doi:10.12068/j.issn.1005－3026.2026.20240236

砂石比影响下高浓度充填体强度与孔隙特性演化

刘洪磊[1]，潘建达[1,2]，侯 晨[1,3]，曲立平[2]
（1.东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110819；2.赤峰柴胡栏子黄金矿业有限公司，内蒙古 赤峰 024001；
3.矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心，河北 唐山 063509）

摘 要：赤峰柴矿充填砂石制成的高浓度充填体，其力学强度受质量分数和胶凝材料比例及龄期的影响显著，表现出规律性变化，而随着砂石比的变化未出现较明显的变化规律．为进一步探究砂石比对高浓度充填材料特性的影响机制，本文采用压汞试验对孔隙结构进行深入分析．结果表明：充填材料强度与分级后得到的中孔隙和大孔隙体积分数及孔隙率存在负相关性；结合分形维数理论并对结果进行验证，得到强度与大于1.0 μm的孔隙占比存在较高的负相关性，即可以用大于1.0 μm的孔隙体积分数定量表征强度与孔隙结构的关系．本研究揭示了不同砂石比条件下高浓度充填材料强度演化的微观机理，可为同类矿山的充填材料优化提供依据．

关 键 词：砂石比；压汞试验；孔隙结构；孔隙率；分形维数
中图分类号：TD 853 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026(2026)04-0103-08

Evolution of Strength and Pore Characteristics of High-Concentration Backfill Under Influence of Sand-to-Aggregate Ratio

LIU Hong-lei[1], *PAN Jian-da*[1,2], *HOU Chen*[1,3], *QU Li-ping*[2]
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Chifeng Chaihulanzi Gold Mining Co., Ltd., Chifeng 024001, China; 3. Collaborative Innovation Center of Green Development and Ecological Restoration of Mineral Resources, Tangshan 063509, China. Corresponding author: HOU Chen, E-mail: houchen@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The mechanical strength of the high-concentration backfill produced using sand and stone from the Chifeng Chaihulanzi Mine is significantly influenced by mass fraction, binder ratio, and curing age, showing regular patterns of change. However, no distinct variation pattern is observed with changes in the sand-to-aggregate ratio. To further explore the mechanism of the sand-to-aggregate ratio's impact on the characteristics of the high-concentration backfill material, mercury intrusion porosimetry (MIP) was used to analyze pore structures in detail. The results indicate a negative correlation between the strength of the backfill material and the volume fraction of mesopores and macropores, as well as porosity. By integrating fractal dimension theory and validating the results, a strong negative correlation is identified between strength and the proportion of pores larger than 1.0 μm. Therefore, the relationship between strength and pore structure can be quantitatively characterized by the volume percentage of pores larger than 1.0 μm. This study reveals the microscopic mechanism underlying the strength evolution of high-concentration backfill materials under different sand-to-aggregate ratio conditions, providing a basis for optimizing backfill materials in similar mining operations.

Key words: sand-to-aggregate ratio; mercury intrusion porosimetry; pore structure; porosity; fractal dimension

收稿日期：2024-12-25
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52174070,51904055)；矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心开放基金项目(HLCX-2024-02).
作者简介：刘洪磊(1981—)，男，山东枣庄人，东北大学教授，博士生导师．
通信作者：侯 晨，E-mail:houchen@mail.neu.edu.cn.

充填采矿技术作为一种绿色、高效的开采方式，正逐步成为矿业工程领域解决资源开发与环境保护之间矛盾的关键技术之一[1]. 充填材料作为充填采矿技术的核心组成部分，其性能直接影响到矿山的开采效率、经济效益及生态环境保护[2]. 赤峰柴矿充填尾砂中含有氰化物，不宜用作充填材料，故选用碎石和细砂的混合砂石作为充填骨料，而混合砂石粒径(0.60~4.75 mm)较普通尾砂(0.075~2.00 mm)更粗，且柴矿充填材料由水泥、水、砂和碎石组成，而普通充填体可能含膨胀水泥、轻质骨料等，这将导致材料的孔隙结构存在差异，进而影响充填体的强度性能.

在研究充填体的强度影响因素时，充填料浆质量分数、胶结剂掺量和龄期是需要考虑的3个重要因素，它们各自及其相互作用显著影响最终的强度结果[3]. 然而，材料的砂石比同样至关重要，砂石比直接影响充填材料的粒径分布和孔隙结构，进而影响其力学性能[4-5]. 许多学者对砂石比对充填材料的强度影响规律作了深入研究. 温震江等[6]通过研究混合骨料级配与料浆流变特性的关系，发现屈服应力与骨料粒径级配相关性随着料浆质量分数升高逐渐增大，并得到了临界粒径范围. 侯永强等[7]通过研究混合骨料胶结充填体的强度特性，解释了抗压强度随废石掺量的变化规律.

