

急倾斜薄矿体轻质吸能材料人工假底设计及应用

李电辉

(甘肃省天水李子金矿有限公司)

摘要:针对李子金矿急倾斜薄矿体开采中底柱高品位矿石回收难题,采用基于轻质吸能材料的人工假底施工工艺,实现井下底柱资源的高效置换。研究基于薄板弹性力学理论建立了人工假底力学模型,系统分析了充填体在自重及上部荷载作用下的应力分布和变形特性,进而确定了人工假底的最优厚度、混凝土强度和钢筋配筋方案,并通过数值模拟验证方案的可行性。采用轻质吸能材料施工后,不仅显著降低了结构自重和施工周期,而且大幅提升了机械化施工水平和劳动安全性,对推动矿山绿色、可持续开采具有重要意义。

关键词:轻质吸能材料;人工假底;急倾斜薄矿体;充填采矿;薄板弹性力学理论;数值模拟;绿色矿山

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)09-0096-08

doi:10.11792/hj20250911

引言

矿业作为国民经济的支柱,不仅为工业等各领域提供关键原材料,同时还支撑着国家整体经济的发展。当前,矿山开采正从粗放、过度开采的模式,逐步转型为工业化、现代化、可持续且绿色的开采模式。在绿色开采过程中,充填采矿法的应用可以有效抑制地表沉降、稳固围岩、调控地压,并减轻尾矿库所承受的压力,从而在保护环境的同时保障作业安全。

20世纪80年代初,冶金工业部长春黄金研究所红花沟金矿试行钢筋混凝土假底,显著提高了资源回收率^[1]。此后,一些矿山采用人工假底技术置换高品位矿石底柱,以尽可能回收矿石^[2-5]。人工假底作为实现底柱置换回采的关键结构,其承载能力、安全性、施工便捷性等直接影响作业效率与生产安全。因此,如何在确保人工假底力学性能的前提下,实现结构轻量化、施工工艺简单化,已成为采矿工程中的重要研究方向^[6-10]。

1 工程背景

甘肃省天水李子金矿有限公司(下称“李子金矿”)位于甘肃省天水市南东约55 km处。李子金矿尖草湾矿区大部分极薄矿体倾角为70°~85°,局部富矿带金品位达10 g/t以上,具有极高的经济开采价值。矿体厚度(多为0.8~1.5 m)小、倾角陡、作业空间狭

窄,传统底柱法不仅导致大量高品位矿石资源被埋压,而且存在回采困难、安全风险高、资源浪费严重等问题,极大制约了资源回收率的进一步提升^[11-13]。

为充分回收底柱高品位矿石资源,拟采用构筑人工假底的方式对底柱资源进行置换,回采前在沿脉上构筑人工混凝土假底,混凝土强度为C20,施工顺序为:采场拉底形成空间→布置人工假底钢筋网→浇筑混凝土形成人工假底→在人工假底上架设漏斗→正常回采作业。

该人工混凝土假底施工时,施工效率较低,劳动作业强度大,施工周期较长,现场施工需5~8人配合完成,单日仅能沿走向长度完成8 m左右的铺设距离。按照目前井下施工进度,按单个采场70~80 m的长度计算,人工假底施工周期20~30 d。施工时采用搅拌机搅拌上料,人工平整假底,但切采空间有限,施工作业环境恶劣,人工假底施工时作业强度较大,进一步导致施工效率下降。

为此,李子金矿采用基于轻质吸能材料的人工假底施工工艺,通过管路输送高密度、高强度的轻质吸能材料来构筑人工假底,旨在缩短采准周期,降低工人劳动强度,提高机械化水平和施工效率。相较于传统钢筋混凝土假底,该技术突破了“施工难、周期长、强度保障难”的瓶颈问题,尤其在极薄、急倾斜矿体等受限空间中,其快速、柔性、低干预的施工优势尤为突出^[14-17]。

收稿日期:2025-03-30;修回日期:2025-05-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2905004)

作者简介:李电辉(1971—),男,高级工程师,硕士研究生,从事矿山采矿技术、生产管理工作;E-mail:LDHZDY@126.com

然而,轻质吸能材料不同于传统刚性混凝土,其本身具有一定的变形能力和弹性吸能特性,在复杂矿压与回采扰动环境下,其承载能力、稳定性和失稳模式仍需系统论证^[18-19]。因此,为保障人工假底的安全性与功能可靠性,必须从工程力学角度出发,对其承载机制与极限状态进行深入研究,从而科学制订轻质吸能材料人工假底结构参数与施工控制指标。

