
3	391	382	373	364	355	346	337	328	319
4	491	482	473	464	455	446	437	428	419
5	591	582	573	564	555	546	537	528	519
6	691	682	673	664	655	646	637	628	619
7	791	782	773	764	755	746	737	728	719
8	891	882	873	864	855	846	837	828	819
9	991	982	973	964	955	946	937	928	919

相似材料试样制备主要包括材料称量、混合搅拌、试样浇筑、试样脱模、恒温养护等步骤,具体流程见图2。

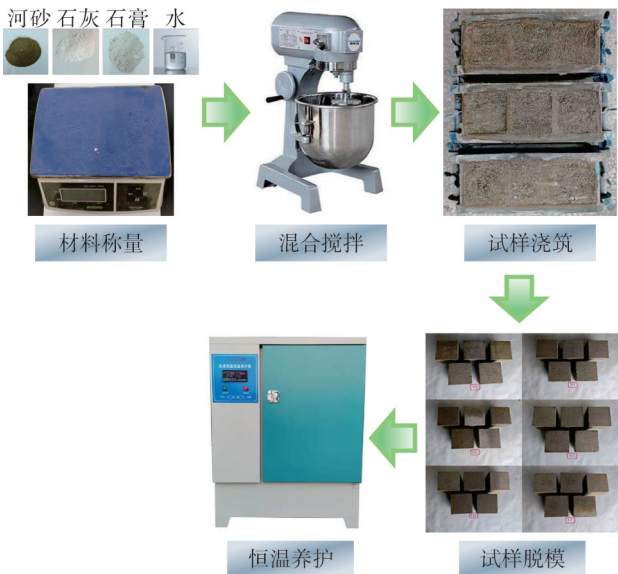


图2 相似材料试样制备及养护流程

Fig.2 Preparation and maintenance flow of similar material samples

(1) 材料称量:按照表1中的比例,依次称量河砂、石灰、石膏和水,其中,水的用量为原材料总量的10%。

(2) 混合搅拌:将河砂、石灰、石膏放入搅

拌机中充分混合,逐渐加入预先称量的水,慢速且均匀地搅拌,该过程需在3 min内完成。

(3) 试样浇筑与脱模:在 $\Phi 70\text{ mm}\times 70\text{ mm}$ 的模具中刷润滑油,将混合均匀的原材料倒入模具,使用橡胶锤与方形木棍充分夯实。松动模具四周的铁板,使相似材料试样脱模。

(4) 恒温养护:将相似材料试样放入恒温恒湿养护箱中,按照相关标准恒温干燥3 d。

2 试验结果分析

2.1 单轴抗压强度试验

采用WDE-100E型微机控制电子万能试验机测试试样在单轴压缩条件下的应力^[15]。用粒径约 $18\text{ }\mu\text{m}$ 的砂纸,将备好试样的上下端面打磨光滑平整,再将打磨好的试样放置于试验机的轴承板上,调节试验机上板,使试样的上下端面与试验机的上下板表面均匀接触,以 0.2 mm/min 的速率加载,直至试样破坏。试样破坏前后形态见图3。部分配比试样的应力-应变见图4。

对81组不同配比条件下405个平行试样进行测试,剔除应力数据中的异常值,取剩余应力平均值作为试样单轴压缩条件下应力最终结果。一般认为,在单轴压缩试验下,试样达到屈服极限会出现塑性破坏,此时相似材料试样单位面积上所承受的极限压强即为单轴抗压强度,等于相似材料试样破坏时单位面积所承受的最大压力^[16-17]。

单轴抗压强度表示为

$$\sigma_c=P/A, \tag{1}$$

式中: P 为试样出现塑性破坏时所受的载荷; A 为垂直加载方向试样的截面积。

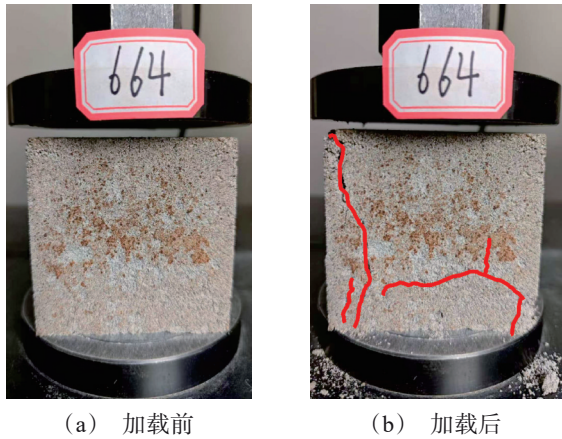


图3 单轴压缩试验下相似材料试样加载前后形态

Fig.3 Morphology of similar material samples before and after loading under uniaxial compression test

