# 高阶段采场充填体应力解析与强度设计模型①

路燕泽[1,2], 甘德清[1,3,4], 刘志义[1,3,4], 孙海宽[1,3,4]
(1.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 2.河北钢铁集团矿业有限公司, 河北 唐山 063000; 3.华北理工大学 矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心, 河北 唐山 063210; 4.华北理工大学 河北省矿山绿色智能开采技术创新中心, 河北 唐山 063210)

**摘 要**: 针对河北中关铁矿高阶段采场充填体的受力特征,通过构建高阶段采场侧压力、剪切应力与垂直应力解析模型,探明采场宽度、高度及长度对充填体应力分布的影响规律,提出考虑应力分布的高阶段采场充填体强度设计模型,并通过工程应用验证模型的可靠性。结果表明:在与非胶结或低配比胶结充填体接触侧充填体底部侧压力达到最大;剪切应力呈先增大后减小的变化趋势,在充填体中部剪切应力达到最大,且受采场宽度和高度影响显著;充填体垂直应力随采场长度呈线性增长,采场长度超过 45 m 后暴露高度对垂直应力的影响逐渐显著;综合考虑充填体应力分布特征、围岩接触面剪切力与水平面夹角,构建了 3 种充填体强度设计模型,结合中关铁矿的工况条件,提出了差异化强度设计建议。现场工业试验验证了充填体强度设计模型的准确性与可靠性。

**关键词**: 高阶段采场; 充填体; 充填开采; 应力解算; 强度模型; 强度设计; 侧压力; 采场结构
**中图分类号**: TD853 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.011
**文章编号**: 0253-6099(2026)02-0073-010

# Stress Analysis and Strength Design Model of Backfill in High-Level Stopes

LU Yanze[1,2], GAN Deqing[1,3,4], LIU Zhiyi[1,3,4], SUN Haikuan[1,3,4]
(1.*School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan* 063210, *Hebei, China*; 2.*Hebei Iron and Steel Group Mining Co., Ltd., Tangshan* 063000, *Hebei, China*; 3.*Collaborative Innovation Center for Green Development of Mineral Resources and Ecological Restoration, North China University of Science and Technology, Tangshan* 063210, *Hebei, China*; 4.*Hebei Provincial Technology Innovation Center for Green and Intelligent Mining, North China University of Science and Technology, Tangshan* 063210, *Hebei, China*)

**Abstract**: Aiming at the mechanical characteristics of backfill in high-level stopes of Zhongguan Iron Mine in Hebei Province, analytical models for lateral pressure, shear stress and vertical stress of high-level stopes were established, and the influence laws of stope width, height and length on the stress distribution of backfill were clarified. A strength design model for backfill in high-level stopes with stress distribution taken into consideration was proposed, and the reliability of the model was verified through engineering application. The results show that the lateral pressure reaches the maximum at the bottom of the backfill on the side contacting uncemented or low-ratio cemented backfill; the shear stress increases first and then decreases, peaking at the middle of the backfill, and is significantly affected by stope width and height; the vertical stress of backfill increases linearly with stope length; when the stope length exceeds 45 m, the influence of exposed height on vertical stress becomes gradually prominent. Based on the comprehensive consideration of the stress distribution characteristics of backfill, the shear force at the contact surface of the surrounding rock and the included angle of the horizontal plane, three types of backfill strength design models were constructed. In combination with the working conditions of Zhongguan Iron Mine, a differentiated strength design scheme was selected. Industrial tests on site have verified the accuracy and reliability of the proposed backfill strength design model.

**Key words**: high-level stope; backfill; backfill mining; stress analysis; strength model; strength design; lateral pressure; stope structure

① **收稿日期**: 2025-12-06
**基金项目**: 河北省博士研究生创新资助项目(CXZZBS2024137);河北省自然科学基金(E2024209141);国家自然科学基金(52204134)
**作者简介**: 路燕泽(1984—),男,河北衡水人,博士研究生,正高级工程师,主要从事采矿工艺技术研究工作。E-mail:luyanze@163.com
**通信作者**: 刘志义(1987—),男,山西朔州人,博士,副教授,主要从事采矿工艺方面的教学与研究工作。E-mail:ncst-lzy@ncst.edu.cn

河北中关铁矿是国内典型的厚大型铁矿,根据矿体赋存条件和厚度,南区设计采用阶段空场嗣后充填采矿法开采,北区设计采用分段凿岩阶段出矿嗣后充填采矿法开采[1-2]。矿体分两步骤开采,矿房开采结束后通过充填形成充填体,作为相邻矿柱回采时的矿柱,其承载能力对二步骤矿柱的安全高效回采具有重要影响[3-4]。针对阶段空场嗣后充填法中充填体所需强度,国内外学者主要采用经验类比法[5]、力学模型法[6-8]和数值分析法等进行推算。目前数值分析法应用相对较为广泛,相关研究利用 FLAC$^{3D}$ 等软件,并结合现场应力监测模拟开采过程,分析充填体及采场围岩的应力演化特征,进而确定充填体的强度要求[9-11]。但现有方法存在不足:首先,大多数研究中的充填体力学模型一般被简化为完全均质受力体,未能充分考虑采场宽度、高度、长度等结构参数对应力分布的耦合影响;其次,强度设计模型多基于单一受力模式,缺乏对不同受力模式下的适用性判据,导致工程应用中模型选取依据薄弱。

矿体开挖过程中,胶结充填体内的应力分布与采场结构参数密切相关[12],但现有研究往往忽略这些因素的影响。为解决不同采场结构参数下一步骤胶结充填质量及充填体片帮垮落等问题,本文以中关铁矿南区采场为工程背景,基于充填体应力解析模型,分析不同采场结构参数下充填体内部应力分布规律,提出考虑中关铁矿高阶段采场应力分布的强度设计模型,并通过工程应用对模型的可靠性进行论证,研究结果对类似矿山两步骤采场安全高效回采具有参考意义。

## 1 中关铁矿南区采矿概况

中关铁矿是国内典型的水文地质条件复杂的岩溶大水矿山,主要矿体均赋存于岩浆岩与中奥陶系灰岩的接触带及其附近灰岩裂隙中,具有含水层异常发育、地应力分布不明、岩石破碎、泥质化严重等特点。中关铁矿南区采场首采段主要在-170~-230 m 水平,厚 35 m 以上的矿体占 55.62%,平均倾角 49°,平均厚度 64.67 m,采用垂直深孔落矿阶段空场嗣后充填采矿法,设计矿房宽度 15 m、高度 60 m、长度 50 m,分两步骤开采,采矿方法[13]如图 1 所示。为了保证凿岩硐室的安全,在中部留设了 3.0 m 的条形矿柱,采场凿岩硐室如图 2 所示。