砂石比会影响骨料粒径分布，导致微观孔隙结构发生变化，进而对材料的强度及性能产生影响. 李振军等[8]研究了孔隙结构对再生混凝土力学性能的影响规律，高孔隙率和有害孔隙的存在会导致材料强度的降低. 李召峰等[9]从微观孔隙结构角度，发现充填体抗压强度随着孔径和孔隙率先减小后增大而呈现先升高后降低的规律.

本文基于赤峰柴矿所用骨料材料的特殊性，采用试验与理论相结合的方法，通过设计不同配比方案研究了质量分数、胶结剂掺量(质量比)、养护龄期及砂石比对充填体强度的影响规律，并基于压汞试验及分形理论研究方法，深入探究了砂石比对高质量分数充填材料孔隙结构的影响机理，从微观角度解释了对充填材料强度起决定性的因素. 研究成果可为矿山充填材料强度及性能的调控提供依据，对于优化充填方案、提高矿山安全生产水平具有重要的理论和实践意义.

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验采用赤峰柴胡栏子金矿混合砂石骨料(粗细骨料无明确分界)，筛分后得到6个粒径区间：<0.6 mm，0.60~0.85 mm，0.85~2 mm，2~3.35 mm，3.35~4.75 mm 以及>4.75 mm，规定粒径小于0.6 mm为砂，大于0.6 mm为石，基于上述筛分得到充填骨料砂石比约为0.4，故设计0.35，0.40，0.45不同砂石比. 由骨料各粒径区间质量占比(表1)可知，骨料粒径0.6~4.75 mm(粗石)占比68.2%，其中0.85~2 mm和3.35~4.75 mm区间占比最高(均约19.1%). 由柴矿细砂粒径分布曲线(图1)可知，砂料以10~1 000 μm粒径为主，占比达87.52%，d_{10}=9.86 μm，d_{30}=31.11 μm，d_{60}=98.12 μm，不均匀系数 $C_u=d_{60}/d_{10}$=9.95，曲率系数 $C_c=d_{30}^2/(d_{10}\times d_{60})$=1，说明砂的级配良好且级配连续[10]. 由细砂主要成分(表2)可知，充填骨料的主要成分为SiO_2，CaO和Al_2O_3，含量较高.

表1 骨料各粒径区间质量占比

Table 1 Mass distribution of aggregate in different particle size ranges

区间/mm	<0.6	0.6~0.85	0.85~2	2~3.35	3.35~4.75	>4.75
质量占比/%	31.8	5.8	19.1	15.7	19.1	8.5

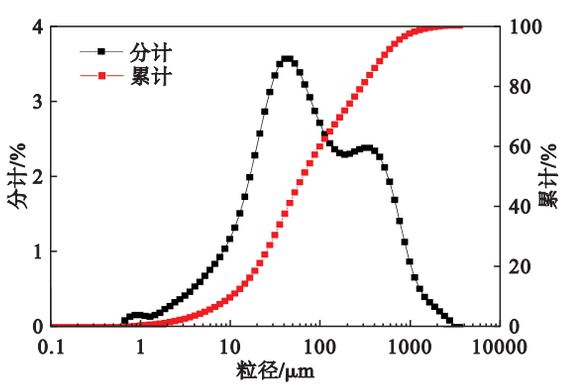


图1 细砂粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves of fine sand

表2 细砂主要成分(质量分数)

Table 2 Main components of fine sand (mass fraction) %

SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO
39.85	18.57	16.91	9.97	9.82

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备

①按设计配比称料，依次加入粗细骨料、水

泥搅拌,加水后继续搅拌至料浆均匀不离析;②将料浆分 3 层装入 100 mm³ 立方体模具振捣,在(20±2)℃、湿度≥95% 条件下养护 1 d 后脱模;③上述条件下继续养护至规定龄期进行试验测试,试验流程见图 2.

1.2.2　试验设计

1) 单轴抗压试验.针对不同充填材料,设置 3 种胶结剂掺量、6 种质量分数、3 种砂石比及 4 个龄期(1,3,7,28 d),共 216 组单轴抗压试验(见表 3).采用 1 mm/min 速率加载试件至破坏,记录数据并分析强度规律.

2) 压汞试验.使用 Auto Pore V 9600 压汞仪(3 nm~1 100 μm)测试 28 d 养护试样的孔隙分布.选取 3 种胶结剂、6 种质量分数、3 种砂石比的试样(见表 4),经无水乙醇浸泡终止水化,40 ℃真空干燥后制成<1 cm 样品.

