石灰优化磷石膏基固废充填体的试验研究*

柳小胜[1],王卫军[1],杨铁江[2],原昌伟[2]

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭市 411201;
2.中矿金业股份有限公司, 山东 招远市 265400)

摘要:高掺量磷石膏凝胶材料具有胶凝性弱、强度低等缺点,添加石灰可以提高磷石膏基固废凝胶材料的胶凝性和强度。以磷石膏、钢渣和高炉矿渣为胶凝材料原材料,石灰为激发剂,尾砂为骨料制备充填体,探究不同石灰掺量下充填体的力学特征、孔隙特征及微观结构,并引入分形理论来探究石灰对磷石膏基固废胶凝充填体孔隙特征的影响。结果表明:2%的石灰掺量可使充填体7 d和28 d强度分别提高133.33%和95.83%,为最佳石灰掺量,过量的石灰会生成过多$Ca(OH)_2$晶体,造成充填体发生体积膨胀和结构破坏,进而导致充填体强度降低;石灰对充填体内小孔径孔隙的影响显著,尤其对20~200 nm内孔隙的分形维数影响最为突出;充填体强度与孔隙度之间呈线性降低关系,与20~100 nm和>200 nm范围内的孔隙含量呈指数递减关系,与100~200 nm范围内的孔隙含量呈二次函数递减关系,与分形维数呈指数递增关系。

关键词:磷石膏基固废胶凝材料;石灰掺量;充填体强度;分形理论

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0093-08

Experimental Study on Lime-Optimized Phosphogypsum-Based Solid Waste Backfill

LIU Xiaosheng[1], *WANG Weijun*[1], *YANG Tiejiang*[2], *YUAN Changwei*[2]

(1.College of Resources Environment and Safety Engineering,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;
2.Zhongkuang Gold Industry Co., Ltd., Zhaoyuan, Shandong 265400, China)

Abstract: The high content of phosphogypsum gel material has the disadvantages of weak gelling and low strength. Adding lime can improve the gelling and strength of phosphogypsum-based solid waste gel material. Phosphogypsum, steel slag and blast furnace slag were used as raw materials of cementitious materials, lime was used as activator, and tailings were used as aggregate to prepare backfill. The mechanical characteristics, pore characteristics and microstructure of backfill under different lime content were investigated. The fractal theory was introduced to explore the effect of lime on the pore characteristics of phosphogypsum-based solid waste cementitious backfill. The results show that a lime content of 2% increases the 7-day and 28-day strengths of the backfill by 133.33% and 95.83% respectively, which is the best lime content. Excessive lime generates excessive $Ca(OH)_2$ crystals, which causes volume expansion and structural damage of the backfill, thereby reducing its strength. Lime has a significant effect on the small pores in the backfill, especially on the fractal dimension of the pores within 20-200 nm. The strength of the backfill decreases linearly with porosity, decreases exponentially with pore contents in the ranges of 20-100 nm and >200 nm, decreases quadratically with pore content in the range of 100-200 nm, and increases exponentially with the fractal dimension.

Key words: Phosphogypsum-based solid waste cementitious material, Lime content, Backfill strength, Fractal theory

0 引言

随着国家对生态环境的重视,不断推出优化资源、保护环境的新政策。我国是一个工业大国,在发展工业经济的同时会产生工业固废,这些工业固废若未能得到有效利用就会造成严重的问题,比如污染环境、占用大量土地等。工业固废重新利用可减少资源浪费,也可以缓解企业的管理压力。有些工业固废具有一定的胶凝性,可作为胶凝材料的原材料,比如钢渣、粉煤灰、工业石膏等。其中磷石膏作

* **收稿日期**:2025-09-30
基金项目:湖南省自然科学基金项目(2023JJ50356)
作者简介:柳小胜(1980—),男,湖南邵阳人,博士,正高级工程师,主要从事充填采矿技术研究工作。E-mail:13681996@qq.com

为化工厂的固废,其处理方式常常为空场堆放,这样既占用土地,又污染环境。有些学者将磷石膏作为骨料进行重新利用[1-3],也有学者将磷石膏作为胶凝材料进行研究,但是这类研究较少,并且磷石膏添加量也较少。这是因为作为胶凝材料原材料的不同石膏类型中,磷石膏的胶凝活性最低[4]。而高掺量磷石膏使固废胶凝材料的胶凝性减弱,从而导致其制备的充填体强度无法满足工程要求。

磷石膏与其他工业固废一样,均属于低活性胶凝材料,需要与其他固废联合使用。在以往的研究中,对于低活性的固废通常采用激发的形式进行重新利用[5-8],例如碱激发、盐激发或复合激发。兰文涛等[9]利用石灰激发磷石膏制备充填体,结果发现石灰掺量为1.5%时充填体强度最高。吴萌等[10]利用石灰激发矿渣粉和粉煤灰复合体,结果产生较多的钙矾石、C-(A)-S-H等水化产物。张建强等[11]利用石灰和矿渣微粉制备充填胶凝材料,得出相较于纯水泥充填体,掺入石灰的胶结充填体的7 d强度均有所提高。从以上研究可以看出,利用石灰激发工业固废可以有效激发其潜在活性,产生水化产物,从而代替水泥作为充填胶凝材料。但是,以上研究利用石灰激发的对象为易激发固废或只激发磷石膏,而磷石膏的活性相对其他固废更弱,更不易被激发;以高掺量磷石膏为原料制备的胶凝材料胶凝性弱、充填体强度低,利用石灰激发高掺量磷石膏固废胶凝材料的研究还不足,并且石灰对固废胶凝材料制备的充填体孔隙特征影响的分析不够深入。

