

巴西劈裂下全尾砂胶结充填体抗拉强度特征研究

蔡发雄, 孙伟, 张盛友, 姜明归, 杨希, 黄锦周池, 景东

昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD803; TD926.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)04-0065-09
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.04.008

摘要 研究充填体抗拉强度对维护采场稳定具有重大参考价值。充填体的破坏过程也是能量耗散的过程, 养护龄期、分层数等因素直接影响充填体的强度大小及能量耗散。以全尾砂为骨料, 制备一组质量浓度为 78%, 灰砂比分别为 1:4、1:6、1:8, 养护龄期分别为 3 d、7 d、14 d、28 d 的胶结充填体进行巴西劈裂实验, 分析了养护龄期与分层数对充填体强度、能量耗散及破坏规律的影响。结果表明: 灰砂比一定时, 不同分层的充填体的强度随养护龄期呈正相关关系; 养护龄期一定时, 强度与灰砂比呈正相关关系, 分层会形成结构弱面, 降低充填体强度。巴西劈裂过程中充填体的能量耗散随养护龄期的增长而增大, 与强度变化特征一致; 室内实验结果可以看出, 充填体裂纹起裂点大多位于充填体中心点处, 在破坏时主裂纹伴随无数微裂纹从中心点处开始萌生、扩展直至贯穿整个充填体, 呈不规则形状向加载直径上扩散。不同分层充填体裂纹扩展较为连贯, 部分充填体出现了分层界面局部错动的情况, 断裂特征多为中心断裂与偏心断裂的复合式断裂。研究结果可为充填采矿设计、实际矿山充填提供理论支持。

关键词 巴西劈裂; 能量耗散; 抗拉强度; 胶结充填体损伤; 裂纹扩展

引言

矿产资源是人类社会赖以生存的重要物质基础, 是制造业产业链、供应链的源头, 是国家安全与经济发展的战略资源和重要保障^[1-2]。随着浅部资源日益枯竭, 矿产资源开发受土地和生态环境约束, 地下矿山比例将逐步增大, 未来 10 年内, 我国 1/3 的地下金属矿山开采深度将达到或超过 1 000 m。地下采选一体化工艺技术可重构优化矿石流网络结构, 贯彻“废石尾矿能抛早抛”理念, 实现入选矿石的量质优化, 从根本上降低深地开采运输成本。同时, 在井下将选矿废石、尾矿直接用于采空区填充, 提高充填采矿效率, 减少对地表环境的影响^[3-7]。

我国矿山废石、尾矿堆存量巨大。据中国冶金矿山企业协会统计数据, 以铁矿为例, 截至 2024 年, 我国铁矿山废石堆存量约 400 亿 t, 铁尾矿堆存量约 100 亿 t。绿色发展是矿产资源行业高质量发展的必然要求。当前, 控制碳排放已成为全球大型矿业公司发展的重要方向。力拓计划到 2050 年实现运营净零排放,

淡水河谷计划到 2050 年底前促进采矿业实现碳中和, 英美资源计划到 2040 年实现所有业务的碳中和^[8-13]。矿业绿色发展的本质不仅是节能减排, 而是发展方式的根本变革, 是能源体系、生态体系、资源体系的全面转型升级。在国家“双碳”战略背景下, 矿业领域需明确目标、统筹规划^[14-17]。当前, 我国矿产资源行业正处在高质量发展开局起步的关键时期, 挑战与机遇并存, 转型与发展并行。智能开采和绿色开采是大势所趋, 亟须持续开展科技攻关、突破关键技术瓶颈, 保障我国矿产资源供应安全^[18-20]。

充填采矿法能够有效降低矿体矿柱回采时的贫化率、损失率, 且可以改善围岩应力状态、维护采空区的稳定性, 还能有效解决由于开采带来的地表生态环境问题, 实现绿色采矿, 是解决深部采矿、矿山生态问题的首选方案。在复杂的地下开采过程中, 对充填体强度的研究极具现实意义。许多学者对岩石、类岩体抗拉强度做了深入的研究。Zhang 等^[21]分析了饱水对煤体劈裂强度和能量特征的影响, 结果表明, 两种状态下煤样抗拉强度与峰值能率大致呈线性关系, 表

收稿日期: 2024-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52474131); 国家自然科学基金项目(42467022); 云南省基础研究项目(202101BE070001-038、202201AT070146)

作者简介: 蔡发雄(1998—), 男, 云南鲁甸人, 硕士研究生, 主要从事充填采矿方面的研究工作, E-mail: 758137175@qq.com。

通信作者: 孙伟(1982—), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事绿色矿山、充填采矿方面的研究工作, E-mail: kmustsw@qq.com。

明煤样抗拉强度越高,需要更多能量才能使煤样劈裂破坏;Wang 等^[22]探讨了试件的破断机理以及破断强度的影响因素,圆盘试件的裂纹起裂点通常位于试件的中部或加载端处,随层理角度逐渐增大,裂纹逐渐沿层理方向扩展;Tan 等^[23]依据圆盘试件破坏后的形态和破断机理,对巴西圆盘的破坏模式进行了分类;Xiao 等^[24]进行砂岩巴西劈裂实验,探讨干燥状态与自然含水状态下砂岩试样的抗拉强度及能量耗散特征,研究表明,干燥状态下位移场分布均匀,试样抗拉强度高,能量耗散低;自然含水状态下,位移场变化多位于试样中下部,分布不均匀,试样抗拉强度低,能量耗散高。Xie 等^[25]分析了具有脆性破坏特征的页岩在拉伸破坏下的能量统计分布特征,研究了整体破坏能量分布与局部应力下的能量统计分布规律,研究发现,能量分布曲线与幂值分布曲线接近于整体破坏过程中的能量分布曲线与幂值分布曲线,并逐渐重合。前人对岩石、类岩体、煤样等的强度、能量耗散、破坏等都做了大量研究,对充填体的抗拉强度研究却较少。