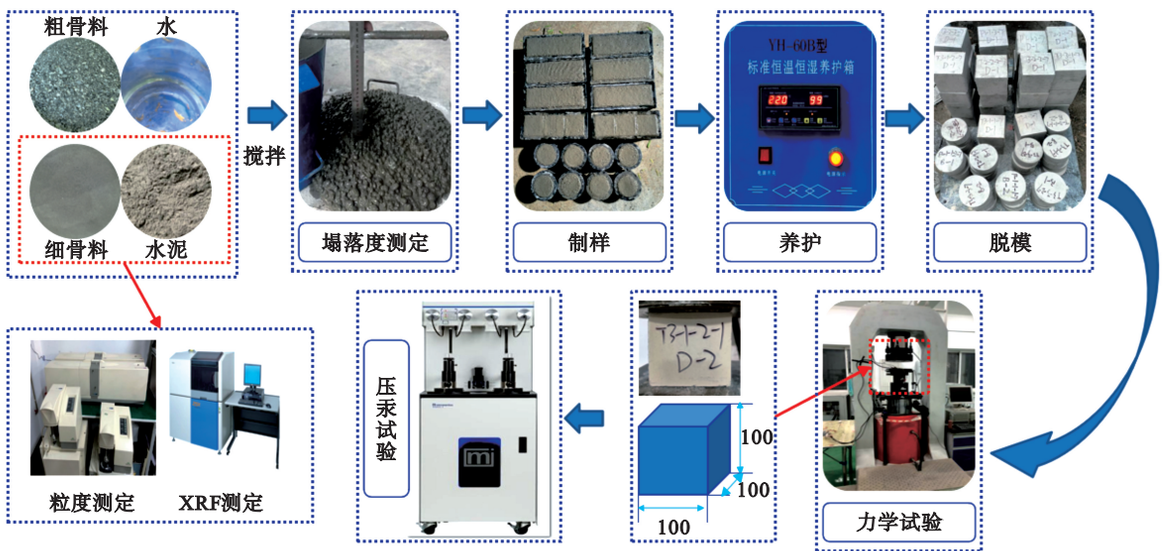


图 2　试验流程图

Fig. 2　Experimental procedure flowchart

表 3　单轴抗压试验方案

Table 3　Uniaxial compressive testing protocol

材料类型	胶结剂掺量	质量分数/%	砂石比	养护龄期/d
假底材料	0.145,0.170,0.195	66,70,74,88,90.5,93	0.35,0.40,0.45	1,3,7,28
充填体材料	0.070,0.095,0.120	66,70,74,88,90.5,93	0.60,0.63,0.66	1,3,7,28

表 4　压汞试验方案

Table 4　MIP protocol

材料类型	胶结剂掺量	质量分数/%	砂石比	养护龄期/d
充填假底	0.145,0.170,0.195	66,70,74,88,90.5,93	0.35,0.40,0.45	28

2　试验结果与讨论

2.1　单轴抗压试验结果分析

2.1.1　质量分数对强度的影响

料浆质量分数(w)是决定充填体强度的主要因素之一,为探究不同龄期下其对强度变化的影响,绘制质量分数与强度拟合曲线(图 3,因规律相似,选部分曲线),图中质量分数对不同龄期充填体强度影响呈线性增长($y=a+bx$).以胶结剂掺量(λ)0.195 为例,1 d 龄期时,质量分数为 93% 的充填体强度为 5.01 MPa,质量分数为 66% 时强度降至 4.05 MPa,降低 19.2%;7 d 龄期时,质量分数为 93% 的强度增至 16.23 MPa,质量分数为 66% 时强度为 10.34 MPa,降低 36.3%.上述结果表明相同胶结剂掺量下,强度随质量分数增加而提高且影响随龄期延长更显著.原因在于:低质量分数料浆固体颗粒间距大、连接弱,故早期和最终强度较低;而高质量分数下固体颗粒紧密排列,连接更强,显著提升强度.

2.1.2　胶结剂掺量对强度的影响

胶结剂掺量对充填体强度也有重要影响,为探究不同龄期下,胶结剂掺量对强度变化的影响,绘制胶结剂掺量与强度拟合曲线(图 4),图中胶结剂掺量对不同龄期充填体强度的影响呈指数增长($y=a+be^{cx}$).当质量分数为 93%,龄期 1 d 时,λ

从0.195降至0.145,强度由4.01 MPa降至3.16 MPa(降低21.2%);质量分数为88%时,强度由3.37 MPa降至2.27 MPa(降低32.6%).7 d时,质量分数为93%的强度随上述λ降低,由14.51 MPa降至8.17 MPa(降低43.7%),质量分数为88%的强度降低34.5%.表明相同质量分数下,强度随胶结剂掺量增加而提升.原因在于:低胶结剂掺量时固相与胶凝物质不足,颗粒连接弱,强度低;高掺量时固相增多,胶结作用增强,显著提高早期及长期强度.