2 人工假底结构参数确定

人工假底稳定性与可靠性分析的核心问题之一

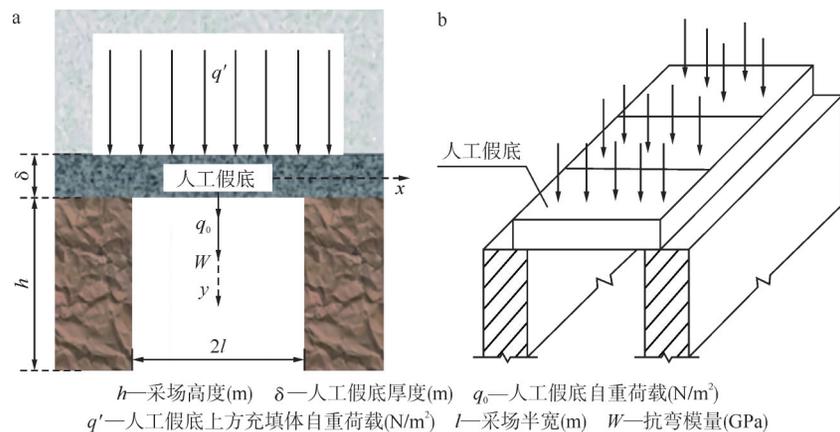


图1 人工假底结构及受力分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure and stress analysis of artificial false bottom

2.1 基于薄板弹性力学理论的人工假底设计

充填体可视为连续均质介质,并满足弹性力学相关理论假设条件,因此可采用薄板弹性力学理论进行力学分析。

人工假底的弯曲变形主要来源于竖向荷载作用,可将采场两帮视为弹性基础,并忽略人工假底所受的水平应力。在此假设下,人工假底的受力状态与薄板弹性力学理论计算结果相符,且采用薄板弹性力学理论计算所得的强度结果偏于保守,因此,在下向充填采矿条件下,基于薄板弹性力学理论计算人工假底强度具有合理性。考虑到两帮由岩体构成,而顶板为人工假顶,该支护系统属于典型的“硬支弱板”结构,其主要破坏形式表现为弯曲导致的拉伸破坏,且破坏位置通常出现在假顶中央区域。

在自重及上部荷载的作用下,人工假底产生的弯矩可能导致以下2种主要破坏模式:若人工假底所选混凝土强度等级过低,则其抗压能力不足,在较大弯矩引起的压应力作用下易发生塑性变形,最终导致受压破坏;若钢筋混凝土人工假底配筋量不足,则其抗拉能力无法抵抗弯曲产生的拉应力,从而引发受拉破坏。因此,为确保人工假底的承载安全性,需首先计算其所受的最大弯矩 M_{\max} ,在此基础上分别对抗压和

于构建合理的极限状态方程。因此,本研究首先建立人工假底力学模型,探讨其应力分布特征,并深入分析其失稳机理。

在充填体中,承载层通常采用较高灰砂比的充填料浆,赋予其较大的强度和良好的整体性;相比之下,补口层与接顶层的充填体灰砂比相对较低,导致强度较弱、整体性较差。因此,充填进路顶板的稳定性主要受承载层控制,而承载层所承受的主要荷载形式为垂向荷载。人工假底结构及受力分析如图1所示。

抗拉强度进行设计分析,以保证人工假底在受压与受拉作用下具备足够的强度储备。

根据薄板弹性力学理论,人工假底内的最大弯矩为:

$$M_{\max} = \frac{(\alpha^2 l^2 + 3\alpha l + 3)ql}{6\alpha(\alpha l + 1)} \quad (1)$$

式中: $\alpha = \left(\frac{E_0}{4Dh}\right)^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{3(1-\mu^2)E_0}{\delta^3 h E}\right]^{\frac{1}{4}}$,一般 $\frac{E_0}{E} = 0.3 \sim 0.8$, μ 为钢筋混凝土假底泊松比, $\mu = 0.1 \sim 0.2$,则, $\alpha = (0.96 \sim 1.24)\left(\frac{1}{\delta^3 h}\right)^{\frac{1}{4}}$, E_0 为两侧帮围岩弹性模量(MPa), E 为钢筋混凝土假底弹性模量(MPa), D 为钢筋混凝土假底挠曲刚度, $D = \frac{E_1 \delta^3}{12(1-\mu^2)}$; q 为均布荷载(MPa)。

将上式分解后,得到:

$$M_{\max} = \left[\frac{l}{6} + \frac{l}{3(\alpha l + 1)} + \frac{l}{2\alpha(\alpha l + 1)} \right] ql \quad (2)$$

通过式(2)分析发现,随着 α 的减小, M_{\max} 增大,因此,在设计中,为安全起见, α 取最小值, $\alpha = 0.96\left(\frac{1}{\delta^3 h}\right)^{\frac{1}{4}}$ 。

设计人工假底所需最小抗拉强度需确定 α 。其中, α 由人工假底厚度(δ)和采场高度(h)确定。因

此,最终需通过确定人工假底厚度(δ)、采场高度(h)、采场半宽(l)及均布荷载(q)来计算人工假底所需最小强度,对于特定的采场, h 和 l 为已知量,均布荷载(q)与人工假底厚度(δ)及所受人工假底上部充填体自重荷载(q')有关。