表 1 尾砂化学成分

Table 1 Chemical composition of tailings

成分	Cu	As	Ag	S	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	Bi	K ₂ O	Ba
含量	0.14	0.55	6.7	4.59	3.01	2.30	19.10	3.27	22.02	0.005	1.24	11.02

注:除 Ag 含量单位为 g/t 外,余为 %。

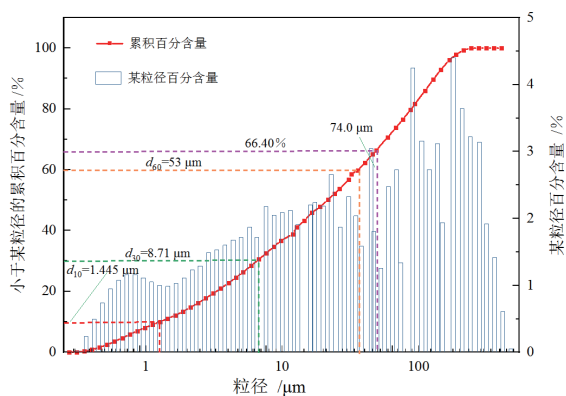


图 1 尾砂粒级组成曲线

Fig. 1 Tailings size composition curve

从表 1 中可知,尾砂含大量的 Fe、SiO₂、Ba, 占比分别为 22.02%、19.10%、11.02%;从图 1 中可知,全尾砂颗粒-200 目(-74 μm)的含量为 66.40%,属于中等细尾砂;通过计算 $C_u = d_{60}/d_{10} = 53.00/1.445 = 36.68$, $C_c = d_{30}^2/d_{10} \times d_{60} = 8.71 \times 8.71/1.445 \times 53.00 = 0.99$,尾砂粒级分布范围较大,尾砂级配较好,连续性较高。

1.2 试件制作及实验

试件分别制作质量浓度为 78%, 1:4、1:6、1:8 三个灰砂比,采用直径 50 mm、高 50 mm 标准模

本文通过不同质量浓度、不同养护龄期及 I、II、III 分层的充填体进行巴西劈裂实验,分析其强度变化规律,结合能量耗散原理分析充填体试件在加载破坏过程中的能量变化规律,并对充填体裂纹的扩展做初步分析,以期对矿山实际充填提供理论依据。

1 实验过程

1.1 实验材料及设备

实验选用大理某矿山尾砂,尾砂比重为 3.47,尾砂松散密度为 1.69 t/m³,密实堆积密度为 2.40 t/m³,尾砂松散孔隙率平均为 51.3%,密实孔隙率平均为 30.6%,尾砂化学成分及粒级组成如表 1、图 1 所示。实验水泥选用红狮牌标号为 P·C 42.5 的复合硅酸盐水泥。实验设备选用 300 kN 微型伺服压力机,加装一个巴西劈裂专用仪器进行巴西劈裂实验,加载方向为由下到上,并可实时记录位移-荷载数据。

具制作试块,浇筑完成后 24 h 脱模并置于温度为 20±1℃、湿度为 (95±5)% 恒温恒湿养护箱进行养护,养护龄期分别为 3 d、7 d、14 d、28 d,共 12 组试块,每组制作 3 个共计 36 个试块进行巴西劈裂实验并记录实时力-位移数据,取平均值进行分析。设备选用 300kN 微型伺服压力机,加载方向为由下到上。控制方式采用位移控制,加载速率为 0.02 mm/s。实验流程如图 2 所示。

2 实验原理

根据二维平面应力弹性力学的理论,充填体的拉应力可以根据巴西劈裂试件弹性力学的平面应力问题求解,巴西劈裂示意图如图 3 所示。

在距离圆盘中心最远处即两端处受压应力为最大,拉应力 σ_x 和压应力 σ_y 可表示为^[21]:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi Dh} \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi Dh} \left(1 - \frac{4D^2}{D^2 - 4y^2} \right) \quad (2)$$

式中: D —圆盘直径, mm;

h —圆盘高度, mm;

P —压力大小, N;

y —加载线上距圆心距离, mm。

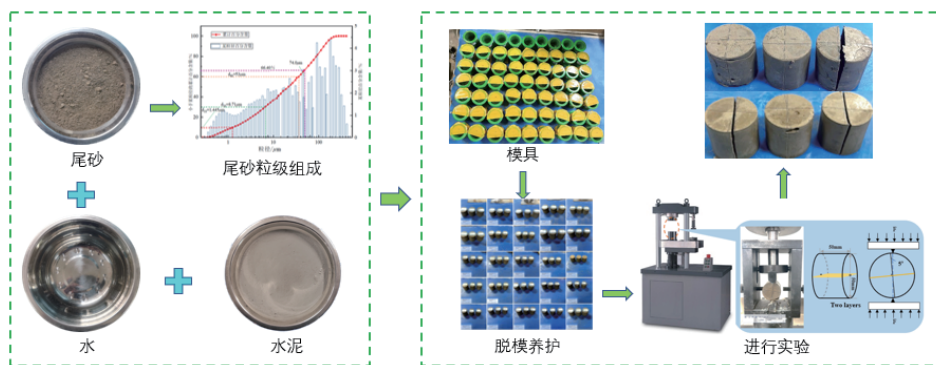


图2 实验流程

Fig. 2 Experimental flow

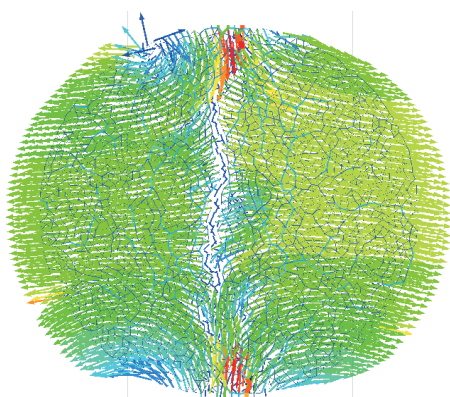


图3 巴西劈裂受力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of splitting force in Brazil

