

金属矿山充填体强度需求发展现状与展望

卢宏建¹, 夏传祥¹, 武立彬², 牟超¹, 刘志义¹

1. 华北理工大学 矿业工程学院, 唐山 河北 063210;
2. 双鸭山市建龙矿业有限公司, 黑龙江 双鸭山 155199

中图分类号: TD853.34 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)02-0001-10
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.02.001

摘要 矿产资源开采对国家安全和经济至关重要, 随着浅部矿产资源逐渐减少, 深部开采已上升为国家战略。充填采矿法因其安全性高和对地表环境影响较小等优势, 已逐渐成为地下开采的首选方法。确定充填体的合理强度是解决充填采矿安全和经济平衡问题的关键, 是充填采矿技术成功应用和健康发展的核心问题。论文梳理了胶凝剂、灰砂配比、充填骨料、养护环境、接触面特性等因素对充填体强度的影响规律, 归纳了经验类比法、力学模型法、数值分析法、人工智能法等充填体强度设计方法, 综述了充填体强度需求研究现状, 提出了深部充填体强度需求计算新思路。旨在完善深部充填体强度需求计算理论, 优化矿山充填体强度设计, 推动深部金属矿山充填开采的研究与应用。

关键词 金属矿山; 充填采矿; 充填体强度; 需求模型; 影响因素; 设计方法

引言

作为矿产资源开采和利用生产链条最前端的基础工业, 采矿不仅在工业生产中发挥着重要作用, 而且也是国家安全和经济发展的重要保障。随着人类社会快速发展, 矿产品需求量迅速增加, 浅部资源逐渐枯竭, 深部开采成为矿业发展的必然趋势^[1]。据不完全统计, 当前国外地下金属矿山超过千米的有百余座, 最大采深达 4 350 m。我国地下金属矿山开采深度已经达到或超过千米的近 50 座, 开采深度以大约 10~30 m/a 的速度下降, 在未来 5~10 年, 将有 1/3 的金属矿山开采深度达到 1 000 m^[2-3]。深部开采面临巨大挑战, 随着深度的增加, 需要面对高应力、高井深、高井温、强扰动“三高一扰动”复杂开采环境下产生的诸多技术问题^[4]。因此, 充填法与空场法有机结合的阶段空场嗣后充填采矿, 以其高效安全的优势, 成为了深部金属矿山大规模高效绿色开发的首选方法^[5-6]。

阶段空场嗣后充填采矿将矿体划分为连续的矿房和矿柱, 矿房回采后进行胶结充填为矿柱回采提供地压防护, 矿柱回采后进行非胶结充填以降低成本。胶结充填体强度不足诱发充填体崩塌, 强度过高增加采矿成本(充填体中胶凝材料费用占到了充填成本的

70%~80%)。因此, 充填体的合理强度是确保采场稳定性和经济平衡的关键因素。随着深度的增加, 充填体的破坏形式更加复杂, 需要对其系统科学的分析, 才能进行合理的充填体强度设计。所以, 建立深部充填体强度需求计算模型是深部金属矿充填开采领域亟待解决的科学问题。鉴于此, 文章在系统综述了充填体强度的影响因素、充填体强度设计方法、充填体强度需求计算理论的基础上, 提出了适合深部充填体强度需求计算的新思路。

1 充填体强度的影响因素

经过半个世纪发展, 胶结充填技术取得了显著进步。胶凝材料、水和骨料是充填体的重要组成, 充填体强度与这三种组分的性能和配比有着密切关系, 同时受到矿山开采工艺和环境的制约, 料浆浓度一定的情况下, 影响其强度的主要因素有胶凝剂、灰砂配比、充填骨料、养护条件以及充填体与围岩接触面特性等。

1.1 胶凝材料

胶凝材料的显著优势在于它能够高效利用其他物质, 借助其自身的胶结性能, 形成具有一定强度的固体。早期充填法采用水泥作为充填体的胶凝剂, 充

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52204134); 河北省自然科学基金项目(E2021209006); 河北省中央引导地方科技专项项目(236Z4105G)

作者简介: 卢宏建(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事金属矿山充填开采、矿山采动岩石力学方向教学与研究工作; E-mail: luhongjian@ncst.edu.cn。

通信作者: 夏传祥(1998—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为采矿工艺理论与技术; E-mail: 1765902958@qq.com。

填成本高,占充填成本的 70% 以上。国内外学者在研究替代水泥的胶凝材料方面开展了大量研究,取得了众多有意义的成果。增强充填体强度的胶凝材料主要有高炉矿渣^[7]、粉煤灰^[8-9]、铜渣^[10]、稻草灰^[11-12]等。高炉矿渣是钢铁厂冶炼生铁过程中产生的副产品,通过活化可以使其水硬化性释放出来,生成具有胶凝性的钙矾石及凝胶。粉煤灰虽然对充填体的早期强度不利,但是可改善充填体的流动性且对后期强度贡献较大。铜渣是炼铜过程中的一种副产品,具有很好的流动性,适量加入到尾砂中,能优化粗骨料的粒径级配,充填体强度、流变特性都有所增强。稻草灰是农业生产后的废弃物,代替部分水泥作为胶凝剂,虽然降低了新鲜胶结尾矿充填的流动性,但仍可保证管道运输,从微观角度看,它会产生额外的 C-S-H 凝胶,颗粒内部的结合强度增大,形成更加紧密的微观结构。

胶凝材料是控制充填采矿成本的关键,众多学者对胶凝材料进行了研发与应用,但深部充填对减少充填料浆泌水、改善井下充填环境、提高充填体早期强度等要求更高,未来充填胶凝材料需继续向着改善充填体早期强度、降低材料成本、扩大固废利用范围、适应深部矿山充填特点的方向发展。

1.2 灰砂配比

根据矿山地质条件,充分考虑采空区所需的充填体强度,进行一系列实验,获取合理的充填配比。李杰林等^[13]以提钛炉渣、铁基全尾砂和水泥为实验材料,在分析相关组成成分物理化学特性基础上,制备了不同灰砂配比充填体试样,测定了不同养护龄期的充填体抗压强度,得出了充填体抗压强度随着灰砂比的增大而增大的规律。唐亚男等^[14]进行了不同灰砂配比组合实验,得出了充填体强度与灰砂配比之间关系函数。魏晓明等^[15]通过矿山取样和实验室实验研究对金厂河多金属矿进行了配比优化,得出采场底部充填体灰砂配比为 1:4,上部灰砂配比为 1:6。熊朝辉^[16]、汪杰^[17]等对水平分层胶结充填体损伤本构模型及强度准则进行了系统研究,优化了采场充填体配比,在确保满足矿山要求的前提下减少了充填成本。杨仕教等^[18]探讨了不同水泥用量、尾砂特性和充填工艺对充填体强度的影响规律,得出灰砂配比越大,龄期的增加对充填体强度增加影响越大;灰砂配比越小,充填体强度随质量浓度的增加越缓慢的结论。胡凡等^[19]以灰砂配比、料浆浓度、水泥、水含量、全尾砂为输入参数,28 d 与 60 d 充填体强度为输出参数,建立 BP 神经网络模型,实现了充填体 28 d 和 60 d 强度与相关影响因子之间的非线性映射关系,充填体强度达到较好的预测。齐冲冲等^[20]论述了人工智能在充填矿山的应用,展望了使用尾砂物化性质、配比设计、结合 3 d USC,直接对 7 d UCS、28 d UCS 甚至 56 d UCS 进行精准预测。