基于以上研究存在的不足,本研究利用石灰激发磷石膏基固废胶凝材料来提高固废胶凝材料的胶凝活性,通过测试充填体的各项性能来表征石灰的优化效果,并引入分形理论来探究石灰对磷石膏基固废胶凝充填体孔隙特征的影响,揭示石灰对磷石膏基固废胶凝材料的调控机制,从而改善磷石膏作为胶凝材料原材料活性低和利用率不足的问题,为实现高比例磷石膏在充填体中的低成本、高性能利用提供了具体、可操作的配比方案。

1 试验方案

1.1 试验材料

本试验所用高炉矿渣、钢渣均来自广西某零售店,磷石膏来自湖北某化工厂,尾砂来自安徽某铁矿,石灰来自市售,经球磨机磨细后再进行筛分,石灰含钙量在95%左右,粒径在150~200目之间。高炉矿渣、钢渣和磷石膏采用X射线荧光光谱分析其成分,结果见表1。从表1可以看出,钢渣的Fe_2O_3含量较高,Al_2O_3含量偏少,而高炉矿渣的含量相对较均匀。采用激光粒度仪测试尾砂的粒径分布,结果如图1所示。从图1可以看出,尾砂最大粒径在500 μm处,大部分粒径小于326 μm,中值粒径约为193 μm。

表1 原材料化学成分

Table 1 Chemical composition of raw materials %

原材料	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	SO_3	Fe_2O_3	其他
钢渣	30.84	42.42	2.54	3.17	—	10.72	10.31
高炉矿渣	29.46	33.31	19.21	9.75	—	1.68	6.59
磷石膏	8.39	37.36	1.32	—	46.74	—	6.19

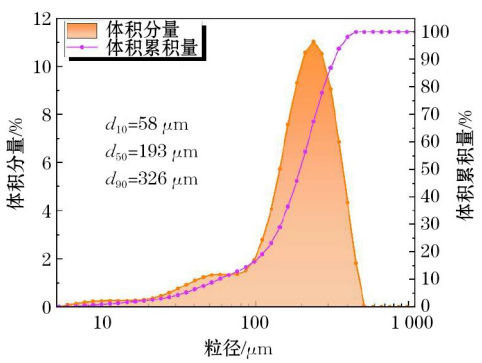


图1 尾砂粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of tailings

1.2 试验设计

本试验所用骨料为尾砂,所用胶结材料为新型胶凝材料,其组分包括钢渣、高炉矿渣、磷石膏和石灰。前期为了确定磷石膏掺量范围进行了正交试验,结果表明,磷石膏掺量越多,充填体强度越低,当磷石膏掺量为40%时,充填体28 d强度大于1 MPa,超过40%时,充填体28 d强度低于1 MPa。综合分析其可行性及最大化提高磷石膏利用率,本研究最终确定钢渣、高炉矿渣和磷石膏配比为3∶3∶4,但由于此配比下充填体强度较低,因此利用石灰进行激发。考虑到预试验中石灰掺量超过10%对充填体强度不仅无利反而有害(石灰掺量为10%时,充填体体积产生膨胀,28 d强度仅为1.09 MPa),本研究设置石灰掺量为新型胶凝材料总量的0、2%、4%、6%和8%。设计胶砂比为1∶4,质量浓度为70%,试验具体配比见表2。试样制备过程如下:首先按照配比将原材料制备成料浆,再将料浆注入标准圆柱模具(Φ50 mm×100 mm)中,待料浆凝固后脱模,按照石灰掺量将试样分组标记(分别为A0、

A1、A2、A3、A4)，将标记好的试样放入养护箱(湿度＞90%，温度20±2 ℃)中进行养护，分别养护到第 7 天和第 28 天时进行各项测试。

表 2　试验配比

Table 2　Experimental proportions

分组	石灰掺量/%	胶凝固废掺量/%	胶砂比	质量浓度/%
A0	0	100		
A1	2	98		
A2	4	96	1∶4	70
A3	6	94		
A4	8	92		