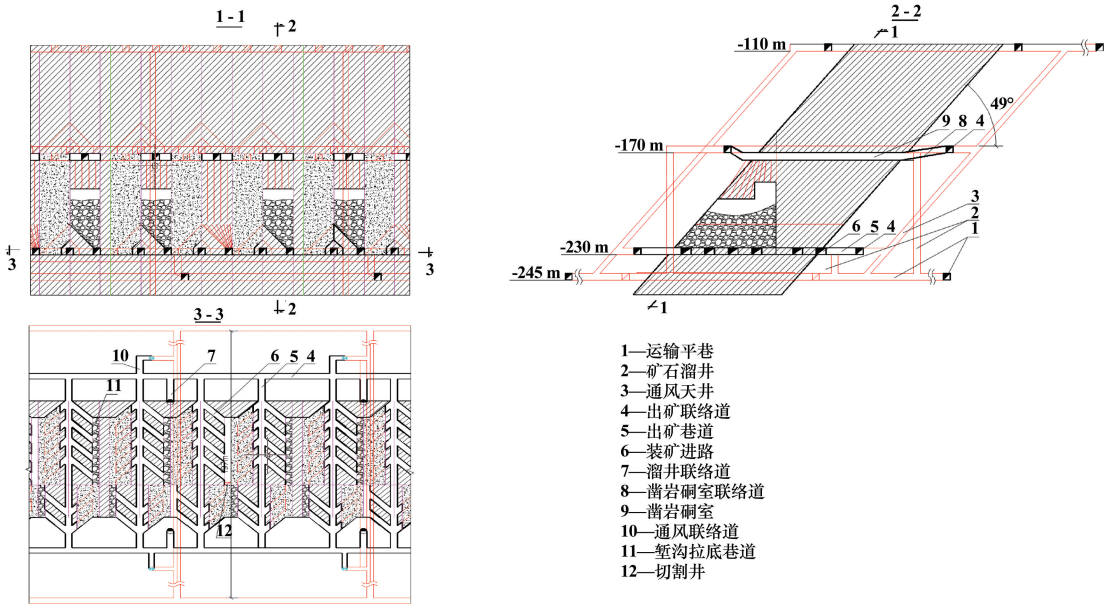



**图 1 中关铁矿南区采矿方法**

Fig. 1 Mining method for southern area of Zhongguan Iron Mine

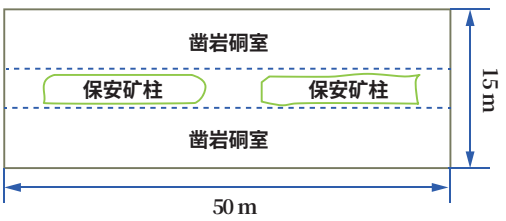



**图 2 采场凿岩硐室**

Fig. 2 Stope drilling chamber

## 2 高阶段采场胶结充填体应力解析与稳定性分析

### 2.1 高阶段采场充填体应力解析

本采矿法采用间隔回采顺序:第一步矿房开挖完毕后,采用尾砂胶结充填法进行充填,当充填体形成可靠承载能力后,再进行矿柱开挖,并采用非胶结或低配

比尾砂胶结充填体进行矿柱充填。回采矿柱时，依据周边回采情况，相邻胶结充填体的受力状态分以下 2 种模式（见图 3）：以 2#矿柱为例，其两侧的 1#与 2#矿房均已采空并充填，回采 2#矿柱时，相邻充填体（1#与 2#矿房）将承受来自两侧非胶结或低配比胶结充填体（1#与 3#矿柱）的侧压力；而以 5#矿柱为例，由于 4#矿柱和 6#矿柱尚未开采，4#矿房和 5#矿房的胶结充填体另一侧为原岩，因此，开采 5#矿柱时，4#矿房和 5#矿房的胶结充填体不存在来自散体尾砂的侧压力。在高阶段采场回采中，工况条件最差的情况是矿房充填体另一侧为非胶结或低配比胶结充填体，该工况下矿房充填体受力特征如图 4 所示。本文以该工况条件为例，进行充填体强度设计，以满足该工况条件下的安全要求。

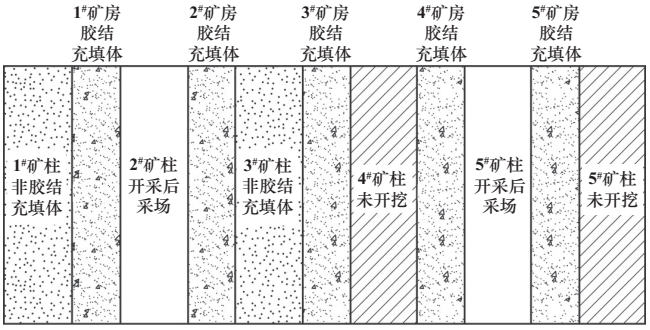



**图 3　高阶段采场划分示意图**

Fig. 3　Schematic diagram of high-level stope division

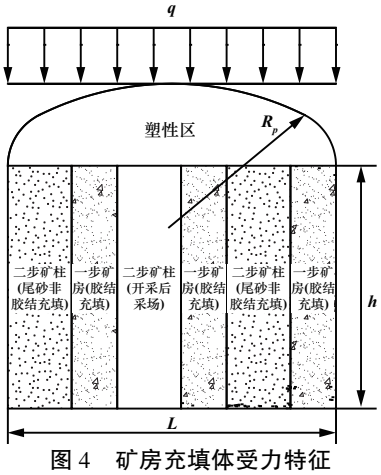



**图 4　矿房充填体受力特征**

Fig. 4　Stress characteristics of ore room backfill

由图 4 可知，矿柱回采过程中，顶板上方的扰动应力场重新分布，形成拱形卸压区。上覆岩层因失去支撑而下沉，并作用于胶结充填体，使充填体受力作用逐渐增强。随着充填体被压缩至极限变形，相邻采场的卸压拱逐渐贯通，最终在采区顶部形成一个大规模的卸压拱。此过程导致顶板岩层显著下沉，充填体与围岩共同构成相互支撑的力学体系。

上述受力分析表明，在矿柱回采过程中，充填体所承受载荷主要包括充填体的自重应力、相邻矿房充填体的侧向应力以及顶板压力 3 部分。充填体是一个受三向应力作用的半无限空间体，其内部应力分布遵循弹性力学基本方程，但充填材料具有非线性、非弹性力学特性，受采场结构参数的显著影响，充填体内部应力场呈现复杂的演化特征。

影响高阶段采场充填体应力演化的关键控制因素可归纳为几何尺寸参数、材料力学参数以及界面接触条件[9-12]。其中几何尺寸参数包括采场宽度、高度和长度，决定了充填体的空间形态与约束边界条件；材料力学参数包括充填体密度、弹性模量、泊松比等，影响应力传递效率与变形协调能力；界面接触条件包括充填体与围岩之间的黏聚力、摩擦角以及非胶结尾砂侧的侧压系数，控制应力在界面处的传递与耗散。为保证矿山安全，根据高阶段采场充填体的受力特征，构建应力解析模型，探明采场宽度、高度及长度对充填体应力分布的影响规律，

## 2.2　侧向应力与剪切应力解析模型及结果分析

矿柱开采过程中，充填体的一侧受到侧面充填体的侧压力作用，另一侧则完全暴露不受力，为临空自由面，侧压力作用下胶结充填体力学模型如图 5 所示，充填体内部的垂直应力 $\sigma_x$ 主要为充填体自重应力 $\rho gH$ 和顶板压力 $\sigma_0$，水平方向载荷 $\sigma_y$ 主要为非胶结充填体或低配比尾砂胶结充填体的压力 $\lambda\gamma gH$。