将 $\alpha = 0.96(\frac{1}{\delta^3 h})^{\frac{1}{4}}$ 代入式(2),可得:

$$M_{\max} = \left[\frac{l}{6} + \frac{l}{2.88l(h\delta^3)^{\frac{1}{4}} + 3} + \frac{l}{1.84l(h\delta^3)^{\frac{1}{2}} + 1.92(h\delta^3)^{\frac{1}{4}}} \right] ql \quad (3)$$

2.1.1 人工假底自重分析

在李子金矿实际矿山生产过程中,各方面的原因导致充填不能接顶,故可以认为人工假底上方承受的荷载为普通充填体的自重荷载,则人工假底自重荷载和上方充填体自重荷载作用下人工假底的均布荷载为:

$$q = q_0 + q' = \rho g \delta + \rho' g h' \quad (4)$$

式中: ρ 为人工假底密度(g/cm^3); g 为重力加速度(m/s^2); ρ' 为充填体密度(g/cm^3); h' 为人工假底上方充填体高度(m)。

2.1.2 人工假底最大应力分析与计算

在人工假底承受上部巨大荷载下,应首先保证人工假底有足够抗压强度来抵抗因最大弯矩产生的压应力,通过人工假底所受上部荷载来确定其所受抗压强度,由弹性力学和材料力学可知:

$$M_{\max} = \sigma_{\max} W = \frac{1}{6} \delta^2 \sigma_{\max} \quad (5)$$

式中: σ_{\max} 为人工假底最大抗压强度(MPa)。

代入式(5)可得:

$$\sigma_{\max} = \frac{(\alpha^2 l^2 + 3\alpha l + 3)ql}{\alpha(\alpha l + 1)\delta^2} \quad (6)$$

由于人工假底采用一定强度等级的轻质吸能材料浇筑施工而成,结合地下矿山工程结构的可靠性与经济性因素,应通过考虑人工假底所受最大压应力值来选定轻质吸能材料强度等级。人工假底厚度一般取值为0.3~1.0 m。通过分析式(5)可知,人工假底厚度越小,其所受最大压应力越大。因此,可通过式(6)计算得到人工假底最大压应力,参考该值选用轻质吸能材料强度等级。

回采时,根据薄板弹性力学理论的人工假底设计结果如表1所示。由表1可知:随人工假底厚度增加,所要求的人工假底充填体抗压强度减小;人工假底厚度0.5 m时,最大抗压强度仅需0.42 MPa;人工假底厚

度1.0 m时,最大抗压强度仅需0.07 MPa。但根据相关规范与标准要求,人工假底强度不应低于0.4 MPa。因此,可确定上向回采时,根据薄板弹性力学理论的人工假底充填体强度不低于0.4 MPa,人工假底厚度不低于0.5 m。

表1 上向回采时人工假底厚度与充填体强度关系

Table 1 Relationship between artificial false bottom thickness and backfill strength during upward mining

人工假底厚度/m	荷载/(N·m ⁻²)	M_{\max} /(N·m ⁻²)	σ_{\max} /MPa
0.5	191 590	174 889.5	0.42
0.6	192 668	197 965.4	0.33
0.7	193 746	220 542.5	0.27
0.8	194 824	242 723.3	0.23
0.9	195 902	264 583.2	0.20
1.0	196 980	286 180.1	0.17
1.2	199 136	328 759.3	0.14
1.4	201 292	370 734.0	0.11
1.5	202 370	391 555.9	0.10
1.8	205 604	453 574.2	0.08
2.0	207 760	494 681.2	0.07

2.2 人工假底参数计算

李子金矿采用轻质吸能材料充填采矿法(上向回采)的人工假底宽度,即切采巷道宽度为2.0~2.15 m,取宽度最大值2.15 m计算。切采巷道中的人工假底,主要用于轻质吸能材料充填采矿法的底柱置换,阶段高度40 m,人工假底位于沿脉巷道上部约2 m处,采场回采完全后,上方采空区高度约38 m,在计算时,取充填体规格(含人工假底厚度)为2.15 m×38 m(宽×高)。根据JG/T 266—2011《泡沫混凝土》,一般轻质吸能材料的干密度为300~1 600 kg/m³,计算时取最大荷载、轻质吸能材料的最大密度。人工假底所用轻质吸能材料密度等级为A16, $\rho=1 600 kg/m^3$,上方轻质吸能材料充填体密度等级为A05, $\rho'=500 kg/m^3$ 。

因此,综合考虑,建议人工假底厚度取1.0 m,抗压强度不低于10 MPa(抗拉强度1.0 MPa),密度等级为A14~A16,即1 400~1 600 kg/m³。

2.3 人工假底配筋计算

在人工假底承载力结构设计中,类比钢筋混凝土结构设计中正截面受弯承载力的设计方法进行设计。充填体充当钢筋混凝土中的混凝土成分,人工假底结构采用单筋矩形截面进行设计,在受拉区充分考虑钢筋的受拉作用而不考虑充填体材料的受拉作用,在受压区充填体承受全部压应力。这里以规范与标准建