1.3　试验方法

利用单轴压缩机对养护好的试样进行强度测试，依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)，将试样放置在承压板中间，保持承压板上下平行，设置好参数后开始测试，待试样破坏后停止加载，记录强度值。每组试验测试 3 次，最终取平均值。利用核磁共振仪对试样进行孔隙测试，首先将试样抽真空浸泡在水里，每隔一定时间取出，用湿毛巾擦干表面水分测量其质量，持续 48 h，待质量不变后取出，用保鲜膜包裹，调好参数后进行测试。采用扫描电镜仪测量试样的微观结构，从强度测试破坏后的试样中挑选 1 cm^3 左右的碎片进行烘干和喷金处理，再放在扫描电镜仪下进行观察并拍照，记录不同倍率下的微观结构。利用热重分析仪分析各组试样的微分热重(DTG)曲线，从强度测试破坏后的试样中挑选几个碎片，进行烘干粉磨，将适量粉末放入含有氮气的加热仪中，记录不同温度下的粉末质量。

2　试验结果

2.1　强度特征

抗压强度是充填体的基本属性，利用单轴压缩机测得的强度结果如图 2 所示。从图 2 可以看出，各龄期强度随着石灰掺量的增加均出现先提高后降低的趋势，石灰掺量为 2%时，试样 7 d 和 28 d 强度分别为 0.91 MPa 和 2.35 MPa，均为最大值。为了进一步分析石灰掺量对充填体强度的影响，利用强度增长率进行表征，其表达式如式(1)所示。根据公式(1)可求出石灰优化后各龄期强度增长率(见图 2)。结果表明，随着石灰掺量的增加，强度增长率先正后负，说明添加过量石灰导致强度出现负增长。添加 2%的石灰可使试样各龄期强度提升幅度最大，其中 7 d 强度增长 133.33%，28 d 强度增长 95.83%，但是随着石灰掺量的增加，强度增长率逐渐降低，甚至出现负增长。当石灰掺量为 8%时，充填体 7 d 和 28 d 强度分别降低 58.97%和 92.50%，因此过量的石灰不仅不会优化充填体强度，还会对充填体强度产生不利影响。仅从强度角度来看，2%的石灰掺量是最优的。

$$\Delta\sigma=\frac{\sigma_i-\sigma_0}{\sigma_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中：$\Delta\sigma$ 代表增长率，%；σ_i 代表各组强度，MPa；σ_0 代表未加石灰组强度，MPa。

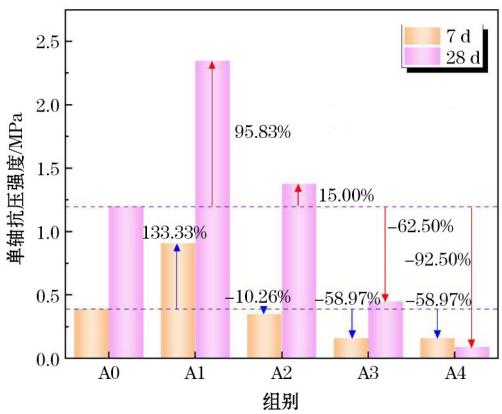


图 2　不同石灰掺量充填体试样强度特征

Fig.2　Strength characteristics of backfill specimens with different lime contents

2.2　孔隙分布

孔隙分布对充填体性能具有重要影响，利用核磁共振测试充填体孔隙分布，结果如图 3 所示。从图 3 可以发现，T_2 图谱中有三个峰，从左到右峰值依次减小，而不同组的峰值差异主要体现在最左边峰。根据 T_2 值与孔径间的关系(见式(2))可知[12-13]，T_2 值越大，孔径越大。即，从左到右三个峰的孔径依次增大，不同组的孔隙差异主要体现在小孔径孔隙里。根据峰面积也可以看出，左侧峰面积最大，往右依次减小，说明小孔径的孔隙含量最多。对比小孔径孔隙可以发现，石灰掺量越多，小孔径孔隙含量先减少后增多，并且出现峰值对应的 T_2 值先减小后增大，即孔径先减小后增大。这也说明石灰的添加对小孔径孔隙具有明显的影响，这主要是因为石灰影响了固废胶凝材料的水化反应，从而影响了充填体的孔隙结构。

$$r=\rho_2 F_s T_2 \tag{2}$$

式中：r 代表孔径；ρ_2 和 F_s 是与孔形有关的参数，充填体内的孔隙为非球形孔隙，因此 F_s 取 2，而 ρ_2 参考其他类似充填体，可取 12 nm/ms[14]；T_2 代表横

向弛豫时间。

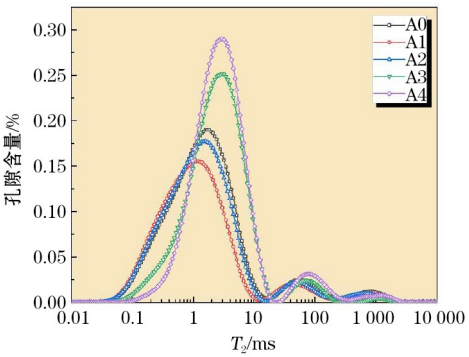


图 3 不同石灰掺量充填体试样的孔隙分布

Fig.3 Pore distribution of backfill specimens with different lime contents

孔径大小是影响充填体强度的重要因素,由于充填体与混凝土结构类似,有学者也按照孔径对充填体强度的损伤程度对孔径进行划分[14]。根据此划分规则可求出不同孔径孔隙的含量分布,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,孔径小于 20 nm 时,随着石灰掺量的增加,孔隙含量呈先增加后减少的趋势,孔径大于 20 nm 时,各类孔径孔隙含量随着石灰掺量的增加均呈先减少后增加的趋势。