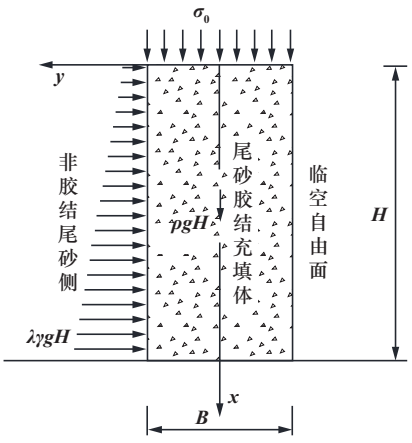



**图 5　侧压力作用下胶结充填体力学模型**

Fig. 5　Mechanical model of cemented backfill under lateral pressure

该工况下，假设充填体在长度方向上无限长，该问题简化为平面应变问题。解析模型采用应力函数表示：

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = xf(y) \tag{1}$$

式中 $\varphi$ 为应力函数。

对式(1)中 $x$ 进行积分,得:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x}=\frac{x^2}{2}f(y)+f_1(y) \tag{2}$$

再对式(2)中 $x$ 进行积分,有:

$$\varphi=\frac{x^3}{6}f(y)+xf_1(y)+f_2(y) \tag{3}$$

结合文献资料与解析函数理论,尾砂胶结充填体侧压力 $\sigma_y$ 和剪切应力 $\tau_{xy}$[15]为:

$$\sigma_y=\lambda\gamma gx\left(\frac{2}{B^3}y^3-\frac{3}{2B}y-\frac{1}{2}\right) \tag{4}$$

$$\tau_{xy}=-\lambda\gamma gx^2\left(\frac{3}{B^3}y^2-\frac{3}{4B}\right)-\lambda\gamma g\left(-\frac{1}{B^3}y^4+\frac{3}{10B}y^2-\frac{B}{80}\right)+\rho g\left(\frac{3}{B}y^2+y-\frac{B}{4}\right) \tag{5}$$

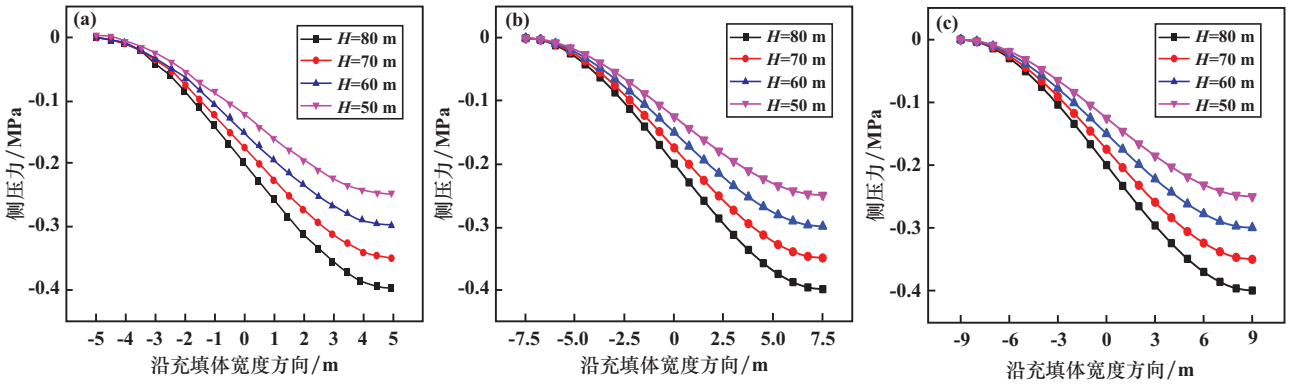
式中:$\lambda$ 为非胶结尾砂或低配比胶结充填体侧压系数;$\gamma$ 为尾砂容重;$g$ 为重力加速度;$B$ 为充填体宽度。

根据充填体侧压力解析模型,结合中关铁矿南区采场结构参数,分析不同充填体暴露高度和宽度条件下充填体底部的侧压力分布规律[沿充填体宽度方向 $y$ 为正值(左侧)时为胶结充填体与非胶结尾砂接触侧,$y$ 为负值(右侧)时为临空自由面]。不同宽度充填体底部的侧压力如图 6 所示。

由图 6 可知,从充填体右侧往左侧延伸时,充填体的侧压力呈先快速增加后趋于平缓的变化趋势,整体侧压力变化率介于 25%~40%,并且在不同充填体宽度条件下,变化趋势近似相同,即宽度对侧压力的变化敏感性较低。在同一宽度下,当充填体暴露高度由 50 m 逐渐增大至 80 m 时,非胶结或低配比尾砂胶结充填体侧压力值增加。

综上所述,当充填体由完全暴露侧向非胶结或低配比尾砂胶结充填体接触侧移动时,充填体的侧压力逐渐增大,同时受暴露高度影响显著,即暴露高度越大,侧压力越大,且增长率越大。

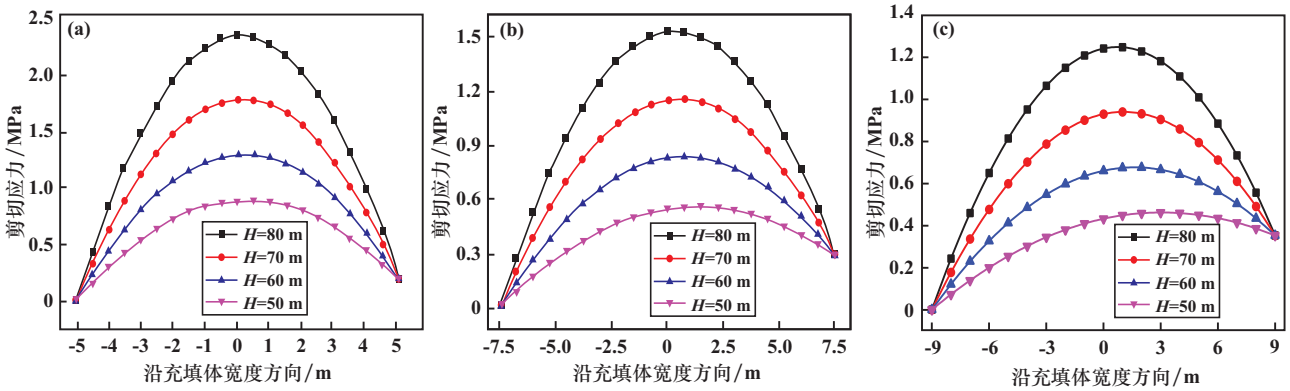
根据式(5)计算充填体底部剪切应力。充填体宽度由 10 m 增大至 18 m、暴露高度由 50 m 增大至 80 m 时,不同宽度充填体底部剪切应力如图 7 所示。




