掺有碳酸钙的膏体充填体力学特性试验研究*

胡昕[1],杨生彬[1],陈新泽[1],饶虎[1],鞠照强[2,3]

(1.中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075;
2.山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地, 山东 青岛市 266590;
3.山东科技大学 矿业工程国家级实验教学示范中心, 山东 青岛市 266590)

摘要:碳酸钙可作为缓凝剂来提高充填料浆的可流动时间,为研究碳酸钙对膏体充填体力学特性的影响程度,采用单因素及正交法设计充填体材料配比方案制备充填体,对充填体试件开展单轴压缩试验,实时监测加载过程中充填体的声发射变化,并利用SEM观察试件裂纹处的微观形貌,研究各因素对充填体抗压强度的影响规律及权重顺序,从多角度分析充填体破坏机制。结果表明:随着碳酸钙质量分数的增加,充填体强度先降低后升高,掺加碳酸钙后,粉煤灰、水泥及固料质量分数对各养护龄期(3 d、7d 、28 d)充填体强度的影响规律与未掺之前基本一致,碳酸钙对充填体抗压强度的劣化作用较弱,但具有价格优势,可作为充填材料缓凝剂使用;基于极差分析可知,各因素对充填体28 d强度影响的权重顺序为:水泥质量分数>碳酸钙质量分数>固料质量分数>粉煤灰质量分数;由充填体破坏特征可知,随着养护龄期的增加,充填体破坏形式由延性劈裂向脆性剪切破坏转变;声发射振铃计数在充填体初始压密接近弹性变形阶段及峰值应力前后发生突变,揭示了充填体内部损伤演化过程。

关键词:碳酸钙;膏体充填体;力学特性;声发射;破坏机制

中图分类号:TD803 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0100-09

Experimental Study on Mechanical Properties of Paste Filling Body Mixed with Calcium Carbonate

HU Xin[1], *YANG Shengbin*[1], *CHEN Xinze*[1], *RAO Hu*[1], *JU Zhaoqiang*[2,3]

(1.Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China;
2.Mining Disaster Prevention and Control-Ministry of State Key Laboratory Breeding Base, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
3.National Demonstration Center for Experimental Mining Engineering Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Calcium carbonate can be used as a retarder to increase the flowable time of the filling slurry. In order to study the influence of calcium carbonate on the mechanical properties of paste filling body, the single factor and orthogonal method were used to design the filling body material ratio scheme, and the filling body was prepared. The uniaxial compression test was carried out on the filling body specimen, and the acoustic emission change of the filling body during the loading process was monitored in real time. The microstructure of the crack of the specimen was observed by SEM. The influence law and weight order of each factor on the compressive strength of the filling body were studied, and the failure mechanism of the filling body was analyzed from multiple perspectives. The results show that with the increase of calcium carbonate mass fraction, the strength of filling body decreases first and then increases. After adding calcium carbonate, the influence of mass fraction of fly ash, cement and solid material on the strength of filling body at each curing age (3 d, 7 d, 28 d) is basically the same as that

* **收稿日期**:2024-09-16

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0604702);国家自然科学基金资助项目(51379119);山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME086);中国能建重大科技项目(CEEC2021-ZDYF-18)

作者简介:胡昕(1979—),男,新疆阿勒泰人,高级工程师,主要研究方向为岩土材料微结构力学、测试方法、软土地基处理等。E-mail:hu_xin68@163.com

通信作者:鞠照强(1999—),男,山东德州人,硕士研究生,主要从事矿山充填开采技术研究工作。E-mail:2155180750@qq.com

before adding calcium carbonate. Calcium carbonate has a weak degradation effect on the compressive strength of filling body, but it has a price advantage and can be used as a retarder for filling materials. Based on the range analysis, the weight order of the influence of each factor on the 28 d strength of the filling body is cement mass fraction>calcium carbonate mass fraction>solid mass fraction>fly ash mass fraction. According to the failure characteristics of filling body, with the increase of curing age, the failure mode of filling body changes from ductile splitting to brittle shear failure. The acoustic emission ringing count changed abruptly before and after the initial compaction of the filling body approaching the elastic deformation stage and the peak stress, which revealed the internal damage evolution process of the filling body.

Key words: Calcium carbonate, Paste filling body, Mechanical property, Acoustic emission, Failure mechanism

0 引言

膏体充填开采是一种符合绿色开采理念的采矿方法[1],充填材料是充填技术的核心要素之一,对充填开采的经济成本具有决定性影响。因此,为降低技术成本,充填材料一般选用工业生产后的固体废弃物作为原材料[2-4]。充填材料的配比及其物理特性决定着充填体的力学特性和充填工艺的最终充填效果[5],因此,研究不同配比方案下膏体充填体的力学特性对膏体充填技术应用具有重要意义。