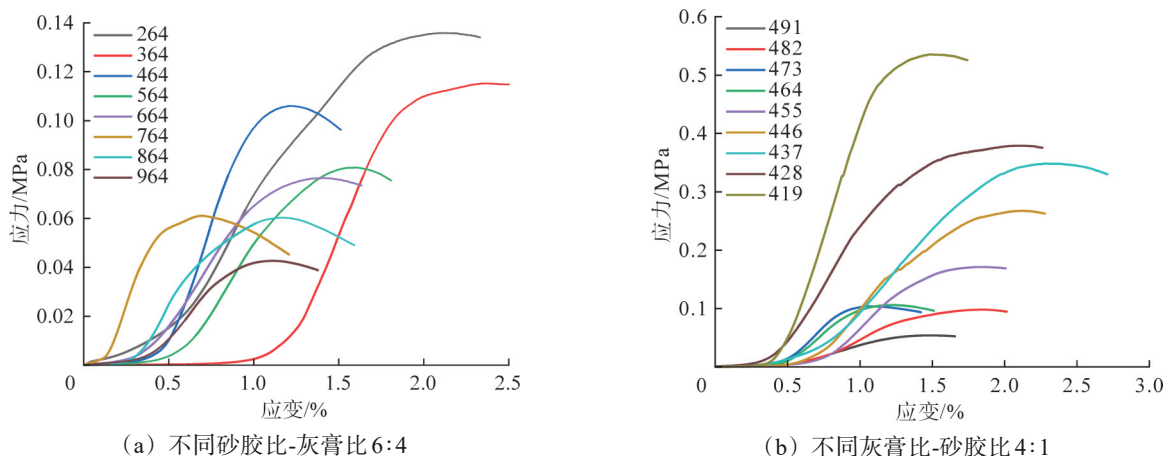


图4 部分相似材料试样的应力-应变

Fig.4 Stress-strain of selected similar material specimens

2.2 单轴抗压强度试验结果

由单轴抗压强度试验结果得到各组相似材料试样的抗压强度,具体见表2。不同配比相似材料试样的单轴抗压强度分布于0.031~0.543 MPa。砂胶比为1:1的试样,单轴抗压强度显著偏离整体变化趋势,表现为高石灰掺量条件下,试样强度异常偏低。此异常结果主要源于石灰与石膏颗粒显著粒径差异引发的物理与结构效应,即石灰颗粒过细(d_{50} 为7.44 μm ,比表面积为0.493 m^2/g),粒径远小于石膏颗粒(d_{50} 为50.17 μm ,比表面积为0.164 m^2/g)。用水量不变时,较大的比表面积差导

致细颗粒石灰吸附了大部分拌合水,而石膏颗粒周围的实际有效水灰比过低,水化反应不充分,难以生成足量的二水石膏晶体及钙矾石等胶凝产物^[18-19]。同时,过细的石灰颗粒破坏了胶结料与河砂骨料之间的连续级配,在体系中形成大量结构薄弱区,最终导致试样虽能成型但强度较低。

除砂胶比为1:1的试样以外,单轴抗压强度试验结果可以覆盖大部分地下岩体在相似模拟实验中的要求。因此,可根据相似模拟实验对材料单轴抗压强度的要求,从表2组合中选择满足或近似满足要求的材料配比。后续的影响规律分析不考虑砂胶比为1:1的情况。

表2 试样单轴抗压强度的试验结果

Tab.2 Uniaxial compressive strength test results of similar material samples

系列号	砂胶比	不同灰膏比下试样的单轴抗压强度/MPa								
		9:1	8:2	7:3	6:4	5:5	4:6	3:7	2:8	1:9
1	1:1	0.047	0.049	0.195	0.199	0.114	0.147	0.251	0.167	0.319
2	2:1	0.066	0.114	0.122	0.135	0.210	0.261	0.324	0.391	0.543
3	3:1	0.065	0.104	0.116	0.126	0.190	0.255	0.317	0.385	0.526
4	4:1	0.056	0.092	0.108	0.110	0.172	0.221	0.280	0.376	0.457
5	5:1	0.055	0.084	0.091	0.105	0.128	0.167	0.190	0.277	0.429
6	6:1	0.039	0.065	0.068	0.074	0.084	0.102	0.124	0.208	0.330
7	7:1	0.038	0.057	0.062	0.068	0.074	0.089	0.115	0.172	0.266
8	8:1	0.036	0.044	0.055	0.062	0.068	0.083	0.102	0.145	0.180
9	9:1	0.031	0.041	0.046	0.048	0.059	0.068	0.082	0.092	0.105

3 影响因素分析

3.1 骨料掺量对抗压强度影响

骨料作为相似材料体系中的骨架组成部分,其掺量直接影响材料的力学性能。采用Logistic模型对骨料掺量 x_g 与试样单轴抗压强度 y_g 之间的关系进行拟合。Logistic模型的表达式为

$$y_g = \frac{A_1 - A_2}{1 + (x_g/x_0)^p} + A_2, \quad (2)$$

式中: A_1 和 A_2 分别为强度的下、上限渐近值; x_0 为拐点位置参数; p 为曲线陡峭程度。

不同配比条件下骨料掺量与试样单轴抗压强度关系见图5。在所有相似材料配比条件下,骨料掺量所占份数由2份增加到9份(配比号2**至9**),

试样单轴抗压强度均呈现下降趋势,这种趋势在不同相似材料配比中表现为明显的梯度特征。

(1) 在石灰掺量较高的配比中(配比号为 291 至 991),强度下降相对平缓,从 0.066 MPa 降至

0.031 MPa,降幅达 53.03%,如图 5 (a) 所示。

(2) 在石膏掺量较高的配比中(配比号为 219 至 919),强度下降幅度最大,从 0.543 MPa 降至 0.105 MPa,降幅达 80.66%,如图 5 (i) 所示。

