



养护压力对膏体充填体强度 影响规律及机理分析

陈顺满^{1,2,3,5}, 王 伟^{1,2,3,5}, 吴爱祥⁴, 王贻明⁴

- (1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 河北省金属矿山安全高效开采技术创新中心, 石家庄 050043;
3. 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 石家庄 050043;
4. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
5. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 石家庄 050043)

摘 要: 为了模拟与现场膏体充填体(CPB)较为相近的养护环境, 分析养护压力对其强度的影响机理, 以某铜矿全尾砂为研究对象, 研究养护压力和养护时间对膏体充填体强度的影响规律。采用扫描电镜观察膏体充填体的微观结构, 并对扫描电镜图像进行二值化处理, 应用分形理论从定量角度对其机理进行分析。结果表明: 随着养护压力的增加, 膏体充填体的强度呈一元二次函数增长, 但增长的速率逐渐减小, 且膏体充填体的强度随养护时间的延长逐渐增加; 膏体充填体的计盒维数随养护压力的增大而增大。养护压力对膏体充填体强度的影响机理在于: 由于养护压力的增加, 使孔隙水压力消散, 水化反应加快, 孔隙被水化产物所填充, 使膏体充填体内部孔隙减小, 形成新的膏体充填体承载骨架, 进而使膏体充填体强度增加。

关键词: 膏体充填体; 养护压力; 强度; 微观结构; 分形维数

文章编号: 1004-0609(2021)-12-3740-10

中图分类号: TD823.7

文献标志码: A

引文格式: 陈顺满, 王 伟, 吴爱祥, 等. 养护压力对膏体充填体强度影响规律及机理分析[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(12): 3740–3749. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36661

CHEN Shun-man, WANG Wei, WU Ai-xiang, et al. Influence rules of curing stress on strength of cemented paste backfill materials and its mechanism analysis[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(12): 3740–3749. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36661

随着矿产资源的持续开采, 产生大量的采空区和尾矿库等, 对矿山的安全生产构成严重威胁, 充填采矿法的应用为解决采空区、尾矿库的安全和环境问题提供了新的途径^[1]。普通的水砂充填体和胶结充填体无法接顶, 排水成本高, 而膏体充填体具有不脱水、不分层、不离析和强度高等特性^[2-3], 可将地表堆存的尾砂进行处理, 充填采空区, 减少地表尾矿库, 提高井下采场安全, 为矿山创造巨大的经济效益、安全效益和社会效益, 因此膏体充填技术在地下矿山中的应用范围越来越广泛^[4-5]。

膏体充填体(CPB)是由尾砂、水泥和水混合而成, 其质量浓度为 70%~85%。对膏体充填体进行设计时, 不仅需要考虑到其流动性, 还需要考虑到其强度, 以满足输送要求和安全要求等^[6-7]。当膏体充填体输送到采场后, 其强度对采场的安全性起到决定作用^[8], 国内外学者对其强度发展规律及影响因素进行了大量研究。汪杰等^[9]的研究表明, 随着灰砂比的增加, 充填体强度逐渐增加。邓代强等^[10]根据充填体应力-应变曲线建立了充填体的损伤演化方程, 并对各参数对其损伤关系进行了分析。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674012)

收稿日期: 2021-02-25; 修订日期: 2021-04-26

通信作者: 王 伟, 教授, 博士; 电话: 15833964950; E-mail: wangweiuuu@163.com

JIANG 等^[11]的研究表明膏体的流动性受水泥和添加剂等因素的影响。GHIRIAN 等^[12]和王勇^[13]对不同充填速率、养护时间、养护压力和排水条件下的膏体充填体宏观力学特性进行了研究。WANG 等^[14]的研究表明水的成分对膏体充填体的物理力学性能影响较大。YILMAZ 等^[15]对不同水泥含量和水泥种类情况下的膏体充填体物理力学性质进行了研究, 结果表明, 不同的水泥种类对膏体充填体的强度影响不同, 水泥含量越大, 膏体充填体强度越大。LIU 等^[16]和 DONG 等^[17]的研究表明, 硫化物对膏体充填体的强度影响较大, 硫化物与水泥的水化产物发生反应, 使膏体充填体的早期强度降低, 且膏体充填体的孔隙结构受硫化物影响较大。

这些研究大多集中在尾砂性质、水泥性质、质量浓度和养护时间等方面, 对膏体充填体强度的研究, 大部分在室内标准养护条件下进行, 未考虑养护压力和排水等条件。随着研究的深入, 发现在采用相同配合比情况下, 现场试验取样得到的膏体充填体强度明显高于室内试验得到的膏体充填体强度^[18], 有些高灰砂比样本的单轴抗压强度甚至要高出普通室内试验强度的 2~5 倍^[19]。虽然这对矿山的安全生产是有利的, 但若设计的膏体充填体强度富余太多, 会导致矿山的充填成本增加, 因此, 需对室内膏体充填体养护装置进行改进, 模拟与现场较为一致的养护环境, 为设计合理的膏体充填体提供技术支撑。

在常规的室内养护试验基础上, 研制了新型的膏体充填体室内养护装置, 可模拟养护压力和排水条件等。以某铜矿全尾砂为研究对象, 研究养护压力为 0、90、180、270、360、450 和 540 kPa 情况下膏体充填体的强度演化规律, 采用扫描电镜观察其微观结构, 并对图像进行二值化处理, 应用分形理论对其强度演化机理进行分析, 为膏体充填体的室内试验设计提供理论基础。