目前相关学者针对充填材料的配比优化和力学试验做了大量研究。王树帅等[6-7]在确定矸石粒径最优配比的基础上,采用 RSM-BBD 法设计试验,研究了水泥、粉煤灰、固料质量分数等单一因素及其交互作用对充填体强度的影响,结果表明,水泥对充填体前期的影响最为显著,水泥与固料质量分数会相互促进两者对充填体强度的增强。杨宝贵等[8]通过试验发现,在无添加剂条件下,普通硅酸盐水泥、粉煤灰、矸石、水质量比为 1∶2∶5∶2 时,充填材料性能较为理想。赵兵朝等[9]研究了充填体在受载过程中的损伤机制与能量演化规律,发现水泥质量分数的增加不仅会提高充填体抗压强度,还会改变充填体的破坏模式。郭育霞等[10]、冯国瑞等[11]、赵永辉等[12]以矸石、粉煤灰、水泥等为原材料制备不同规格的充填体,并探讨尺寸效应对充填体力学特性的影响,发现充填体的破坏形式随尺寸的增大从劈裂破坏逐渐转化为剪切破坏。李永亮等[13]研究了不同材料配比的膏体充填体的流动特性与强度变化规律,且取得了良好的工程应用效果。

由以上研究可知,膏体充填材料在试验研究与工程应用中较为广泛,然而膏体充填材料在料浆状态输送时容易发生堵管事故[14]。为解决这一难题,除了制备均质化充填料浆之外[15],还可以在充填材料中添加葡萄糖酸钠、柠檬酸盐、硼酸盐等[16]缓凝剂。王成等[17]通过试验发现,碳酸钙可减缓胶凝产物生成,提高充填材料的可流动时间。同时,考虑到碳酸钙价格具有优势,可将其作为缓凝剂使用,但碳酸钙在作为缓凝剂使用时可能会对充填体强度造成影响,因此,有必要研究在掺有碳酸钙的情况下,各材料质量分数变化对充填体性能的影响规律。基于此,本文采用单因素分析及正交试验设计材料配比方案制备充填体,并对其进行单轴压缩试验,实时监测加载过程中声发射的变化情况。利用 SEM 观察试件裂纹处的微观形貌,以研究各因素对充填体抗压强度的影响规律及权重顺序,从多角度分析充填体的破坏机制。

1 试验设计

1.1 试件制备

本次试验选用煤矸石、粉煤灰、水泥、碳酸钙及水作为原料制备膏体充填体试件,分别以 X_1、X_2、X_3、X_4 表示水泥、粉煤灰、碳酸钙及固料质量分数。考虑到膏体充填固料质量分数最高可达 85%[14],可将其设定为中心水平。其他影响因素参数水平见表 1[12]。

表 1 膏体充填材料性能试验配比方案

Table 1 Ratio schemes for performance test of paste filling material %

方案	固料质量分数	粉煤灰质量分数	水泥质量分数	碳酸钙质量分数	煤矸石质量分数
1	85	18	10	3	54
2	85	22	10	3	50
3	85	20	8	3	54
4	85	20	12	3	50
5	85	20	10	1	54
6	85	20	10	5	50
7	83	20	10	3	50
8	87	20	10	3	54
9	85	20	10	3	52

其中,水泥为 P·C 42.5 复合硅酸盐水泥,碳酸钙为普通碳酸钙,粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰,煤矸石取自柴里煤矿,通过小型颚式破碎机进行二级破碎至颗粒直径≤15 mm。对破碎后的矸石颗粒级配进行人工调整,具体粒径配比服从泰波理论级配系数,即 $n=0.5$[6],水为实验室自来水。充填固料经机械拌和均匀后,加水搅拌成料浆,将其浇筑于模具内制成尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的标准试件,振动去除试件内部气泡,待 24 h 后脱模,将试件放入标准养护室中分别养护 3 d、7 d、28 d,各配比方案和养护龄期下的试件均制作 3 块。

1.2 试验设备及方法

试验测试系统由加载设备和声发射监测设备组成。加载设备为 MTS-CMT5305 型万能试验机,声发射监测设备为 AMSY-6 声发射系统。试件单轴压缩采用位移加载,速率设置为 0.3 mm/min[18]。声发射试验需要清理干净试件表面以布置声发射探头,门槛值设为 50 dB 以屏蔽外界噪音,与加载系统同步进行,以便后期数据处理与分析。为保证试验效果,除涂抹凡士林之外,还需利用强磁环固定探头,最后用胶水将磁环粘到试件表面。

2 试验结果与分析

2.1 不同材料含量对试件抗压强度的影响

参考相关规范[19],单因素试验中矸石膏体充填体实测抗压强度见表 2。

表 2 矸石膏体充填体试件抗压强度

Table 2 Compressive strength of gangue gypsum filling body specimens

方案	3 d 抗压强度测试值/MPa			7 d 抗压强度测试值/MPa			28 d 抗压强度测试值/MPa			抗压强度确定值/MPa		
	试件 1	试件 2	试件 3	试件 1	试件 2	试件 3	试件 1	试件 2	试件 3	3 d	7 d	28 d
1	0.75	0.75	0.47	2.00	1.70	1.81	5.57	5.85	4.38	0.75	1.84	5.57
2	0.93	0.93	0.87	2.53	2.45	2.58	5.84	6.43	6.59	0.91	2.52	6.29
3	0.53	0.69	0.63	1.79	1.35	1.89	3.71	3.36	3.41	0.63	1.79	3.49
4	1.03	0.99	1.05	3.26	2.92	3.28	6.77	7.65	8.14	1.02	3.15	7.52
5	0.87	0.86	0.95	1.91	2.07	2.04	6.96	7.23	7.07	0.89	2.01	7.09
6	0.90	0.83	0.92	2.61	2.54	2.44	7.92	8.56	7.74	0.88	2.53	8.07
7	0.46	0.54	0.50	1.84	1.88	1.42	5.68	5.26	5.21	0.50	1.84	5.38
8	1.09	1.03	1.09	2.17	2.10	2.06	7.97	8.68	8.69	1.07	2.11	8.45
9	0.75	0.72	0.87	1.88	1.98	2.06	6.97	6.15	6.90	0.78	1.97	6.67