议的开采时最大进路断面尺寸3 m×2.5 m为依据,计算充填体的配筋情况。

参考钢筋混凝土中的配筋计算方法,介绍受弯构件的正截面受弯承载力及破坏形态,即随着配筋率不同所出现的破坏形态。由于纵向受拉钢筋配筋率的不同,受弯构件的破坏形态可分为适筋破坏、超筋破坏和少筋破坏3种。

1) 适筋破坏: 构件的破坏首先是由于受拉区纵向受力钢筋屈服,然后受压区充填体被压碎,钢筋和充填体的强度都得到充分利用。这种破坏被称为适筋破坏。适筋破坏在构件破坏前有明显的塑性变形和裂缝预兆,破坏不是突然发生的,属于延性破坏。

2) 超筋破坏: 发生超筋破坏的特点是充填体受压区边缘先压碎,纵向受拉钢筋不屈服,在明显没有预兆的情况下由于受压区充填体被压碎而破坏,属于脆性破坏。虽然和适筋破坏相同,在破坏时受压区边缘混凝土都压碎,但由于受拉区受拉钢筋未达到屈服,一方面不经济,另一方面破坏前无征兆,因此在设计中应当避免超筋破坏。常通过限制最大配筋率或限制受压区高度来避免正截面受弯构件发生超筋破坏。

3) 少筋破坏形态: 这种破坏的特点是受拉区充填体一旦开裂,在裂缝截面处钢筋很快屈服,甚至进入强化阶段,而受压区充填体的应变还没有达到极限应变。出现第一条裂缝后很快破坏,呈现出“脆性破坏”的特征。破坏前无任何征兆,承载力低,且不能充分发挥充填体的抗压强度,在工程设计中应避免。

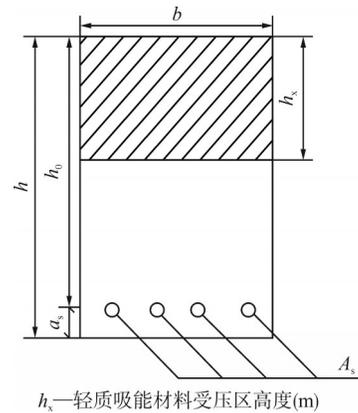
2.3.1 计算依据

在人工假底构筑设计中,采用单筋矩形截面配筋设计,根据钢筋混凝土结构设计,受弯构件纵向受力钢筋的总截面面积应由构件的正截面承载力计算确定。正截面的配筋量用配筋率 k 为:

$$k = \frac{A_s}{bh_0} \quad (7)$$

式中: A_s 为纵向受力钢筋的总面积,可由 $A_s = n\pi(d/2)^2$ 求得,其中, n 为配筋数量, d 为钢筋直径; b 为人工假底截面宽度,为简化计算,沿人工假底长度方向取 $b=1.0$ m; h_0 为人工假底截面有效高度,等于纵向受拉钢筋的合力作用点至截面受压区边缘的距离(如图2所示),即 $h=h_0-a_s$,其中, a_s 为纵向受拉钢筋的合力作用点至截面受拉区边缘的距离,对于一排钢筋一般取 $a_s=25 \sim 100$ mm,这里取50 mm。

单筋矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算如下:



h_s —轻质吸能材料受压区高度(m)

图2 钢筋混凝土保护层和有效高度

Fig. 2 Reinforced concrete protective layer and effective height

计算截面抵抗系数(α_s):

$$\alpha_s = \frac{M_{\text{筋}}}{\alpha_1 f_c b h_0^2} \quad (8)$$

式中: $M_{\text{筋}}$ 为力矩(N·m); α_1 为截面系数, $\alpha_1=1$; f_c 为材料的抗压强度(MPa)。

经计算: α_s 不得大于0.614。

相对受压区高度(ε)为:

$$\varepsilon = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_s} \quad (9)$$

计算内力矩的内力臂系数(γ_s):

$$\gamma_s = \frac{1 + \sqrt{1 - 2\varepsilon}}{2} \quad (10)$$

由此可计算出人工假底所配钢筋的截面面积(A_s)为:

$$A_s = \frac{M_{\text{筋}}}{f_y \gamma_s h_0} \quad (11)$$

式中: f_y 为钢筋抗拉强度(MPa),HRB235热轧钢筋抗拉强度设计值为210 MPa。

综上,可通过查每米板宽钢筋截面面积(如表2所示),得到主筋的配筋参数。单向板除沿受力方向布置受力钢筋(主筋)外,还应在垂直于受力方向布置钢筋(副筋)。每单位宽度上分布筋截面面积不宜小于单位宽度上受力钢筋截面面积的15%,即:

$$A_{s\text{min}} = A_s \times 15\% \quad (12)$$

此外,GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》规定的构造要求还必须满足“不应小于 $\phi 6@200$ mm(每米宽142 mm²)”。基于此可得到分布筋最小受力面积。

2.3.2 计算结果

经计算,钢筋的截面面积为299.95 mm²。查表2,可选用 $\phi 12@300$ mm, $A_s=377$ mm²。而目前矿山采用的 $\phi 12@250$ mm, $A_s=452$ mm²,远远大于设计要求。每单位宽度上分布筋截面面积不宜小于单位宽度上受力钢筋截面面积的15%,即45 mm²。此外,由于