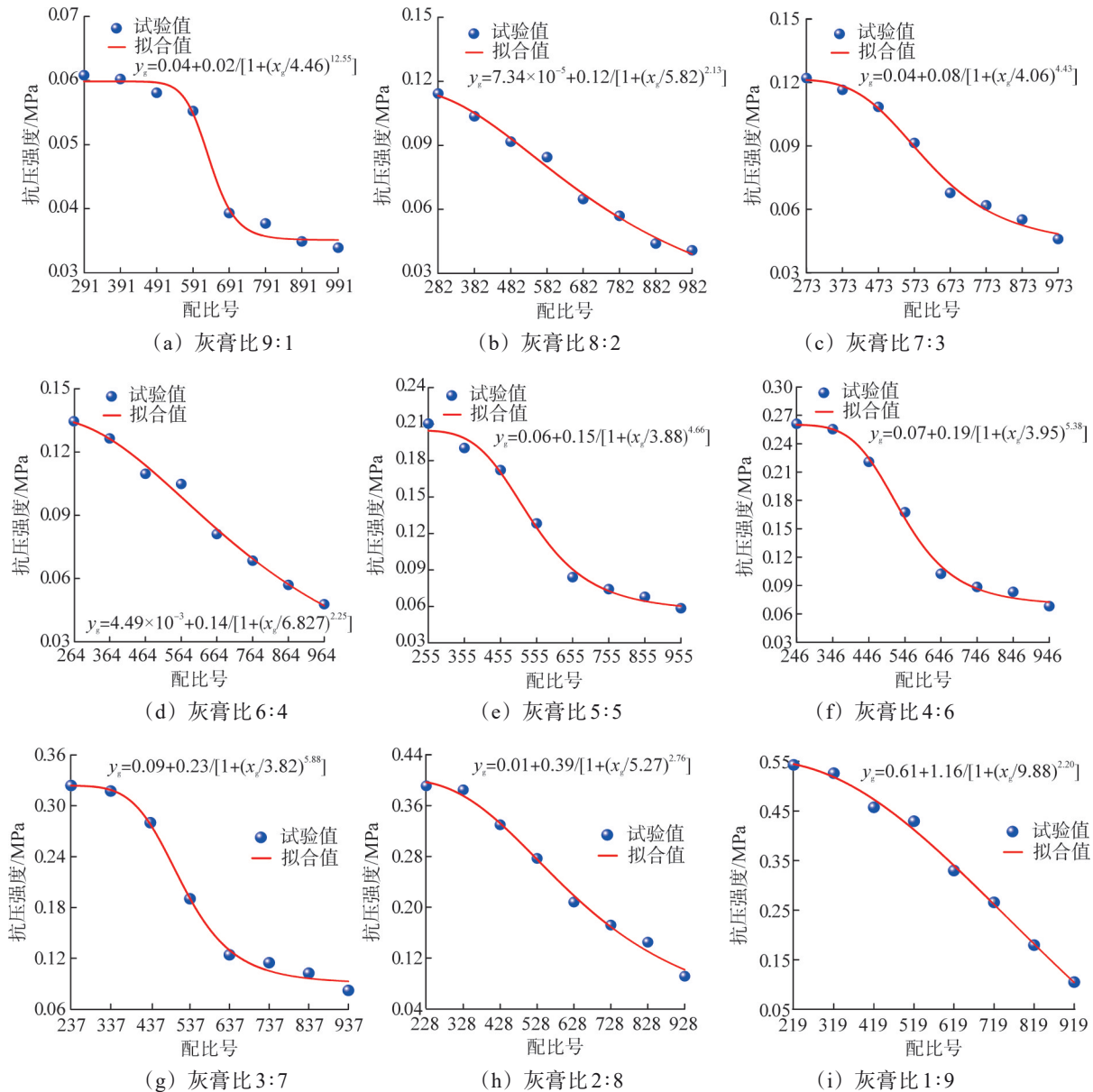


图 5 骨料掺量对相似材料试样单轴抗压强度的影响

Fig.5 Effect of aggregate fraction on uniaxial compressive strength of similar material samples

上述规律可以说明,以河砂为主的骨料稀释效应在不同胶结体系中具有普遍性,但其影响程度受胶结料灰膏比的显著调控。

式(2)的拟合优度 R^2 见表 3。不同灰膏比条件下, R^2 均高于 0.99,证实骨料掺量与试样单轴抗压强度之间存在负相关关系,即随着石膏掺量由 10% 增加到 90%,卡方值 χ^2 从 2.41×10^{-6} 逐渐增大至 1.84×10^{-4} ,表明在灰膏比一定时,骨料掺量会

引起试样单轴抗压强度更显著的波动。由此可知,石膏体系对骨料掺量的变化具备更高敏感性。

综合分析图 5 和表 3,将骨料掺量的影响划分为 3 个特征区段:高骨料区(骨料掺量大于等于 7 份,对应砂胶比 7:1~9:1),曲线平缓,强度衰减速率低;中等骨料区(骨料掺量为 4~6 份,对应砂胶比 4:1~6:1),曲线斜率最大,材料强度对骨料变化最敏感;低骨料区(骨料掺量小于等

于3份,对应砂胶比2:1~3:1),强度保持较高水平且变化平稳。

表3 骨料掺量-单轴抗压强度关系的拟合优度
Tab.3 R^2 of the relationship between aggregate fraction and uniaxial compressive strength