将实验所得巴西劈裂破坏时的最大压力代入式(1)即可得到不同充填体试件在巴西劈裂实验下的抗拉强度特征。

3 实验结果及分析

3.1 应力特征

图4为质量浓度78%、灰砂比分别为1:4、1:8时,不同分层充填体在不同养护龄期下的巴西劈裂实验结果。从图4中可得,充填体在巴西劈裂过程中均显现出相似的规律性,随着位移的增加,I、II、III分层,灰砂比1:4、1:8充填体的应力-应变曲线均先缓慢上升,随后到达弹性阶段加快上升,曲线变陡,到达弹性终点后极速下降,试件破坏,充填体表现出极为明显的脆性破坏特征。观察不同分层及灰砂比下充填体的应力-应变曲线,所有条件下的曲线都表现出一致的规律,随着养护龄期的增加,所有曲线在应力上升阶段均越来越陡,即弹性模量越来越大。弹性模量可视为衡量材料产生弹性变形难易程度的指标,其值越大,使材料发生一定弹性变形的应力也越大,即材料刚度越大,亦即在一定应力作用下,发生弹性变形越小^[26-27]。弹性模量是指材料在外力作用下产生单位弹性变形所需要的应力,可作为充填采矿设

计的一个重要参考标准^[28-30]。其弹性模量随养护龄期变化情况如图5所示。

从图5中可得,充填体的弹性模量在3~7 d内增加最快,7~14 d其次,14~28 d最慢,即随着养护龄期的增加,弹性模量增长速度减慢,这是由于充填体的弹性模量与内部水化反应产生C-S-H凝胶量有关,而充填体水化反应又在3~7 d内增加最快,7~14 d其次,14~28 d最慢,因此,弹性模量表现出与强度相同的规律,设计充填采矿设计参数时可以选取适当养护龄期以满足实际要求。

3.2 强度特征

不同条件下充填体的抗拉强度结果如表2所示,不同分层的充填体抗拉强度结果进行拟合如图6所示。

从表2及图6中可得,充填体的抗拉强度与灰砂比呈正相关关系,与养护龄期呈正相关关系,随着养护龄期的增加,增长速度逐渐减缓,在3~14 d左右增长速度最快,说明在3~14 d内充填体的水化反应最剧烈,产生C-S-H凝胶最多,14 d以后水化反应趋于饱和,充填体抗拉强度增长缓慢。以灰砂比1:6为例,I分层充填体从养护龄期3 d到7 d、7 d到14 d、14 d到28 d强度增长分别为0.146 MPa、0.121 MPa、0.068 MPa,II分层充填体强度增长分别为0.104 MPa、0.174 MPa、0.019 MPa,III分层充填体强度增长分别为0.097 MPa、0.131 MPa、0.061 MPa。

3.3 能量特征

能量转化是物质物理变化过程的内在本质,充填体损伤以及破坏是能量驱动下的一种状态宏观失稳现象。试样加载过程中积蓄能量是导致充填体破坏的内在因素^[31-36]。在巴西劈裂过程中随着载荷增大,积聚能量逐渐增大,积聚能量多少与材料损伤和材料强度丧失密切相关。充填体加载过程是实验机连续做功、充填体则不断积蓄能量,积蓄能量可由力-位移曲线与横坐标围成的面积确定:

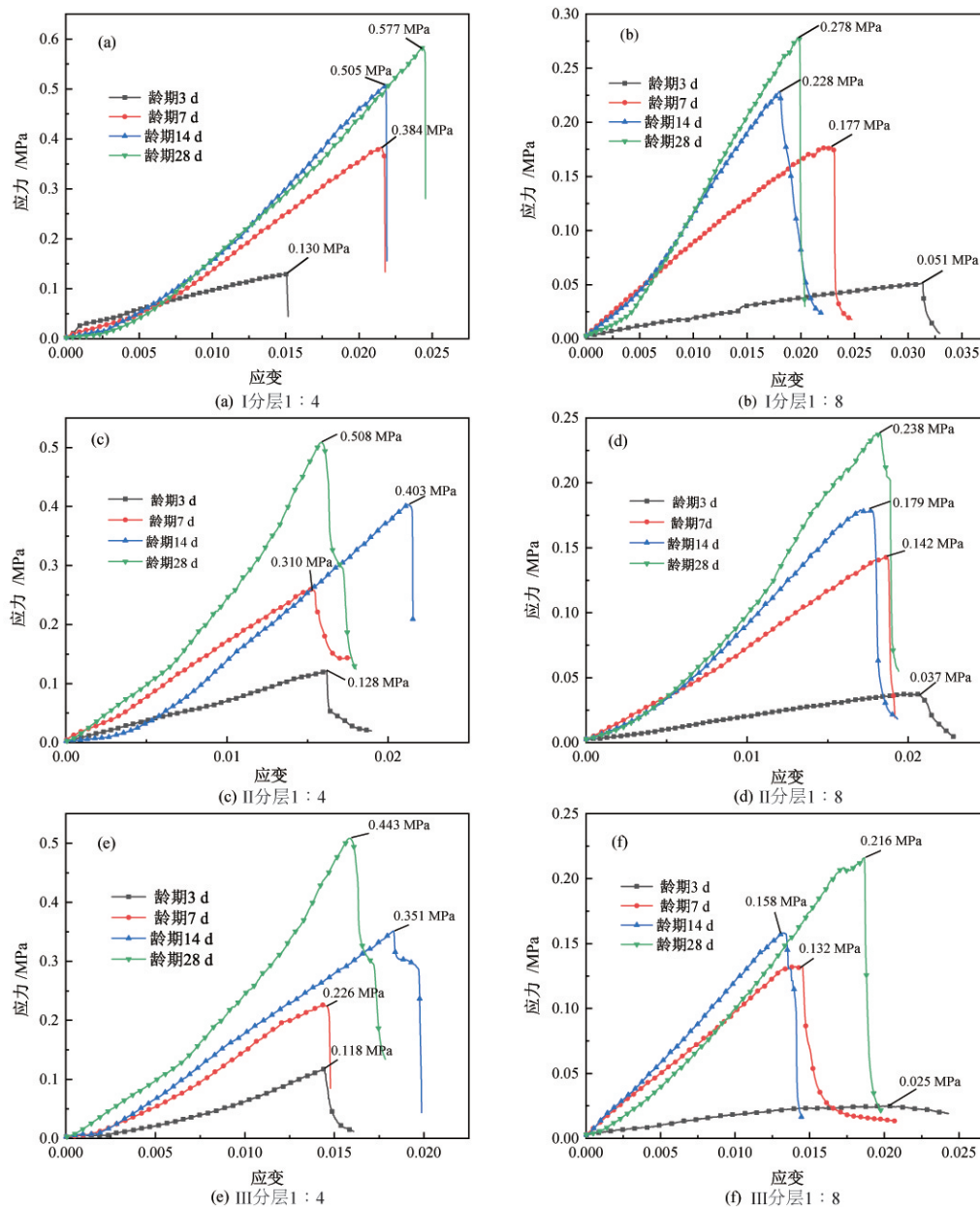
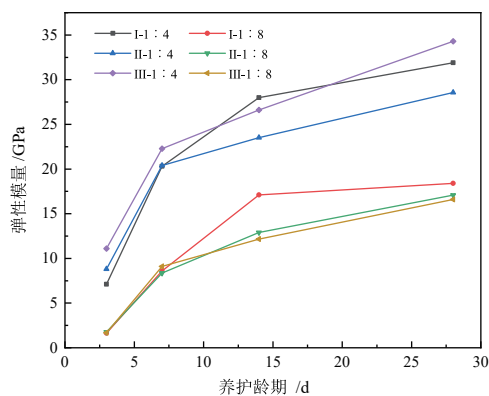


图4 不同条件下充填体的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of backfill body under different conditions



(图中 I-1:4 表示分层数 I、灰砂比 1:4, 以此类推; 下同)

图5 不同条件下充填体的弹性模量

Fig. 5 Elastic modulus of backfill body under different conditions

表2 充填体抗拉强度结果

Table 2 Results of tensile strength of backfill body

分层数	灰砂比	不同养护龄期下的充填体抗拉强度/MPa			
		3 d	7 d	14 d	28 d
I	1:4	0.130	0.384	0.505	0.577
	1:6	0.106	0.252	0.373	0.441
	1:8	0.051	0.177	0.228	0.278
II	1:4	0.123	0.310	0.403	0.508
	1:6	0.095	0.199	0.373	0.392
	1:8	0.037	0.142	0.228	0.238
III	1:4	0.118	0.226	0.351	0.443
	1:6	0.061	0.158	0.289	0.350
	1:8	0.025	0.132	0.158	0.216

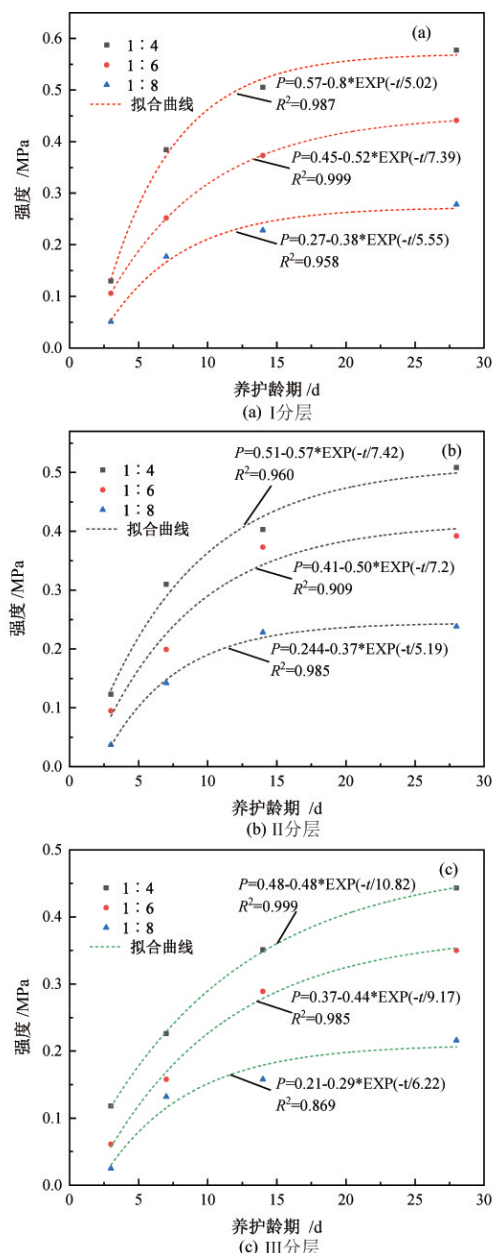


图6 抗拉强度拟合结果

Fig. 6 Fitting result of tensile strength

$$W_i = \int_0^u P_i du_i \quad (3)$$

式中: P —为加载载荷, N;

u —为径向加载压缩变分量;