表2 每米板宽钢筋截面面积

Table 2 Cross-sectional area of rebar per meter width of slab mm^2

钢筋间距/mm	直径/mm									
	6	6/8	8	8/10	10	10/12	12	12/14	14	16
70	404	561	718	920	1 122	1 369	1 616	1 907	2 199	2 872
75	377	524	670	859	1 047	1 277	1 508	1 780	2 053	2 681
80	353	491	628	805	982	1 198	1 414	1 669	1 924	2 513
85	333	462	591	758	924	1 127	1 331	1 571	1 811	2 265
90	314	437	559	716	873	1 064	1 257	1 483	1 710	2 234
95	298	413	529	678	827	1 009	1 190	1 405	1 620	2 116
100	283	393	503	644	785	958	1 131	1 335	1 539	2 011
110	257	357	457	585	714	871	1 028	1 214	1 399	1 828
120	236	327	419	537	654	798	942	1 113	1 283	1 676
125	226	314	402	515	628	766	905	1 068	1 232	1 608
130	217	302	387	495	604	737	870	1 027	1 184	1 547
140	202	280	359	460	561	684	808	954	1 100	1 436
150	188	262	335	429	524	639	754	890	1 026	1 340
160	177	245	314	403	491	599	707	834	962	1 257
170	166	231	296	379	462	564	665	785	906	1 183
180	157	218	279	358	436	532	628	742	855	1 117
190	149	207	265	339	413	504	595	703	810	1 058
200	141	196	251	322	392	479	565	668	770	1 005
220	129	178	228	293	357	436	514	607	700	914
240	118	164	209	268	327	399	471	556	641	838
250	113	157	201	258	314	383	452	534	616	804
260	109	151	193	248	302	369	435	513	592	773
280	101	140	180	230	280	342	404	477	550	718
300	94	131	168	215	262	319	377	445	513	670
320	88	123	157	201	245	299	353	417	481	628

GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》规定的构造要求还必须满足“不应小于 $\phi 6@200\text{ mm}$ (每米宽 142 mm^2)”。基于此得到分布筋最小受力面积,之后查每米板宽钢筋截面面积得到副筋的配筋设计。查表2,跨度方向的纵筋可按 $\phi 6@200\text{ mm}$ 设计。而根据李子金矿目前使用的配筋参数,可满足要求,可继续沿用该配筋参数,即主筋 $\phi 12@250\text{ mm}$,副筋 $\phi 10@250\text{ mm}$ 。经验算,满足要求,则可确定配筋情况,如图3所示。

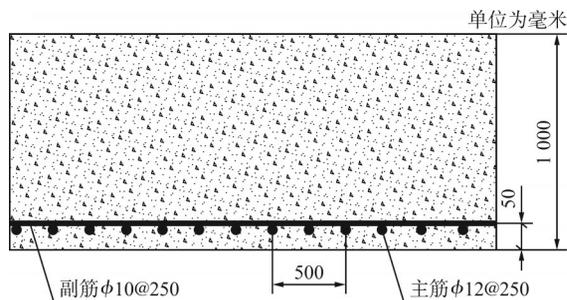


图3 人工假底配筋示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reinforcement arrangement of artificial false bottom

3 轻质吸能材料人工假底数值模拟研究

3.1 模拟材料本构模型设置

考虑到轻质吸能材料具有较高的体积压缩率和应变率依赖性,能够产生较大塑性变形,因此采用Flac^{3D}软件进行数值模拟。采用摩尔-库仑本构模型,为方便数值模拟计算,对模型进行一定的简化与假设,具体如下:

1)假设岩体、轻质吸能材料等材料为各向同性均质材料。

2)假设围岩内部没有大的断裂等构造,围岩为完整的连续实体。

3)人工假底水平厚度及宽度为固定值。

4)人工假底中充填材料为均质、各向同性的材料,塑性流动不改变材料各向同性。

5)分析中涉及的所有物理量均与时间无关。

6)人工假底沿长度方向端部不受限制,沿跨度方向受两帮围岩限制,因此可以设置人工假底为自由边界条件。

7)人工假底在吊筋悬吊下发挥承载作用,因此只对人工假底所用模型中所有吊筋的端部节点进行约束。

3.2 参数选定及计算模型建立

为真实反映人工假底的结构响应规律,依据李子金矿人工假底施工设计,建立数值模拟计算模型,模型尺寸长 \times 宽 \times 高 $=2\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$,充填体为轻质吸能材料(其物理力学参数如表3所示),主副筋网度为 $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}$,主筋直径 12 mm ,副筋直径 10 mm ,其余参数均参考人工假底计算中的数据。边界条件:模型两侧设置为固定边界,其余为自由边界。

表3 材料物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of materials

材料名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/ ($^\circ$)	内聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
轻质吸能材料	1 800	1 200	0.3	20	0.8	0.5
钢筋	7 850	200 000	0.3			450