1 实验

1.1 试验材料及设备

1.1.1 尾砂

选用某铜矿全尾砂为研究对象, 其粒径分布曲

线如图 1 所示。尾砂密度为 2.74 g/cm^3 , 其中小于 $20 \mu\text{m}$ 粒径的尾砂累计分数为 29.60%; 结合曲率系数和不均匀系数计算理论^[20], 得到该铜矿全尾砂的不均匀系数和曲率系数分别为 8.05 和 1.31, 表明该铜矿尾砂的粒径分布范围较广, 级配分布较好。

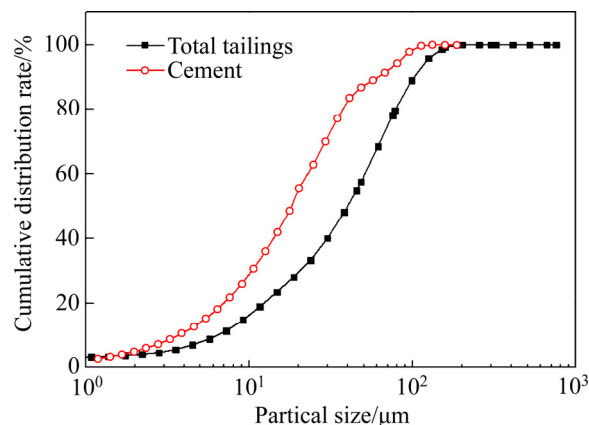


图 1 尾砂和水泥的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of cement and binders

1.1.2 水泥

选用水泥作为膏体充填体的胶凝材料, 水泥类型为普通硅酸盐水泥, 其技术标号为 42.5R, 密度为 3.10 g/cm^3 , 其中小于 $20 \mu\text{m}$ 粒径的尾砂累计分布率为 55.56%, 主要成分为 CaO 和 SiO_2 , 其粒径组成曲线如图 1 所示。

1.1.3 水

试验用水为实验室用自来水, 用于制作尾砂、水泥混合的膏体充填料。

1.1.4 试验设备

根据前人的研究, 在室内试验中, 对膏体充填体的养护均是在恒温恒湿条件下对其进行标准养护(养护温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 养护湿度 90%RH, 脱模后自然养护)。图 2(a)所示为自主研发的可考虑养护温度和养护压力的膏体充填体多场耦合养护试验装置。该装置主要包括温度控制、压力控制和操作界面等几个部分, 可用于模拟膏体充填体的养护压力、养护温度、养护湿度和灰砂比等, 其中可施加的养护压力范围为 0~1000 kPa, 可控制的养护温度范围为 $10 \sim 60^\circ\text{C}$ 。图 2(b)和(c)所示为 MPS-6 型传感器和 5TE 型传感器, 图 2(d)所示为 Em50 型数据采集器。这些设备主要用于对膏体充填体内部基

质吸力和电导率等参数进行监测。

膏体充填体试样养护到指定时间后,对其进行磨光处理等,放置到WDW-50型伺服控制单轴压力试验机上测试其单轴抗压强度。在本研究中,采用蔡司ZEISS EVO 18型扫描电子显微镜对膏体充填体样品进行扫描,观测不同养护压力和养护时间作用下膏体充填体的微观形貌。

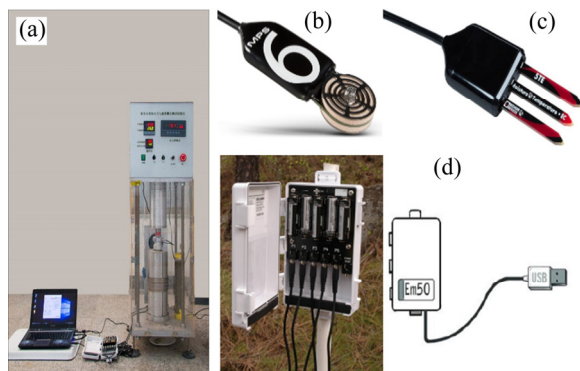


图2 膏体充填体多场耦合养护试验装置

Fig. 2 Equipment of simulating curing condition for CPB materials: (a) Overall of curing equipment for CPB; (b) Sensor of MPS-6; (c) Sensor of 5TE; (d) Data logger of Em50

1.2 试验方法与结果

本研究中,膏体充填体的质量浓度为76%,砂灰比为6,以养护压力分别为0 kPa(A点处,等效采场高度0 m)、90 kPa(B点处,等效采场高度5 m)、180 kPa(C点处,等效采场高度10 m)、270 kPa(D点处,等效采场高度15 m)、360 kPa(E点处,等效采场高度20 m)、450 kPa(F点处,等效采场高度25 m)和540 kPa(G点处,等效采场高度30 m)的膏体充填体为研究对象,养护压力的施加过程如图3所示,主要分析养护压力和养护时间对膏体充填体强度的影响。FAHEY等^[21]和ALIREZA^[22]开展了养护压力条件下充填体的固结性能测试试验,结果表明,在养护的前48 h内,养护压力对充填体的固结强度起关键性的作用;在充填体初凝完成后,继续施加养护压力,虽然养护压力对充填体的强度发展仍有一定的影响,但影响相对较小。因此,本研究中所有方案的养护压力均在养护3 d内达到指定的压力,然后分别养护至7 d、14 d和28 d,设计的

试验方案及试验结果如表1所示。在膏体充填体的养护过程中,采用如图2所示的MPS-6型传感器和5TE型传感器对膏体充填体内部的负孔隙水压力和电导率进行监测。

表1 养护压力对膏体充填体强度影响的试验方案及结果

Table 1 Schemes and results of curing stress on influence of strength for CPB materials

Experiment No.	Curing stress/kPa	Uniaxial compressive strength (UCS)/MPa			
		3 d	7 d	14 d	28 d
1	0	0.76	1.07	1.48	1.97
2	90	1.27	1.60	2.15	2.73
3	180	1.66	2.01	2.63	3.18
4	270	1.96	2.39	2.93	3.42
5	360	2.25	2.65	3.22	3.68
6	450	2.47	2.80	3.40	3.84
7	540	2.65	2.99	3.55	4.00

Note: Mass concentration of backfill is 76%; tailing-cement ratio is 6.