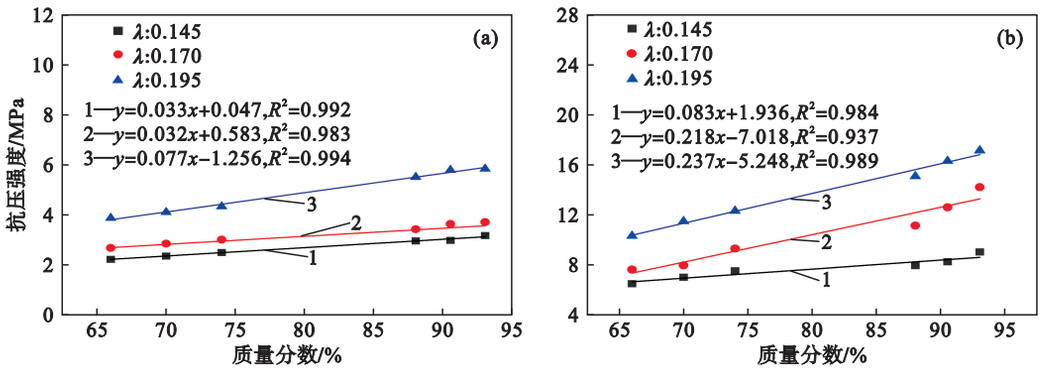


图3 质量分数与强度拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of mass fraction versus strength

(a)—养护1 d;(b)—养护7 d.

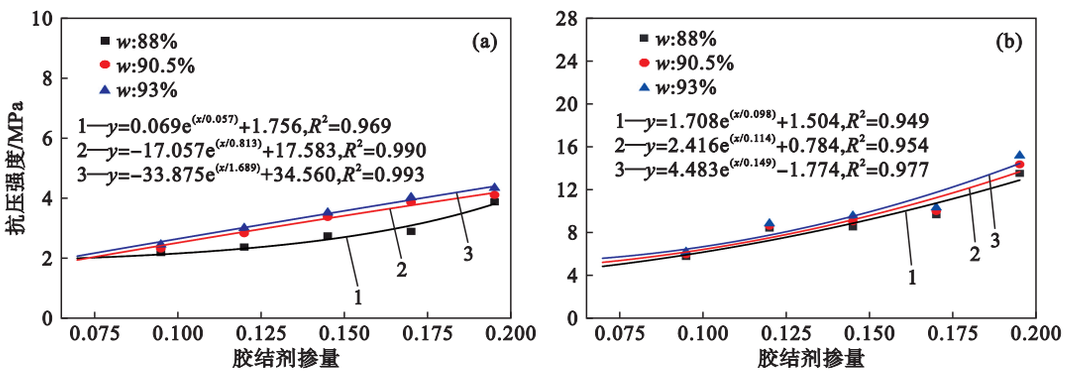


图4 胶结剂掺量与强度拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of binder content versus strength

(a)—养护1 d;(b)—养护7 d.

2.1.3 养护龄期对强度的影响

养护龄期对强度的影响同样至关重要,为探究不同胶结剂掺量下龄期对强度变化的影响,绘制龄期与强度拟合曲线如图5所示,图中不同胶结剂掺量下龄期对强度变化的影响呈现$y=a\ln(x+b)$函数关系.早期养护阶段(≤3 d),胶结剂水化反应初期未形成稳固结构,强度较低;养护中期(3~7 d)水化反应深入,颗粒结合力增强,微观结构致密化使强度显著提升;后期(>7 d)强度增速减缓但仍持续增长,约28 d达到峰值强度.

2.1.4 砂石比对强度的影响

图6是不同胶结剂掺量下砂石比对强度的影响,图中曲线呈现不规律的变化.当λ为0.145时,强度随砂石比的变化先减小后增大;λ为0.170时强度则先增大后减小.不同粒径骨料的组合比例变化,会引发孔隙结构的显著改变.从粒径角度看,粗骨料主导时会形成较大孔隙(间隙未被细骨料完全填充),细骨料增加则会产生更多微孔隙(细颗粒填充导致比表面积增大,水分蒸发后遗留的孔隙)[10].为深入解析不同砂石比造成的孔隙结构对强度的微观影响机理,需进行压汞试验进一步研究.

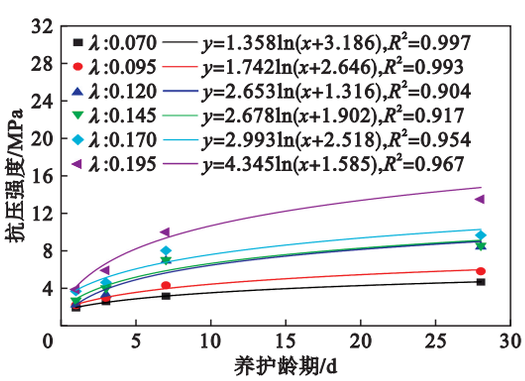


图5 龄期与强度拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of curing age versus strength