灰膏比	R^2	调整后 R^2	χ^2
9:1	0.990 5	0.983 4	2.41×10^{-6}
8:2	0.991 9	0.985 8	1.07×10^{-5}
7:3	0.993 1	0.987 9	1.07×10^{-5}
6:4	0.991 7	0.985 4	1.53×10^{-5}
5:5	0.993 3	0.988 3	4.29×10^{-5}
4:6	0.995 9	0.992 8	4.70×10^{-5}
3:7	0.996 0	0.993 1	7.08×10^{-5}
2:8	0.993 8	0.989 1	1.38×10^{-4}
1:9	0.996 0	0.993 0	1.84×10^{-4}

三个特征区段的划分揭示了骨料掺量对相似

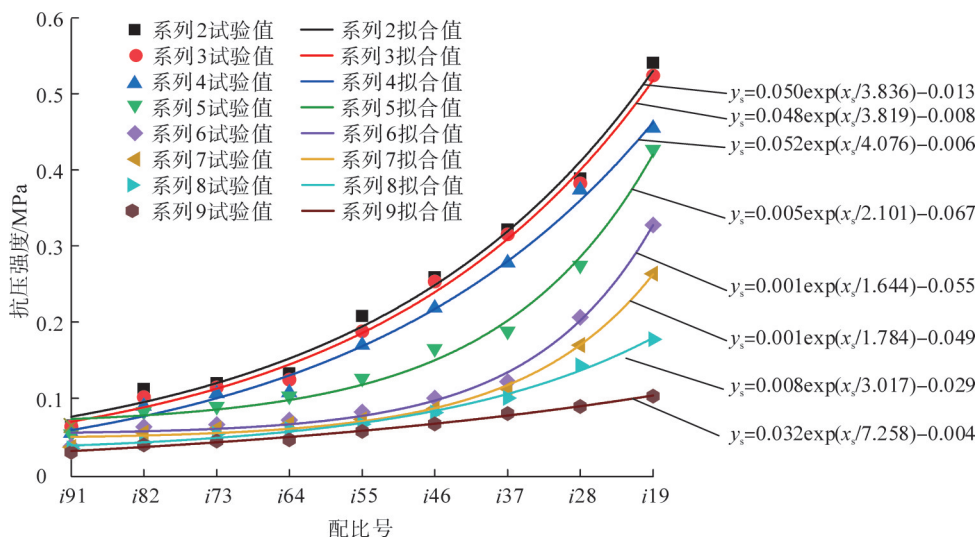


图6 灰膏比对相似材料试样单轴抗压强度的影响

Fig.6 Effect of lime-to-gypsum ratio on uniaxial compressive strength of similar material samples

在骨料掺量较低的系列2、系列3中,石膏掺量增加对材料强度的提升作用极为显著,且呈持续上升趋势。以砂胶比2:1(系列2)为例,石膏掺量从10%(配比号291)增至90%(配比号219)时,试样单轴抗压强度从0.066 MPa持续增长至0.543 MPa,增加约8.23倍。这一规律在砂胶比3:1(系列3)中同样显著,试样单轴抗压强度从0.065 MPa(配比号391)持续增至0.526 MPa(配比号319),增加约8.09倍。这说明在骨料较少、胶结料相对充裕的条件下,石膏水化生成二水石膏及与石灰反应形成钙矾石的反应充分,胶结网络得以连续发育,因此强度随石膏掺量增加呈现稳定的上升趋势,未出现明显平台段或强波动。

材料试样单轴抗压强度的非线性影响特征,为相似材料配比中骨料掺量的选取提供重要依据。

3.2 胶结料配比对抗压强度影响

胶结料作为相似材料体系中的关键组分,其配比变化直接影响相似材料力学性能的变化规律。为系统研究灰膏比对相似材料试样单轴抗压强度的影响,基于试验数据,采用ExpGro1指数模型对灰膏比 x_s 与试样单轴抗压强度 y_s 进行拟合分析。

ExpGro1指数模型表示为

$$y_s = y_0 + Ae^{x_s/t}, \quad (3)$$

式中: y_0 为单轴抗压强度初始值; A 为强度增长幅度; t 为增长特征时间常数。

不同骨料掺量条件下灰膏比与相似材料试样单轴抗压强度的关系见图6,图中 i 代表系列号2~9。整体看来,随着石膏掺量的增加,试样单轴抗压强度均呈显著增长趋势。

在骨料掺量中等的系列4、系列5、系列6中,强度随石膏掺量增加呈增长趋势,但在石膏掺量较少时增长趋缓,当石膏掺量超过某一临界值后增速才明显提升。以砂胶比5:1(系列5)为例,石膏掺量从10%(配比号591)增至50%(配比号555)时,强度仅从0.055 MPa升至0.128 MPa,增长缓慢;而当石膏掺量继续增至90%(配比号519)时,强度迅速上升至0.429 MPa,增幅显著。该现象可归因于:在中等骨料掺量下,体系中的胶结料总量有限,当石膏掺量较低时,其生成的胶结相不足以充分包裹和黏结骨料,且部分石膏与石灰反应生成钙矾石,胶结效率较低;一旦石膏掺量超过某阈值(约50%),胶结相逐步形成连

续网络,对骨料的包裹与胶结作用增强,强度遂呈加速上升态势。

在骨料掺量较高的系列7、系列8、系列9中,整体强度水平显著偏低,即便石膏掺量提高至90%,强度绝对值仍处于较低区间(系列9中仅为0.105 MPa)。在该条件下,石膏掺量从10%增至90%,虽试样强度从0.031 MPa提升至0.105 MPa(增加约3.39倍),但提升幅度明显低于低、中骨料系列。这主要由于骨料掺量过高时,胶结料总量相对不足,难以在骨料颗粒间形成完整、致密的胶结骨架。即便石膏掺量提高,生成的胶结相也主要用于填充骨料间隙,胶结作用被大幅降低,因而整体强度发展受限,增长趋势平缓。