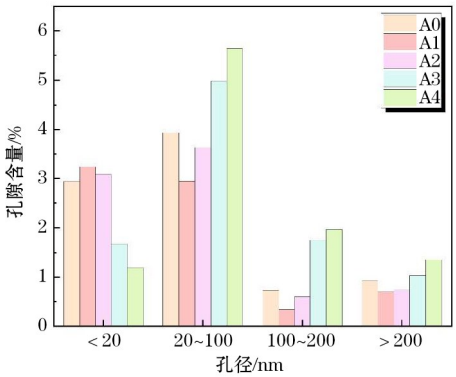
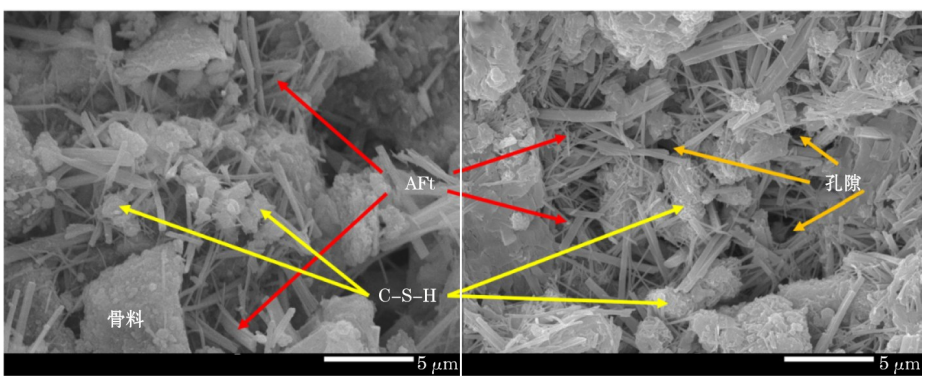


图 4 不同孔径孔隙分布

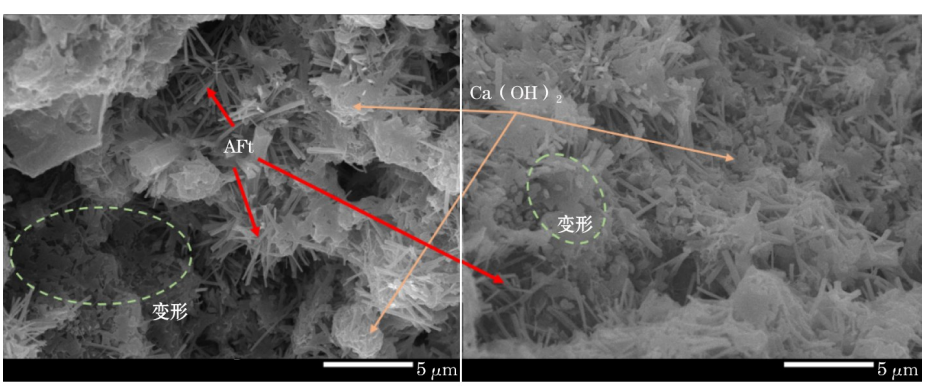
Fig.4 Pore distribution of different pore sizes

2.3 微观结构

扫描电镜技术是一种直观观察样品内部微观结构的方法,可以将充填体碎片放大上千倍,从而观察其内部的微观结构特征,根据内部结构形态判断产物类型,通常将针棒状、柱状结构归为钙矾石(AFt),将絮状、箔片状结构归为 C-S-H 凝胶,将层片状结构或类球形簇状归为氢氧化钙。但扫描电镜图只能定性分析物质结构成分。图 5 为不同龄期下 A1 组和 A4 组放大 5 000 倍的扫描电镜图。



(a) A1,7 d (b) A1,28 d



(c) A4,7 d (d) A4,28 d

图 5 充填体微观结构

Fig.5 Microstructure of backfill specimens

从图 5 可以看出，水化产物主要为针状晶体的 AFt 和絮状的C－S－H 凝胶，孔隙被水化产物交错填充。对比不同组别间的水化产物可以发现，添加过量石灰后，水化产物含量减少，并且部分产物形态变形，氢氧化钙含量增加，这均对充填体强度造成不利影响。对比不同龄期下的水化产物特征可以发现，28 d时的水化产物形貌更致密、数量更丰富，钙矾石更细更多，且交错在孔隙内，而 C－S－H 凝胶也更蓬松更多，与其他固相胶结在一起，孔隙也更小更少，因此 28 d 的强度更高。在合适的石灰掺量下，适宜的碱性环境为水化反应创造了合适的水化环境，随着养护龄期的延长，石灰促进了水化产物的发育[15-16]。