(a) 10 m; (b) 15 m; (c) 18 m

**图 6 不同宽度充填体底部的侧压力**

Fig. 6 Lateral pressure at bottom of backfill with different widths




(a) 10 m; (b) 15 m; (c) 18 m

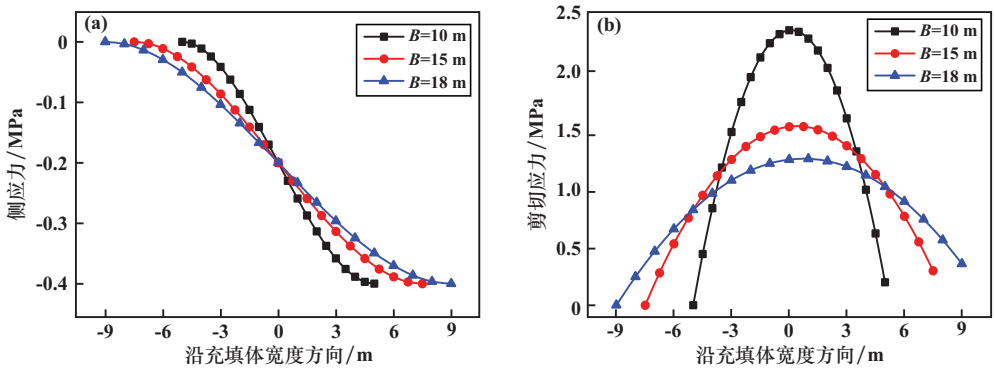
**图 7 不同宽度充填体底部剪切应力**

Fig. 7 Shear stress at bottom of backfill with different widths

由图 7 可知，充填体从右往左延伸时，底部剪切应力呈先增大后减小的变化趋势，该变化规律跟充填体与介质接触面的摩擦约束效应相关。靠近自由面一侧，充填体处于无侧限状态，剪切应力趋近于 0；向非胶结或低配比尾砂胶结充填体（接触介质）一侧延伸时，接触介质对充填体的侧向约束逐渐增强，剪切应力随之增大；但当接近接触介质界面时，由于充填体与接触介质之间相对位移趋于一致，剪切应力反而下降并趋于稳定值。当充填体宽度一定时，随着充填体暴露高度增大，剪切应力显著增大，表明高阶段采场充填体剪切滑移随着高度增大发生的概率逐渐升高，因此，高阶段采场充填体的抗剪强度对保证其稳定具有重要影响。

以充填体暴露高度 60 m 为例，宽度分别为 10、15、18 m 时，充填体底部侧压力和剪切应力分布情况如图 8 所示。

由图 8 可知，充填体宽度越小，侧压力和剪切应力曲线越陡，变化趋势越大。即当充填体宽度由 10 m 逐渐增大至 18 m 时，充填体底部侧压力和剪切应力均减小。这说明充填体宽度越小，其内部高应力赋存范围及大小均越显著，充填体的片帮冒落与垮塌失稳风险越高。因此，在开采设计过程中，适当增大充填体宽度，有利于降低充填体内部高应力的集中幅度，从而提升其稳定性。




（a）侧压力；（b）剪切应力

**图 8　不同宽度充填体底部侧压力和剪切应力分布（$H$=60 m）**

Fig. 8　Lateral pressure and shear stress distribution at bottom of backfill with different widths ($H$=60 m)

## 2.3　垂直应力解析模型及结果分析

高阶段采场充填体的垂直应力主要来自其自重应力与顶板上覆岩层传递的压力，其两侧主要应力为围岩或非胶结充填体。本文采用垂直应力解析模型，考虑充填体最易发生失稳的工况条件，即充填体一侧暴露、另一侧为非胶结或低配比胶结充填体，假定忽略充填体与非胶结充填体之间的垂直摩擦力，而当充填体另一侧为待采矿柱时，必须考虑两者之间的黏结力与摩擦力。

基于上述假设与边界条件，高阶段采场充填体垂直应力模型如下：

$$\sigma_x = \frac{\gamma_1 gL - 2C}{2K\tan\varphi} + \left(\frac{\gamma gL/2 + \gamma gH\cot\theta}{f} - \frac{\gamma_1 gL - 2C}{2K\tan\varphi}\right) \times \exp\left(-\frac{2K\tan\varphi}{L}y\right) \tag{6}$$

式中：$\gamma_1$ 为胶结充填体密度，kg/m$^3$；$\gamma$ 为矿石密度，kg/m$^3$；$g$ 为重力加速度；$L$ 为充填体长度；$C$ 为胶结充填体凝聚力；$\theta$ 为两侧围岩滑移角，$\theta$=45°+$\varphi$/2，$\varphi$ 为充填体长度方向两侧围岩内摩擦角；$f$ 为顶板岩石的普氏系数。

应用构建的高阶段采场充填体垂直应力解析模型，结合中关铁矿南区充填体力学参数，分析了高阶段充填体垂直应力与采场长度、高度之间的关系，如图 9 所示。

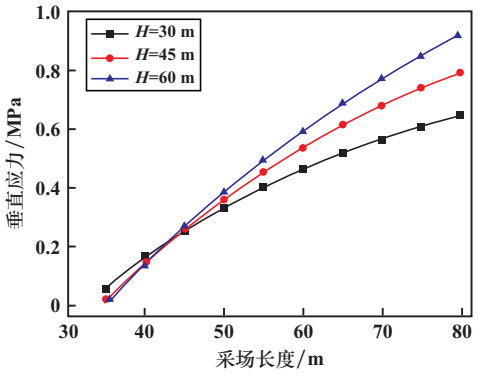



**图 9　不同高度充填体垂直应力与采场长度、高度的关系**

Fig. 9　Relationship between vertical stress of backfill with different heights and stope length and height

图 9 表明，采场高度一定时，充填体垂直应力与采场长度成正比增大关系。当采场长度小于 45 m 时，高

度对充填体垂直应力影响不大;当采场长度大于 45 m 时,充填体垂直应力随高度增大逐渐增大,表明采场长度超过 45 m 之后,采场高度对充填体垂直应力影响逐渐显著。采场长度较小时,充填体上方顶板岩层能够形成稳定的“压力拱”结构,拱脚支撑于两侧围岩,上覆岩层的大部分自重通过拱结构传递至围岩,充填体仅承受拱内岩体的重力,因而垂直应力受采场高度变化影响较小。随着采场长度增加,压力拱的跨度不断增大,当采场长度超过某一临界值后,拱结构趋于扁平化,拱效应逐渐减弱甚至失效,上覆岩层的自重开始直接作用于充填体,此时采场高度成为控制充填体垂直应力的主导因素,表现为充填体垂直应力随采场高度增大而显著上升的变化特征。

# 3 胶结充填体单侧揭露强度模型及强度设计

## 3.1 胶结充填体单侧揭露强度模型假设与分析

为建立适用于单侧揭露工况的胶结充填体强度设计模型,作出以下基本假设:① 充填体为均质各向同性材料;② 破坏面为剪切滑移面;③ 充填体与围岩接触面上的抗剪强度由黏聚力与摩擦阻力共同提供;④ 非胶结尾砂侧仅提供侧压力,不考虑其黏结作用。