上述规律表明,石膏是驱动强度增长的核心因素,其增强效率受骨料掺量的显著调控。骨料掺量越低,石膏掺量提升带来的强度增加倍数越高;骨料掺量越高,石膏的增强效应仍存在,但强度增加的倍数明显下降。

此外,石灰掺量的变化同样表现出明显的规律性。当石灰掺量超过80%时(配比号为*82、*91,如182、191等),相似材料试样的单轴抗压强度受到明显抑制。这是因为在石灰-石膏胶结体系中,强度主要源于石膏水化生成的二水石膏晶体及两者反应生成的钙矾石等水化产物所构成的胶结网络。石灰掺量过高时,石膏相对不足,体系难以生成足量的钙矾石等高强度凝胶相,胶结作用转而依赖氢氧化钙的碳化或少量生成物,其胶结效能远低于石膏体系。同时,石灰颗粒远细于石膏颗粒,在固定用水量下,石灰掺量高时,石灰会竞争并吸附大量拌合水,致使石膏颗粒周围实际水灰比过低、水化不充分,甚至引发“假凝”,宏观表现为材料虽能成型但强度发展严重受限。此外,过高的石灰掺量会破坏胶结料与河砂骨料间的合理级配,在微观结构中形成较多薄弱界面与孔隙,进一步降低材料的整体密实度与强度。

式(3)的拟合优度见表4。所有系列的 R^2 均高于0.99,调整后 R^2 为0.986 8~0.991 5,证实式(3)能够准确描述灰膏比与试样单轴抗压强度的关系。其中,系列9(骨料掺量高)的 χ^2 最小,说明在骨料掺量较高条件下,相似材料试样单轴抗压强度的离散程度最小;而系列2(骨料掺量低)的 χ^2 相对较大,但其 R^2 仍达到0.991 1,表明胶结料在低骨料掺量体系中能够有效驱动相似材料试样单轴抗压强度发展。

对比不同骨料掺量试样单轴抗压强度的发展

规律可知,灰膏比对单轴抗压强度发展有决定性影响。在石膏掺量大于50%的配比中(配比号为*i*46、*i*37、*i*28、*i*19),试样单轴抗压强度随石膏掺量的增加而显著提升;在石灰掺量大于80%的配比中(配比号为*i*82、*i*91),相似材料试样的单轴抗压强度发展明显受限。这一现象说明,石灰与石膏在试样单轴抗压强度形成过程中存在明显的交互作用,适量石膏能够有效促进胶结体系的水化反应,而过量石灰则会抑制试样单轴抗压强度的发展。

表4 灰膏比与试样单轴抗压强度的 R^2
Tab.4 R^2 of the relationship between lime-to-gypsum ratio and uniaxial compressive strength

系列号	R^2	调整后 R^2	χ^2
2	0.991 1	0.988 1	2.89×10^{-4}
3	0.993 6	0.991 5	2.00×10^{-4}
4	0.993 6	0.991 4	1.65×10^{-4}
5	0.990 1	0.986 8	1.85×10^{-4}
6	0.991 0	0.988 0	1.02×10^{-4}
7	0.992 8	0.990 5	4.98×10^{-5}
8	0.992 9	0.990 5	2.22×10^{-5}
9	0.993 3	0.991 1	5.59×10^{-6}

综合分析表明,石灰与石膏的配比关系共同决定试样单轴抗压强度。在胶结体系中,石膏主要起增强作用,其掺量与相似材料试样单轴抗压强度呈正相关;石灰超过一定掺量后抑制试样强度的作用增强。这一规律为相似材料配比选取中胶结组分的优化提供了重要依据,在实际配比设计中应避免石灰掺量过高,同时保证足够的石膏掺量以获得理想的相似材料配比。

3.3 分析讨论

骨料掺量、石灰掺量及石膏掺量与相似材料试样单轴抗压强度的综合关系,见图7。在相同骨料掺量条件下,骨料-石膏曲面沿石膏掺量增加方向呈现持续上升趋势,并达到峰值;而骨料-石灰曲面在高石灰掺量区域,出现强度平台甚至轻微下降,整体强度水平低于前者。这表明,石膏是驱动强度增长的核心组分,其增强效应在宽掺量范围内保持稳定;石灰虽具有一定的胶结能力,但过量掺入时因颗粒过细引发的物理稀释效应及水化产物结构变化,反而制约了强度的进一步提升。试验结果表明,不同配比条件下,相似材料试件单轴抗压强度在0.031~0.543 MPa内连续变化,覆盖从软弱岩层到中硬岩层的强度需求。进一步分析图7中不同强度区间的曲面特征可以发现,同一强度水平往往对应多种骨料掺量与胶结

料掺量的组合路径,其内在规律与岩性模拟目标密切相关。

基于上述三维曲面的整体特征,进一步对不同强度区间内骨料与胶结料的组合规律进行系统分析。对于强度低于0.1 MPa的软弱岩层(如煤层、泥岩等),相似材料配比可选择骨料掺量较高(砂胶比7:1~9:1)且高石膏掺量(灰膏比4:6~1:9)的组合,如配比号为746、837、928的组合。此类配比中骨料掺量较高,胶结料总量有限,石膏虽仍发挥增强作用,但因总量不足难以形成连续高强度胶结网络,强度发展受限,恰好满足软岩低强度需求。值得注意的是,若在此强度区间内采用低骨料掺量(砂胶比2:1~4:1)并搭配极低石膏掺量(灰膏比9:1~8:2),虽亦可获得相近强度(如182、191),但其力学来源主要为石灰的碳化胶结,强度稳定性及重现性较差,在实际应用中需谨慎选用。