当 X_1、X_2、X_3、X_4 等单因素线性变化时,各养护龄期下充填体抗压强度的变化规律如图 1 所示。由图 1(a)可知,充填体在各养护龄期下的抗压强度均与 X_1 呈正相关关系。当 X_1 从 8%增大至 12%时,充填体 3 d 强度增长了 61.9%,充填体 7 d 强度增长了 76.0%,充填体 28 d 强度增长了 115.5%,表明养护龄期的延长会促进水泥质量分数 X_1 对充填体强度的增强作用。这是因为充填体作为一种多相复合材料,其基体材料主要由水泥生成,水泥与水发生水化反应生成各种硅酸基胶凝产物,这些产物一方面与骨料形成空间网状结构,另一方面持续填充充填体内部孔隙,提升充填体密实度,二者共同作用提高充填体强度。当 X_1 保持不变,充填体养护龄期由 3 d 延长至 28 d 时,X_1 为 8%的充填体强度增长了 454.0%;X_1 为 10%的充填体强度增长了 755.1%;X_1 为 12%的充填体强度增长了 637.3%。可知当 X_1 小于 10%时,随着养护龄期的增长,X_1 的增加会促进充填体强度增长;当 X_1 大于 10%时,随着养护龄期的增长,X_1 的增加会抑制充填体强度的增强。充填体强度的增长率随着水泥质量分数的增加呈先增大后减小的变化趋势。

由图 1(b)可知,充填体早期(3 d、7 d)、后期强度(28 d)随 X_2 增加的变化趋势不同,在早期阶段,充填体强度随着 X_2 的增加呈增长趋势,在后期阶段,充填体强度先增加后降低。随着 X_2 增加,充填体 3 d、7 d 强度的增长率分别为 21.3%、37.0%,28 d 强度峰值较初始强度增幅仅为 19.7%,表明充填体强度随 X_2 的变化较 X_1 并不明显。这是因为粉煤灰对充填体强度的影响既存在物理作用,又存在化学作用[7,20]。在早期阶段(3 d、7 d),物理作用占主导地位,随着粉煤灰质量分数增加,粉煤灰颗粒逐渐填充到矸石骨架的空隙中,优化骨料级配,从而提高充填体强度;到了后期阶段(28 d),化学作用开始占主导地位,碳酸钙使火山灰活性对充填体强度的作用由促进改为抑制,具体表现为碳酸钙破坏了粉煤灰水化产物的 AFt 结构,使充填体强度降低。

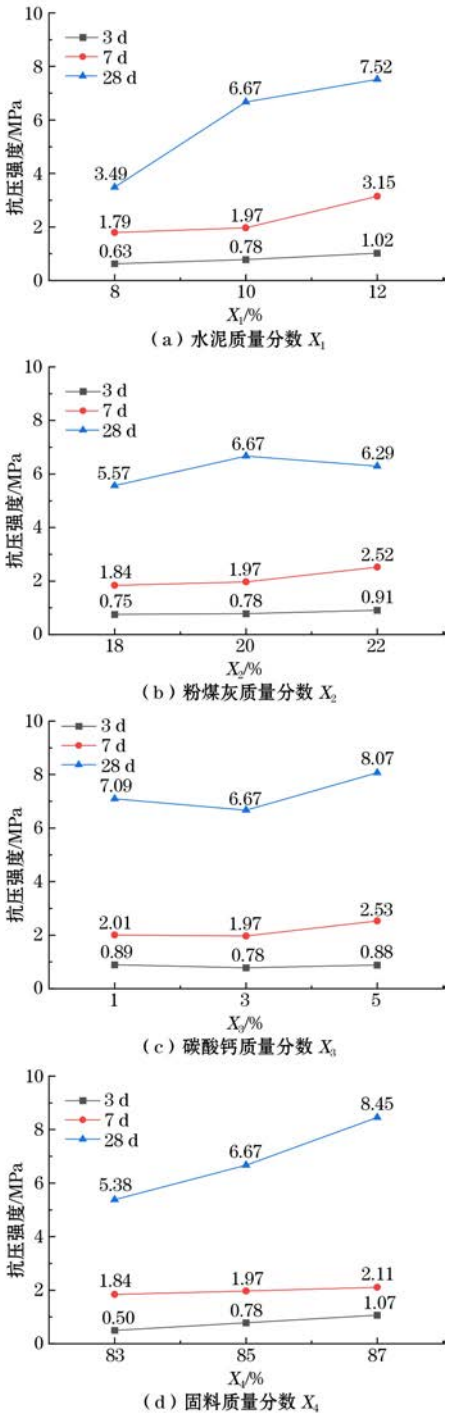


图 1　各因素对充填体抗压强度的影响

Fig.1　The influence of various factors on the compressive strength of filling body