根据力学分析可知,一步胶结充填体一侧为采空区、另一侧为非胶结或低配比胶结充填体时,其最容易发生破坏[15]。设胶结充填体上表面承载的竖向压力为 $P_0$,充填体自重力为 $W$,一步骤采场胶结充填体与采场两侧壁围岩接触面上的剪切力为 $S_s$,$S_s$ 作用力方向与水平面夹角为 $\beta$,一步骤采场胶结充填体底部的潜在滑动面与水平面的夹角为 $\alpha$,非胶结尾砂一侧作用在一步骤采场胶结充填体上的侧压力为 $P_b$。基于此,建立胶结充填体单侧揭露受力模型,如图 10 所示。

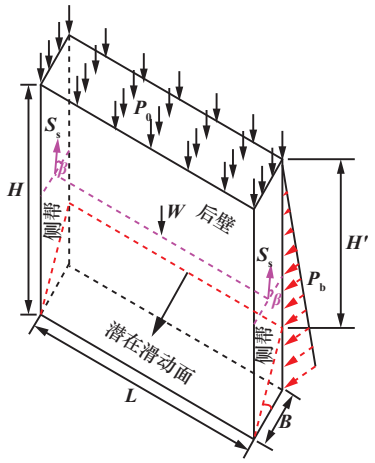



图 10 胶结充填体单侧揭露受力分析

Fig. 10 Stress analysis of single-sided exposed cemented backfill

## 3.2 胶结充填体单侧揭露强度计算模型

一步骤采场胶结充填体与采场两侧壁围岩接触面上存在剪切力,且由于充填体受侧压力 $P_b$ 的影响,单侧揭露后胶结充填体与上下盘围岩接触面的剪切力 $S_s$ 与水平面夹角 $\beta$ 可能发生不同程度的变化。因此,根据 $\beta$ 的取值情况,结合不同水平面夹角受力情况下胶结充填体单侧揭露时强度设计方法[15-16],构建 3 种典型破坏模式下的强度计算模型。

1) 模型 1。当 $\alpha=45°+\varphi/2$、$\beta=90°$ 时,即认为非胶结尾砂的侧压力 $P_b$ 对 $\beta$ 不产生影响。此时,滑移面上的下滑力 $F$ 为:

$$F=(W-2S_s)\sin\alpha+P_b\cos\alpha \tag{7}$$

滑移面上抗滑力 $T$ 为:

$$T=\frac{BLc}{\cos\alpha}+[(W-2S_s)\cos\alpha-P_b\sin\alpha]\tan\varphi \tag{8}$$

考虑图 10 中胶结充填体楔形滑动体的极限力学平衡状态,可知 $F<T$,则楔形滑动体的安全系数 $F_s$ 为:

$$F_s=\frac{\dfrac{BLc}{\cos\alpha}+[(W-2S_s)\cos\alpha-P_b\sin\alpha]\tan\varphi}{(W-2S_s)\sin\alpha+P_b\cos\alpha} \tag{9}$$

此时,充填体破坏主要由充填体自重与顶板压力共同作用引起。通过建立竖向力平衡方程与绕底部点的力矩平衡方程,可解得所需充填体强度 $c$ 为:

$$c=\frac{[F_s(W\sin\alpha+P_b\cos\alpha)-(W\cos\alpha-P_b\sin\alpha)\times\tan\varphi-2X(F_s\sin\alpha-\cos\alpha\tan\varphi)]}{\left[\dfrac{BL}{\cos\alpha}+2BH^*r_s(F_s\sin\alpha-\cos\alpha\tan\varphi)\right]} \tag{10}$$

式中 $H^*$ 为胶结充填体楔形滑动体的等效高度。

2) 模型 2。当 $\beta=\alpha=45°+\varphi/2$ 时,认为非胶结尾砂的侧压力 $P_b$ 使胶结充填体沿底部滑动面产生了整体的滑移破坏,此时胶结充填体与两侧壁围岩或矿体接触面的剪切力 $S_s$ 与底部滑动方向相反。计算该条件下的下滑力 $F$、抗滑力 $T$,并考虑楔形滑动体安全系数 $F_s$,推导得出模型 2 的充填体强度计算模型,见式(11)。

$$c=\frac{F_s(W\sin\alpha+P_b\cos\alpha)-(W\cos\alpha-P_b\sin\alpha)\tan\varphi-2X}{\dfrac{BL}{\cos\alpha}+2BH^*r_s} \tag{11}$$

3) 模型 3。当 $0°\leqslant\beta\leqslant90°$,认为在非胶结尾砂侧压力 $P_b$ 作用下,胶结充填体与两侧壁围岩或矿体接触面的剪切力 $S_s$ 与水平面夹角为任意值。通过计算下滑力 $F$、抗滑力 $T$ 以及楔形滑动体的安全系数 $F_s$,并参考莫尔圆中 Rankine 被动土压力时的方向角计算准

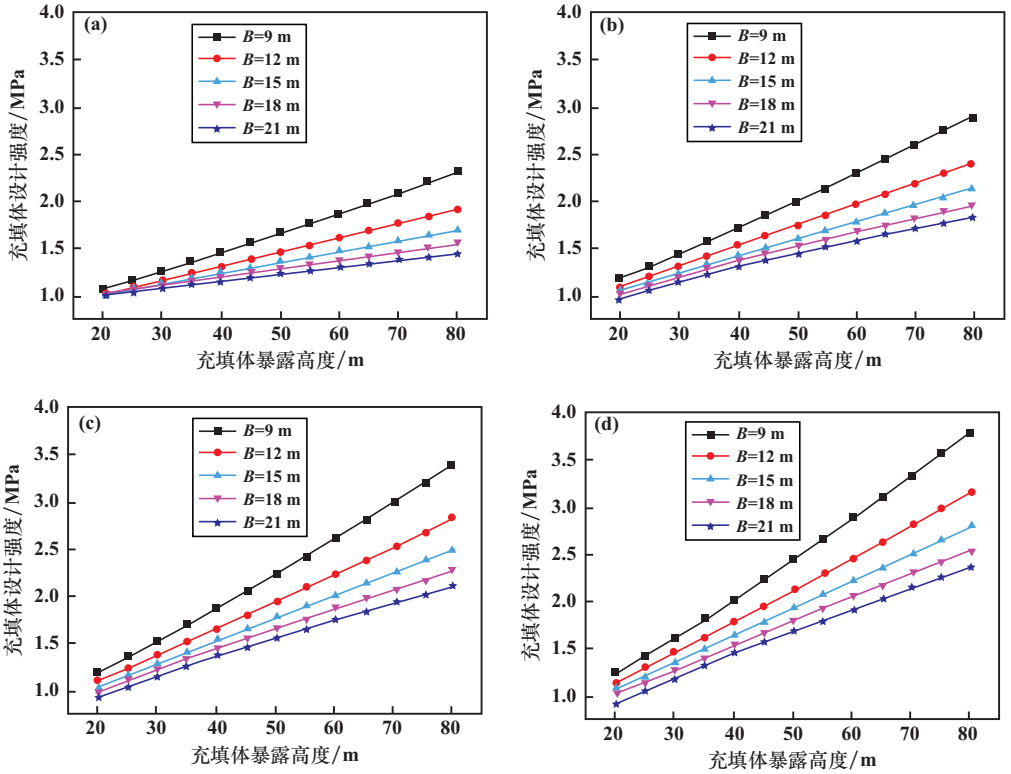
则，建立模型 3 的充填体强度计算模型，见式（12）。

$$c = \left[(W\sin\alpha + P_b\cos\alpha)\cos\varphi - (W\cos\alpha - P_b\sin\alpha)\sin\varphi - 2X\right] \Big/ \left[\frac{BL\cos\varphi}{\cos\alpha} + 2BH^{*} r_s\right] \tag{12}$$