W_i —为压缩变分量为 i 时积蓄的能量。

由于篇幅原因,选取 I、III 分层充填体计算得到不同条件下充填体巴西劈裂消耗的能量,如图 7 所示。

由图 7 可得,充填体破坏所需能量随养护龄期的增加而增加,与强度特征相似。能量消耗最大的为 I 分层养护龄期 28 d、灰砂比 1:4 的充填体,能耗为 1.14 J;最小能耗为三分层养护龄期 3 d、灰砂比 1:8 的充填体,能耗为 0.06 J。I 分层的充填体破坏时的

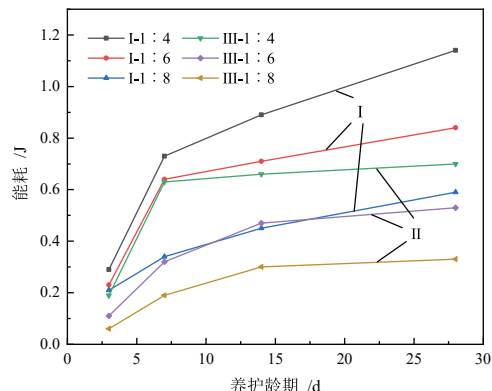


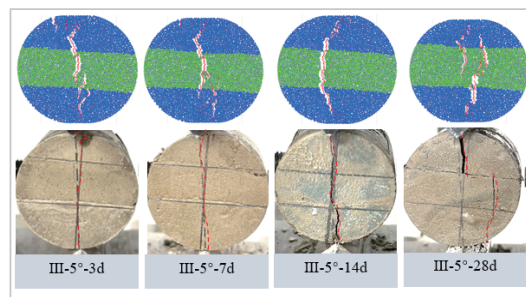
图7 充填体能量耗散特征

Fig. 7 Characteristics of energy dissipation of backfill body

能耗均大于三分层的充填体,这是由于分层破坏了充填体的整体性、连续性,产生分层弱面,弱化了充填体整体强度,使之破坏时消耗更少的能量。

3.4 破坏特征

对充填体裂纹扩展情况进行简单的数值模拟,模拟结果与室内实验结果较符合,起裂点位于试件中间,裂纹扩展不规则,但主要沿着加载直径方向扩展。以 III 分层充填体为例,裂纹扩展情况如图 8 所示。本次实验选取倾斜角度为 5° 的充填体进行分析。裂纹起裂点位于试件的中部,裂纹面垂直于层面向加载端部扩展,同时,受倾角的影响,试件容易形成沿层理面的次级裂纹及微裂纹。

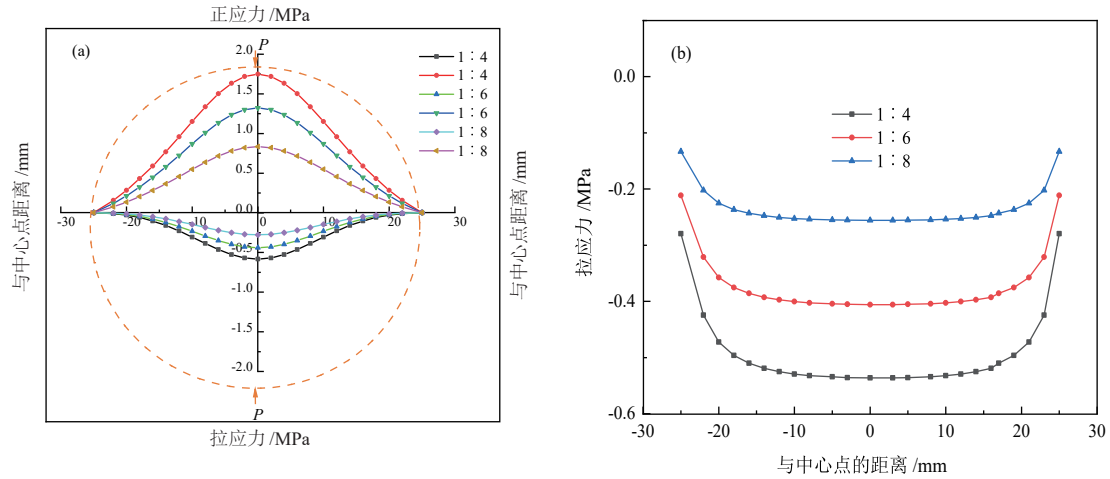


(图中 III-5°-3 d 表示分层数 III 倾角 5° 、养护龄期 3 d,以此类推)

图8 裂纹扩展情况

Fig. 8 Crack propagation

数值模拟结果与室内实验具有较高相似度,充填体裂纹起裂点大多位于充填体中心点处,在破坏时主裂纹伴随无数微裂纹从中心点处开始萌生、扩展直至贯穿整个充填体,呈不规则形状向加载直径上扩散。3 d、7 d 试件主要表现为中心断裂与偏心断裂的复合式断裂,由中心产生裂纹,但受角度的影响,产生一些偏离中心线的微小裂纹;另一种是受分层面的影响,表现为中心断裂以及沿层理方向的二次拉伸破坏,14 d、28 d 即主要表现为此种断裂模式,从充填体的裂纹分布特征可以看出,大部分充填体的裂纹都是从加载直径上开始起裂并扩展,这与图 9 中试件的应力分