由图 1(c)可知，随着 X_3 的增加，各养护龄期充填体的抗压强度呈现先降低后升高的变化趋势。分析认为，当 X_3 低于 3%时，碳酸钙会减缓水化钙矾石及其他水化物的生成，增大钙矾石结构体的空间空隙，使充填体强度降低。当 X_3 高于 3%时，一方面，水泥水化放出的热量促进碳酸钙参与水化反应，并在一定程度上生成 C—H，从而激发粉煤灰活性，提升充填体的抗压强度；另一方面，碳酸钙作为充填材料的一部分，可以优化充填体颗粒级配或通过碳化作用直接提高充填体强度。对此，利用 XRD 方法测得煤矸石与充填体的 X 射线衍射图谱，如图 2 所示，侧面验证了碳酸钙对充填体抗压强度的影响。

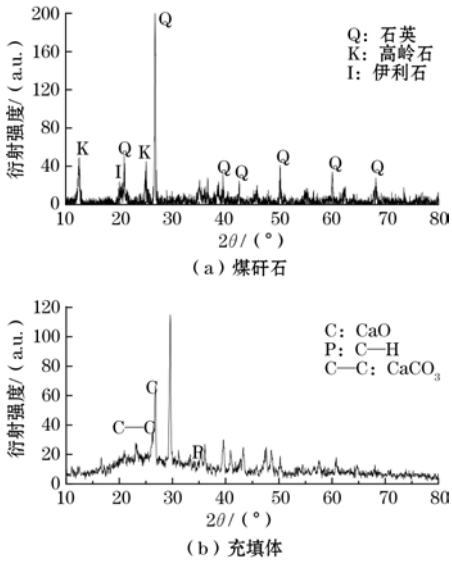


图 2　充填材料 X 射线衍射图谱

Fig.2　X-ray diffraction pattern of filling material

另外，$X_3=3\%$时，充填体抗压强度最低，表明此时碳酸钙对充填体强度的不利影响达到最高，充填体 3 d、7 d、28 d 强度分别降低了 12.3%、3.5%、6.3%，可见碳酸钙对充填体抗压强度的劣化作用较为微弱。但碳酸钙具有价格优势，并不影响其作为缓凝剂正常使用。

由图 1(d)可知，各养护龄期下，充填体强度均随着 X_4 的增加而增大，这是因为随着固料质量分数增加，水泥和粉煤灰等胶凝材料的含量相对增加，生成了更多水化产物，进一步提高了充填体密实度，使得充填体强度增大。

由上述分析可知，掺入碳酸钙后，X_1、X_2、X_4 等影响因素对充填体强度的影响规律与未掺入碳酸钙前[7]基本一致，表明碳酸钙对充填体强度的影响较小，劣化作用微弱。

通过单轴压缩试验得到不同养护龄期充填体的全应力-应变曲线(以方案 9 为例)，如图 3 所示。从图 3 可以看出，不同养护龄期下，充填体试件的应力-应变曲线均可分为压密、弹性、塑性和破坏 4 个阶段，但各阶段的应变在总应变中的占比有所不同。随着充填体养护龄期的增加，充填体弹性模量(由应力-应变曲线的斜率表示)随之增加，塑性阶段对应

的应变量逐渐降低,抗压强度提高,峰值强度所对应的应变值呈下降趋势;在峰后阶段,曲线由“轻缓”式跌落逐渐转变为“陡峭”式骤降,试件破坏速率加剧。这表明随着养护龄期的增加,充填体抵抗变形能力得到提高,破坏模式由延性破坏向脆性破坏转变,脆性特征逐渐增强。此外,早期阶段的充填体在经历峰值应力后仍然具有较高的残余强度,这是因为充填体内部的水化物尚未完全固化[7],材料黏聚力较高,仍可承受较大载荷,有利于工程应用。

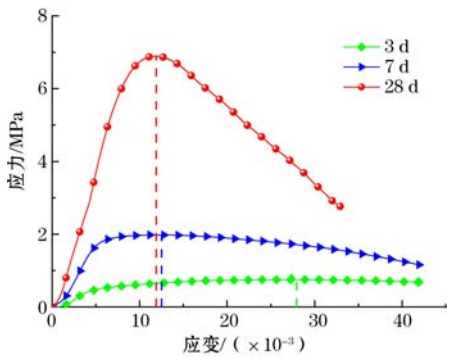


图 3 充填体应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of filling body

2.2 极差分析

基于单因素试验,得到了不同养护龄期充填体抗压强度与 X_1、X_2、X_3、X_4 的关系,然而,哪种因素对充填体抗压强度的影响占据主导地位尚需进一步探讨。因此,在前期试验的基础上,设计 4 因素 3 水平正交试验,并引入极差分析法进行深入分析。以 28 d 强度为例,探究影响充填体抗压强度的主导因素,表 3 为正交试验设计方案及结果,图 4 为 X_1、X_2、X_3、X_4 影响下的 K_{avg} 值与极差 R 值。其中,1,2,3 水平分别代表水泥质量分数 X_1 为 8%、10%、12%,粉煤灰质量分数 X_2 为 18%、20%、22%,碳酸钙质量分数 X_3 为 1%、3%、5%,固料质量分数 X_4 为 83%、85%、87%。K_{avg} 值表示在某一影响因素的特定水平下,所有试验结果的平均值。