建立计算模型。人工假底计算模型、模型的荷载及边界条件布置如图4所示。根据本研究内容,由于人工假底沿长度方向所受荷载及构筑条件相同,因此,为简化计算,模拟人工假底厚度为 1 m ,跨度与实际情况相同。金属网铺设在充填体之中,对人工假底进行加载,记录其位移、应力场的变化,重点对人工假底的稳定性进行研究。

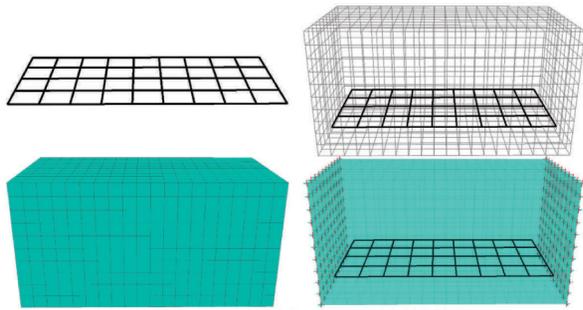


图4 人工假底计算模型、荷载及边界条件布置

Fig. 4 Calculation model, load, and boundary condition arrangement of artificial false bottom

3.3 计算结果

为验证人工假底结构在采场回采阶段的受力能与稳定性,基于 Flac^{3D} 软件模拟得出人工假底在上向回采条件下的位移场、应力场及钢筋应力分布情况。

根据材料设计参数,轻质吸能材料的抗拉强度约为 0.5 MPa,内聚力为 0.8 MPa,说明其当前承载应力远低于极限破坏强度,未进入屈服或破坏状态,仍处于弹性工作范围内。这说明,人工假底在承载过程中整体受力合理,轻质吸能材料未发生剪切破坏或开裂破坏,具有良好的承载与吸收变形能力。

人工假底重力及均布荷载数值模拟结果,以及金属网及充填体的应力应变如图 5 ~ 10 所示。

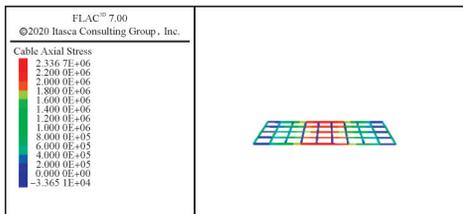


图5 金属网轴向应力

Fig. 5 Axial stress of metal mesh

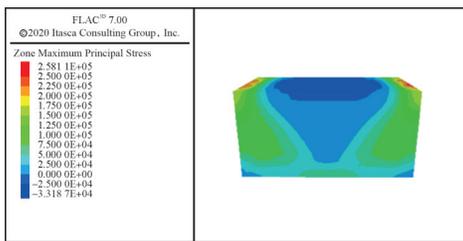


图6 充填体最大主拉应力

Fig. 6 Maximum principal tensile stress of backfill

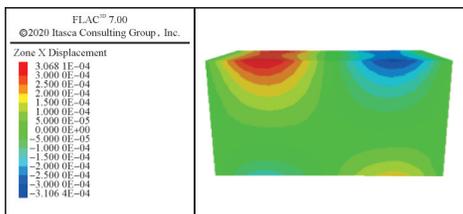


图7 人工假底 x 方向绕度等值线图

Fig. 7 Contour map of x-direction deflection of artificial false bottom

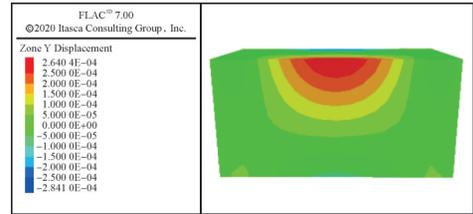


图8 人工假底 y 方向绕度等值线图

Fig. 8 Contour map of y-direction deflection of artificial false bottom

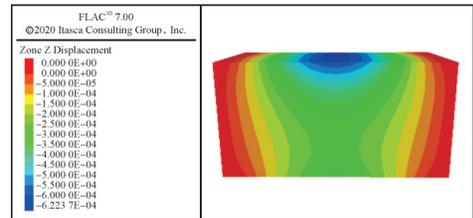


图9 人工假底 z 方向绕度等值线图

Fig. 9 Contour map of z-direction deflection of artificial false bottom

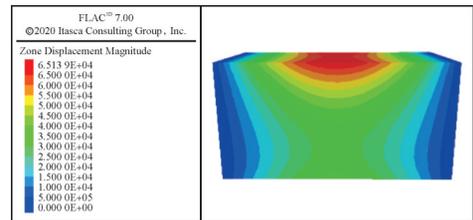


图10 人工假底位移等值线图

Fig. 10 Contour map of displacement of artificial false bottom

由图 6 可知:回采过程中充填体受力状态整体较为均匀,未形成明显的应力集中带。最大主拉应力为 0.03 MPa,发生于人工假底下部跨中位置附近。

由图 5 ~ 10 可知:在采场上向回采过程中,人工假底未出现整体结构破坏,整体呈良好的弯曲稳定状态。人工假底最大竖向变形出现在中间位置,竖直位移为 0.653 mm。该值远小于《矿山井巷工程设计规范》及相关结构承载设计中的变形控制限值(一般控制在 10 mm 以内),说明人工假底结构在自重及采场上部矿压联合作用下变形量可控,未出现明显下沉或失稳迹象。整体来看,人工假底在吊筋悬吊约束及钢筋网加固下,具备良好的结构刚度与抗挠性能,可满足采场作业期间的变形控制与安全使用要求。