(a—沿 x 方向应力分布; b—沿 y 方向拉应力分布)

图 9 不同灰砂比充填体应力集中分布情况

Fig. 9 Stress concentration distribution of backfill body in different directions

布情况相符合,即在加载直径上,试件应力集中分布,易产生裂纹并破坏,随着与加载直径的距离增大,试件应力逐渐减小,不容易产生破坏。

3.5 应力分布特征

研究充填体应力场分布特征,可以直观了解充填失稳破坏过程。巴西盘对称集中载荷作用下的任意坐标点 $S(x, y)$ 的应力状态方程为^[2]:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi L} \left(\frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{r_1} + \frac{\sin^2 \theta_2 \cos \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2P}{\pi DL} \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi L} \left(\frac{\cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^3 \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2P}{\pi DL} \quad (5)$$

当点 S 位于试样 y 轴,即 $x=0$ 时, S 点水平拉应力 σ_x 与垂向正应力 σ_y 可写为:

$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi DL} \quad (6)$$

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi L} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) - \frac{2P}{\pi DL} \quad (7)$$

选取质量浓度 78%、养护龄期 28 d、I 分层充填体,通过式 (4)、(5)、(6)、(7) 计算出充填体在劈裂破坏下沿 x 方向上的应力分布,如图 9 (a)、图 9 (b) 所示。

由图 9 可得,图 9 (a) 为均匀材质 (I 充填体) 沿垂直于加载直线方向上的水平拉应力与垂向正应力分布情况,图 9 (b) 为均匀材质 (I 充填体) 沿加载直径方向的拉应力分布情况。从图 9 中可以看出,不同灰砂比充填体的水平拉应力与垂向正应力在加载直线上最大,随着与加载直径的距离逐渐增大,正应力与拉应力逐渐减小与实际裂纹扩展情况相吻合。

4 结论

本文以全尾砂为骨料,制备一组质量浓度为 78%,

灰砂比分别为 1:4、1:6、1:8,养护龄期分别为 3 d、7 d、14 d、28 d 的胶结充填体进行巴西劈裂实验,分析了养护龄期与分层数对充填体强度、能量耗散及破坏规律的影响,为充填采矿设计、实际矿山充填提供一定理论支持。得出以下主要实验结论:

(1) 充填体劈裂实验的应力应变曲线具有较强的规律性,与单轴压缩实验大致相同,均经历压密、弹性、屈服、破坏 4 个阶段,控制充填体所受拉应力在弹性范围内可以有效预防充填体失效破坏。

(2) 灰砂比、养护龄期及分层数是影响充填体强度的重要因素。相同养护龄期及灰砂比下充填体的抗拉强度与分层数呈负相关关系,分层弱化充填体的整体性,因此在充填时尽量减少分层数,以提高充填体强度;在其他条件相同时,充填体的抗拉强度与灰砂比呈正相关关系;在其他条件相同时,充填体的强度与养护龄期呈正相关关系,在养护龄期 3~10 d 时,充填体抗拉强度增幅较大,例如, I 分层充填体从养护龄期 3 d 到 7 d、7 d 到 14 d、14 d 到 28 d 强度增长分别为 0.146 MPa、0.121 MPa、0.068 MPa, II 分层充填体强度增长分别为 0.104 MPa、0.174 MPa、0.019 MPa, III 分层充填体强度增长分别为 0.097 MPa、0.131 MPa、0.061 MPa,因此,建议在实际充填时尽量养护 12 d 以上(不同矿山尾砂结果可能有差别),使充填料浆水化反应能够更充分,确保强度达标。

(3) 充填体的破坏过程实际上是能量耗散的过程。充填体破坏时能量消耗与养护龄期呈正相关关系,与强度变化特征一致。充填体破坏过程中应力分布较为集中,所受拉力沿加载直径上较大,随着远离加载直径,所受应力呈规律性减小,在加载直径上,两端有较大的正应力作用,中心点处所受拉应力最大。

(4) 充填体裂纹起裂点大多位于充填体中心点处,在破坏时主裂纹伴随无数微裂纹从中心点处开始萌

生、扩展直至贯穿整个充填体,呈不规则形状向加载直径上扩散。室内实验结果可以看出,不同分层充填体裂纹扩展较为连贯,部分充填体出现了分层界面局部错动的情况,断裂特征多为中心断裂与偏心断裂的复合式断裂。

综上所述,在实际矿山充填体中,可以根据不同强度需求优化不同的灰砂比及选用不同养护龄期以保障安全的同时实现绿色、高效生产。例如,在下向充填采矿中,对充填体的强度要求高,我们需要采用更高的灰砂比及养护更久的时间,同时通过对位移监测、裂纹情况等的采集,来判断采场的稳定性,及时维护采场稳定,实现安全生产。

参考文献:

- [1] SARI M, YILMAZ E, KASAP T, et al. Exploring the link between ultrasonic and strength behavior of cementitious mine backfill by considering pore structure[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2023, 370: 130588.
- [2] SUN W, WANG H J, HOU K P. Control of waste rock-tailings paste backfill for active mining subsidence areas[J]. *J. Clean. Prod.*, 2018, 171: 567-579.
- [3] CAO H, GAO Q, ZHANG X Z, et al. Research progress and development direction of filling cementing materials for filling mining in iron mines of china[J]. *Gels*, 2022, 3: 192.
- [4] SUN W, WU A X, HOU K P, et al. Real-time observation of meso-fracture process in backfill body during mine subsidence using X-ray CT under uniaxial compressive conditions[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2016, 113: 153-162.
- [5] 侯永强,尹升华,曹永,等.单轴压缩下不同养护龄期尾砂胶结充填体损伤特性及能量耗散分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(7): 1955-1965.
HOU Y Q, YIN S H, CAO Y, et al. Damage characteristics and energy dissipation analysis of tailings cemented backfill at different curing ages under uniaxial compression[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2020, 51(7): 1955-1965.
- [6] GAO T, SUN W, LIU Z, et al. Investigation on fracture characteristics and failure pattern of inclined layered cemented tailings backfill[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2022, 343: 128110.
- [7] TANG Y N, FU J X, SONG W D, et al. Mechanical properties and crack evolution of interbedded cemented tailings backfill[J]. *Chinese J. Eng.*, 2020, 42: 1286-1298.
- [8] WANG J, SONG W D, GAO S, et al. Mechanical properties and failure modes of stratified backfill under triaxial cyclic loading and unloading[J]. *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2019, 29: 809-814.
- [9] SUN W, GAO T, ZHAO J G, et al. Research on fracture behavior and reinforcement mechanism of fiber-reinforced locally layered backfill: Experiments and models[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2023, 366: 130186.
- [10] LIU X S, NING J G, Y. L. Tan, et al. Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading[J]. *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2016, 85: 27-32.
- [11] 刘志祥,青灵,党文刚.尾砂胶结充填体损伤软-硬化本构模型[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(2): 36-41.
LIU Z X, LIU Q L, DANG W G. On softening-hardening intrinsically constitutive model for damage of tailings-cemented filling body[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2012, 31(2): 36-41.
- [12] TAN Y L, GU Q H, NING J G, et al. Uniaxial compression behavior of cement mortar and its damage-constitutive model based on energy theory[J]. *Materials*, 2019: 1309. DOI: [10.3390/ma12081309](https://doi.org/10.3390/ma12081309).
- [13] JIAO H Z, YANG W B, SHRN H M, et al. Study on multi-layer filling treatment of extra-large goaf and its underground application[J]. *Materials*, 2022, 16: 5680.
- [14] SONG W D, WANG J, TAN Y Y, et al. Energy consumption and damage characteristics of layered filling under triaxial addition-unloading[J]. *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2017, 46(5): 1050-1057.
- [15] HAN B, ZHANG S Y, SUN W. Impact of temperature on the strength development of the tailing-waste rock backfill of a gold Mine[J]. *Adv. Civ. Eng. Mater.* 2019, 43: 79606.
- [16] SUN W, JIANG M G, FAN K, LIU Z. Determination and application of pressure loss in long distance pipeline transportation of paste slurry based on pipe loop experiment[J]. *Arch. Min. Sci.*, 2022, 67: 223-237.
- [17] LU K F, SUN W, GAO T, et al. Preparation of new copper smelting slag-based mine backfill material and investigation of its mechanical properties[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2023, 382: 131228.
- [18] LI Z Y, SUN W, GAO T, et al. Experimental study on evolution of pore structure of inclined layered cemented tailings backfill based on X-ray CT[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2023, 366: 130242.
- [19] GAO T, SUN W, LI Z Y, et al. Study on shear characteristics and failure mechanism of inclined layered backfill in mining solid waste utilization[J]. *Minerals*, 2022, 12(12): 1540.
- [20] JIAO H Z, ZHANG W, YANG Y, et al. Static mechanical characteristics and meso-damage evolution characteristics of layered backfill under the condition of inclined interface[J]. *Constr. Build. Mater.*, 2023, 366: 130113.
- [21] 张辉,程利兴,苏承东,等.饱水煤样巴西劈裂强度和能量特征试验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(12): 5-10.
ZHANG H, CHENG L X, SU C D, et al. Experimental study on Brazilian splitting strength and energy characteristics of saturated coal samples[J]. *China Science and Technology of production Safety*, 2015, 11(12): 5-10.
- [22] 王辉,李勇,曹树刚,等.基于巴西劈裂实验的层状页岩断裂特征试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(3): 604-612.
WANG H, LI Y, Cao S G, et al. Experimental study on fracture characteristics of layered shale based on Brazilian splitting test[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2020, 37(3): 604-612.
- [23] TAN X, KONIETZKY H, FRÜ HWIRT T, et al. Brazilian tests on transversely isotropic rocks: laboratory testing and numerical simulations[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(4): 1341-1351.
- [24] 肖福坤,于涵,侯志远,等.砂岩巴西劈裂破坏的位移场演化及能量耗散特征[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2018, 28(2): 125-129.
XIAO F K, YU H, HOU Z Y, et al. Displacement field evolution and energy dissipation characteristics of sandstone splitting failure in Brazil [J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2018, 28 (2): 125-129.
- [25] 谢凯楠,姜德义,蒋翔,等.页岩巴西劈裂试验的能量分布与临界特征分析[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 613-620.
XIE K N, JIANG D Y, JIANG X, et al. Analysis of energy distribution and critical characteristics of shale splitting test in Brazil[J]. *Journal of Coal Industry*, 2017, 42(3): 613-620.
- [26] 杜坤,李地元,金解放.充填体与岩体能量和强度匹配的分析及应用[J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(12): 82-87.
DU K, LI D Y, JIN J F. Matching analysis of energy and strength between backfill and rock mass and its application[J]. *China Safety*