对于强度介于0.2~0.4 MPa的中等强度岩层(如粉砂岩、细粒砂岩等),配比选择呈现两种典型路径:其一为中等骨料掺量(砂胶比4:1~6:1)配合中等偏高石膏掺量(灰膏比4:6~2:8),如配比号为446、437、528的组合。此类组合的胶结料总量适中,石膏水化生成的胶凝相能够初步形成连续网络,对骨料产生有效包裹;其二为较低

骨料掺量(砂胶比2:1~3:1)配合较低石膏掺量(灰膏比9:1~4:6),如配比号为346、355的组合。该路径依靠胶结料总量优势弥补石膏的相对不足,仍可达到相近强度。两类路径的并存表明,中等强度岩层的模拟既可通过“适量胶结料+石膏主导”实现,也可通过“富胶结料+石灰主导”实现,前者更符合实际岩层中胶结物均匀分布的特征,后者则需注意石灰过细颗粒可能带来的结构均匀性问题。

对于强度接近0.5 MPa的较高强度岩层(如粗粒砂岩等),配比选择集中于低骨料掺量(砂胶比2:1~4:1)与高石膏掺量(灰膏比2:8~1:9)的组合,如配比号为219、328、428的组合。此类配比中胶结料总量充裕,石膏掺量占绝对优势,水化生成的二水石膏晶体及钙矾石能够形成致密的胶结骨架,强度得以充分发展。对比分析表明,当目标强度大于0.4 MPa时,骨料的稀释效应成为主导限制因素,必须通过降低骨料掺量、增加胶结料总量来保障胶结网络的完整性,单纯提高石膏掺量而骨料掺量过高(砂胶比6:1~9:1)时,强度提升幅度有限(如配比号为619的组合,强度仅为0.330 MPa),说明在高骨料掺量条件下,即便进一步提高石膏掺量,强度增长仍受骨料稀释效应限制,难以满足强度大于0.4 MPa的需求。

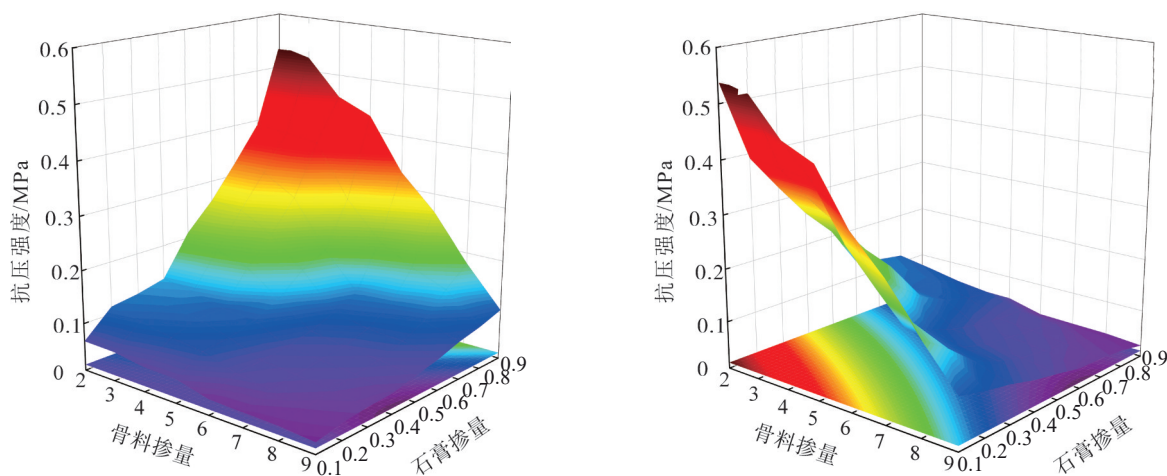


图7 不同胶结体系抗压强度

Fig.7 Compressive strength under different cementitious systems

归纳不同强度区间内砂胶比与灰膏比的配比优化分区,见表5。从低强度区到高强度区,骨料掺量逐渐降低、石膏掺量逐渐提高,且曲线梯度特征与强度区间存在良好对应关系。

综上,相似材料配比的选取应遵循“岩性定区间、区间选路径”的原则:软岩模拟优先选择高骨料区,利用骨料的稀释效应获得低强度;中硬岩模拟可在中等骨料区通过调整灰膏比实现强

度调控,存在“石膏增强”与“胶结料总量补偿”两种路径;硬岩模拟则必须进入低骨料区,充分发挥石膏的增强潜能。这一规律为不同强度岩层的相似材料配比优选提供了理论依据,即根据目标强度所处的区间,首先确定砂胶比的大致范围,进而在该范围内通过调整灰膏比实现强度精细匹配,从而在保证模拟精度的同时兼顾材料的经济性与可操作性。

表5 配比优化分区
Tab.5 Partition of proportion optimization

区间	砂胶比	灰膏比	强度范围/ MPa	梯度 特征
高强度区	2:1,3:1,4:1	9:1,8:2、 7:3,6:4	0.457~0.543	陡峭
中强度区	4:1,5:1,6:1	6:4,5:5,4:6	0.330~0.457	适中
低强度区	6:1,7:1、 8:1,9:1	4:6,3:7、 2:8,1:9	0.031~0.330	平缓