2.4　DTG 分析

不同物质的热稳定性不同，可通过温度差异判断物质种类，图 6 为各组试样在不同温度下的 DTG 曲线。根据相关研究可知[17-19]，在 50～200 ℃范围内，充填体水化产物一般为石膏、钙矾石和 C－S－H 凝胶，而在 400 ℃左右为$Ca(OH)_2$晶体。从图 6 可以看出，DTG 曲线主要有两个峰，分别在 50～200 ℃和 340～420 ℃之间，由此可以判断出充填体内部大致有钙矾石、C－S－H 凝胶和$Ca(OH)_2$等物质。其中第一个峰为水化产物峰，第二个峰为石灰产生的$Ca(OH)_2$峰。随着石灰掺量的增加，水化产物峰出现先增大后减小的变化趋势，而$Ca(OH)_2$峰出现逐渐增大的变化趋势。有研究表明[20]，CaO 吸水变成$Ca(OH)_2$晶体，从而出现体积膨胀现象，因此过多的$Ca(OH)_2$晶体会降低充填体强度。综上所述，石灰促进了水化反应的进行，但过多的石灰会形成$Ca(OH)_2$晶体，产生体积膨胀，从而降低充填体强度。

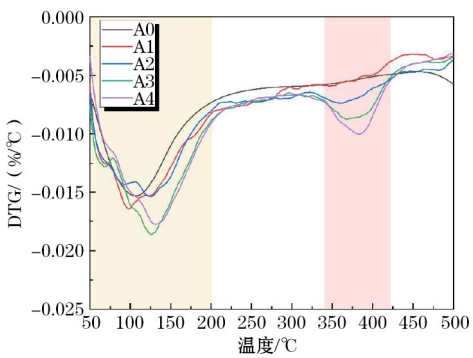


图 6　各组试样的 DTG 曲线

Fig.6　DTG curves of each group of specimens

2.5　孔隙分形分析

2.5.1　分形理论

在传统几何学中，图形通常为规则图形，例如正方形、圆形、三角形等，然而实际中的图形并非为规则图形，例如云朵的边缘、山脉的轮廓、海岸线的曲折等。另外，我们所熟悉的维度目前有直线的一维，平面的二维和立体的三维，但有些维度可能并非是整数。为了分析这些不同维度的不规则图形，数学家本华·曼德博创立了分形几何，它具有自相似性和分数维度。分形的自相似性是指一个图形的局部结构总是相似于整体形态的特征，而它的分数维度是指图形的结构填充空间的能力，例如著名的科赫雪花，它的维度大约为 1.26。从扫描电镜图中也可以看出，充填体内孔隙结构并非为规则结构，而是由许多复杂的结构构成，利用传统的几何学无法准确地描述它们，因此，引入分形几何对此加以描述便可准确分析其几何特征。

利用分形理论来描述自然界中具有自相似性的物体，可用一个幂函数来表达，具体表达形式[21]如下：

$$N(r)\propto r^{-D_f} \tag{3}$$

式中：$N(r)$代表半径大于 r 的孔隙总量；D_f代表分形维数。

从式(3)可以看出，分形维数与孔径 r 之间具有一定的函数关系，而核磁共振结果中也含有孔径 r(见式(2))，因此，可以将分形维数与核磁共振结果相结合，从而利用分形理论分析充填体的孔隙特征。

2.5.2　孔隙分形特征

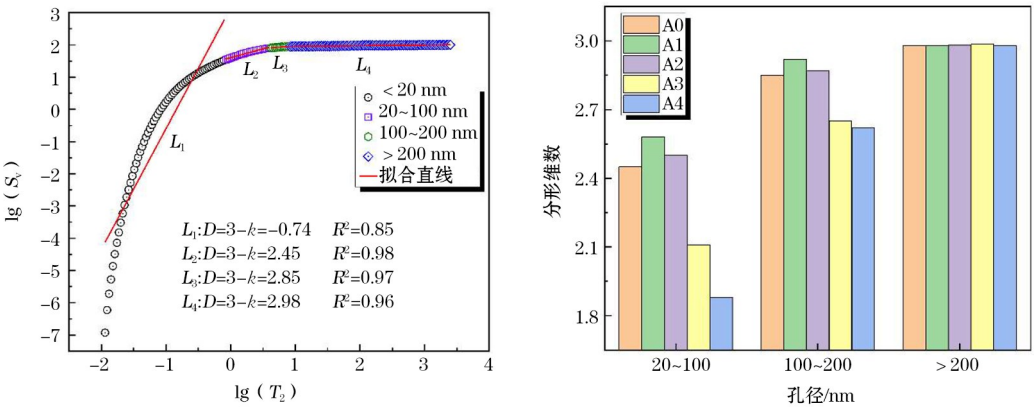
为了进一步分析孔隙特征，利用分形理论对其进行研究。分形维数反映了孔隙的复杂程度，有研究表明，核磁共振 T_2 图谱与分形理论相结合可以满足一定的函数关系[22-23]，表达式如下：