表 3 正交试验设计方案及结果

Table 3 Orthogonal experimental design schemes and results

方案	X_1/%	X_2/%	X_3/%	X_4/%	28 d 抗压强度/MPa
1	8	18	1	83	3.34
2	8	20	5	85	6.20
3	8	22	3	87	3.88
4	10	18	5	87	10.69
5	10	20	3	83	5.42
6	10	22	1	85	7.05
7	12	18	3	85	5.81
8	12	20	1	87	7.86
9	12	22	5	83	6.28

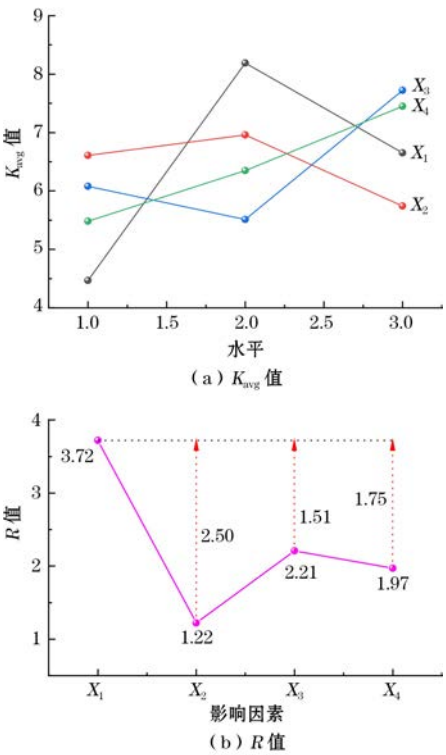


图 4 各因素影响下的 K_{avg} 与 R 值

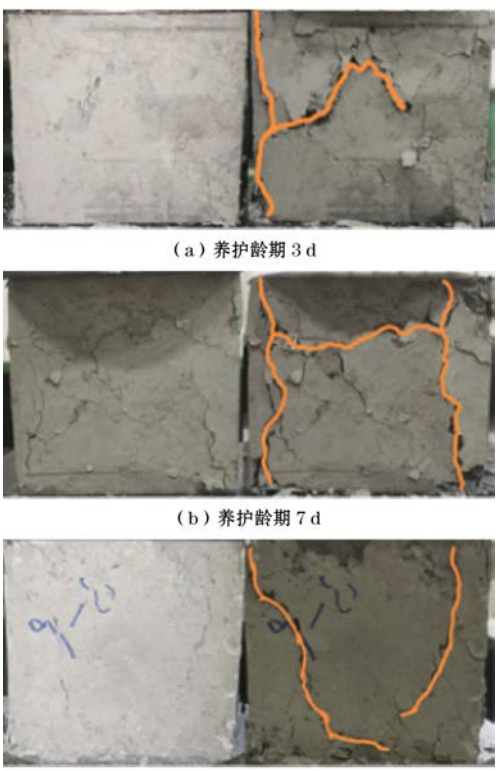
Fig 4 K_{avg} and R values under the influence of various factors

由图 4(a)可知,当 X_4 增大时,充填体 28 d 强度也随之增大;当 X_2 处于第 2 水平时,充填体 28 d 强度达到最大值;当 X_3 处于第 2 水平时,充填体 28 d 强度达到最小值;随着 X_1 的水平增大,充填体 28 d 强度先增大后减小,但整体呈增加趋势,该结论与前文的试验结果基本吻合。由图 4(b)可知,最“优”因子为水泥质量分数 X_1,R 值为 3.72,其次为碳酸钙质量分数 X_3,R 值为 2.21,再次为固料质量分数 X_4,R 值为 1.97,最后为粉煤灰质量分数 X_2,R 值为 1.22,4 因子优劣排序为:$X_1>X_3>X_4>X_2$。

2.3 充填体变形破坏特征

为研究单轴压缩试验中不同养护龄期膏体充填体的破坏形式,以单因素设计方案中的第 9 组配比充填体为例,选取该配比条件下不同养护龄期充填体试件破坏后的典型破坏面,如图 5 所示。由图 5 可知,不同养护龄期充填体在应力峰值处均出现微裂纹,而破坏后的贯通主裂纹是微裂纹进一步发育的结果。当养护龄期为 3 d 时,充填体试件表面存在两条贯通主裂纹,一条主裂纹与加载方向近乎平行,表明该区域承受拉伸应力,另一条主裂纹起始于纵向主裂纹中部,与加载方向存在一定角度的偏差,

表明该区域主要承受剪切应力，此时充填体破坏形式表现为剪切破坏与劈裂破坏的复合形式；当养护龄期为 7 d 时，充填体试件上有 2 条处于充填体边缘且与加载方向平行的主裂纹，以及 1 条联通纵向主裂纹且与加载方向垂直的主裂纹，横向主裂纹的出现表明该区域主要承受剪切应力，此时充填体破坏形式同样表现为剪切破坏和劈裂破坏的复合形式；当养护龄期为 28 d 时，充填体试件的主裂纹大致呈“V”状，还存在部分塌陷区，“V”状裂纹通常与剪切应力有关，故此时充填体破坏形式表现为剪切破坏。因此，随着养护龄期的增加，充填体破坏模式由劈裂破坏逐渐转变为剪切破坏。