充填料浆灰砂配比效果要以采场充填体强度为检验标准,需建立采场与实验室数据的数学关系模型,通过大数据训练与优化,推荐合理的充填料浆灰砂配比,使充填体强度达到设计要求,并控制充填胶结耗材量,以达到安全低耗充填的目标。因此,结合智能化算法与低碳理念进行充填体的灰砂配比设计,实现经济、安全、低碳思想是充填采矿的发展趋势。

1.3 充填骨料

充填骨料选择原则是来源广泛、成本低廉、性质稳定以及品质高^[21]。充填骨料按照粒度可分为细骨料和粗骨料两类。常用的细骨料为尾砂,粗骨料常见的有破碎废石、戈壁砂、棒磨砂等。

1.3.1 传统充填骨料

在 20 世纪 50 年代,为了配合当时广泛使用的干式充填技术,矿山开采活动中产生的废石被破碎后广泛用作骨料。60 到 70 年代,随着胶结充填技术的兴起,并借鉴混凝土相关技术,通常使用河砂、戈壁砂、棒磨砂和脱泥尾砂作为骨料进行胶结充填。其中,棒磨砂因其制备过程简便、成本相对低廉以及较高的充填强度等优点,在矿山中得到了广泛应用^[22-23]。

1.3.2 尾砂

尾砂是从矿石通过破碎、磨粉和选矿等过程提取有价值成分后剩余的固体废料。目前,尾砂是我国需要处理的大宗固体废弃物之一,其尾砂库的不断增长已经成为制约矿山发展的一大因素。随着胶结充填技术的进步和普及,尾砂被作为一种骨料用于矿山填充,不仅缓解了尾砂的排放和堆积问题,还实现了资源的就地利用和废物回收,带来了显著的经济效益和环保效果^[24-25]。

1.3.3 废石

在开采矿产资源的过程中,矿山会产生大量废石。当前,经破碎的废石主要被用作建筑材料或填充骨料。然而,作为建筑材料,废石需要满足较高的质量和粒度分布要求,其使用量因此受限。相反,当用作填充骨料,并与其他骨料(如全尾砂、戈壁砂等)混合时,废石展现出良好的填充效果,并已在国内多家有色金属矿山得到广泛应用^[26]。

王楚涵等^[27]分析了细颗粒尾砂含量、水泥含量和料浆浓度对充填体强度的影响,得出在一定范围内增加细颗粒尾砂含量可以提高充填体的强度,但过量则会降低强度。李洪宝等^[28]发现了尾砂粒度对胶结充填体早期强度的影响,尾砂粒度显著影响早期强度,粒度越细,与水泥水化胶结的契合度越高,早期强度越大。Liu 等^[29]深入研究不同尾砂细颗粒含量条件下

的胶结充填体的强度特性变化, 增加细颗粒含量对充填体早期强度有一定提升作用, 但过多细颗粒会降低晚期强度。

1.4 养护环境

了解外界温度和养护时间如何影响充填体强度, 对于提高采矿作业的安全性和效率至关重要。外界温度可以显著影响充填材料的固化和化学性质, 而养护时间则是决定材料微观结构和最终性能的重要因素。刘超等^[30]研究了高寒地区废石破碎胶结充填体的强度特性, 得出了养护温度对废石破碎胶结充填体强度影响较为明显, 温度越高, 强度越大, 从影响程度上看, 温度对充填体早期强度的影响要明显大于后期。焦国芮等^[31]聚焦于深井开采中胶结充填体在高温环境下的表现, 发现温度对胶结充填体强度具有显著影响, 当浓度和灰砂比保持恒定时, 充填体试件的强度随温度升高而先增加后减少, 特别是在 150 °C 左右时, 强度达到峰值。王炳文等^[32]对高寒地区尾砂胶结充填体的固结特性进行实验分析, 发现与常温养护条件下的尾砂胶结充填体相比, 低温环境下养护的该类试块展现出较低的强度表现, 尤其是在早期强度阶段, 降幅最为显著。徐文彬等^[33]对 20~100 °C 范围内不同温度处置后的充填体进行单轴压缩实验, 发现 20~60 °C 之间, 温度强化了充填体强度, 温度在 40 °C 左右, 充填体强度达到最大值, 60 °C 之后充填体强度开始劣化降低。随着矿山开采深度增加, 外界温度也随之增加, 未来需要考虑如何应对高温影响充填体强度的热点问题。

针对养护时间的考虑, 郑迪等人^[34]进行多元线性回归分析, 分析了充填体在不同养护龄期下的强度变化情况, 揭示了随着养护时间的延长, 充填体的强度呈现出线性增长趋势, 其中灰砂比和料浆浓度较高时, 强度增长的速率也相应更大。王永岩^[35]、张福学^[36]等对养护龄期这一影响因素也进行了实验研究, 发现在不同养护阶段充填体以拉伸破坏形式出现。

充填体经过一定的养护龄期才能达到既定的抗压强度。如果养护时间不足, 充填浆料中的水泥将不能完全发生水化反应, 导致充填体的孔隙度过高, 进而影响其强度。然而, 在施工过程中, 延长养护龄期会影响矿山后续工作和产能, 因此, 寻找合理的养护龄期, 是实现开采效率和效益最大化的关键问题之一。

1.5 充填体与围岩接触特性

充填料浆通过泵送或自重输送到采空区, 在固结过程中与采场围岩耦合, 形成了充填体-围岩组合体, 充填体和采场围岩界面的接触特性也是影响最终充填效果的重要因素。卢宏建等^[37-38]分析了接触面倾角的充填体-围岩组合体, 发现接触面倾角 0°、15°和 30°时组合体破坏发生在充填体区域, 接触面倾角 45°和