$$\lg(S_v)=(3-D)\lg(T_2)+(D-3)\lg(T_{2max}) \tag{4}$$

式中：S_v 代表孔隙累积含量；D 代表分形维数。

从式(4)可以看出，孔隙累积量与 T_2 值取对数后，两参数之间符合线性关系，通过线性拟合求斜率即可求出分形维数。以 A0 组为例，按照孔隙对强度的损伤程度进行分类[14]，各类孔隙的分形特征如图 7(a)所示。从图 7(a)中可以看出，对于孔径小于 20 nm 的孔隙，其分形维数小于 0，不具有分形特征；对于孔径大于 20 nm 的孔隙，其分形维数分布在 2～3 之间，符合分形特征，并且分形效果较好(拟合率大于 0.96)。随着孔径的增大，分形维数也在增大，孔隙越复杂。各组试样不同孔径孔隙的分形维数结果如图 7(b)所示。从图 7(b)可以看出，添加石灰后，对于孔径在 20～100 nm 之间孔隙，石灰对其分形维数影响较大，随着孔径增大，影响越来越弱，当孔径大于 200 nm 时，石灰对孔隙分形维数几乎无影响。当孔径范围为 20～200 nm 时，A1 组的分

形维数最大,结合微观结构分析可知,水化产物的形成对该孔径范围内的孔隙发育产生重要影响,大量水化产物的形成可填充大孔隙并形成较小的孔隙,导致孔隙形态多样化,这一特征对充填体的宏观性能产生显著影响,对强度的作用尤为突出。综上,孔隙变小、形态多样化提高了充填体强度。



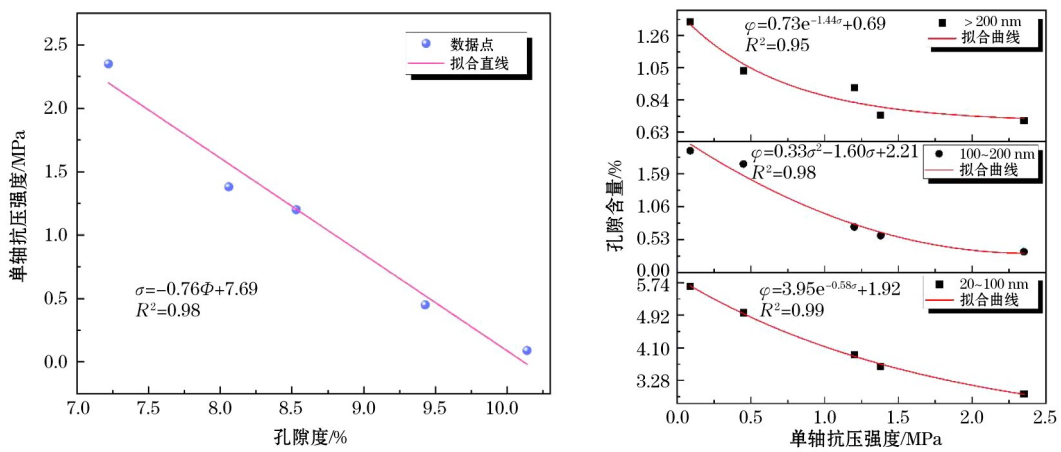
(a) 分形特征 (b) 分形维数

图 7 孔隙的分形结果

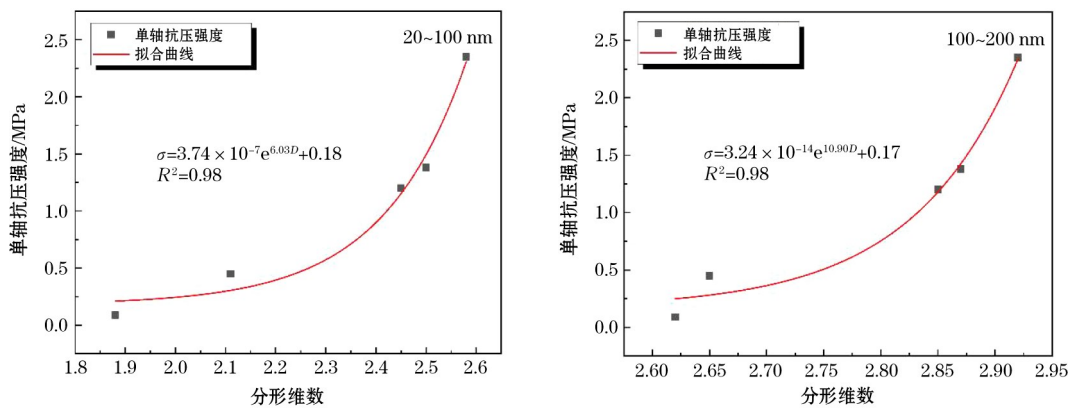
Fig.7 Fractal results of pore

2.6 强度与孔隙特征的关系

孔隙特征对充填体强度性能具有重要影响,本文建立了孔隙特征与充填体强度之间的函数关系模型,如图 8 所示。



(a) 强度与孔隙含量的关系



(b) 强度与分形维数的关系

图 8 强度与孔隙之间的关系

Fig.8 Relationship between strength and pore

图 8(a)是孔隙含量与充填体强度之间的关系,图 8(b)是孔隙分形维数与充填体强度之间的关系。从图 8(a)可以看出,试样强度与孔隙度呈线性降低关系,与 20～100 nm 和＞200 nm 范围内的孔隙含量呈指数递减关系,与 100～200 nm 范围内的孔隙含量呈二次函数递减关系。孔隙含量越大,充填体强度越低,因此,降低孔隙含量是提高充填体强度的有效途径。从图 8(b)中可以看出,充填体强度与分形维数之间呈指数递增关系,说明孔隙越复杂,充填体强度越高。这是因为孔隙复杂度不仅与孔径大小有关,还与孔隙类型有关,当不同大小的固相堆积在一起,固相尺寸越多,堆积时产生的孔隙孔径和孔隙类型越多,孔隙的复杂度越高,充填体强度越高。