（a）养护龄期 3 d

（b）养护龄期 7 d

（c）养护龄期 28 d

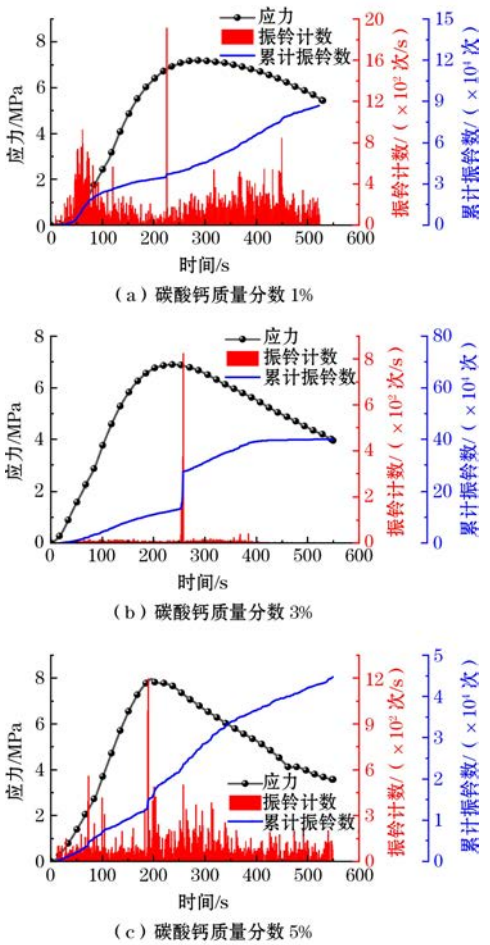
图 5　充填体试件破坏特征

Fig.5　Failure characteristics of filling body specimens

2.4　声发射特征

从能量角度可以充分反映充填体试样的损伤演化过程[21-22]。充填体试件声发射振铃计数－应力－时间的关系如图 6 所示，改变碳酸钙质量分数而其他影响因素保持不变，通过充填体单轴压缩过程中的振铃计数变化情况分析其内部损伤演化过程。

从图 6 中可以看出，充填体试件均在峰值应力前后达到振铃计数最大值，此外，在初始压密阶段向弹性变形阶段过渡时，出现了显著的振铃计数突变。这是因为当外荷载作用于充填体试件时，充填体作为人工造物，其内部原有微裂纹和孔隙的闭合过程中伴随着能量释放，产生可检测的声发射信号。在弹性变形阶段，根据 Kaiser 效应[23]，每一次声发射信号的微波动都意味着新的微裂纹的产生或已有裂纹的进一步扩展，活跃的声发射振铃计数表明充填体内部密实度不高，微裂隙或空隙数量较多；在弹塑性变形能大量积聚后，试件于应力峰值附近发生剧裂能量释放，导使第二次声发射突变发生，声发射信号强度突增并超过峰值，宏观表现为充填体内部原有微裂隙迅速扩张形成贯穿整个充填体的主裂纹。具体而言，当应力达到一定阈值时，微裂纹的快速扩展导致声发射振铃计数急剧上升，这与在试验中观察到的现象一致。



（a）碳酸钙质量分数 1%

（b）碳酸钙质量分数 3%

（c）碳酸钙质量分数 5%

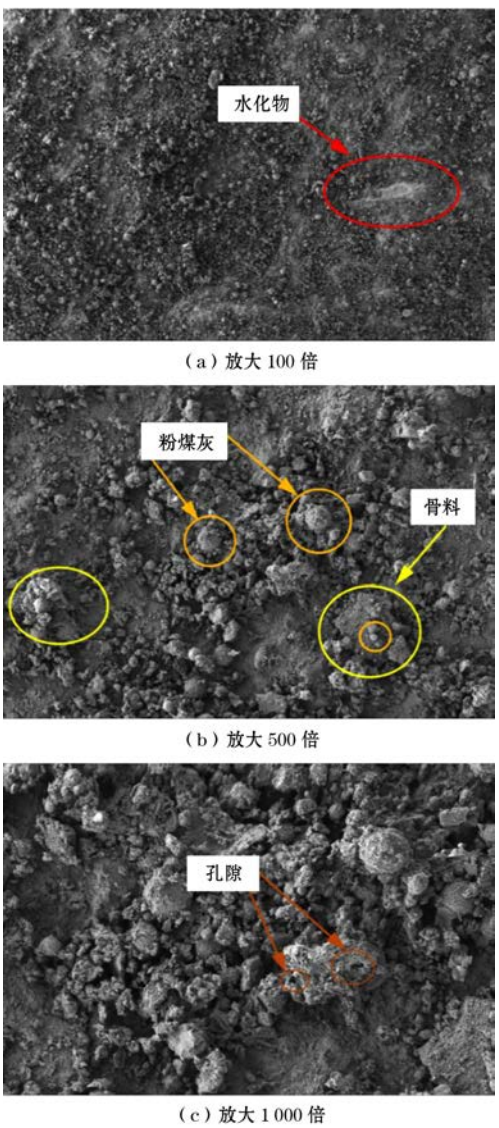
图 6　充填体试件声发射振铃计数－应力－时间的关系

Fig.6　Relationship of acoustic emission ringing count-stress-time of filling body specimens