- Science Journal, 2011, 21(12): 82–87.
- [27] 刘志祥, 李夕兵, 赵国彦, 等. 充填体与岩体三维能量耗损规律及合理匹配[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 344–348.
LIU Z X, LI X B, ZHAO G Y, et al. Three-dimensional energy dissipation laws and reasonable matches between backfill and rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 344–348.
- [28] DENG J, LI B, LI X B. et al. Analysis of factors and countermeasures of mining subsidence in Kaiyang Phosphorus Mine[J]. J. Cent. South Univ. Technol., 2006, 13: 733–737.
- [29] SONG X P, LI J B, WANG S, et al. Study of mechanical behavior and cracking mechanism of prefabricated fracture cemented paste backfill under different loading rates from the perspective of energy evolution[J]. Constr. Build. Mater., 2022, 361: 129737.
- [30] QI W Y, ZHANG J X, ZHOU N, et al. Mechanism by which backfill body reduces amount of energy released in deep coal mining[J]. Shock and Vibration, 2019, 14: 8253269.
- [31] LIU L, XIN J, QI C C, KI-IL SONG, et al. Experimental investigation of mechanical, hydration, microstructure and electrical properties of cemented paste backfill[J]. Constr. Build. Mater., 2020, 263: 120137.
- [32] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003–3010.
XIE H P, JU Y, LI L Y. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003–3010.
- [33] XIAO S, WANG H L, LIU B, et al. The surface-forming energy release rate based fracture criterion for elastic-plastic crack propagation[J]. J. Mech. Phys. Solids., 2015, 84: 336–357.
- [34] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 砂岩拉伸过程中的能量耗散与损伤演化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2526–2531.
PENG R D, XIE H P, JU Y. Analysis of energy. dissipation and damage evolution of sandstone during tensile process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2526–2531.
- [35] T NISHIOKA, S SYANO, T FUJIMOTO. Concepts of separated j-integrals, separated energy release rates, and the component separation method of the J-integral for interfacial fracture mechanics[J]. J. Appl. Mech., 2003, 70(4): 505–516.
- [36] 卢开放, 侯正猛, 孙伟, 等. 云南省矿井抽水蓄能电站潜力评估与建设关键技术[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 136–144.
LU K F, HOU Z M, SUN W, et al. Key technologies for potential evaluation and construction of mine pumped storage power stations in Yunnan Province[J]. Engineering Science and Technology, 2022, 54 (1): 136–144.

Study on Tensile Strength Characteristics of Cemented Backfill with Full Tailings under Brazilian Splitting

CAI Faxiong, SUN Wei, ZHANG Shengyou, JIANG Minggui, YANG Xi, HUANG Jinzhouchi, JING Dong

Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China

Abstract: The failure process of backfill body is also a process of energy dissipation. Factors such as curing age and delamination number directly affect the strength and energy dissipation of the backfill body. In this paper, using whole tailings as aggregate, a group of cemented backfill with mass concentration of 78%, lime-sand ratio of 1 : 4, 1 : 6, 1 : 8 and curing age of 3D, 7 d, 14 d and 28 d were prepared for Brazilian splitting experiment. The effects of mass concentration, curing age and delamination number on the strength, energy dissipation and failure law of the backfill body were analyzed. The results showed that when the cement-sand ratio was constant, the strength of the backfill body was positively correlated with the curing age, and when the curing age was fixed, the strength and the cement-sand ratio were positively correlated, and the delamination will form the weak surface of the structure and reduced the strength of the backfill body. In the Brazilian splitting process, the energy dissipation of the backfill body increases with the increased of curing age, which was consistent with the strength change characteristics; the crack initiation point of the backfill body was mostly located at the central point of the backfill body and spread into an irregular shape to the loading diameter. The indoor test results showed that the crack initiation point of the backfill body was mostly located at the central point of the backfill body, and during failure, the main crack started to initiate and propagated from the center point with numerous microcracks until it ran through the whole backfill body. It spread into an irregular shape to the loading diameter. The crack propagation of different layered backfill bodies was more coherent, and the local dislocation of the delamination interface occurs in some of the backfill bodies, most of the fracture characteristics were the compound fracture of central fracture and eccentric fracture.

Keywords: Brazilian split; energy dissipation; tensile strength; cemented backfill body damage; crack propagation

引用格式: 蔡发雄, 孙伟, 张盛友, 姜明归, 杨希, 黄锦周池, 景东. 巴西劈裂下全尾砂胶结充填体抗拉强度特征研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(4): 65-73.

CAI Faxiong, SUN Wei, ZHANG Shengyou, JIANG Minggui, YANG Xi, HUANG Jinzhouchi, JING Dong. Study on tensile strength characteristics of cemented backfill with full tailings under Brazilian splitting[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(4): 65-73.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



通信作者简介:

孙伟, 甘肃庆阳人, 教授, 博士生导师, 昆明理工大学国土资源工程学院资源开发工程系主任, 兼任中国有色金属学会第八届采矿学术委员会委员、中国(德国)研发创新联盟-碳中和与能源转型专业委员会委员等。长期从事金属矿充填理论与技术相关的教学科研工作, 曾赴德国、赞比亚等国家从事访学、科研工作, 在理论研究、方案设计、现场工业应用等方面开展了大量的研究工作。主持并参与了包括中国有色矿业集团、中国铝业、云南锡业、中国黄金集团、云南普朗铜矿等企业横向科研项目 36 余项, 国家自然科学基金、国家重点研发计划等项目 5 项。发表学术论文 60 余篇, 其中 SCI/EI 收录 20 余篇。获中国有色金属工业科学技术奖一等奖、中国黄金协会科学技术奖二等奖、昆明理工大学教学成果奖一等奖 2 项等奖励。