3 结论

(1) 添加适量的石灰可有效提高磷石膏基固废胶凝充填体强度。充填体强度随着石灰掺量的增加先提高后降低,当石灰掺量为 2%时,充填体各龄期强度最高,7 d 和 28 d 强度分别为 0.91 MPa 和 2.35 MPa,比未加石灰的充填体强度分别提高了 133.33%和 95.83%,过量的石灰会降低充填体强度,当石灰掺量为 8%时,充填体 7 d 和 28 d 强度分别降低 58.97%和 92.50%。

(2) 石灰对充填体孔隙特征也有显著影响。充填体的 T_2 图谱含有三种峰,其中小孔径的峰值最高,并且石灰对小孔径孔隙的影响最为显著。进一步分析显示,小于 20 nm 的孔隙没有分形特征,而石灰对 20～200 nm 孔隙的分形维数影响最为显著。孔径越大,分形维数越大;随着石灰掺量的增加,分形维数呈先增加后降低的变化趋势。

(3) 充填体强度与孔隙特征之间具有一定的函数关系。通过建立充填体强度与孔隙特征之间的关系,确定了充填体强度与孔隙度之间呈线性降低关系,与 20～100 nm 和＞200 nm 范围内的孔隙含量呈指数递减关系,与 100～200 nm 范围内的孔隙含量呈二次函数递减关系,与分形维数之间呈指数递增关系。该模型表明孔径大于 20 nm 的孔隙含量越多,充填体强度越低,而在 20～200 nm 范围内的孔隙,其分形维数越大,充填体强度越高。

(4) 适量石灰(2%)通过优化水化环境,显著促进了 AFt 和 C-S-H 凝胶的生成,并特异性地细化和复杂化了 20～200 nm 范围内的有害孔隙,这是充填体强度提升的微观本质;过量石灰会生成过多 $Ca(OH)_2$ 晶体,从而导致充填体体积膨胀、结构破坏。

(5) 本研究确定的最优石灰掺量为 2%,可直接作为以 3∶3∶4 的钢渣-矿渣-磷石膏制备充填体的核心配比参数;同时,监测 20～200 nm 孔径区间的孔隙分形维数可作为评价此类充填体性能的一个潜在微观指标。

参考文献(References):

[1] 罗芳,贺严,焦文宇,等.基于磷石膏的多骨料充填体强度演化规律研究[J].矿业研究与开发,2019,39(6):41-46.
LUO Fang, HE Yan, JIAO Wenyu, et al. Research on the strength evolution rule of multi-aggregate filling body based on phosphogypsum[J]. Mining Research and Development, 2019,39(6):41-46.

[2] 张建华,刘方芳,姜金洁,等.磷石膏基复合充填材料力学性能试验研究[J].金属矿山,2017(10):47-50.
ZHANG Jianhua, LIU Fangfang, JIANG Jinjie, et al. Experimental study on the mechanical property of composite backfills with phosphorus gypsum[J]. Metal Mine, 2017(10):47-50.

[3] ZHOU Yanan, LI Xibing, MIN Chendi, et al. Release of toxic gases in the process of cemented backfill with phosphorus waste[J]. Journal of Central South University, 2023,30(1):202-213.

[4] WU Fan, XIAO Bolin, YANG Faguang. Rheological and strength properties of steel-slag cemented paste backfill:link to gypsum type and dosage[J]. Minerals 2023,13:421.

[5] 孙浩,胡凯伟,李崇智,等.硫酸铝激发钢渣复合微粉的作用机理研究[J].材料导报,2024,38(增刊 1):341-345.
SUN Hao, HU Kaiwei, LI Chongzhi, et al. Study on the action mechanism of aluminum sulfate excited steel slag composite micropowder[J]. Materials Reports, 2024, 38(Suppl.1):341-345.

[6] 黄笃学,温震江,高谦,等.矿渣基充填胶凝材料开发及料浆配比优化研究[J].金属矿山,2020(2):163-168.
HUANG Duxue, WEN Zhenjiang, GAO Qian, et al. Development of slag-based cementitious filling material and the proportioning optimization of slurry[J]. Metal Mine, 2020(2):163-168.