4 配比方案选取

前述 72 种相似材料试样的单轴抗压强度基本可以满足绝大多数相似模拟材料配比的要求。为此,选取鸳鸯湖矿区某矿 232205 及 232206 工作面作为相似模拟试验原型,拟开展厚煤层开采区段煤柱稳定性分析的相似模拟试验。

结合相似模拟试验架的几何特征与煤层综合柱状,确定本次相似模拟试验的几何相似比为

$$C_L = L_H/L_M = 100\text{ cm}/1\text{ cm} = 100:1, \quad (4)$$

容重相似比为

$$C_\gamma = \gamma_H/\gamma_M = 1.5:1, \quad (5)$$

应力相似比为

$$C_\sigma = \frac{\sigma_H}{\sigma_M} = \frac{L_H\gamma_H}{L_M\gamma_M} = C_L C_\gamma = 150:1. \quad (6)$$

式(4)~式(6)中: L_H 、 L_M 分别为煤岩层的实际尺寸和模型尺寸; γ_H 、 γ_M 分别为煤岩层的实际容重和模型容重; σ_H 、 σ_M 分别为煤岩层的实际单轴抗压强度和模型单轴抗压强度。

根据 232205 及 232206 工作面煤系地层中各煤岩的实测单轴抗压强度,从前述配比体系中选取配比号,以此建立模拟煤系地层中各煤岩层的模型。相似模拟试验中,煤岩层原型与模型的单轴抗压强度见表 6。

表6 煤岩层原型和模型主要力学参数
Tab.6 Main mechanical parameters of coal rock prototype and model

岩性	单轴抗压强度/MPa		配比号
	原型	模型	
煤层	13.0	0.087	746
粗粒砂岩	56.0	0.373	428
细粒砂岩	35.6	0.237	446
粉砂岩	35.6	0.237	446

根据表 6 和煤岩体单轴抗压强度特性匹配原则,确定各煤岩层对应的相似材料配比方案。

(1) 煤层选用的相似材料配比号可以为 655、746、846、937,最终确定为 746。

(2) 粗粒砂岩选用的相似材料配比号可以为 228、328、337、428,最终确定为 428。

(3) 粉砂岩与细粒砂岩选用的相似材料配比号可以为 446、437、528,最终确定为 446。

根据上述相似材料配比,利用二维相似模拟试验台,探究厚煤层开采区段煤柱稳定性。232205 及 232206 工作面模型开采结束后,覆岩变形特征与破坏模式见图 8。

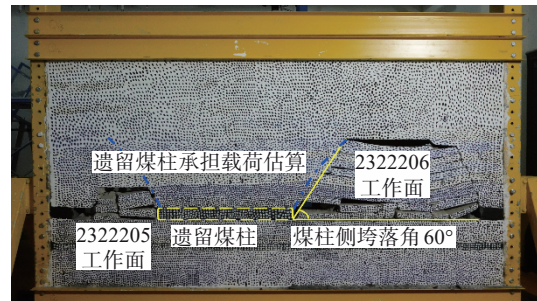


图8 相似模拟试验验证

Fig.8 Verification of similar simulation test

分析图 8 得到如下结论。

(1) 厚煤层开采覆岩破断特征:工作面开采结束,采空区上方覆岩发生了显著变形、破断与移动。直接顶岩层发生了完全垮落,呈不规则堆积状态;基本顶岩层表现出明显的周期性破断特征,基本顶破断岩块相互铰接,形成砌体梁结构。这为工作面侧向顶板的受力分析提供了依据。

(2) 边界裂隙发育特征及垮落角:工作面开采结束,遗留煤柱侧的采空区边界形成明显的边界主裂隙,垮落角约为 60°,裂隙的发育方向控制了区段煤柱所承载的载荷。这为区段煤柱的极限载荷估算提供了依据。

上述试验表明,基于“岩性定区间、区间选路径”原则选取的相似材料配比方案,能有效通过相似模拟方法模拟工作面开采过程。

5 结论

通过全面试验设计方法,系统研究了以河砂为骨料、石灰和石膏为胶结料的相似材料配比对相似材料试样单轴抗压强度的影响规律,得到以下主要结论。

(1) 基于 81 组全因子试验,建立了河砂-石灰-石膏相似材料配比数据库,揭示了骨料掺量和石膏掺量对试样单轴抗压强度的主控作用。

(2) 明确了不同强度区间的配比选取原则,即低强度区宜采用高骨料、低石膏掺量配比,中强度区宜在中等骨料掺量范围内调节灰膏比,高强度区宜采用低骨料、高石膏掺量配比,提出了“岩性定区间、区间选路径”的优选原则。

(3) 试验结果表明,所选配比能够较好模拟

目标岩层的力学特性,可为相似模拟试验材料配比选取提供依据。

本文主要基于宏观力学试验分析骨料掺量和石膏掺量对试样强度的影响,尚缺少微观机理层面的深入揭示。后续可结合微观测试与机器学习方法,拓展多体系、宽强度范围的配比数据库,并建立配比参数与抗压强度之间的预测模型,以提高配比选取的效率和精度。

参考文献(References):