60°时组合体破坏发生在充填体和接触面区域, 接触面倾角达到 75°和 90°时组合体破坏沿两介质接触面扩展。王奕仁等^[39]通过单轴压缩下胶结充填体-围岩组合体实验, 得出充填体-围岩组合体的强度变化趋势随着接触面倾角的增大, 组合体的强度先减小后增大, 呈“V”字形。王明旭^[40]通过相似材料制作了充填体-围岩复合体试块, 采用不同荷载作用下围岩与充填体相互作用室内实验, 分析了胶结充填体与围岩复合体的应变变化、裂纹扩展和变形演化以及稳定破坏情况。

围岩和充填体组合件压缩实验可以研究揭示顶底板围岩与充填体在竖向变形沉降过程中的力学行为, 也可以模拟采场充填体与围岩边帮在侧向变形过程中的挤压作用。充填体在采场内与围岩直接接触, 两者会发生相互作用。因此, 充填体的强度受多因素共同作用。

2 充填体强度设计方法

2.1 经验类比法

经验类比法是通过参考类似矿山胶结充填的实际经验, 设计矿山胶结充填体的强度。实施中, 需要掌握矿山开采技术条件、充填条件, 通过对比, 选择一个合理的充填体强度值^[41]。表 1 为国内外采用经验类比法确定胶结充填体强度的矿山。

表 1 矿山实际使用胶结充填体强度^[42]

Table 1 Strength of cemented backfill actually used in mine

国别	矿山	高/m	长/m	宽/m	侧向暴露面积/m ²	强度/MPa
中国	凡口铅锌矿	40	35	7	1 400	2.50
	金川镍矿	60	51	50	3 060	2.50
	白银深部铜矿	60	50~80	20	3 900	1.00~5.00
	安庆铜矿	120	40~60	15	6 000	0.18~4.00
澳大利亚	芒特艾萨矿	100	40	30	4 000	2.20
		40	10	30	400	0.90
加拿大	若里达矿	65	11	25	715	9.50
南非	黑山矿物公司	70	28	45	1960	7.00
芬兰	洼马拉矿	50	40~70	5~30	2 000~3 500	1.50
	威汉迪矿	100	60	-	6 000	1.05
爱尔兰	塔拉铅锌矿	80	20~60	12.5	1 600~4 800	1.00~4.00

与国外采用充填采矿法的矿山相比, 我国在空场嗣后充填采矿技术领域的研究较晚, 设计的胶结充填体强度相对保守以确保安全, 无疑会增大水泥耗量, 增加充填体成本。为节约胶结充填量, 国内设计的胶结充填体宽度较窄, 但是提高了对胶结充填体稳定性的要求, 无疑将增加充填体水泥单耗。因此, 设计胶结充填体宽度, 还应考虑充填成本优化问题。

经验类比法过分依赖矿山实践经验,主观性较强,易忽略影响胶结充填体稳定性因素的多样性和复杂性,使得设计的强度缺乏理论依据。因此,该法不应作为设计胶结充填体所需强度的主要方法,作为一种辅助方法,用于给出设计对象所需强度的初选值更为合适^[41]。

2.2 力学模型法

国内外学者采用了理论分析方法,对充填体的强度设计进行了深入研究,常用计算公式如表 2 所示。

表 2 常用理论计算公式^[46]

Table 2 Common theoretical calculation formulas

名称	公式	适用范围	注释
蔡嗣经经验公式	$H^3 = \alpha \sigma_c^3$	用于考虑充填体高度对充填体强度的影响	H 为胶结充填体的高度, m; σ_c 为胶结充填体的设计强度, MPa; α 为经验系数,当充填高度小于 50 m 时,建议取 600,当充填高度大于 50 m 时,建议取 1 000
Thomas 计算法	$\sigma_c = \frac{\gamma h}{1 + (h/b)}$	考虑胶结充填体与围岩壁间的摩擦力所产生的成拱作用	σ_c 为充填体强度, MPa; γ 为充填体容重, kN/m ³ ; h 为充填体高度, m; b 为充填体宽度, m
卢平修正计算法	$\sigma_c = \frac{\gamma h}{(1-k) \left(\tan \alpha + \frac{2h}{b} * \frac{C_1}{C} \sin \alpha \right)}$	在 Thomas 计算方法的基础上考虑充填体自身的强度特性	k 为侧压系数, $k = 1 - \sin \phi_1$; α 为充填体滑动面与水平面的夹角 $\alpha = 45^\circ + \phi/2$; C_1, ϕ_1 为充填体与围岩的黏聚力和内摩擦角; C, ϕ 为充填体黏聚力和内摩擦角

蔡嗣经经验公式主要关注高度与强度的关系,但未能全面考虑其他影响因素。Thomas 模型提出了高度和长度与所需强度之间的关系,却忽略了宽度的作用。卢平修正模型进一步考虑了高度、长度以及充填体的强度特性(如内聚力和内摩擦角)和充填体与围岩的相互作用,但同样未包含宽度因素。这些方法在考虑影响因素上存在局限性,虽然可以为计算充填体强度提供参考,但未来的发展方向是建立更系统全面的力学模型。

2.3 数值分析方法

数值分析法是应用有限元法、边界元法或其他数值模拟方法构建工程数值模型,设置边界条件进行加载和卸载模拟,在分析采场围岩和充填体位移与应力分布规律后,对充填体稳定性进行评价。Abtin 等^[47]借助 FLAC^{3D} 数值软件,构建了三维数值模型,分别分析了采场长度、采场宽度、矿体倾角、充填体内摩擦角等对胶结充填体内部水平应力和垂直应力分布的影响,最后发现数值计算结果与理论推导结果比较吻合。卢宏建等^[48]研究了非线性接触面下接触角对充填体-围岩组合体破裂演化特征,借助 RFPA^{3D} 分析软件,模拟不同接触角,发现随接触角增大,组合体模型的应力、应变以及弹性模量先增大后减小。付玉华^[49]采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件分析了高阶阶段采场充填体的稳定性,研究发现充填体在承担部分上部围岩压力外,主要约束围岩的侧向变形。WANG 等^[50]采用

Thomas 等^[43]基于极限平衡分析法的研究,探讨了围岩与充填体间的摩擦力引发的拱形效应,并以此为基础,提出了 Thomas 公式用于指导充填强度的设计。卢平^[44]研究表明,Thomas 公式仅考虑了充填体的几何尺寸和填充材料的容重,却未涉及填充材料本身的强度特性,以此提出了卢平修正模型以弥补这一缺陷。卢宏建等^[45]通过研究胶结充填体-围岩组合体剪切强度与破坏特征,提出了基于摩尔应力圆公切线法与摩尔-库伦强度准则确定组合体抗剪强度参数的计算方法,为地下充填采场稳定性分析提供理论支持。