3　微观形貌分析

矸石膏体充填体作为一种人工制备的多相复合材料，内部具有较多气孔、孔隙。通过对其裂纹区域

取样,采用分散粉末粘到导电胶上并作喷金处理,采用蔡司 sigma 300 扫描电镜进行多尺度观测。取样粉末在扫描电镜下分别放大 100 倍、500 倍和 1 000 倍,得到的微观形貌如图 7 所示。由图 7 可知,放大 100 倍时,可以明显看出充填体内存在水泥水化物、骨料颗粒等;放大 500 倍时,发现充填体内呈球状的粉煤灰颗粒与不规则骨料颗粒被 C-S-H 凝胶包裹,两者通过水化产物形成互锁结构;放大 1 000 倍时,被水化产物黏结的骨料颗粒间存在微小孔隙,颗粒表面存在类绒毛结构,这些类绒毛结构黏结各种骨料颗粒,使充填体具有较高强度。试件加载后,气孔及微裂纹在荷载作用下形成微裂隙,传递至充填体表面并迅速发育,形成宏观的贯通主裂纹和塌陷区,导致结构失稳破坏。



(a) 放大 100 倍

(b) 放大 500 倍

(c) 放大 1 000 倍

图 7 充填体微观形貌

Fig.7 Micro-morphology of filling body

4 结论

(1) 基于单轴压缩试验,得到了不同养护龄期充填体抗压强度与粉煤灰、水泥、碳酸钙、固料质量分数的关系,发现掺有碳酸钙后,粉煤灰、水泥及固料质量分数对充填体强度的影响规律与未掺之前基本一致。

(2) 随着碳酸钙质量分数增加,充填体强度呈现先降低后升高的趋势,碳酸钙对充填体强度的劣化作用微弱,考虑到其具有价格优势,可作为膏体充填体的缓凝剂使用。

(3) 基于极差分析结果,各因素对充填体 28 d 强度影响的权重排序为:水泥质量分数>碳酸钙质量分数>固料质量分数>粉煤灰质量分数。

(4) 充填体破坏形式与养护龄期密切相关,随着养护龄期的增加,充填体在单轴压缩试验下的破坏模式由延性劈裂逐渐转变为脆性剪切。因此,在设计和施工过程中,必须特别关注材料的养护条件和龄期,以确保结构的可靠性和安全性。

(5) 声发射振铃计数在充填体初始压密阶段向弹性变形阶段过渡及峰值应力前后出现突变,这与试验中观察到的微裂纹快速扩展现象相对应,该研究结果揭示了充填体内部损伤演化过程。

参考文献(References):

[1] 钱鸣高,缪协兴,许家林.资源与环境协调(绿色)开采[J].煤炭学报,2007,32(1):1-7.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(1):1-7.

[2] 毕颖,赵文斌.磷石膏-水泥基复合充填材料的综合性能和细观水化机理[J].矿业研究与开发,2024,44(6):89-94.
BI Ying, ZHAO Wenbin. Comprehensive performance and microscopic hydration mechanism of phosphogypsum-cement based composite filling material[J]. Mining Research and Development,2024,44(6):89-94.

[3] 董猛,李江山,陈新,等.煤系固废基绿色充填材料制备及其性能研究[J].煤田地质与勘探,2022,50(12):75-84.
DONG Meng, LI Jiangshan, CHEN Xin, et al. Preparation of coal-series solid-waste-based green filling materials and their performance[J]. Coal Geology & Exploration,2022,50(12):75-84.

[4] 张吉雄,鞠杨,张强,等.矿山生态环境低损害开采体系与方法[J].采矿与岩层控制工程学报,2019,1(2):56-68.
ZHANG Jixiong, JU Yang, ZHANG Qiang, et al. Low ecological environment damage technology and method in coal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2019,1(2):56-68.

[5] 冉洪宇,郭育霞,冯国瑞,等.分级加载下矸石胶结充填材料蠕变特性研究[J].矿业研究与开发,2020,40(2):42-47.
RAN Hongyu, GUO Yuxia, FENG Guorui, et al. Creep properties of coal gangue cemented backfill material under step loading[J]. Mining Research and Development,2020,40(2):42-47.

[6] 王树帅,李永亮,李清,等.基于泰波理论的矸石级配系数对充填材料性能的影响[J].采矿与安全工程学报,2022,39(4):683-692.
WANG Shushuai, LI Yongliang, LI Qing, et al. Influence of gangue gradation coefficient on the performance of filling material based on talbol theory[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2022,39(4):683-692.

[7] 王树帅,徐斌,李杨,等.基于 RSM-BBD 法胶结充填材料配比优化及工程应用[J].煤田地质与勘探,2023,51(3):73-84.
WANG Shushuai, XU Bin, LI Yang, et al. Optimization of cemented filling material ratio based on RSM-BBD method and engineering application [J]. Coal Geology & Exploration,2023,51(3):73-84.

[8] 杨宝贵,韩玉明,杨鹏飞,等.煤矿高浓度胶结充填材料配比研究[J].煤炭科学技术,2014,42(1):30-33.
YANG Baogui, HAN Yuming, YANG Pengfei, et al. Research on ratio of high concentration cementation stowing materials in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2014,42(1):30-33.