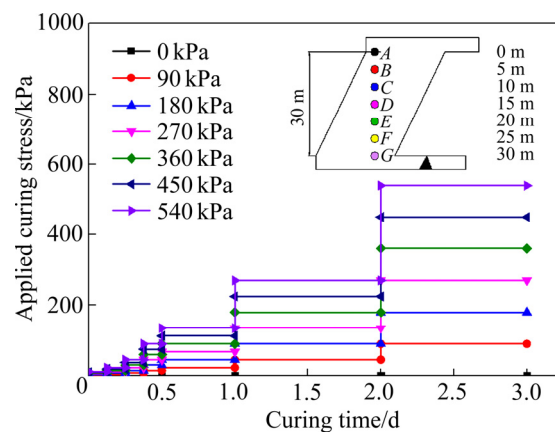


图3 膏体充填体养护过程中施加养护压力变化图

Fig. 3 Curing stress application for CPB materials during curing process

2 结果与讨论

2.1 养护压力对不同养护时间膏体充填体强度的影响

对于某铜矿而言,采用分段空场嗣后充填采场法,首先对采空区的底部进行充填,然后逐层向上

充填。等效采场高度不同, 上覆充填体对下部充填体的自重压力不同, 即养护压力不同^[23]。因此, 在不同采场位置处的膏体充填体受力不同, 且不同养护时间条件下膏体充填体的强度也存在一定的差异。

根据表 2 中的试验结果, 得到不同养护压力情况下膏体充填体强度与养护时间的关系曲线如图 4 所示, 其中 3 d 和 7 d 强度为膏体充填体的早期强度, 14 d 和 28 d 强度分别为其中期强度和后期强度。在养护压力一定的情况下, 膏体充填体的强度随着养护时间的增加而逐渐增加, 且养护压力越大, 膏体充填体的强度也越大。此外, 采用对数函数对膏体充填体强度与养护时间的关系进行拟合, 拟合系数均大于 0.95, 因此, 膏体充填体的强度与养护时间之间符合对数函数的规律。

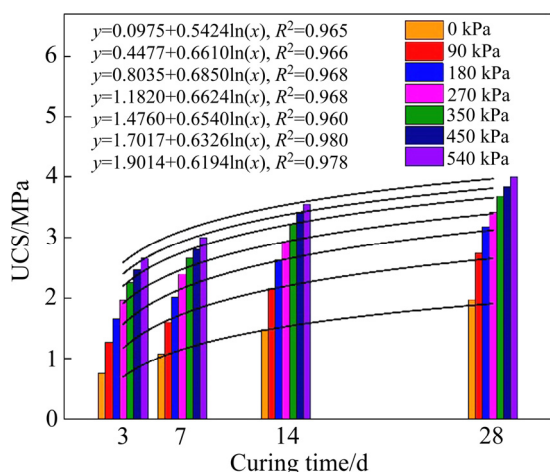


图 4 膏体充填体强度与养护时间的关系

Fig. 4 Relationship between strength and curing time for CPB materials

图 5 所示为膏体充填体强度的增长率随养护时间、养护压力的变化规律。由图 5 可以看出, 当养护压力为 90 kPa 时, 养护时间为 3 d、7 d、14 d 和 28 d 的膏体充填体强度增长率分别为 67.11%、49.53%、45.27%和 38.58%, 表明膏体充填体的早期单轴抗压强度增长率最大, 其次为中期和后期强度增长率, 即膏体充填体的强度增长率随养护时间的增加而逐渐减小。当养护压力分别为 180、270、360、450 和 540 kPa 时, 膏体充填体的强度增长率与养护时间之间也呈现出类似的规律。

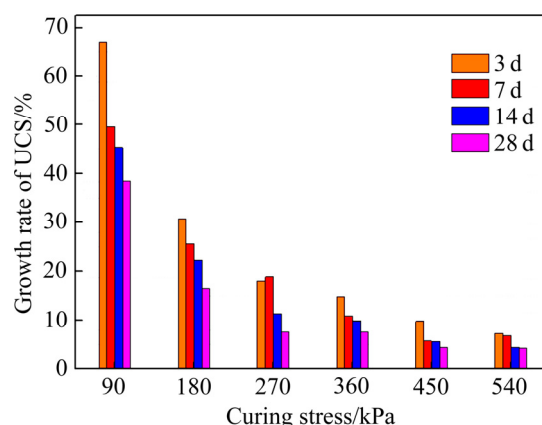


图 5 膏体充填体强度增长率随养护时间、养护压力变化规律

Fig. 5 Evolution law of strength growth rate and curing time, curing stress for CPB materials