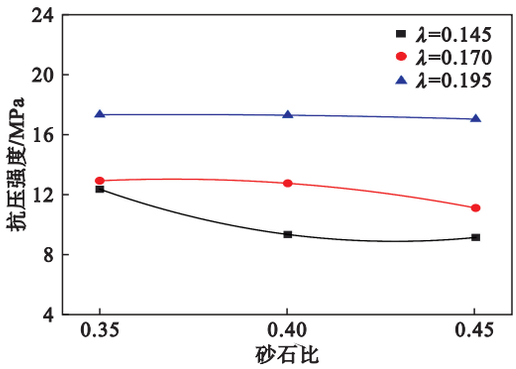


图6　强度随砂石比变化曲线

Fig. 6　Strength with sand-to-aggregate ratio

2.2　压汞试验结果分析

2.2.1　孔隙分级

选取料浆质量分数为88%(与矿山料浆质量分数一致),养护龄期为28 d,胶结剂掺量为0.145,0.170和0.195,砂石比为0.35,0.40,0.45的试样小块进行分析,共9种工况.本研究采用分形理论分析孔隙特征.结果显示(图7),材料孔隙分形曲线在双对数坐标中呈多段折线形态[11],并在0.01,0.05,0.5和2.5 μm处出现显著转折点,表明这些是孔隙特征变化的临界值(表5),故将其作为孔隙尺度划分依据.

表5　充填材料孔隙分级

Table 5　Pore classification of filling materials

孔隙类型	孔径范围/μm
超微孔隙	<0. 01
微孔隙	0. 01~0. 05
小孔隙	0. 05~0. 5
中孔隙	0. 5~2. 5

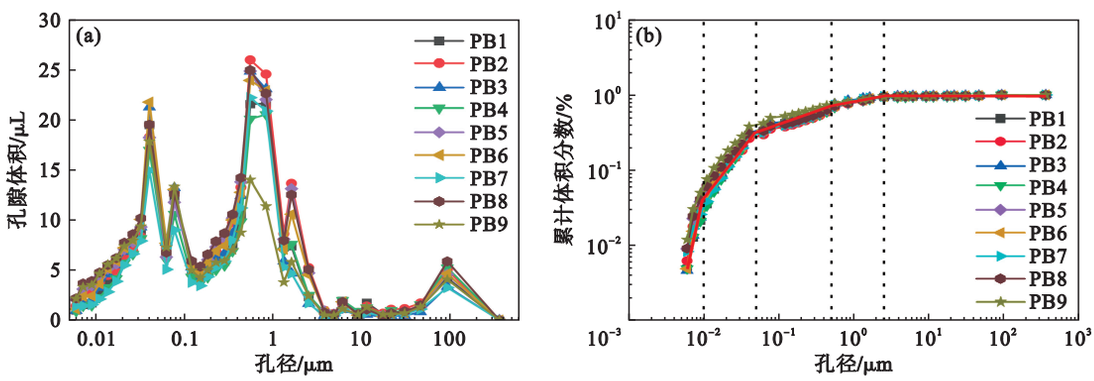


图7　孔隙分布曲线和孔隙分形曲线

Fig. 7　Pore distribution curves and pore fractal curves

(a)—分布曲线;(b)—分形曲线.

根据孔隙划分结果,绘制不同配比材料各孔隙区间占比图(图8),对比分析表5和图8可知,充填材料中孔隙(0.5~2.5 μm)占比最高.

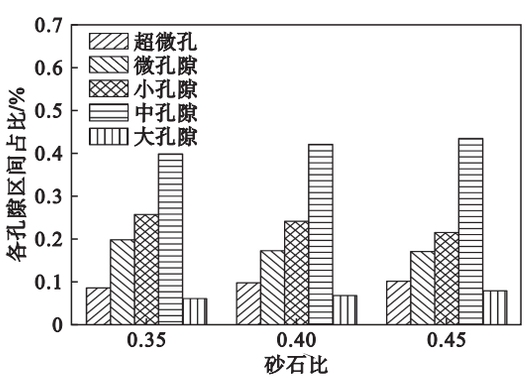


图8　不同配比充填材料各孔隙区间占比

Fig. 8　Mass distribution of different pore size intervals in backfill materials with varying proportions

按文献[12]方法,将单轴抗压强度与各区间孔隙占比进行线性拟合,结果显示:超微、微、小、中、大孔隙体积分数与抗压强度的线性拟合相关性系数(R^2)分别为0.006,0.542,0.853,0.842,0.819,超微孔隙相关性较弱;而微孔隙和小孔隙与抗压强度呈正相关,原因是其尺寸小,能均匀分布应力,减少应力集中,提高结构稳定性;中孔隙及大孔隙与强度呈负相关(图9),表明材料单轴抗压强度在一定程度上受中孔隙及大孔隙占比影响.

文献[13-15]证实固化充填材料的孔隙率与强度密切相关,从图10充填材料单轴抗压强度随孔隙率变化拟合曲线可见,二者负相关明显,相关系数0.871.综上,本文充填材料的中孔隙、大孔隙占比及孔隙率均与抗压强度负相关,可表征强度与微观结构的关系.