式中：$r_s = C_s/C_c$，介于［0，1］，$C_s$ 为一步骤采场胶结充填体与上下盘围岩接触面的黏聚力，$C_c$ 为胶结充填体黏聚力；$X$ 为中间变量。

### 3.3　胶结充填体设计强度与采场参数的关系

应用模型 1，2 和 3，结合中关铁矿目前采场结构参数，对充填体强度进行设计。模型 1 不同采场结构参数下充填体设计强度如图 11 所示。由图 11 可知，模型 1 中，采场长度固定时，充填体设计强度随着充填体宽度减小呈非线性增长趋势，尤其在暴露高度较大时，宽度的影响更为突出，表明宽度较小的充填体在高阶段采场中更易发生侧向卸荷破坏，这与之前的分析结果一致。以采场长度 50 m 为例，当暴露高度由30 m 增至 60 m 时，宽度为 9 m 的充填体设计强度由 1.51 MPa升至 2.59 MPa，变化率为 72.0%，而宽度为 15 m 的充填体设计强度变化率降低至 56%，这说明宽度较小的充填体对暴露高度的变化更敏感。因此，模型 1 表现出胶结充填体在垂直滑裂面破坏模式下，宽度与高度对强度需求的耦合控制作用。



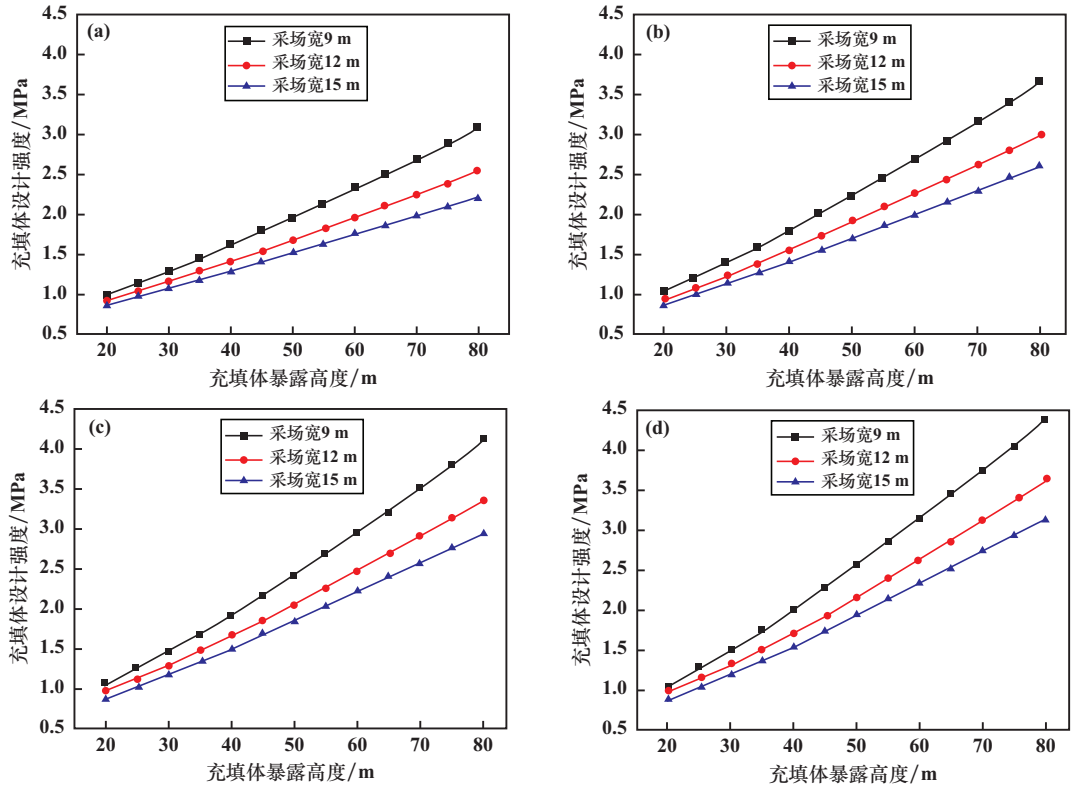

（a）采场长度 30 m；（b）采场长度 40 m；（c）采场长度 50 m；（d）采场长度 60 m

**图 11　模型 1 不同采场结构参数下充填体设计强度**

Fig. 11　Design strength of backfill in model 1 with different stope structural parameters

模型 2 不同采场结构参数下充填体设计强度如图 12所示。与模型 1 相比，模型 2 假设充填体沿底部滑动面整体滑移，其强度需求整体略高，且随暴露高度增加更为敏感。当采场宽度为 9 m、长度 50 m 时，充填体暴露高度由 30 m 增至 60 m，充填体设计强度由 1.45 MPa 提升至 2.93 MPa，增幅显著，但强度曲线在宽度较小时表现出更明显的非线性特征。另外，当采场长度超过 40 m 后，充填体设计强度曲线随暴露高度增加逐渐变陡，这说明在较大采场尺度下，充填体的暴露高度成为主导充填体强度的关键因素。

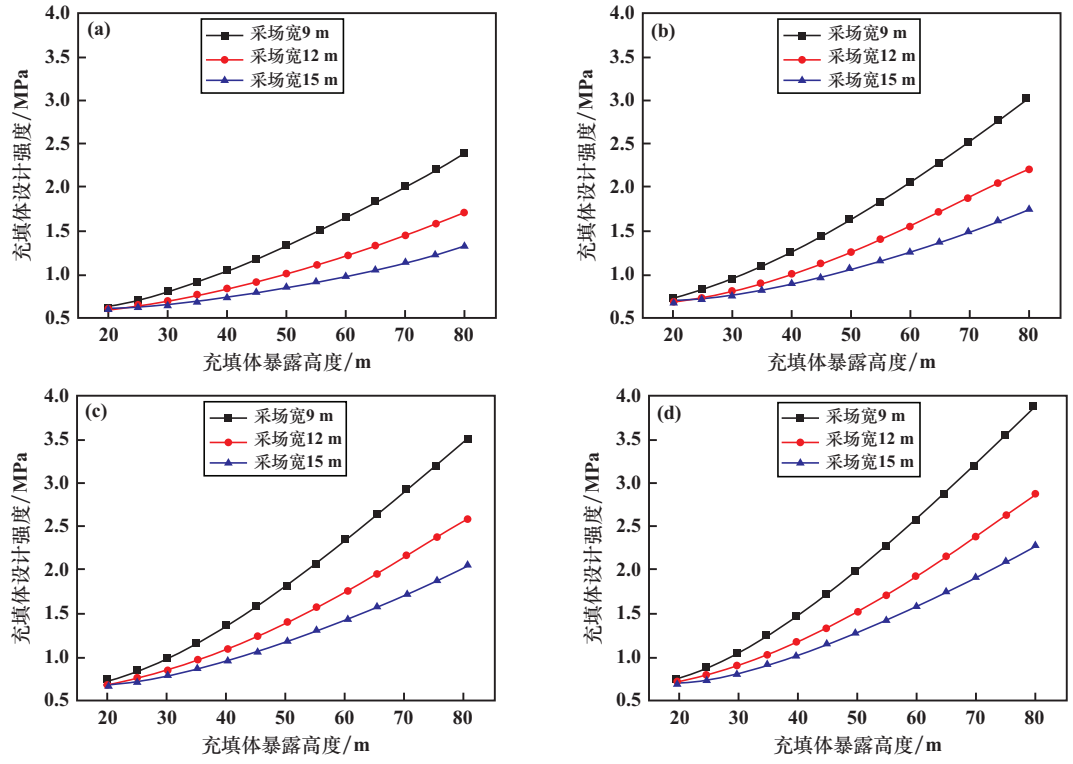
模型 3 不同采场结构参数下充填体设计强度如图 13 所示。由图 13 可知，模型 3 考虑滑裂面倾角为任意值，综合反映出充填体在复杂受力状态下的潜在破坏模式。与模型 1 和 2 相比，模型 3 在设计强度上整体居中，但尺寸耦合效应更显著。当暴露高度较小时（$H$=30 m），设计强度随采场宽度变化平缓，各长度条件下设计强度差异不大；当暴露高度增大至 60 m 时，宽度对设计强度的影响逐渐增强，宽度由 15 m 减小至9 m，设计强度增加程度均超过 30%。这说明在高阶段采场中，随着暴露高度增大，充填体的侧向约束效应减弱，滑裂面倾角对强度设计的影响越发突出，需结合具体采场结构合理选用模型。