2.2 养护压力对膏体充填体强度的影响分析

图 6 所示为不同养护时间情况下膏体充填体单轴抗压强度与养护压力的关系。由图 6 可以看出, 当养护时间一定, 膏体充填体的单轴抗压强度随着养护压力的增加而逐渐增加。结合膏体充填体的单轴抗压强度与养护压力的关系, 采用一元二次函数对其进行拟合, 拟合系数均大于 0.95, 表明膏体充填体的单轴抗压强度随养护压力呈现出一元二次函数增长的规律。

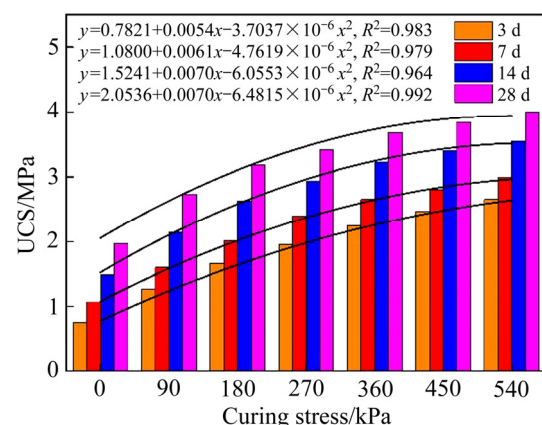


图 6 膏体充填体强度与养护压力的关系

Fig. 6 Relationship between strength of CPB materials and curing stress

当养护时间为 3 d 时, 养护压力分别为 90、180、270、360、450 和 540 kPa 的膏体充填体单轴抗压强度增长率分别为 67.11%、30.71%、18.07%、14.80%、9.78%和 7.29%。结果表明, 膏体充填体

的单轴抗压强度增长率随养护压力的增加而逐渐减小,最后趋于平缓,即养护压力越大,对膏体充填体强度的影响越大。对比不同养护时间情况下膏体充填体强度增长率随养护压力的变化规律,养护时间越大,膏体充填体强度随养护压力的增长率也越小,即当养护时间为 28 d,养护压力为 540 kPa 时,膏体充填体的单轴抗压强度增长率最小。

3 养护压力对膏体充填体强度影响的机理分析

3.1 养护压力对膏体充填体强度影响的微观结构分析

为探讨养护压力对膏体充填体强度的影响机理,采用扫描电镜观察不同养护压力作用下膏体充填体的微观结构。在养护压力分别为 0、180、360 和 540 kPa 且养护时间为 7 d 时,膏体充填体电镜扫描微观结构如图 7 所示。

当养护压力为 0 kPa 时,膏体充填体内部存在较多的微孔隙和微裂纹,且这些孔隙结构呈现出分布不规则,整体结构较为疏松;养护压力为 180 kPa 时,由于上覆岩层压力的作用将膏体充填体进行压

密,膏体充填体的结构得到明显改善,粗颗粒、细颗粒和水泥的水化产物发生混合,其孔隙率大大减小;当养护压力为 360 kPa 和 540 kPa 时,膏体充填体内部的大孔逐渐减小,粗颗粒、细颗粒和水化产物混合更为均匀,由于上覆岩层压力呈现增大的趋势,膏体充填体的孔隙率呈现逐渐减小的规律。

3.2 养护压力对膏体充填体强度影响的定量分析

为了进一步揭示养护压力对膏体充填体强度的影响机理,需采用定量的方法对膏体充填体的微观结构进行定性分析^[24]。采用 Image J 软件对图 7 中的电镜扫描图进行二值化处理,得到膏体充填体扫描电镜的二值化图像如图 8 所示,其中黑色像素点代表非孔隙结构,白色像素点代表孔隙结构。

分形理论是由 MANDEBROT 最早提出,该理论可进行定量分析,适用于处理不规则且具有相似性的结构,已广泛应用于岩石力学、生物学、机械和材料等领域^[25-26]。膏体充填体为内部结构杂乱无章、不规则的孔隙结构,其孔隙结构呈现出明显的自相似性和分形特征,因此,可采用分形理论对其进行量化分析。