2.2.2　分形维数

固化充填材料的强度与宏观孔隙("有害孔")密切相关,孔径越大越易受拉应力破坏.因上述表征方法相关系数均小于0.9,为深入分析抗压强度与宏观孔隙关系,引入分形维数表征孔径体积及分布特征[16-17].分形维数反映孔隙分布

范围:高分形维数表明孔径分布广,大小差异大;低分形维数则表明孔径分布集中,大小较均匀.基于压汞实验数据计算分形维数方法如下:

$$s=\left(\frac{d}{d_{\max}}\right)^{3-D}, \tag{1}$$

$$\lg s=(3-D)\lg r+C. \tag{2}$$

式中:d 为孔径,μm;$d_{\max}$ 为最大孔径,μm;s 为孔径小于 d 的累计孔隙体积分数;D 为孔隙分形维数;r 为孔半径;C 为常数.

由式(2)可以看出,s 和 r 在双对数坐标上呈线性关系,所以用回归拟合法计算不同孔径区间及不同工况条件下孔隙分形维数 D.

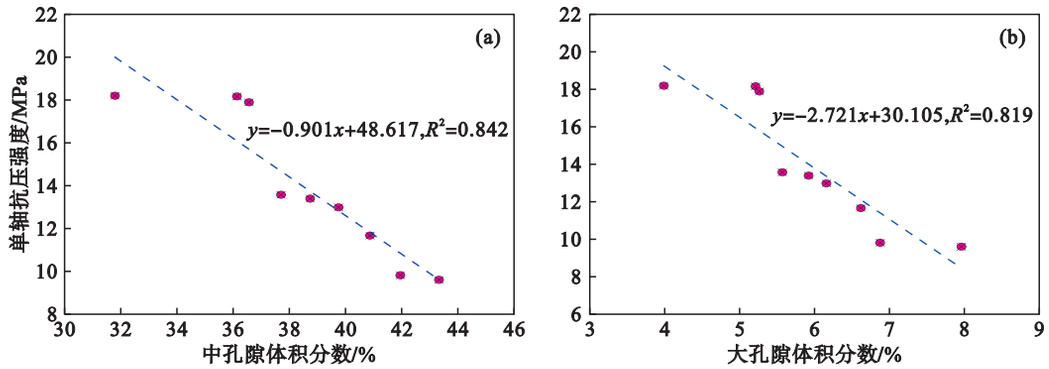


图 9 单轴抗压强度随各区间孔隙占比变化

Fig. 9 Variation of uniaxial compressive strength with porosity percentage in different intervals

(a)—中孔隙;(b)—大孔隙.

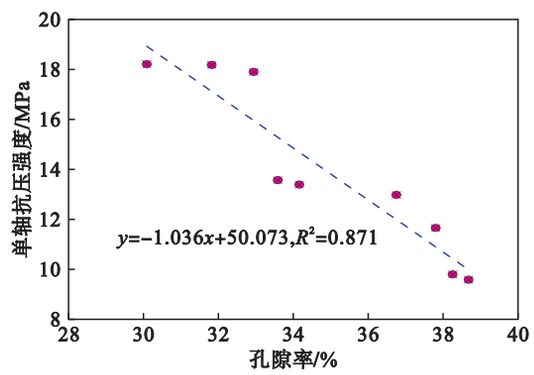


图 10 充填材料单轴抗压强度随孔隙率变化

Fig. 10 Variation of uniaxial compressive strength of backfill materials with porosity

本文充填材料主要孔径为 0.5~2.5 μm,孔径大易受拉应力破坏,分形维数随宏观孔隙增多而增大,统计孔径超过 0.5,1.0,2.0 μm 的孔隙分布分形维数见表 6.由图 11 抗压强度随分形维数变化拟合曲线可知,二者负相关强,相关系数超过 0.9(0.925,0.946,0.914),这表明,孔隙分形维数能准确反映充填材料的微观结构特征,其中孔径 >1.0 μm 的孔隙相关性最高(R^2=0.946),说明 1.0 μm 以上宏观孔隙的体积及分布形态是影响强度的关键因素.

表 6 不同孔径区间及不同工况条件下孔隙分形维数

Table 6 Fractal dimension of pores under different particle size intervals and working conditions

编号	配比		斜率(K)			分形维数(D=3−K)		
	胶结剂掺量	砂石比	>0.5 μm	>1.0 μm	>2.0 μm	>0.5 μm	>1.0 μm	>2.0 μm
PB1	0.145	0.35	0.040 50	0.021 11	0.013 62	2.959 50	2.978 89	2.986 38
PB2	0.145	0.40	0.030 56	0.016 30	0.012 69	2.969 44	2.983 70	2.987 31
PB3	0.145	0.45	0.029 79	0.012 40	0.009 77	2.970 21	2.987 60	2.990 23
PB4	0.170	0.35	0.041 91	0.021 94	0.015 62	2.958 09	2.978 06	2.984 38
PB5	0.170	0.40	0.041 80	0.021 75	0.014 65	2.958 20	2.978 25	2.985 35
PB6	0.170	0.45	0.035 56	0.019 55	0.013 25	2.964 44	2.980 45	2.986 75
PB7	0.195	0.35	0.048 66	0.025 96	0.020 11	2.951 34	2.974 04	2.979 89
PB8	0.195	0.40	0.045 96	0.025 01	0.017 50	2.954 04	2.974 99	2.982 50
PB9	0.195	0.45	0.042 60	0.022 60	0.016 62	2.957 40	2.977 40	2.983 38