FLAC^{3D} 数值模拟方法研究了矿深和邻近采空区开采对侧露胶结充填体稳定性的影响,分析了充填体的破坏机理和失败时的黏聚力。卢宏建等^[51]采用 MIDAS GTS NX 软件分析了接触面与采充时序对充填体稳定性的影响规律,得出胶结充填体在考虑接触面特性时比不考虑接触面特性的位移量增大,应力值降低,塑性区与破坏区减小。

数值分析方法得出可靠的结果,前提是物理原型与数值模型间的误差在合理范围内。地下充填采场力学环境与材料的复杂性,导致现有的数值计算结果大多是进行定性分析,不能得出定量的结论。因此需要耦合人工智能方法,建立生产矿山相关指标数据库,优化物理原型与数值模型间的关键参数和数学函数,形成定性定量的综合分析方法。

2.4 人工智能方法

人工智能算法有支持向量机(SVM)^[52-53]、神经网络(NN)、随机森林^[54]等,常用的支持向量机模型与神经网络模型的实现过程分别见图 1 和图 2。董越等人^[55]通过采用正交实验协同 BP 神经网络模型对金川镍矿充填体的抗压强度进行预测,成功建立了能够自动学习、自适应性强和预测准确度高的充填体强度预测模型。LI 等^[57]基于室内实验结果,使用 slap swarm algorithm—SVM 杂化模型预测纤维增强性充填材料强度。白春红^[58]及周士霖^[59]采用 ANN、SVM 等人工智能方法,建立了采场稳定性与充填体强度的智能模

型。王志会等^[60]使用 PSO—ANN 建立了胶结剂含量、养护温度、养护时间及抗剪强度的智能预测模型。

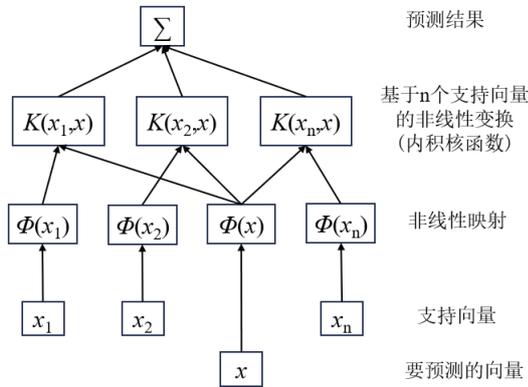


图 1 支持向量机结构示意图^[55]
Fig. 1 Schematic diagram of support vector machine structure

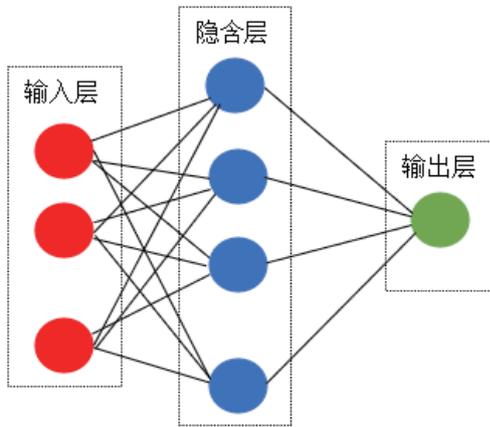


图 2 神经网络的网络结构^[61]
Fig. 2 Network structure of NN

人工智能方法在矿山充填领域的应用受到数据采集问题的限制。这不仅是因为人工智能方法需要大规模的数据样本,而且矿山充填领域的数据收集过程本身就相当复杂。目前,大多数数据主要来源于室内实验。为了克服数据不足的问题,可以考虑拓展数据来源,包括从地下采场收集的充填体位移和应力监测数据,以及料浆输送管道的实时监测数据等。

3 充填体强度需求研究现状

充填体强度设计是充填采矿中影响矿山安全、成本、效益的重要环节,最常用的充填体强度需求计算有解析法和数值模拟法两种。Mitchell 等人^[62]通过开展一系列单侧揭露充填体的室内物理模型实验,研究提出了用于侧向揭露充填体强度需求计算的三维楔形滑动解析模型。Li 和 Aubertin 等^[63]系统结合了采场充填体应力分布特征和各向力学边界,逐步克服了 Mitchell 原始模型中的假设条件限定,考虑实际采场充填体的分层现象、充填体与采场侧壁围岩摩擦作用等,对充填体强度需求计算理论与方法进行了拓展。

Liu 等^[64]基于充填体本构方程,根据围岩开挖释放能量与充填体蓄应变能相近原则,得到了考虑原岩地应力的胶结充填体安全评价公式。Yang 等^[65]基于滑楔体平衡理论和数值模拟方法给出了滑动面贯通和不贯通充填体安全评价模型。Zhao 等^[66]给出了基于土质斜坡稳定性 Morgenstern 法和微分切片法,考虑采场充填体不均匀特性的解析评价方法。张常光等^[67]提出了考虑中间主应力效应、充填顺序、后壁黏聚力等综合因素的充填体所需粘聚力和安全系数的统一解。王俊^[68]、杨磊^[69]利用滑楔体极限平衡理论,考虑采场结构参数、充填材料自身特性和充填体-矿岩(柱)接触面特性的影响,建立了胶结充填体前壁揭露-后壁受压状态下三维稳定性评价模型。刘光生等^[70]基于两步骤阶段空场嗣后充填法的实际采充时序,重点考虑二步骤采场非胶结充填体对相邻一步骤采场胶结充填体的侧压力作用,提出了前壁揭露-后壁受压胶结充填体强度需求的三维解析模型,并结合充填配比试样强度和原位取芯试样强度的统计分析,提出了一种浮动安全系数的统计计算方法。

现有评价方法多基于 Mitchell 滑楔体平衡理论提出,其适用于浅部充填体线性滑移破坏分析,对于深部的非线性挤出破坏不适用,如图 3 所示。对于深部复杂采充应力环境下,充填体的面力因素和体力因素参数在三维空间上用解析法表征难度加大,采用数值模拟方法分析是很好的突破口,但需要耦合其他理论方法弥补现有数值模拟方法定量评价的不足。

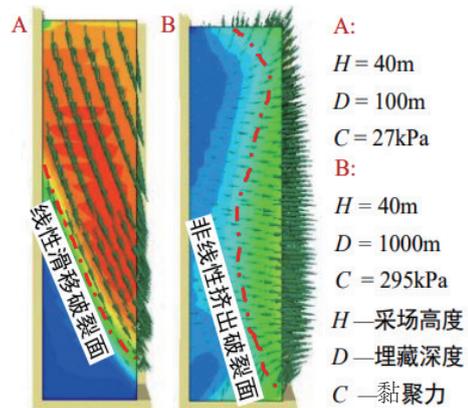


图 3 不同深度充填体位移云图^[50]
Fig. 3 Displacement nephogram of filling body with different depths