模拟结果显示,嵌设于人工假底中的钢筋网在采场回采期间发挥了重要的抗拉与限变作用。上向回采过程中,钢筋网中主筋最大应力为 2.3 MPa,出现在跨中位置;副筋最大应力为 0.04 MPa,受力相对较小。二者应力均远低于 HRB400 钢筋的屈服强度设计值,主筋应力仅约为其 1.1%,副筋更低,说明钢筋网在结构中处于弹性工作状态,未发生屈服或塑性变形,具备足够的安全储备系数。

此外,从受力分布来看,主筋承担了大部分由弯矩引起的拉应力,副筋主要起到分布和辅助限位作用,进一步验证了钢筋配置的合理性。

综合上述结果,得出以下结论:

1)在人工假底所受荷载较大情况下,金属网将发挥很好的辅助作用,提高人工假底的整体强度和承载能力,主筋为主要承载部分,副筋主要起结构作用。

2)通过人工假底数值模拟研究,验证了在重力及均布荷载作用下,设计人工假底轻质吸能材料强度和配筋率的合理性,表明人工假底轻质吸能材料强度和配筋满足要求,具备可靠承载能力,可充分发挥金属网的承载能力与充填体自身的承载能力。

3.4 现场应用效果

为验证轻质吸能材料人工假底结构在实际采场中的适用性与可靠性,李子金矿在尖草湾矿区开展了井下现场工业试验,如图11所示,采场矿体为典型急倾斜极薄矿体,厚度1.0~1.2 m,倾角约78°,顶底板围岩完整。

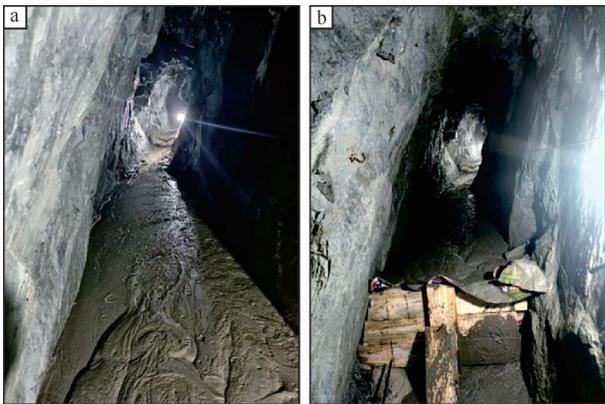


图11 人工假底现场施工情况

Fig. 11 On-site construction of artificial false bottom

人工假底施工工序:采场空间预处理→安装吊筋→管道输送轻质吸能材料并灌注→内设钢筋网定位→表面找平→人工假底凝结养护。人工假底参数:施工厚度1.0 m,轻质吸能材料平均密度2 000 kg/m³,抗压强度≥4.5 MPa,主筋间距250 mm,吊筋长度1.5 m。

1)施工效率提升。相比传统人工搅拌铺设方式,管道泵送施工仅需3人配合,每班可完成人工假底铺设长度达18~20 m,较原工艺效率提高150%以上。

2)结构稳定性与安全性提高。经现场实际回采作业验证,人工假底在支撑上覆矿岩及漏斗作业设备荷载下无明显变形、下沉或开裂,回采前后位移监测变化不超过1 mm,结构稳定性良好。施工后30 d无任何渗漏、结构脱空现象,钢筋锚固稳固,吊筋与围岩连接牢固,回采作业安全实现“零事故”。

3)资源回收率提高。借助人工假底进行底柱置

换回收,有效回收原设计中因稳定性要求而预留的高品位矿石底柱,单采场矿石资源回收率由72.5%提高至92.3%,提高近20个百分点,其中,底柱矿石平均金品位达11.2 g/t,经济效益显著。

4)工人劳动强度改善。传统人工假底施工每日进度仅约8 m,需5~8人作业,劳动强度高、施工周期长,受限于井下通风与切采空间,作业环境较恶劣。采用轻质吸能材料泵送施工后,日施工进度提高至18~20 m,仅需3人操作,劳动强度大幅下降,施工周期从20~30 d缩短至8~10 d,显著提高采准效率。

4 结论

1)基于薄板弹性力学理论建立的力学模型能够较好地反映人工假底在均布荷载及自重作用下的应力与变形分布情况,为结构设计提供了保守而可靠的参数依据。

2)采用轻质吸能材料施工工艺后,结构自重显著降低,配合合理的钢筋配筋设计,能够确保人工假底在大荷载条件下依然保持足够的抗弯、抗压能力,且最大变形均控制在安全范围内。