随着分形理论的快速发展,其计算方法和定义

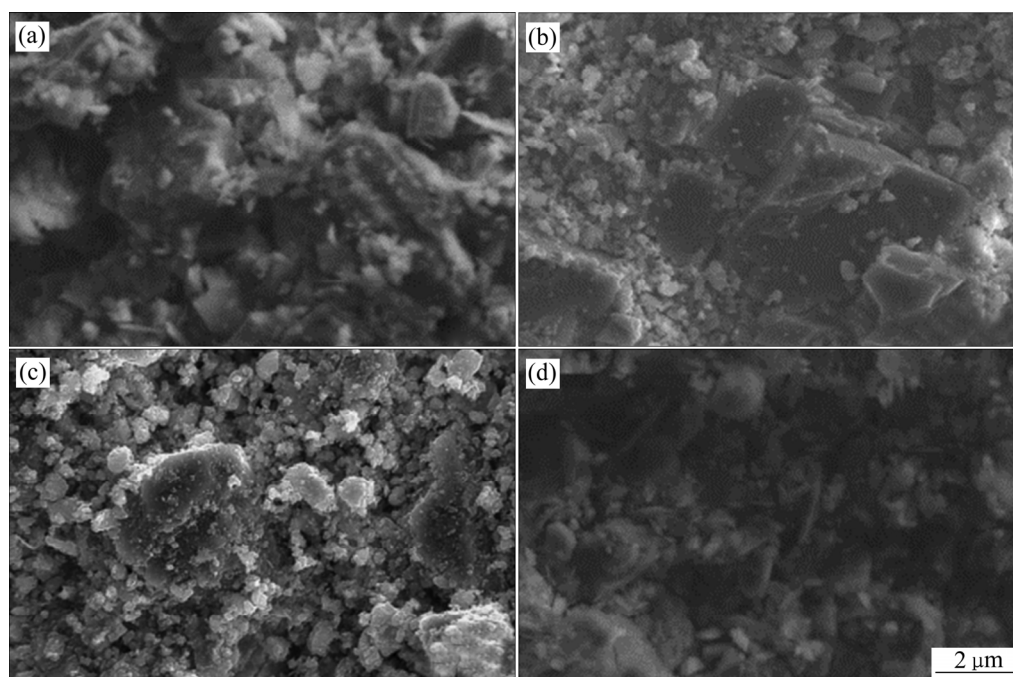


图 7 不同养护压力下膏体充填体的 SEM 像

Fig. 7 SEM images of CPB materials at different curing stresses for seven days: (a) 0 kPa; (b) 180 kPa; (c) 360 kPa; (d) 540 kPa

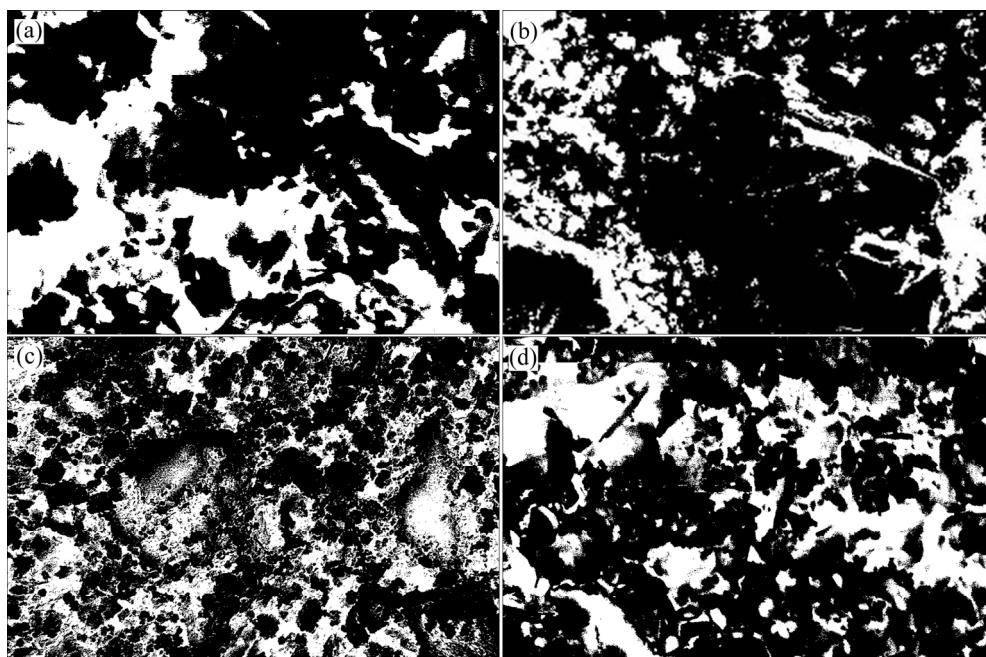


图 8 膏体充填体电镜扫描二值化图像

Fig. 8 Binary SEM images of CPB materials: (a) 0 kPa; (b) 180 kPa; (c) 360 kPa; (d) 540 kPa

有很多种, 主要包括计盒维数、Lyapunov 维数和相似维数等^[27], 但计盒维数应用相对较为广泛^[28], 因此, 本研究采用计盒维数进行计算。其核心是以三维空间计算图像为基础, 将盒子分为很多小的方格, 统计分析得到不同大小图像子区内像素灰度值的变化幅度, 然后在双对数坐标系中对盒子数目和盒子大小进行线性回归, 得到计算分形维数的计算表达式如下^[29]:

$$\lg N = D_B \cdot (-\lg S) + b$$

式中: N 为盒子数目; S 为盒子大小; D_B 为线性回归得到的斜率, 即为该图像的计盒维数; b 为常数。

等效采场高度越小, 上覆岩层的竖直应力越小, 即养护压力越小, 膏体充填体的孔隙越大, 结构越复杂, 其计盒维数越小; 反之, 计盒维数越大。以养护压力为 0 kPa 的膏体充填体为例进行分析, 根据图 8 中处理后的二值化图像, 通过分形理论进行计算, 养护压力为 0 kPa 的膏体充填体计盒维数如图 9 所示, 其计盒维数为 0.97。采用类似的方法计算得到养护压力为 180 kPa、360 kPa 和 540 kPa 作用下膏体充填体的计盒维数分别为 1.06、1.16 和 1.31。

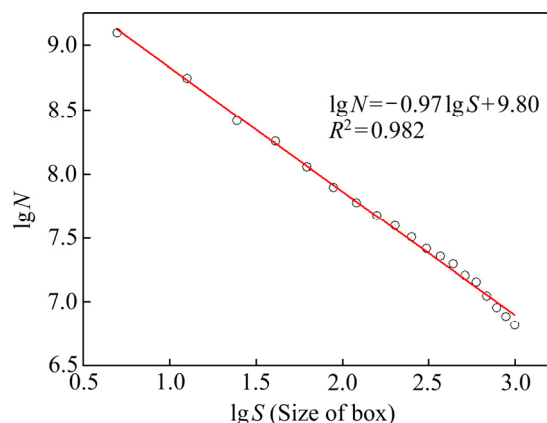


图 9 养护压力为 0 kPa 的膏体充填体分形维数

Fig. 9 Fractal dimension of CPB materials under curing stress of 0 kPa

为了分析膏体充填体计盒维数与养护压力(等效采场高度)之间变化的规律, 作出计盒维数与养护压力之间的散点图(如图 10 所示), 采用线性拟合的方法对其进行拟合, 得到膏体充填体的计盒维数与养护压力的关系式为:

$$D_B = 0.957 + 6.222 \times 10^{-4} \cdot p, R^2 = 0.977$$

式中: p 为养护压力, kPa。

结果表明, 在不同养护压力作用下, 上覆岩层压力不同, 使膏体充填体的微观结构发生较大的变

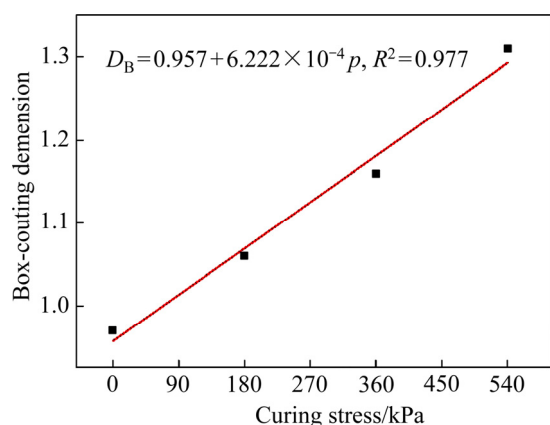


图 10 计盒维数与养护压力关系变化规律

Fig. 10 Evolution law between box-counting dimension and curing stress

化,随着养护压力的增加,计盒维数也逐渐增加,表明上覆岩层的作用使膏体充填体更加密实,大颗粒、小颗粒与水泥的水化产物发生混合,孔隙水排出,促使膏体充填体的密实度增加,其孔隙减小。

3.3 养护压力对膏体充填体强度影响的机理分析

膏体充填体是由水泥、尾砂和水混合而成,在水的作用下,水泥发生水化反应生成水化产物,促进膏体充填体的孔隙结构发生变化,结合不同养护压力与养护时间作用下膏体充填体的微观结构,可得到养护压力对膏体充填体强度的影响机理如图 11 所示,具体表现为如下几点:

1) 挤压排水作用。研究结果表明,不同养护压力作用对膏体充填体的孔隙结构影响较大,这可从 GHIRIAN 的研究得到证明^[30]。水泥的水化反应会

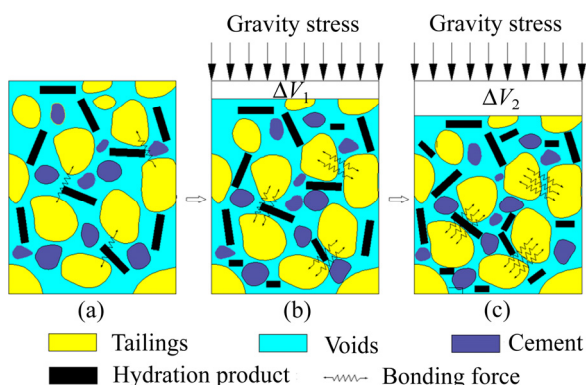


图 11 养护压力作用对膏体充填体强度影响机理分析图

Fig. 11 Mechanism analysis maps of curing stress on influence of strength for CPB materials: (a) 0 kPa; (b) 270 kPa; (c) 540 kPa

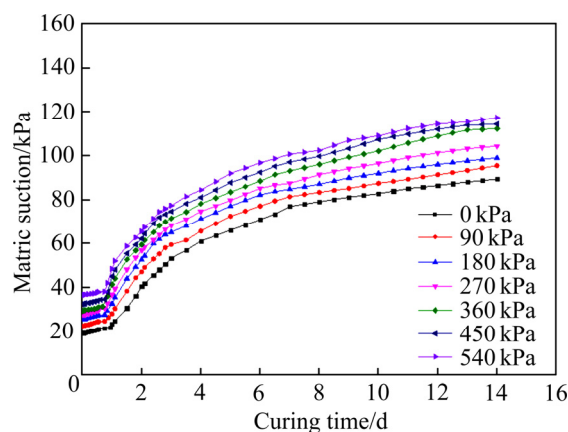


图 12 膏体充填体基质吸力与养护时间的关系

Fig. 12 Relationship between matric suction and curing time for CPB materials

消耗膏体充填体内部的部分水,膏体充填体内部基质吸力(负孔隙水压力)与养护时间的关系如图 12 所示。随养护时间的增加,膏体充填体内部的孔隙水被逐渐排出,且膏体充填体内部负孔隙水压力随养护时间的延长而增加,膏体充填体内部生成了更多的水化产物,从而使膏体充填体的强度增加。

2) 养护压力影响膏体充填体的水化反应速度。研究表明,电导率是反映水泥水化反应的重要指标之一^[31]。图 13 所示为膏体充填体内部电导率与养护压力、养护时间关系曲线。由图 13 可看出,随着养护压力的增加,膏体充填体内部电导率峰值发生的时间越短,即发生水化反应的时间越短,且膏体充填体内部的电导率随养护时间呈现出先增加