- [1] 康希并, 张建业. 相似材料模拟中的材料配比[J]. 淮南矿业学院学报, 1988, 8(2): 50-64.
Kang Xibing, Zhang Jianyi. Mixture ratio in equivalent material modelling[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 1988, 8(2): 50-64.
- [2] 杨洪增, 赵章, 李玉宝. 高强度相似材料配比试验研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(9): 59-62, 67.
Yang Hongzeng, Zhao Zhang, Li Yubao. Experimental study on ratio of high strength similar materials[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9): 59-62, 67.
- [3] 史小萌, 刘保国, 肖杰. 水泥和石膏胶结相似材料配比的确定方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1357-1362.
Shi Xiaomeng, Liu Baoguo, Xiao Jie. A method for determining the ratio of similar materials with cement and plaster as bonding agents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1357-1362.
- [4] 李晓红, 卢玉义, 康勇, 等. 岩石力学实验模拟技术[M]. 北京: 科学技术出版社, 2007: 3-5.
- [5] 韩伯鲤, 陈霞龄, 宋一乐, 等. 岩体相似材料的研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997(2): 6-9.
Han Boli, Chen Xialing, Song Yile, et al. Research on similar material of rock mass[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1997(2): 6-9.
- [6] 苏永华, 郑璇. 深部节理岩体分区分裂化机制数值研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(1): 94-101.
Su Yonghua, Zheng Xuan. Numerical study on mechanism of zonal disintegration in deep rock mass with joints[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(1): 94-101.
- [7] Kim S H, Burd H J, Milligan G W E. Model testing of closely spaced tunnels in clay[J]. Géotechnique, 1998, 48(3): 375-388.
- [8] 赵鹏翔, 李树刚, 高锦彪, 等. 新型“固-气”耦合相似材料渗透性影响因素[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(1): 16-22.
Zhao Pengxiang, Li Shugang, Gao Jinbiao, et al. Effect of permeability of a new type of solid-gas coupling similar material[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2017, 36(1): 16-22.
- [9] 张杰. 相似模拟实验材料的流固耦合参数测试[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(2): 198-201.
Zhang Jie. Liquid-solid coupling parameter testing of simulation materials[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2011, 30(2): 198-201.
- [10] 陈帅, 朱凯飞, 姜兴基. 基于正交设计方法的相似材料配比试验研究[J]. 土木工程, 2024, 13(9): 1803-1810.
Chen Shuai, Zhu Kaifei, Jiang Xingji. Research on similar material proportioning test based on orthogonal design[J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2024, 13(9): 1803-1810.
- [11] 夏婷, 代张音, 蒙文富, 等. 基于正交试验的砂岩相似材料力学性能研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(5): 142-148.
Xia Ting, Dai Zhangyin, Meng Wenfu, et al. Research on mechanical properties of similar materials of sandstone based on orthogonal test[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(5): 142-148.
- [12] 何春雨, 袁伟, 谭克锋. 磷石膏-粉煤灰-石灰-水泥胶凝体系性能研究[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(8): 1-4.
He Chunyu, Yuan Wei, Tan Kefeng. Study on property of cementitious binder consisting of phosphogypsum-flyash-lime-cement[J]. New Building Materials, 2009, 36(8): 1-4.
- [13] 刘树龙, 李公成, 刘国磊, 等. 石膏-矿渣-石灰复合胶凝体系早期水化作用机理[J]. 有色金属工程, 2021, 11(4): 102-109.
Liu Shulong, Li Gongcheng, Liu Guolei, et al. Early hydration mechanism of gypsum-slag-lime composite cementitious system[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(4): 102-109.
- [14] Yang S, Wang J G, Chen J, et al. Study on the response mechanism characteristics of fault activation under the mining effect of thick coal seam[J]. Journal of Applied Geophysics, 2025, 243: 105954.
- [15] 王平. 岩石单轴抗压强度试验的探讨与研究[J]. 四川水力发电, 2013, 32(2): 89-91, 176.
Wang Ping. Discussion and research on rock uniaxial compressive strength test at water resources and hydropower station[J]. Sichuan Water Power, 2013, 32(2): 89-91, 176.
- [16] 邓代强, 姚中亮, 唐绍辉, 等. 充填体单轴压缩韧性性能试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(5): 26-28, 67.
Deng Daiqiang, Yao Zhongliang, Tang Shaohui, et al. An experimental study on the toughness properties of backfill under uniaxial compression[J]. Mining Research and Development, 2005, 25(5): 26-28, 67.
- [17] 汪学清, 陈博, 吴帅军, 等. 不同加载速率下含交叉裂隙类岩石力学特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(8): 104-112.
Wang Xueqing, Chen Bo, Wu Shuaijun, et al. Study on mechanical properties of rocks with cross cracks under different loading rates[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(8): 104-112.
- [18] 李相国, 陈嘉懿, 马保国, 等. 粒度分布对磷石膏-石灰-粉煤灰胶结材料物理性能的影响[J]. 化工学报, 2012(增刊1): 230-234.
Li Xiangguo, Chen Jiayi, Ma Baoguo, et al. Influence of different granular distributions on physical properties of phosphogypsum-lime-fly ash system[J]. CIESC Journal, 2012(Suppl.1): 230-234.
- [19] 叶蓓红, 钱耀丽, 江传德. 石膏复合胶凝材料的研究进展[J]. 粉煤灰综合利用, 2014, 28(5): 47-49.
Ye Beihong, Qian Yaoli, Jiang Chuande. Research progress in gypsum-based composite cementitious material[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2014, 28(5): 47-49.