[7] 赵风文,胡建华,曾平平,等.基于正交试验的碱基-磷石膏胶结充填体配比优化[J].中国有色金属学报,2021,31(4):1096-1105.
ZHAO Fengwen, HU Jianhua, ZENG Pingping, et al. Optimization research of base-phosphogypsum cemented backfill ratio based on orthogonal test[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(4):1096-1105.

[8] 戚庭野,成思远,冯国瑞,等.碱激发钢渣-粉煤灰固废充填材料的制备及强度形成机理[J].煤炭科学技术,2025,53(6):236-249.
QI Tingye, CHENG Siyuan, FENG Guorui, et al. Preparation of alkali-activated steel slag-fly ash based full solid waste filling material and strength formation mechanism research[J]. Coal Science and Technology,2025,53(6):236-249.

[9] 兰文涛,吴爱祥,王贻明,等.半水磷石膏充填体离子固化与尺寸效应[J].中国环境科学,2019,39(1):210-218.
LAN Wentao, WU Aixiang, WANG Yiming, et al. Ionic solidification and size effect of hemihydrate phosphogypsum backfill[J]. China Environmental Science, 2019, 39(1): 210-218.

[10] 吴萌,张云升,刘志勇,等.石灰激发低碳胶凝材料的水化特性与力学性能[J].浙江大学学报(工学版),2025,59(6):1253-1264.
WU Meng, ZHANG Yunsheng, LIU Zhiyong, et al. Hydration characteristics and mechanical performance of lime and gypsum-activated low carbon cementitious materials[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2025,59(6):1253-1264.

[11] 张建强,张陆佳,张明,等.矿渣基胶凝材料固废充填体强度与微观结构研究[J].有色金属(矿山部分),2024,76(5):149-156.
ZHANG Jianqiang, ZHANG Lujia, ZHANG Ming, et al. Study on the equivalent identification of rock mechanics parameters and numerical simulation of the slope stability[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(5):149-156.

[12] ZHAO Fengwen, HU Jianhua, YANG Yinan, et al. Cross-scale study on lime modified phosphogypsum cemented backfill by fractal theory[J]. Minerals 2022,12(4):403.

[13] LI Jielin, KAUNDA Rennie B, ZHOU Keping. Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone[J]. Cold Regions Science and Technology,2018,154:133-141.

[14] LIU Xiaosheng, YANG Dongjie, WANG Weijun. Experimental study on the cross-scale relationship of cemented backfill under the action of an air-entraining agent [J]. Fractal Fract,2023,7:821.

[15] 阮竹恩,武鹏杰,吴爱祥,等.矿用精炼渣基早强胶凝材料配比优化与水化机理[J].中国有色金属学报,2023,33(9):3064-3076.
RUAN Zhuen, WU Pengjie, WU Aixiang, et al. Ratio optimization and hydration mechanism of early strength cementitious material based on refining slag for mining[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2023,33(9):3064-3076.

[16] YANG Pan, LIU Lang, SUO Yonglu, et al. Investigating the synergistic effects of magnesia-coal slag based solid waste cementitious materials and its basic characteristics as a backfill material[J]. Science of the Total Environment, 2023,880:163209.

[17] 温震江.钢渣协同矿渣制备超细尾砂充填胶结料及应用研究[D].北京:北京科技大学,2021.
WEN Zhenjiang. Study on preparation and application of binder with steel slag and slag for the cemented superfine tailings backfill[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2021.

[18] LI Qianlong, WANG Bingwen, YANG Lei, et al. Recycling multisource industrial waste residues as green binder for cemented ultrafine tailings backfill: hydration kinetics, mechanical properties, and solidification mechanism[J]. Powder Technology,2024,441:119799.

[19] 王强,张兴军,杜晓伟,等.多元固废基胶凝材料的组成优化及强度形成机理[J].科学技术与工程,2024,24(23):10063-10071.
WANG Qiang, ZHANG Xingjun, DU Xiaowei, et al. Optimization of composition and analysis of strength formation mechanism of multi-solid waste-based cementitious materials[J]. Science Technology and Engineering,2024,24(23):10063-10071.

[20] 王剑锋,常磊,王艳,等.钢渣胶凝活性与体积稳定性优化研究现状[J].材料导报,2023,37(11):115-123.
WANG Jianfeng, CHANG Lei, WANG Yan, et al. Research status of improving cementitious activity and volume stability of steel slag[J]. Materials Reports,2023,37(11):115-123.

[21] 张友志,甘德清,薛振林,等.基于NMR技术的孔隙结构与充填体强度关联机制[J].工程科学与技术,2022,54(4):121-128.
ZHANG Youzhi, GAN Deqing, XUE Zhenlin, et al. Correlation mechanism between pore structure and backfill strength based on NMR technology[J]. Advanced Engineering Sciences,2022,54(4):121-128.

[22] LIU Lang, FANG Zhiyu, QI Chongchong, et al. Experimental investigation on the relationship between pore characteristics and unconfined compressive strength of cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials,2018,179:254-264.

[23] ZHAO Kang, MA Chao, YANG Jian, et al. Pore fractal characteristics of fiber-reinforced backfill based on nuclear magnetic resonance[J]. Powder Technology, 2023, 426:118678.