2.2.3 影响机理验证

依据 2.2.2 节结论,绘制 >1.0 μm 部分孔隙分布孔隙体积与孔径对数散点图(图 12).由图可知:1) 相同胶结剂掺量时,不同砂石比对应的分布孔隙体积总体随砂石比增大而增大,与强度负相关,和前文一致;2) 在所有孔隙曲线中,1.61,2.51,

3.78,45.51,91.47 μm孔径处,分布孔隙体积随砂石比增大而增大,与强度负相关,所以不同砂石比下强度差异源于这些孔径对应孔隙体积占比不同.

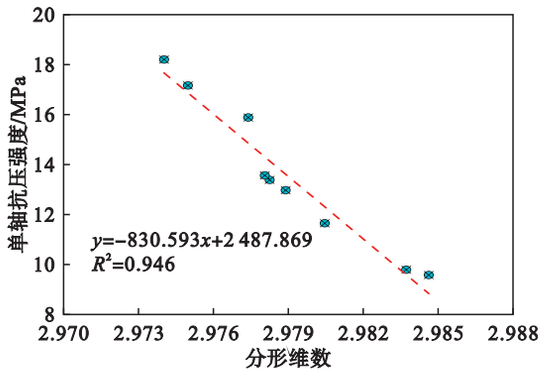


图 11　充填材料单轴抗压强度随分形维数变化

Fig. 11　Variation of uniaxial compressive strength of backfill materials with fractal dimension

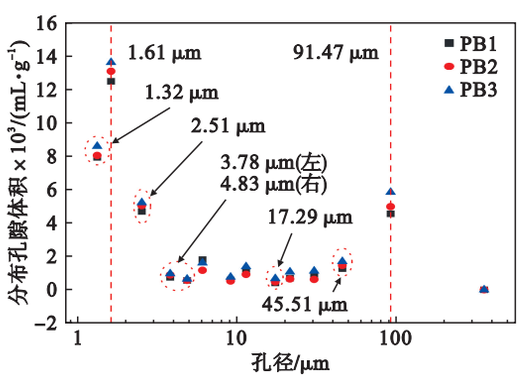


图 12　>1.0 μm孔隙的分布孔隙体积−孔径曲线

Fig. 12　Pore volume−pore size distribution curves for pores larger than 1.0 μm

进一步统计不同工况充填材料>1.0 μm孔隙占比(表 7),从图 13 单轴抗压强度随>1.0 μm孔隙占比变化的拟合曲线可知,二者负相关性高,相关系数(R^2)达 0.932,表明 1.0 μm 以上宏观孔隙体积分数能定量阐释孔隙结构对充填体强度的影响规律.

2.2.4　分形维数应用讨论

分析骨料特性与分形维数关系可知:1) 通常骨料粒径越小,孔隙结构越复杂,分形维数越高,如细砂孔隙分形维数高于粗砂;2) 形状不规则骨料堆积孔隙多且分布不均,分形维数大,如碎石分形维数大于卵石;3) 良好级配使孔隙结构复杂均匀,分形维数高,如连续级配骨料分形维数高于单一级配.

基于此,设计充填配比可参考:①依充填体要求与性能目标确定孔隙结构分形维数范围;②用正交试验等方法,调整不同粒径骨料比例改变分形维数,依实验结果绘制关系曲线,得出最佳骨料配比范围.

表 7　不同配比充填材料各孔隙区间占比

Table 7　Mass distribution of pore size intervals in backfill materials with varying proportions

编号	>1.0 μm孔隙占比/%	充填材料强度/MPa
PB1	0.265 8	12.98
PB2	0.289 5	9.82
PB3	0.296 1	9.61
PB4	0.257 9	13.57
PB5	0.261 7	13.39
PB6	0.268 1	11.67
PB7	0.192 6	18.18
PB8	0.215 6	17.85
PB9	0.246 9	15.88

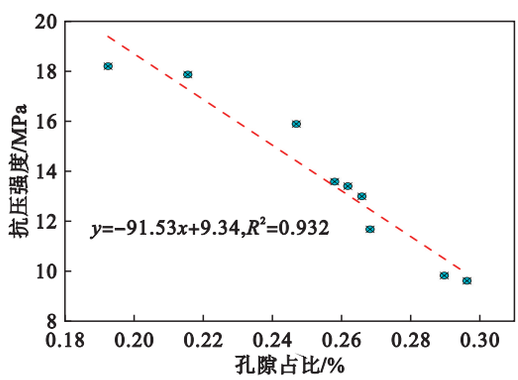


图 13　单轴抗压强度随 1.0 μm以上孔隙占比变化

Fig. 13　Variation of uniaxial compressive strength with proportion of pores larger than 1.0 μm

3　结　　论

1) 赤峰柴矿充填材料强度随料浆质量分数增长呈$y=a+bx$线性增长;随胶结剂掺量增大呈$y=a+be^{cx}$指数增长;随养护龄期增长呈$y=a\ln(x+b)$函数增长;随砂石比变化呈现不规律变化,不能用单一函数关系表征强度随砂石比的变化规律.