（a）采场长度 30 m；（b）采场长度 40 m；（c）采场长度 50 m；（d）采场长度 60 m

**图 12 模型 2 不同采场结构参数下充填体设计强度**

Fig. 12 Design strength of backfill in model 2 with different stope structural parameters




（a）采场长度 30 m；（b）采场长度 40 m；（c）采场长度 50 m；（d）采场长度 60 m

**图 13 模型 3 不同采场结构参数下充填体设计强度**

Fig. 13 Design strength of backfill in model 3 with different stope structural parameters

综上所述,通过对比分析充填体单侧揭露模型 1、模型 2、模型 3 的计算结果,当采场宽度分别为 9、12、15 m 时,充填体暴露高度或采场高度 $H \leqslant 30$ m 时,选用模型 1 进行充填体强度设计时更为安全合理;充填体暴露高度或采场高度 $H > 30$ m 时,选用模型 2 进行充填体强度设计时更为安全合理。结合中关铁矿南区目前生产实际情况,建议充填体的设计强度见表 1。

**表 1　中关铁矿南区充填体设计强度**

Table 1　Design strength of backfill in south area of Zhongguan Iron Mine

| 采场宽度/m | 充填体暴露高度或采场高度/m | 采场长度/m | 充填体设计强度/MPa |
|---|---|---|---|
| 9 | $H = 30$ | $L \leqslant 30$ | 1.26 |
| | | $30 < L \leqslant 40$ | 1.43 |
| | | $40 < L \leqslant 50$ | 1.51 |
| | | $50 < L \leqslant 60$ | 1.60 |
| | $H = 60$ | $L \leqslant 30$ | 2.32 |
| | | $30 < L \leqslant 40$ | 2.67 |
| | | $40 < L \leqslant 50$ | 2.93 |
| | | $50 < L \leqslant 60$ | 3.13 |
| 12 | $H = 30$ | $L \leqslant 30$ | 1.17 |
| | | $30 < L \leqslant 40$ | 1.32 |
| | | $40 < L \leqslant 50$ | 1.37 |
| | | $50 < L \leqslant 60$ | 1.44 |
| | $H = 60$ | $L \leqslant 30$ | 1.95 |
| | | $30 < L \leqslant 40$ | 2.25 |
| | | $40 < L \leqslant 50$ | 2.46 |
| | | $50 < L \leqslant 60$ | 2.62 |
| 15 | $H = 30$ | $L \leqslant 30$ | 1.12 |
| | | $30 < L \leqslant 40$ | 1.24 |
| | | $40 < L \leqslant 50$ | 1.28 |
| | | $50 < L \leqslant 60$ | 1.34 |
| | $H = 60$ | $L \leqslant 30$ | 1.74 |
| | | $30 < L \leqslant 40$ | 1.99 |
| | | $40 < L \leqslant 50$ | 2.18 |
| | | $50 < L \leqslant 60$ | 2.32 |

## 4　工程应用

根据中关铁矿首采区生产实际,在-230~-170 m 水平南部区域选定 13#S4 采场作为试验采场,该矿房采用大直径深孔落矿阶段空场嗣后充填采矿法,设计矿房宽度 15 m、高度 60 m、长度 50 m,矿块矿量 13.4 万 t,累计出矿 12.3 万 t,回采率达到 93%以上。依据表 1 中采场宽度 15 m、高度 60 m、长度 40~50 m 的工况,选取模型 2( $H = 60$ m )计算得到所需充填体强度不低于 2.18 MPa。据此,现场采用灰砂比 1∶6、料浆浓度 72%的尾砂胶结充填料进行充填,28 d 养护后取样实测单轴抗压强度为 2.35 MPa,满足设计要求。

待矿房回采结束后且充填体养护至设计龄期后,开采相邻矿柱,开采结束后观测矿房的充填体暴露面发现,充填体直立性和完整性较好,采场顶板稳定,且矿柱整个落矿过程中,充填体未发生垮落,采场整体稳定性较好。证实构建的充填体强度需求模型可靠,设计的充填体强度合理,既能保证采场的稳定安全,又能保障中关铁矿的产能需求。

## 5　结论

1) 高阶段采场侧压力在充填体与围岩接触侧底部达到最大,由摩擦约束与侧向压力共同主导;剪切应力在充填体中部靠围岩侧呈先增大后减小的分布特征,其峰值位置与幅值受暴露高度影响;垂直应力与采场长度呈线性增加关系,当采场长度超过 45 m 时,暴露高度的影响由弱转强,表现出较强的尺寸耦合效应。充填体宽度越小且暴露高度越大时,充填体应力集中显著,适当增大充填体宽度是改善其受力状态的有效策略。

2) 考虑高阶段采场充填体应力分布规律与滑裂面倾角 $\beta$ 的不同取值,分别建立了对应垂直滑裂面(模型 1)、沿底部滑面整体滑移(模型 2)及任意角度滑裂面(模型 3)强度计算公式,明确了 3 种模型的适用条件。对于中关铁矿高阶段采场,当充填体暴露高度 $H \leqslant 30$ m 时,宜用模型 1 进行充填体强度设计;当 $H > 30$ m 时,宜用模型 2 进行充填体强度设计。

3) 以中关铁矿南区宽 15 m、高 60 m、长 50 m 的 13#S4 采场为对象,基于模型 2 计算得到充填体所需强度为 2.18 MPa。现场采用灰砂比 1∶6、料浆浓度 72%的充填料,28 d 实测强度满足要求。相邻矿柱回采过程中,充填体暴露面完整、顶板稳定,验证了应力解析模型的准确性与强度设计方法的可靠性。

**参考文献**(References):


[1] 江飞飞,周辉,刘畅,等. 地下金属矿山岩爆研究进展及预测与防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2019,38(5):956-972.
JIANG Feifei, ZHOU Hui, LIU Chang, et al. Progress, prediction and prevention of rockbursts in underground metal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(5):956-972.