[9] 赵兵朝,翟迪,陈攀,等.矸石胶结充填体损伤演化规律及裂纹扩展特征[J].西安科技大学学报,2023,43(1):18-27.
ZHAO Bingchao, ZHAI Di, CHEN Pan, et al. Damage evolution law and crack expansion characteristics of gangue cemented paste backfill[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2023,43(1):18-27.

[10] 郭育霞,赵永辉,冯国瑞,等.矸石胶结充填体单轴压缩损伤破坏尺寸效应研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(12):2434-2444.
GUO Yuxia, ZHAO Yonghui, FENG Guorui, et al. Study on damage size effect of cemented gangue backfill body under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(12):2434-2444.

[11] 冯国瑞,赵永辉,郭育霞,等.柱式充填体单轴压缩损伤演化及破坏特征研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(10):4012-4023.
FENG Guorui, ZHAO Yonghui, GUO Yuxia, et al. Study on damage evolution and failure characteristics of backfill column under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(10):4012-4023.

[12] 赵永辉,冉洪宇,冯国瑞,等.单轴压缩下不同高宽比矸石胶结充填体损伤演化及破坏特征研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(4):674-682.
ZHAO Yonghui, RAN Hongyu, FENG Guorui, et al. Damage ev-olution and failure characteristics of cemented gangue backfill body with different height-width ratios under uniaxial compression [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2022,39(4):674-682.

[13] 李永亮,路彬,杨仁树,等.煤矿连采连充式胶结充填采煤技术与典型工程案例[J].煤炭学报,2022,47(3):1055-1071.
LI Yongliang, LU Bin, YANG Renshu, et al. Cemented backfilling mining technology with continuous mining and continuous backfilling method for underground coal mine and typical engineering cases[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(3):1055-1071.

[14] 邓雪杰.特厚煤层上向分层长壁逐巷胶结充填开采覆岩移动控制机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
DENG Xuejie. Ground control mechanism of mining extra-thick coal seam using upward slicing longwall roadway cemented backfilling technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2017.

[15] 孙欢欢,石勇,赖伟,等.全尾砂高效活化搅拌技术及均质化膏体充填特性研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8):45-50.
SUN Huanhuan, SHI Yong, LAI Wei, et al. Study on efficient activation stirring technology of full tailings and filling characteristics of homogenized paste [J]. Mining Research and Development,2023,43(8):45-50.

[16] 赵磊,王杰,孙勇,等.复合缓凝剂改性硫铝酸盐水泥注浆材料性能试验研究[J].煤炭技术,2024,43(1):34-39.
ZHAO Lei, WANG Jie, SUN Yong, et al. Experimental study on properties of composite retarder modified sulphoaluminate cement grouting material [J]. Coal Technology,2024,43(1):34-39.

[17] 王成,洪紫杰,熊祖强,等.重质碳酸钙对新型高水充填材料的影响[J].煤矿安全,2015,46(12):31-34.
WANG Cheng, HONG Zijie, XIONG Zuqiang, et al. Influence of heavy calcium carbonate on new type of high water filling material[J]. Safety in Coal Mines,2015,46(12):31-34.

[18] 吴疆宇,靖洪文,浦海,等.分形矸石胶结充填体的宏细观力学特性[J].岩石力学与工程学报,2021,40(10):2083-2100.
WU Jiangyu, JING Hongwen, PU Hai, et al. Macroscopic and mesoscopic mechanical properties of cemented waste rock backfill using fractal gangue[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(10):2083-2100.

[19] 国家能源局.煤矿膏体充填材料试验方法:NB/T 51070—2017[S].北京:煤炭工业出版社,2017.
National Energy Administration. Method of material testing of paste filling in mines: NB/T 51070—2017[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,2017.

[20] 王晓东.风积砂质高浓度胶凝充填材料性能与粉煤灰掺量关系分析[J].工程地质学报,2016,24(1):78-86.
WANG Xiaodong. Relationship between engineering performance and mix proportion of fly ash for cemented and high concentration backfill material with wind-blown sand as aggregate[J]. Journal of Engine-ering Geology,2016,24(1):78-86.

[21] 程爱平,戴顺意,张玉山,等.胶结充填体损伤演化尺寸效应研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊1):3053-3060.
CHENG Aiping, DAI Shunyi, ZHANG Yushan, et al. Study on size effect of damage evolution of cemented backfill [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(Suppl.1):3053-3060.

[22] 华心祝,常贯峰,刘啸,等.多源煤基固废充填体强度演化规律及声发射特征[J].岩石力学与工程学报,2022,41(8):1536-1551.
HUA Xinzhu, CHANG Guanfeng, LIU Xiao, et al. Strength evolution law and acoustic-emission characteristics of multi-source coal-based filling body of solid wastes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022, 41(8):1536-1551.

[23] 赵奎,项威斌,曾鹏,等.岩石声发射 Kaiser 效应研究现状及展望[J].金属矿山,2021(1):94-105.
ZHAO Kui, XIANG Weibin, ZENG Peng, et al. Research status and prospect of Kaiser effect in rock acoustic emission [J]. Metal Mine,2021(1):94-105.