2) 将试块孔隙进行分级,得到中孔隙(0.5~2.5 μm)和大孔隙(>2.5 μm)的孔隙体积分数及孔隙率与抗压强度之间存在一定负相关性,相关系数接近 0.9,可以在一定程度上表征强度与微观结构关系.

3) 基于分形维数理论分析发现,充填材料单轴抗压强度与大于 1.0 μm 的孔隙占比之间呈现高度的负相关性,相关系数达到 0.932.这意味着 1.0 μm 以上宏观孔隙的体积分数能够定量地解

释孔隙结构对充填体试样强度的影响规律.

参考文献:

[1] Zhang J Q, Yang K, He X, et al. Research status of comprehensive utilization of coal-based solid waste (CSW) and key technologies of filling mining in China: a review [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 926: 171855.

[2] Wu T H, Gao Y T, Ji M W, et al. Recycling gold mine tailings into eco-friendly backfill material for a coal mine goaf: performance insights, hydration mechanism, and engineering applications [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 193: 95−114.

[3] Chiloane N M, Mulenga F K. Revisiting factors contributing to the strength of cemented backfill support system: a review [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(6): 1615−1624.

[4] Mo J X, Ren F M, Guo S Z, et al. Impact of sand to aggregate ratio on mechanical properties and micro-structures of waste crumb rubber concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 88: 109212.

[5] Zhang J X, Ma Y W, Zheng J Z, et al. Chloride diffusion in alkali-activated fly ash/slag concretes: role of slag content, water/binder ratio, alkali content and sand-aggregate ratio [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 261: 119940.

[6] 温震江,高谦,王永定,等.不同浓度料浆流变特性与混合骨料级配相关性试验[J].东北大学学报(自然科学版),2020, 41(5): 642−648.
(Wen Zhen-jiang, Gao Qian, Wang Yong-ding, et al. Experiment on the correlation between rheological properties of slurry of different consistency and gradation of mixed aggregate [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(5): 642−648.)

[7] 侯永强,尹升华,杨世兴,等.混合骨料胶结充填体强度特性及与开挖矿体的合理匹配[J].中国有色金属学报,2021, 31(12): 3750−3761.
(Hou Yong-qiang, Yin Sheng-hua, Yang Shi-xing, et al. Strength characteristics of mixed aggregate cemented backfill and reasonable matching with excavated ore body [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(12): 3750−3761.)

[8] 李振军,刘喜,赵辰宇,等.钢纤维地聚物再生混凝土孔隙结构与力学性能试验研究[J].复合材料学报,2024, 41(10): 5516−5526.
(Li Zhen-jun, Liu Xi, Zhao Chen-yu, et al. Pore structure and mechanical properties of steel fiber reinforced geopolymer recycled aggregate concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(10): 5516−5526.)

[9] 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.
(Li Zhao-feng, 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.)

[10] Ke X, Zhou X, Wang X S, et al. Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 126: 345−350.

[11] Liu X Y, Zhu Z G, Chen Y, et al. Relationship between small-strain shear modulus and size polydispersity of granular soils: whether the coefficient of uniformity is sufficient? [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 451: 138830.

[12] 张昆,孟召平,金毅,等.不同煤体结构煤的孔隙结构分形特征及其研究意义[J].煤炭科学技术,2023, 51(10): 198−206.
(Zhang Kun, Meng Zhao-ping, Jin Yi, et al. Fractal characteristics of pore structures on different coal structures and its research significance [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(10): 198−206.)

[13] Zhang S Y, Yang L, Qiu J P, et al. Fluidity and strength behaviors of cemented foam backfill: effect of particle size distribution and foaming agent dosage [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(4): 1−15.

[14] Wijekoon S H B, Janarth A, Dharmar J, et al. Optimizing compressive strength prediction of pervious concrete using artificial neural network [J]. *Engineering Research Express*, 2025, 7(1): 015418.

[15] Wang L, Feng S Z, Wang Y G, et al. The effect of porosity on the fatigue crack growth behavior of selective laser melted TA15 titanium alloy [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 170: 109305.

[16] Ulyeva A G. Strength and porosity of special coke used in electrothermal processes [J]. *Coke and Chemistry*, 2025, 67(9): 540−545.

[17] Guan X, Hou X, Hao X D, et al. Dynamic energy performance and pore structure of CGSC under sulfate attack: an SHPB−based study [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 457: 139457.