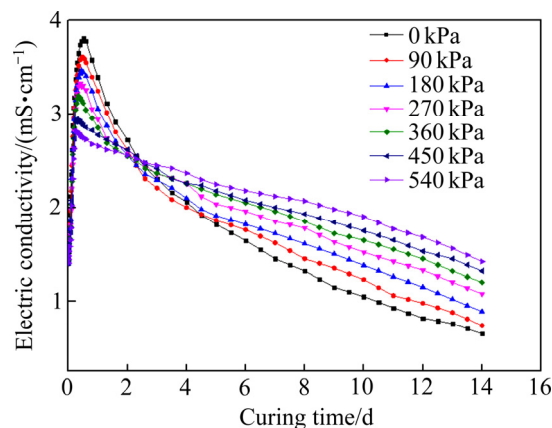


图 13 膏体充填体电导率与养护压力关系曲线

Fig. 13 Relationship between electrical conductivity and curing stress for CPB materials

后减小的趋势。因此,养护压力的增加可加速水泥的水化反应速度,从而使膏体充填体内部产生更多的水化产物,进而对膏体充填体的强度有利。

3) 养护压力影响膏体充填体的孔隙结构和微观形貌。研究表明^[12],随着养护压力的增加,促进孔隙水的排出,加快水泥的水化反应速度,产生更多的水化产物。根据扫描电镜的结果,随着养护压力的增加,膏体充填体的微观形貌逐渐由稀疏状态变为密实状态,孔隙逐渐被水化产物所填充,膏体充填体的孔隙率减小,形成新的膏体充填体承载骨架,从而使膏体充填体的强度增加。

4 结论

1) 自主研发了新型的膏体充填体养护试验装置,弥补了普通室内养护试验无法考虑养护压力和排水等条件的不足,可模拟与现场较为接近的膏体充填体养护环境,缩小室内试验与现场试验的差距,可为现场进行膏体充填体配比设计奠定良好基础。

2) 当养护压力为0~540 kPa时,膏体充填体的单轴抗压强度随养护压力的增加而逐渐增加,但增加的速率呈现出逐渐减小的趋势,且膏体充填体强度与养护压力之间呈现一元二次函数的关系;养护时间越长,膏体充填体的强度越大,但增长的速率逐渐减小,且膏体充填体的强度与养护时间之间呈现出对数函数的关系。

3) 养护压力的增加,促进了孔隙水的排出,使膏体充填体的水化反应速度加快,产生更多的水化产物,进而影响膏体充填体的微观结构,使膏体充填体内部的结构由稀疏变为密实。养护压力越大,计盒维数越大;灰砂比为6、质量浓度为76%,养护压力为0~540 kPa作用下养护7 d的膏体充填体计盒维数为0.97~1.31。

4) 养护压力对膏体充填体强度的作用机理在于:由于养护压力的作用,使孔隙水压力消散,粗颗粒、细颗粒和水化产物充分混合,孔隙逐渐减小,密实度增加,水化反应完全,形成新的膏体充填体骨架,使膏体充填体的微观形貌更加密实,进而使膏体充填体的强度增加。

REFERENCES

- [1] QI C C, FOURIE A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 144(12): 1–21.
- [2] 王洪江, 李 辉, 吴爱祥, 等. 基于全尾砂级配的膏体新定义[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(2): 557–562.
WANG Hong-jiang, LI Hui, WU Ai-xiang, et al. New paste definition based on grading of full tailings[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2014, 45(2): 557–562.
- [3] 王小林, 王洪江, 吴爱祥, 等. 全尾砂膏体管道输送壁面滑移减阻模型[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(9): 2201–2205.
WANG Xiao-lin, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, et al. Wall slip drag reduction model of full tailings paste in pipeline transportation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(9): 2201–2205.
- [4] LIANG C, FALL M. Mechanical and thermal properties of cemented tailings materials at early ages: Influence of initial temperature, curing stress and drainage conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125(10): 553–563.
- [5] LU G D, FALL M, YANG Z H. An evolutive bounding surface plasticity model for early-age cemented tailings backfill under cyclic loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 117(2): 339–356.
- [6] WANG Y, FALL M, WU A. Initial temperature-dependence of strength development and self-desiccation in cemented paste backfill that contains sodium silicate[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2016, 67(3): 101–110.
- [7] WANG H, QIAO L. Coupled effect of cement-to-tailings ratio and solid content on the early age strength of cemented coarse tailings backfill[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 37(4): 2425–2435.
- [8] CHEN S M, WU A X, WANG Y M, et al. Coupled effects of curing stress and curing temperature on mechanical and physical properties of cemented paste backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273(9): 1–10.
- [9] WANG J, FU J X, SONG W D, et al. Mechanical behavior, acoustic emission properties and damage evolution of cemented paste backfill considering structural feature[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 261(6): 1–16.