4 深部充填体强度需求计算方法展望

建立基于有限元理论与机器学习算法耦合的目标充填体强度需求迭代搜索计算模型,确定不同采充时序过程目标充填体的危险滑移面,获取破坏区体积与位置、安全系数稳定性定量评价指标,形成深部充填体强度需求计算方法,可以优化深部充填体强度需求计算理论。

4.1 对目标充填体的稳定性进行定性评价及信息提取

选取采充时序过程工程尺度三维数值计算工况中典型的充填体模型,作为深部充填体强度需求三维有限元模型。目标充填体网格必须采用映射实体生成的六面体网格,尺寸根据计算精度需要确定,其他区域网格可以采用四面体和六面体混合格网,根据目标充填体影响区域矿体开挖与充填顺序进行计算模拟。对影响区域矿体开挖与充填工序的三向位移与应力数据进行提取与分析,提取整个目标充填体的塑性区云图进行分析。通过位移等值面、应力与充填体强度比、塑性区体积多指标信息综合分析,对目标充填体的稳定性进行定性评价。对目标充填体进行坐标位置与数据(位移、应力、塑性应变)信息提取的线点布设,如图4所示。

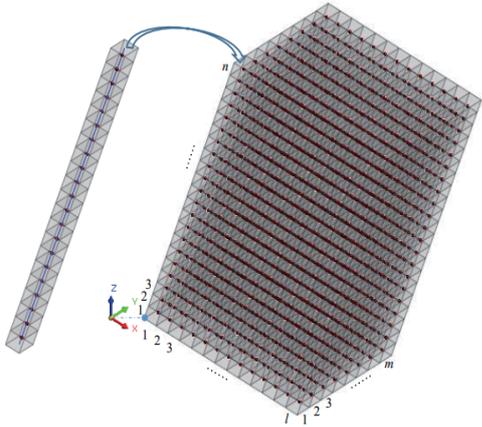


图4 有限元模型目标充填体信息提取线点布设
Fig. 4 Layout of line points for information extraction of target filling body in finite element model

4.2 目标充填体模型重构及稳定性定量评价

先将目标充填体信息提取线点的坐标数据和位移场数据导入到MATLAB中,对有限元网格通过线点信息进行网格重构,如图5所示,再对每条信息提取线上的点进行危险破坏点搜索,标定潜在破坏点坐标信息并采用lowess方法进行平滑处理获得潜在三维破坏面。最后,采用加权平均整体安全系数计算方法确定目标充填体的安全系数,计算破坏区域体积及其与目标充填体对应区域位置,对目标充填体稳定性进行定量评价。

4.3 深部目标充填体强度需求迭代搜索计算

综合有限元模型的稳定性定性评价与机器学习算法的稳定性定量评价,结合目标充填体区域矿体采充时序,形成目标充填体强度需求迭代搜索计算模型与流程,如图6所示。根据强度需求计算流程,初选

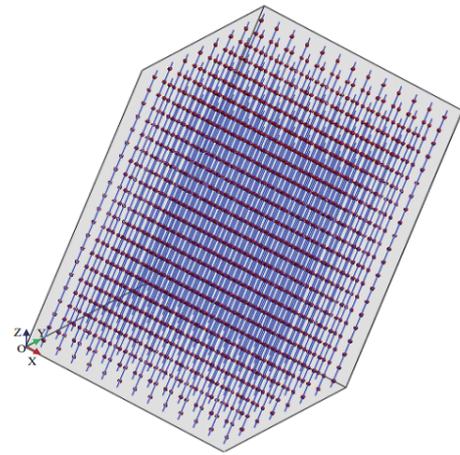


图5 充填体信息网格重构
Fig. 5 Reconstruction of information grid of filling body

一种灰砂配比的充填体参数进行计算,根据有限元的稳定性定性评价分析结果进行迭代搜索(进行不同灰砂配比胶结充填体参数替换,非胶结充填体灰砂配比不变)得出临界强度参数,提取破坏区域目标充填体的位移、应力、塑性应变数据值设定为允许值,进行基于机器学习算法的稳定性定量评价,根据需要设定安全系数,再次进行强度需求计算流程的迭代优化,最终确定目标充填体强度。

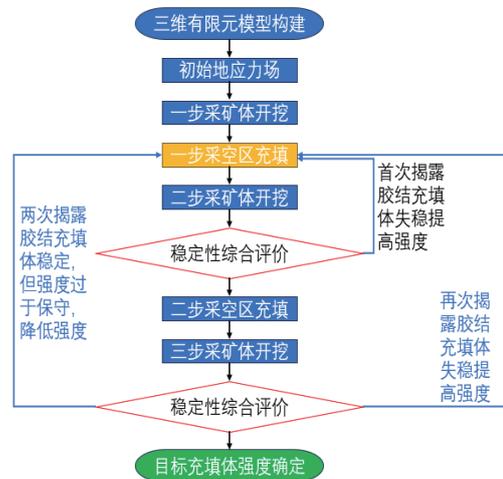


图6 目标充填体强度需求迭代搜索计算模型和流程
Fig. 6 Iterative search calculation model and process for strength requirement of target backfill

5 结语

金属矿产资源作为我国工业发展的基石,在推动科技进步、保障国家安全方面具有不可替代的作用。随着“绿色低碳”转型的深入,金属矿充填开采成为了矿业领域关注的焦点。

(1)充填体的力学性能是采矿工程设计与施工中的关键因素,其强度与稳定性受到多种因素的影响,其中包括胶凝剂的性质、灰砂配比的优化、充填骨料的粒度分布与质量,以及养护过程中环境条件的控制

等。通过综合考虑各要素的影响机制,能够优化充填体的力学性能,确保其具备足够的抗压强度和稳定性。

(2)在充填体强度的设计过程中,依赖单一的计算方法是不够准确和科学的。实际操作中,应该融合多种计算方法,综合利用不同技术的优势,对充填体所需的强度进行全面评估。通过将各种方法得到的结果进行交叉比对和分析,可以从多个维度验证设计的合理性,不仅提高了设计方案的准确度,也确保了工程实践中充填体的稳定性和安全性。

(3)矿山充填环节在总成本中占据了相当大的比重,这一直是限制充填采矿法广泛应用的一个重要因素。然而,人工智能技术的快速发展为矿山充填领域带来了前所未有的新机遇和挑战。通过利用人工智能在数据处理、预测分析及自动化控制方面的强大能力,可以显著提高充填效率,降低操作成本,从而优化整个采矿过程。

(4)针对深部充填体的非线性挤出破坏特征,提出了耦合数值计算与人工智能的解决方法,形成了深部充填体强度需求计算模型思想,有望推动矿山充填与绿色协同发展。

参考文献:

- [1] 王俊. 空场嗣后充填连续开采胶结体强度模型及其应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
WANG J. Strength model of cemented body for continuous mining with subsequent filling in open stope and its application[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [2] 赵兴东, 周鑫, 赵一凡, 等. 深部金属矿采动灾害防控研究现状与进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2522-2538.
ZHAO X D, ZHOU X, ZHAO Y F, et al. Present situation and progress of research on prevention and control of mining disasters in deep metal mines[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2021, 52(8): 2522-2538.
- [3] 蔡美峰, 薛鼎龙, 任春华. 金属矿深部开采现状与发展战略[J]. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417-426.
CAI M F, XUE D L, REN F H. Present situation and development strategy of deep mining of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426.
- [4] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE H P. Research progress of deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of Coal, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [5] 程海勇, 吴爱祥, 吴顺川, 等. 金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J]. 工程科学学报, 2022, 44(1): 11-25.
CHENG H Y, WU A X, WU S C, et al. Research status and development trend of solid waste filling in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1): 11-25.
- [6] 郭利杰, 刘光生, 马青海, 等. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4182-4200.
GUO L J, LIU G S, MA Q H, et al. Research progress on application of filling mining technology in metal mines[J]. Journal of Coal, 2022, 47(12): 4182-4200.
- [7] JIANG H Q, QI Z J, YILMAZ E, et al. Effectiveness of alkali-activated slag as alternative binder on workability and early age compressive strength of cemented paste backfills[J]. Construction and Building Materials, 2019, 218: 689-700.
- [8] SUN Q, LI B, TIAN S, et al. Creep properties of geopolymer cemented coal gangue-fly ash backfill under dynamic disturbance[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 644-654.
- [9] WU D, DENG T F, ZHAO R K. A coupled THMC modeling application of cemented coal gangue-fly ash backfill[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 326-336.
- [10] 巴蕾, 韦寒波, 温震江, 等. 废石-铜渣尾砂混合骨料配比优化试验[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(2): 31-37.
BA L, WEI H B, WEN Z J, et al. Optimization test of mixed aggregate ratio of waste rock-copper slag tailings[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(2): 31-37.
- [11] WANG S, SONG X P, WEI M L, et al. Strength characteristics and microstructure evolution of cemented tailings backfill with rice straw ash as an alternative binder[J]. Construction and Building Materials, 2021, 297.
- [12] MUNSHI S, SHARMA P R. Utilization of rice straw ash as a mineral admixture in construction work[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 11637-644.
- [13] 李杰林, 李奥, 郝建璋, 等. 提钽炉渣-铁基全尾砂-水泥胶结充填体配比实验研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(6): 838-846.
LI J L, LI A, HAO J Z, et al. Experimental study on the ratio between Ti-bearing blast furnace slag-iron-based full tailing sand and cement in cementitious filling[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(6): 838-846.
- [14] 唐亚男, 付建新, 宋卫东, 等. 分层胶结充填体力学特性及裂纹演化规律[J]. 工程科学学报, 2020, 42(10): 1286-1298.
TANG Y N, FU J X, SONG W D, et al. Mechanical characteristics and crack evolution law of layered cemented filling[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(10): 1286-1298.
- [15] 魏晓明, 郭利杰, 陈鑫政, 等. 金厂河多金属矿尾砂胶结充填试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(6): 42-46.
WEI X M, GUO L J, CHEN X Z, et al. Experimental study on cemented filling of tailings in Jinchanghe polymetallic mine[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(6): 42-46.
- [16] 熊朝辉, 谭玉叶, 楚立申, 等. 高阶嗣后分层胶结充填体强度及结构优化研究[J]. 金属矿山, 2022(3): 35-42.
XIONG C H, TAN Y Y, CU L S, et al. Study on strength and structure optimization of high-stage subsequent layered cemented backfill[J]. Metal Mine, 2022(3): 35-42.
- [17] 汪杰, 宋卫东, 谭玉叶, 等. 水平分层胶结充填体损伤本构模型及强度准则[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1731-1739.
WANG J, SONG W D, TAN Y Y, et al. Damage constitutive model and strength criterion of horizontal layered cemented backfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1731-1739.
- [18] 杨仕教, 苏帅, 王富林. 高浓度全尾砂胶结充填体强度规律分析[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(3): 847-852.
YANG S J, SU S, WANG F L. Analysis of strength law of cemented backfill with high concentration full tailings[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2019, 38(3): 847-852.
- [19] 胡凡, 彭亮, 仵峰峰, 等. 基于BP神经网络模型的充填体强度值