[2] 甘德清,孟岐,刘志义,等. 缓倾斜极厚矿体高阶段采场开采顺序优化[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):28-34.
GAN Deqing, MENG Qi, LIU Zhiyi, et al. Optimization of mining sequence for high-level stope with gently-dipping and extra-thick orebody[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):28-34.

[3] 蒋江晨,叶永飞,柳小胜. 胶结充填体拱效应作用下的水平矿柱回采安全厚度研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):39-43.
JIANG Jiangchen, YE Yongfei, LIU Xiaosheng. Thickness of horizontal pillar for safe extraction under arching effect of cemented backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):39-43.

[4] 吴爱祥,沈慧明,姜立春,等. 窄长型充填体的拱架效应及其对目标强度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016,26(3):648-654.
WU Aixiang, SHEN Huiming, JIANG Lichun, et al. Arching effect of

long-narrow cemented paste backfill body and its effect on target strength[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(3):648-654.

[5] 蔡嗣经. 矿山充填力学基础[M]. 2版. 北京:冶金工业出版社, 2009.
CAI Sijing. Fundamentals of mine filling mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.

[6] 熊朝辉,谭玉叶,楚立申,等. 高阶段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 Zhaohui, TAN Yuye, CHU Lishen, et al. Study on strength and structure optimization of high-stage subsequent layered cemented backfill[J]. Metal Mine, 2022(3):35-42.

[7] 魏晓明,郭利杰,李长洪,等. 高阶段胶结充填体强度空间变化规律研究[J]. 岩土力学, 2018,39(增刊2):45-52.
WEI Xiaoming, GUO Lijie, LI Changhong, et al. Study of space variation law of strength of high stage cemented backfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,39(S2):45-52.

[8] BEN D, BRAD B, MURRAY M. Constrained thermal expansion as a causal mechanism for in-situ pressure in cemented paste and hydraulic backfilled stopes[C]//11# International Symposium on Mining with Backfill. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2014:365-378.

[9] 于永纯,罗正良,孙长坤,等. 窄长采场胶结充填体强度要求及结构设计[J]. 有色金属(矿山部分), 2021,73(2):21-26.
YU Yongchun, LUO Zhengliang, SUN Changkun, et al. Strength requirement and structure design of cemented backfill in narrow-long stope[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021,73(2):21-26.

[10] 张雄天,马炳德,张春阳,等. 多中段开采复杂采空区群稳定性数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):26-33.
ZHANG Xiongtian, MA Bingde, ZHANG Chunyang, et al. Numerical simulation for stability of complex mined-out areas in multi-level mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):26-33.

[11] LIU G S, LI L, YANG X C, et al. Numerical analysis of stress distribution in backfilled stopes considering interfaces between the backfill and rock walls[J]. International Journal of Geomechanics, 2017,17(2):06016014.

[12] 卢西洲,王文杰,贾稳宏,等. 大体积充填体下胶结充填法回采进路参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(5):20-25.
LU Xizhou, WANG Wenjie, JIA Wenhong, et al. Parameter optimization for stoping by cemented backfilling below massive filling body[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(5):20-25.

[13] 向伟华,路燕泽,刘志义,等. 阶段空场嗣后充填法凿岩硐室矿柱对顶板稳定性的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):69-76.
XIANG Weihua, LU Yanze, LIU Zhiyi, et al. Influence of pillars in drifting chamber on roof stability during sublevel open stoping with backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):69-76.

[14] 曹帅,杜翠凤,谭玉叶,等. 金属矿山阶段嗣后充填胶结充填体矿柱力学模型分析[J]. 岩土力学, 2015,36(8):2370-2376.
CAO Shuai, DU Cuifeng, TAN Yuye, et al. Mechanical model analysis of consolidated filling pillar using stage-delayed backfill in metal mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(8):2370-2376.

[15] 董亚宁,王忠强,肖松丽. 罗河铁矿高阶段采场充填体应力解析与强度设计[J]. 现代矿业, 2020,36(12):96-97.
DONG Yaning, WANG Zhongqiang, XIAO Songli. Stress analysis and strength design of backfill in high stage stope of Luohe iron mine[J]. Modern Mining, 2020,36(12):96-97.

[16] 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):1391-1403.
LIU Guangsheng, YANG Xiaocong, GUO Lijie. Models of three-dimensional arching stress and strength requirement for the backfill in open stoping with subsequent backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(5):1391-1403.

**引用本文**:路燕泽,甘德清,刘志义,等. 高阶段采场充填体应力解析与强度设计模型[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):73-82.
LU Yanze, GAN Deqing, LIU Zhiyi, et al. Stress analysis and strength design model of backfill in high-level stopes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):73-82.

(上接第72页)

[18] 刘基程,马林建,张宁,等. 岩石变形破坏过程的能量演化研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2021,17(3):975-986.
LIU Jicheng, MA Linjian, ZHANG Ning, et al. Research progress on energy evolution in the process of rock deformation and failure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3):975-986.

[19] 王平,胡彦,程爱平,等. 基于三轴试验与数值模拟的大理岩破坏特征研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):1-6.
WANG Ping, HU Yan, CHENG Aiping, et al. Failure characteristics of marble based on triaxial test and numerical simulation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(6):1-6.

[20] 尤东华,韩俊,胡文瑄,等. 塔里木盆地顺南501井鹰山组白云岩储层特征与成因[J]. 沉积学报, 2018,36(6):1206-1217.
YOU Donghua, HAN Jun, HU Wenxuan, et al. Characteristics and genesis of dolomite reservoirs in the Yingshan forma-tion of well SN501 in the Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(6):1206-1217.

[21] WANG M Q, WU Y H, SONG B H, et al. Point load strength test power index of irregular sandy dolomite blocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024,57(7):5279-5290.

[22] HERNANDEZ-URIBE L A, AMAN M, ESPINOZA D N. Assessment of mudrock brittleness with micro-scratch testing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017,50(11):2849-2860.

[23] 丁发兴,吴霞,张学民,等. 材料强度理论研究进展述评[J]. 铁道科学与工程学报, 2024,21(11):4555-4587.
DING Faxing, WU Xia, ZHANG Xuemin, et al. Reviews on research progress of strength theories for materials[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024,21(11):4555-4587.

[24] LI C G, LI C H, ZHAO R, et al. A strength criterion for rocks[J]. Mechanics of Materials, 2021,154:103721.

**引用本文**:魏威,陈冲,沈晓杰,等. 不同应力路径下含泥质风化白云岩的力学特性和破坏特征[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):66-72.
WEI Wei, CHEN Chong, SHEN Xiaojie, et al. Mechanical properties and failure characteristics of argillaceous weathered dolomite under different stress paths[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):66-72.