- [10] 邓代强, 姚中亮, 唐绍辉, 等. 单轴压缩作用下充填体损伤本构模型研究[J]. 土工基础, 2006, 20(3): 53–55.
DENG Dai-qiang, YAO Zhong-liang, TANG Shao-hui, et al. Study on constitutive model of damage of backfill under uniaxial compressive loading[J]. Soil Engineering and Foundation, 2006, 20(3): 53–55.
- [11] JIANG H Q, FALL M, YILMAZ E, et al. Effect of mineral admixtures on flow properties of fresh cemented paste backfill: Assessment of time dependency and thixotropy[J]. Powder Technology, 2020, 372(7): 258–266.
- [12] GHIRIAN A, FALL M. Strength evolution and deformation behaviour of cemented paste backfill at early ages: Effect of curing stress, filling strategy and drainage[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(5): 809–817.
- [13] 王 勇. 初温效应下膏体多场性能关联机制及力学特性[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
WANG Yong. Initial temperature-dependence of multi-field property correlation and mechanical behaviors for cemented paste backfill[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [14] WANG C, VILLAESCUSA E. Influence of water salinity on the properties of cemented tailings backfill[J]. Mining Technology Transactions of the Institutions of Mining & Metallurgy, 2013, 110(1): 62–65.
- [15] YILMAZ E, BELEM T, BUSSIÈRE B, et al. Curing time effect on consolidation behaviour of cemented paste backfill containing different cement types and contents[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75(75): 99–111.
- [16] LIU L, XIN J, HUAN C, et al. Pore and strength characteristics of cemented paste backfill using sulphide tailings: Effect of sulphur content[J]. Construction and Building Materials, 2020, 237(11): 1–13.
- [17] DONG Q, LIANG B, JIA L F, et al. Effect of sulfide on the long-term strength of lead-zinc tailings cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200(3): 436–446.
- [18] THOMPSON D, BAWDEN W F, GRABINSKY W. In situ measurements of cemented paste backfill at the Cayeli Mine[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(7): 755–772.
- [19] YILMAZ E. Investigating the hydrogeotechnical and microstructural properties of cemented paste backfill using the CUAPS apparatus[D]. Quebec Rouyn-Noranda: University of Quebec at Abitibi-Temiscamingue, 2010.
- [20] YANG L H, WANG H J, WU A X, et al. Effect of mixing time on hydration kinetics and mechanical property of cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247(6): 1–9.
- [21] FAHEY M, HELINSKI M, FOURIE A. Development of specimen curing procedures that account for the influence of effective stress during curing on the strength of cemented mine backfill[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(5): 709–723.
- [22] ALIREZA G. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical (THMC) processes in cemented tailings backfill structures and implications for their engineering design[D]. Ottawa: University of Ottawa, 2016.
- [23] ALIREZA G, FALL M. Strength evolution and deformation behaviour of cemented paste backfill at early ages: Effect of curing stress, filling strategy and drainage[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(5): 809–817.
- [24] 吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江, 等. 恒定剪切作用下全尾膏体微观结构演化特征[J]. 工程科学学报, 2015, 37(2): 145–149.
WU Ai-xiang, LIU Xiao-hui, WANG Hong-jiang, et al. Microstructural evolution characteristics of an unclassified tailing paste in constant shearing[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(2): 145–149.
- [25] SHU Z R, CHAN P W, LI Q S, et al. Characterization of vertical wind velocity variability based on fractal dimension analysis[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 213(15): 1–8.
- [26] LI Q, LIU D, CAI Y, et al. Effects of natural micro-fracture morphology, temperature and pressure on fluid flow in coals through fractal theory combined with lattice Boltzmann method[J]. Fuel, 2021, 286(15): 1–10.
- [27] 孙逸飞, 沈 扬, 刘汉龙. 粗粒土的分形阶应变率及其与分形维度的关系[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1): 297–302, 317.
SUN Yi-fei, SHEN Yang, LIU Hang-long. Fractional strain rate and its relation with fractal dimension of granular soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1): 297–302, 317.
- [28] 王益栋. 粗粒土单颗粒压缩破碎强度和压缩变形的分形理论[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
WANG Yi-dong. Fractal theory of single particle crushing strength and compression deformation of coarse granular materials[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.

- [29] 陈 恋, 袁 梅, 许石青, 等. 数字图像技术结合小岛法在煤分形特征中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(3): 77–83.
- CHEN Lian, YUAN Mei, XU Shi-qing, et al. Application of digital image technology combined with island method in coal fractal characteristics[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(3): 77–83.
- [30] GHIRIAN A, FALL M. Coupled behaviour of cemented paste backfill at early ages[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(5): 1141–1166.
- [31] WU A X, WANG Y, WANG H J, et al. Coupled effects of cement type and water quality on the properties of cemented paste backfill[J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, 143(9): 65–71.

Influence rules of curing stress on strength of cemented paste backfill materials and its mechanism analysis

CHEN Shun-man^{1, 2, 3, 5}, WANG Wei^{1, 2, 3, 5}, WU Ai-xiang⁴, WANG Yi-ming⁴

- (1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Hebei Technology and Innovation Center on Safe and Efficient Mining of Metal Mine, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
4. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
5. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: To simulate the similar curing environment of field condition for cemented paste backfill(CPB) materials, and to analyze the influence of curing stress on the strength of CPB materials, the total tailings in one copper mine was selected as the research object, the effects of the curing stress and curing time on the strength of CPB materials were studied. The scanning electron microscope was used to observe the microstructure of cemented paste backfill materials, and the computer image processing technology was applied for the binary processing for the SEM image, then the fractal dimension method was adopted to analyze the compressive strength mechanism. The results show that the strength of CPB materials increases with the increase of the curing stress, and it shows the quadratic function of one variable, also the strength increases significantly with the increase of curing time. The box-counting dimension increases with the increase of curing stress. The mechanism for the influence of curing stress on the strength of CPB materials is that, with the increase of curing stress, the porosity decreases greatly due to the dissipation of pore water pressure, and the hydration reaction increases, the pores are filled by the hydration products, also the pores are decreased for the CPB, forming the new bearing frame of CPB materials, which resulting in the increase of strength for CPB materials.

Key words: cemented paste backfill materials; curing stress; strength; microstructure; fractal dimensions

Foundation item: Project(51674012) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2021-02-25; **Accepted date:** 2021-04-26

Corresponding author: WANG Wei; Tel: +86-15833964950; E-mail: wangweiuu@163.com

(编辑 李艳红)