- 预测[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(6): 60-65.
HU F, PENG L, WU F F, et al. Prediction of strength value of backfill based on BP neural network model[J]. Nonferrous Metal (Mine Section), 2021, 73(6): 60-65.
- [20] 齐冲冲, 杨星雨, 李桂臣, 等. 新一代人工智能在矿山充填中的应用综述与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 688-700.
QI C C, YANG X Y, LI G C, et al. Review and prospect of the application of new generation artificial intelligence in mine filling[J]. Journal of Coal, 2021, 46(2): 688-700.
- [21] 董培鑫, 王忠红, 高谦, 等. 鞍钢矿山全尾砂新型充填胶凝材料配方正交试验与优化[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(12): 47-50.
DONG P X, WANG Z H, GAO Q, et al. Orthogonal test and optimization of new filling cementing material formula for all tailings in angang mine[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(12): 47-50.
- [22] 王明强. 齐大山铁矿选矿厂重选尾矿回收利用研究[J]. 工程建设, 2018, 50(5): 6-10.
WANG M Q. Study on recovery and utilization of gravity tilings in Qidashan iron mine concentrator[J]. Engineering Construction, 2018, 50(5): 6-10.
- [23] 李茂辉. 低活性水淬渣基早强充填胶凝材料开发与水化机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
LI M H. Development and hydration mechanism of low-activity water-quenched slag-based early-strength filling cementing material[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [24] 刘丹. 铁尾矿粉泡沫混凝土配合比及其性能的试验研究[D]. 阜新: 辽宁科技大学, 2020.
LIU D. Experimental study on mix proportion and performance of iron tailings powder foam concrete[D]. Fuxin: Liaoning University of Science and Technology, 2020.
- [25] 王有团. 金川低成本充填胶凝材料及高浓度料浆管输特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
WANG Y T. Study on pipeline transportation characteristics of low-cost filling cementitious materials and high-concentration slurry in Jinchuan[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [26] 王晓宇, 乔登攀. 废石-全尾砂高浓度充填料浆管输阻力影响因素分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2010, 62(4): 61-65.
WANG X Y, QIAO D P. Analysis of influencing factors on pipeline transportation resistance of waste rock-tailings high concentration filling slurry[J]. Nonferrous Metal (Mine Section), 2010, 62(4): 61-65.
- [27] 王楚涵, 韩亮, 田晓曦, 等. 细颗粒尾砂含量对充填体强度影响的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(5): 99-103.
WANG C H, HAN L, TIAN X X, et al. Experimental study on the influence of fine tailings content on the strength of filling body[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(5): 99-103.
- [28] 李洪宝, 甘德清, 鄂鑫雨, 等. 尾砂粒度对充填体早期强度影响的试验研究[J]. 金属矿山, 2021(3): 34-39.
LI H B, GAN D Q, E X Y, et al. Experimental study on the influence of tailings particle size on the early strength of backfill[J]. Metal Mine, 2021(3): 34-39.
- [29] LIU G S, LI L, YAO M K, et al. An investigation of the uniaxial compressive strength of a cemented hydraulic backfill made of alluvial sand[J]. Minerals, 2017, 7(1).
- [30] 刘超, 韩斌, 孙伟, 等. 高寒地区废石破碎胶结充填体强度特性试验研究与工业应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 139-147.
LIU C, HAN B, SUN W, et al. Experimental study and industrial application of strength characteristics of waste rock broken cemented backfill in alpine region[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 139-147.
- [31] 焦国芮, 郝益民, 杨子龙, 等. 胶结充填体受温度作用的影响分析[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(3): 46-49.
JIAO G R, HAO Y M, YANG Z L, et al. Analysis of the influence of temperature on cemented backfill[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(3): 46-49.
- [32] 王炳文, 甘肃, 董平波, 等. 高寒地区尾砂胶结充填体固结特性试验研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(8): 2446-2457.
WANG B W, GAN S, DONG P B, et al. Experimental study on consolidation characteristics of tailings cemented backfill in alpine region[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(8): 2446-2457.
- [33] 徐文彬, 万昌兵, 田喜春. 温度裂隙对充填体强度耦合效应及裂纹扩展模式[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 612-619.
XU W B, WAN C B, TIAN X C. Coupling effect of temperature crack on strength of filling body and crack propagation mode[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(3): 612-619.
- [34] 郑迪, 薛改利, 宋卫东. 基于不同养护龄期的充填体强度多元线性回归分析[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(6): 21-24.
ZHENG D, XUE G L, SONG W D. Multivariate linear regression analysis of backfill strength based on different curing ages[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(6): 21-24.
- [35] 王永岩, 黄飒, 于卓群, 等. 考虑龄期的全尾砂胶结充填体强度预测模型建立及试验验证[J]. 煤炭技术, 2021, 40(8): 1-3.
WANG Y Y, HUANG S, YU Z Q, et al. Establishment and experimental verification of strength prediction model of cemented backfill with full tailings considering age[J]. Coal Technology, 2021, 40(8): 1-3.
- [36] 张福学, 康志强, 辛东夫. 某铁矿胶结充填体特性试验及配比研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(2): 38-41.
ZHANG F X, KANG Z Q, XIN D F. Experimental study on characteristics and proportioning of cemented backfill in an iron mine[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(2): 38-41.
- [37] 卢宏建, 王奕仁, 张友志, 等. 考虑接触面倾角的充填体——围岩组合体能量特征分析[J]. 金属矿山, 2022(8): 9-19.
LU H J, WANG Y Y, ZHANG Y Z, et al. Analysis of energy characteristics of backfill-surrounding rock combination considering contact angle[J]. Metal Mine, 2022(8): 9-19.
- [38] LU H J, WANG Y R, GAN D Q, et al. Numerical investigation of the mechanical behavior of the backfill-rock composite structure under triaxial compression[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(5): 802-812.
- [39] WANG Y R, LU H J, WU J. Experimental investigation on strength and failure characteristics of cemented paste backfill-rock composite under uniaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2021, 304: 1-14.
- [40] 王明旭. 胶结充填体与围岩复合体的力学特性[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 445-453.
WANG M X. Mechanical properties of cemented backfill and