3)数值模拟结果表明,经过金属网增强的人工假底在受力过程中呈现出均匀应力传递和较小局部应力集中现象,进一步验证了设计参数的合理性和施工方案的可行性。

4)相较于传统施工方法,轻质吸能材料工艺显著提高了铺设速度和机械化水平,有效缩短了施工周期并降低了井下劳动强度。

总体而言,本研究不仅证明了轻质吸能材料人工假底在理论上具备较高的承载安全性和稳定性,也为实际应用中如何平衡安全、效率与经济性提供了明确的设计参考。未来工作应进一步关注长期耐久性试验和现场监测,以不断优化设计细节,提升矿山采矿业的整体安全性和经济效益。

[参考文献]

- [1] 何红选,范永奎.钢结构人工假底在峪耳崖金矿的应用[J].黄金,2008,29(1):33-36.
- [2] 胡子龙,范海峰.人工钢筋混凝土假底置换顶底柱在急倾斜金属矿山的应用[J].中国金属通报,2020(4):294,296.
- [3] 龚新华,侯克鹏,孙健.人工假底在金属矿山的应用现状及展望[J].中国钨业,2014,29(1):21-24.
- [4] 曾庆友.人工假底上向分层废石充填法在玉树硫铜矿的应用[J].采矿技术,2010,10(4):17-19.
- [5] 孙发院,侯克鹏,程涌,等.某硫化矿钢筋混凝土人工假底设计[J].现代矿业,2017,33(4):82-84.
- [6] 安龙,李元辉,徐帅.急倾斜薄矿脉崩落法开采矿岩散体流动规律研究[J].中国矿业,2019,28(12):104-109.

- [7] 王晓峰. 中深孔分段凿岩阶段矿房采矿法在鑫达公司的应用[J]. 黄金, 2018, 39(6): 39-41, 45.
- [8] 王志方. 矿岩欠稳的急倾斜薄矿脉采矿方法与工艺的改进[J]. 有色矿山, 1995(5): 1-7.
- [9] 张兵, 杨世兴, 龚武田, 等. 基于爆破漏斗试验的中深孔爆破参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(5): 25-30.
- [10] 赵海洋. 复合型支护技术在甲玛铜多金属矿软弱破碎岩体掘进中的应用[J]. 黄金, 2021, 42(7): 50-53.
- [11] 张纯锋, 付琛, 杜双成, 等. 丰山铜矿中深孔爆破参数优化研究[J]. 采矿技术, 2024, 24(5): 157-161.
- [12] 李绍斌, 尹俊, 杨长辉, 等. 某露天采场破碎岩体预裂爆破参数研究[J]. 云南冶金, 2025, 54(2): 40-46.
- [13] 姜群, 姜寄, 朱阳亚, 等. 全尾砂胶结充填相似采场模拟试验[J]. 黄金, 2019, 40(4): 24-28.
- [14] 纪晓飞, 童大志, 曲展鹏, 等. 充填体下人工假底模型分析与设计[J]. 采矿技术, 2018, 18(6): 35-37.
- [15] 杨纪光, 杜加法, 荆晓东, 等. 某金矿全尾砂膏体充填料浆性能试验研究[J]. 黄金, 2018, 39(10): 32-35.
- [16] 田振军. 关于人工假底假巷技术在中薄厚脉金矿中的应用研究[J]. 世界有色金属, 2017(12): 84-85.
- [17] 李华, 荣辉, 何荣兴, 等. 急倾斜薄矿体采场围岩及假底应力分布规律研究[J]. 现代矿业, 2024, 40(4): 182-186.
- [18] 朱俊宁, 赵周能, 张志贵, 等. 某矿分段空场嗣后胶结充填底柱置换方法研究[J]. 金属矿山, 2018(3): 19-25.
- [19] 杨志芳. 基于数值模拟的不同等级顶板支护效果分析[J]. 黄金, 2025, 46(5): 23-27.

Design and application of artificial false bottom with lightweight energy-absorbing materials for steeply inclined thin ore body

Li Dianhui

(Gansu Province Tianshui Lizi Gold Mine Co., Ltd.)

Abstract: To address the challenge of recovering high-grade ore from the bottom pillar in the mining of steeply dipping thin orebodies in the Lizi Gold Mine of Gansu, an artificial false bottom construction technology based on lightweight energy-absorbing material was adopted to achieve efficient underground bottom pillar resource replacement. Based on the theory of elasticity for thin plate, a mechanical model of the artificial false bottom was established, and the stress distribution and deformation characteristics of the backfill under self-weight and upper load were systematically analyzed. The optimal thickness, concrete strength, and reinforcement scheme of the artificial false bottom were then determined and verified through numerical simulation. The application of lightweight energy-absorbing materials significantly reduced the structural weight and construction period while greatly enhancing mechanized construction efficiency and labor safety. This approach is of great significance in promoting green and sustainable mining.

Keywords: lightweight energy-absorbing material; artificial false bottom; steeply dipping orebody; backfill mining; theory of elasticity for thin plate; numerical simulation; green mine