- surrounding rock complex[J]. *Journal of Coal*, 2019, 44(2): 445–453.
- [41] 杨建桥. 某矿自立胶结充填体的稳定性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
YANG J Q. Study on stability of self-supporting cemented backfill in a mine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- [42] 蔡嗣经. 矿山充填力学基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
CAI S J. Fundamentals of mine filling mechanics[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [43] 陈玉宾, 乔登攀, 孙宏生, 等. 上向水平分层充填体的强度模型及应用[J]. *金属矿山*, 2014(10): 27–31.
CHEN Y B, QIAO D P, SUN H S, et al. Strength model of upward horizontal layered backfill and its application[J]. *Metal Mine*, 2014(10): 27–31.
- [44] 卢平. 确定胶结充填体强度的理论与实践[J]. *黄金*, 1992(3): 14–19.
LU P. Theory and practice of determining the strength of cemented backfill[J]. *Gold*, 1992(3): 14–19.
- [45] 卢宏建, 武晓军, 蔡晓盛, 等. 胶结充填体—围岩组合体剪切强度与破坏特征[J]. *金属矿山*, 2023(5): 97–103.
LU H J, WU X J, CAI X S, et al. Shear strength and failure characteristics of cemented backfill-surrounding rock combination[J]. *Metal Mine*, 2023(5): 97–103.
- [46] 李电辉, 孙德胜. 三鑫矿业公司充填体强度与采矿方法匹配研究[J]. *黄金*, 2013, 34(6): 39–42.
LI D H, SUN D S. Study on matching between filling body strength and mining method in SanxCLmpany[J]. *Gold*, 2013, 34(6): 39–42.
- [47] ABTIN J, MICHEL A, LI L. Three-dimensional stress state in inclined backfilled stopes obtained from numerical simulations and new closed-from solution[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(6): 810–828.
- [48] 卢宏建, 王奕仁, 武婕, 等. 充填体——围岩组合体力学特性及破裂演化特征 RFPA3D 模拟[J]. *金属矿山*, 2022(6): 1–8.
LU H J, WANG Y R, WU J, et al. Mechanical characteristics and fracture evolution characteristics of backfill-surrounding rock combination RFPA3D simulation[J]. *Metal Mine*, 2022(6): 1–8.
- [49] 付玉华, 占飞, 余信橙. 高阶段采场充填体稳定性的数值分析[J]. *中国矿业*, 2017, 26(7): 111–115.
FU Y H, ZHAN F, YU X C. Numerical analysis of stability of filling body in high-stage stope[J]. *China Mining*, 2017, 26(7): 111–115.
- [50] WANG R F, ZENG F T, LI L. Stability analyses of side-exposed backfill considering mine depth and extraction of adjacent stope[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 142.
- [51] 卢宏建, 武晓军, 武婕. 考虑接触面特性与采充时序的胶结充填体稳定性评价[J]. *金属矿山*, 2023(4): 1–7.
LU H J, WU X J, WU J. Stability evaluation of cemented backfill considering contact surface characteristics and mining and filling sequence[J]. *Metal Mine*, 2023(4): 1–7.
- [52] QI C, FOURIE A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 144: 106025.
- [53] 秦原, 张斌斌, 谢刚. SVM 模型预测充填体强度[J]. *江西建材*, 2020(7): 10–12+14.
QIN Y, ZHANG B B, XIE G. Prediction of backfill strength by SVM model[J]. *Jiangxi Building Materials*, 2020(7): 10–12+14.
- [54] LIU J D, LI G C, YANG S, et al. Prediction models for evaluating the strength of cemented paste backfill: a comparative study[J]. *Minerals*, 2020, 10(11).
- [55] 王志军, 吕文生, 杨鹏, 等. 充填体强度的支持向量机设计匹配模型[J]. *金属矿山*, 2016(11): 34–38.
WANG Z J, LV W S, YANG P, et al. Support vector machine design matching model of filling body strength[J]. *Metal Mine*, 2016(11): 34–38.
- [56] 董越, 杨志强, 高谦. 正交试验协同 BP 神经网络模型预测充填体强度[J]. *材料导报*, 2018, 32(6): 1032–1036.
DONG Y, YANG Z Q, GAO Q. Prediction of the strength of backfill by orthogonal test combined with BP neural network model[J]. *Materials Reports*, 2018, 32(6): 1032–1036.
- [57] LI E, ZHOU J, SHI X Z, et al. Developing a hybrid model of salp swarm algorithm-based support vector machine to predict the strength of fiber-reinforced cemented paste backfill[J]. *Engineering with Computers*: 1–22[2021–02–02].
- [58] 白春红. 基于 SVM 模型的充填体强度与采场稳定性需求智能匹配研究[J]. *中国矿业*, 2019, 28(11): 104–108.
BAI C H. Research on intelligent matching of backfill strength and stope stability demand based on SVM model[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(11): 104–108.
- [59] 周士霖. 深部开采充填体稳定性及与岩体智能匹配研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
ZHOU S L. Study on stability of deep mining backfill and its intelligent matching with rock mass[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [60] 王志会, 吴爱祥, 王洪江. 基于 PSO-BPNN 的充填体围岩界面抗剪强度预测[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(3): 130–134.
WANG Z H, WU A X, WANG H J. Prediction of shear strength of surrounding rock interface of backfill based on PSO-BPNN[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(3): 130–134.
- [61] ZHANG B, LI K Q, ZHANG S Q, et al. Strength prediction and application of cemented paste backfill based on machine learning and strength correction[J]. *Heliyon*, 2022, 8(8): e10338–e10338.
- [62] MITCHELL R J, OLSEN R S, SMITH J D. Model studies on cemented tailings used in mine backfill[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 19(1).
- [63] LI L. Generalized solution for mining backfill design[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2014, 14(3).
- [64] LIU Z X, LAN M, XIAO S Y, et al. Damage failure of cemented backfill and its reasonable match with rock mass[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(3).
- [65] YANG P, LI L, AUBERTIN M. A new solution to assess the required strength of mine backfill with a vertical exposure[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(10).
- [66] ZHAO X, FOURIE A, QI C C. An analytical solution for evaluating the safety of an exposed face in a paste backfill stope incorporating the arching phenomenon[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2019, 26(10): 1206–16.
- [67] 张常光, 蔡明明, 祁航, 等. 考虑充填顺序与后壁黏结力的采场充填计算统一解[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(2): 226–36.
ZHANG C G, CAI M M, QI H, et al. Unified solution of stope filling calculation considering filling sequence and cohesive force of back

- wall[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(2): 226–36.
- [68] 王俊, 乔登攀, 韩润生, 等. 阶段空场嗣后充填胶结体强度模型及应用[J]. *岩土力学*, 2019, 40(3): 1105–12.
WANG J, QIAO D P, HAN R S, et al. Strength model of cemented body after filling in stage open stope and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(3): 1105–12.
- [69] 杨磊, 邱景平, 孙晓刚, 等. 阶段嗣后胶结充填体矿柱强度模型研究与应用[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(9): 2316–22.
YANG L, QIU J P, SUN X G, et al. Study and application of pillar strength model of cemented backfill after stage[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2018, 49(9): 2316–22.
- [70] 刘光生, 杨小聪, 郭利杰. 阶段空场嗣后充填体三维拱应力及强度需求模型[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1391–403.
LIU G S, YANG X C, GUO L J. Three-dimensional arch stress and strength demand model of filling body after stage open stope[J]. *Journal of Coal*, 2019, 44(5): 1391–403.

Development Status and Prospect of Strength Demand for Backfill in Metal Mines

LU Hongjian¹, XIA Chuanxiang¹, WU Libin², MOU Chao¹, LIU Zhiyi¹

1. *School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China;*

2. *ShuangyashanJianlong Mining co., Ltd., Shuangyashan 155199, Heilongjiang, China*

Abstract: The exploitation of mineral resources is vital to national security and the economy, and with the gradual decline of shallow mineral resources, deep mining has risen to the level of a national strategy. Backfill has gradually become the preferred method of underground mining due to its advantages such as high safety and low impact on the surface environment. Determining the reasonable strength of the backfill is the key to solving the problem of balancing the safety and economy of backfill mining, and it is the core issue for the successful application and healthy development of backfill mining technology. The influence of factors such as cementitious agents, lime sand ratio, backfill aggregates, curing environment, and contact surface characteristics on the backfill strength are sorted out. The backfill strength design methods such as empirical analogy, mechanical model, numerical analysis, and artificial intelligence are summarized. The current research status of backfill strength requirement are summarized, and new ideas suitable for calculating the deep backfill strength requirement is proposed. It aims to improve the calculation theory of deep backfill strength demand, optimize the backfill strength design, and promote the research and application of deep metal mine backfill mining.

Keywords: metal mine; backfill mining; backfill strength; demand model; influencing factor; design method

引用格式: 卢宏建, 夏传祥, 武立彬, 牟超, 刘志义. 金属矿山充填体强度需求发展现状与展望[J]. *矿产保护与利用*, 2024, 44(2): 1–10.

LU Hongjian, XIA Chuanxiang, WU Libin, MOU Chao, LIU Zhiyi. Development status and prospect of strength demand for backfill in metal mines[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2024, 44(2): 1–10.

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

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn