



移动阅读

王磊,刘志强,李方政,等.西部软岩地层基于内外壁联合承载的冻结井壁减薄方法[J].煤炭学报,2020,45(S2):773-780.

WANG Lei, LIU Zhiqiang, LI Fangzheng, et al. Method for reducing freezing shaft wall thickness based on the combination of inner and outer walls in soft rock strata of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 773-780.

西部软岩地层基于内外壁联合承载的冻结井壁减薄方法

王磊^{1,2},刘志强^{1,2},李方政^{1,2},王延廷^{1,3},张松^{1,2},张基伟^{1,2},丁航^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院 建井研究分院, 北京 100013; 2. 北京中煤矿山工程有限公司, 北京 100013; 3. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要:为解决深部软岩地层冻结井筒内壁设计厚度较大问题,运用煤矿立井井筒设计理论和锚杆支护理论,研究了冻结井筒内层井壁、外层井壁和围岩的联合承载受力机理,提出了一种新型井壁结构形式和内层、外层井壁厚度减薄方法,即在井壁围岩中打入短锚杆,锚杆端头浇筑在外壁内部,并将锚杆端头闭锁的钢丝绳连接在内壁钢筋上,通过不同结构联合承载的方式提高内壁和外壁的承载能力,进而减薄井壁厚度。以内蒙古红庆河煤矿副井-640~-660 m 冻结段为研究对象,通过理论计算得出了采用新型井壁结构形式后的井壁厚度,其中新型内层井壁厚度较原井壁可减薄12.5%,外层井壁厚度可减薄20%;结合数值模拟手段,给出了新型井壁中的应力传递过程。数值计算表明:新型内层井壁内缘混凝土的压应力值为24.5 MPa,小于原内层井壁内缘混凝土压应力值,验证了新型井壁结构的安全性和可靠性;新型井壁结构中,锚杆和钢丝绳传递的外力主要由外壁的刚性变形承担,锚杆在软岩地层中提供的锚拉作用很小,工程应用时可以缩短锚杆的钻入长度,避免锚杆钻入过程中打穿偏斜的冻结管。这种新型井壁结构将外层井壁强度通过钢丝绳和锚杆连接纳入到了内层井壁的承载体系中,提高了内层井壁的承载力,减薄了井壁厚度。

关键词:井壁减薄;冻结井壁;联合承载;冻结法;深部软岩地层

中图分类号:TD265

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2020)S2-0773-08

Method for reducing freezing shaft wall thickness based on the combination of inner and outer walls in soft rock strata of western China

WANG Lei^{1,2}, LIU Zhiqiang^{1,2}, LI Fangzheng^{1,2}, WANG Yanting^{1,3}, ZHANG Song^{1,2}, ZHANG Jiwei, DING Hang^{1,2}

(1. Mine Construction Research Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. China Coal Mine Engineering Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To optimize the inner wall thickness of frozen shaft wall in a deep soft water-rich layer, the combined bearing mechanism of the inner wall, outer wall and surrounding rock is investigated by using the shaft design and bolt support theories. A new type shaft wall structure and a thickness reduction method of inner and outer walls are put forward, in which short bolts are drilled into the surrounding rock. The ends of the bolts are embedded in the outer wall and the wire ropes which fixed at the end of the bolts are combined to the reinforcing bars of the inner wall. The bearing capacity of the inner and outer walls is improved and the thickness of the shaft wall is reduced due to the combination of the

收稿日期:2020-02-18 修回日期:2020-04-01 责任编辑:黄小雨 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2020.0218

基金项目:中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2018QN023);十三五国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600904);国家自然科学基金青年基金资助项目(52008197)

作者简介:王磊(1989—),男,山东德州人,助理研究员,博士。E-mail:tumuanglei@yeah.net

structures. Furthermore, the stress transfer process in the new shaft wall is given by means of numerical simulation. Specifically, in this paper, the -640--660 m frozen section of the auxiliary shaft in Hongqinghe coal mine is taken as a research object, and the corresponding thicknesses are obtained. That is, the thickness of inner wall is reduced by 12.5%, and its outer wall is reduced by 20% when the new shaft wall structure is adopted. The numerical calculation shows that, in the new inner layer shaft wall, the compressive stress value of the inner edge concrete is 24.5 MPa, which is lower than that of the original one. Therefore it verifies the safety and reliability of the new shaft lining structure. In the new shaft lining structure, the external forces transmitted by the anchors and wire ropes are mainly resisted by the outer wall, and the axis forces of bolts in soft rock strata are small. Hence, the drilling length of bolts can be shorted in actual engineering cases to avoid frozen pipes damaged during the bolts drilling processes. On the other hand, the strength of the outer wall is re-integrated into the bearing system of the inner wall through the connection of wire ropes and bolts, which improves the bearing capacity and effectively reduces the thickness of the shaft lining.

Key words: shaft lining thickness reduction; freezing shaft lining; combined bearing; artificial ground freezing; deep soft rock strata

随着我国煤炭资源开发向西部地区转移,大量新建井筒穿越白垩纪、侏罗纪等多个孔隙型含水软岩地层,这些地层具有富水、低强度、弱胶结、遇水泥化等特点,井筒穿越施工难度较大。冻结法凿井是井筒穿越富水软岩地层的有效方法^[1]。冻结法施工的立井井筒多采用双层钢筋混凝土结构。根据煤矿立井井筒设计规范^[2],双层井壁中的外层井壁(外壁)承受建井时期的冻结压力和自重,内层井壁(内壁)承受外壁或夹层传来的水压^[3-4]。随着我国新建井筒深度不断增加、地压和水压的增大,井壁厚度也急剧增加。如:核桃峪煤矿副井底部内壁厚度为1.6 m^[5];母杜柴登矿副井内壁厚度达1.8 m;巴彦高勒矿副井底部内壁厚度为2 m^[6];龙固煤矿副井内壁底部采用厚度为1.1 m的C70高强混凝土浇筑^[7]。井壁厚度的增加,造成井筒混凝土用量和冻土体量增大,提高了井筒的施工难度和建设成本。减薄井壁厚度、开发新型井壁结构的迫切性越来越突出。

许多专家学者对此进行了研究,得出以下3个因素可以有效地减薄井壁厚度:

(1)改进井壁结构,提高井壁材料强度。由理论力学可知,相同厚径比的圆筒,承载能力和井壁材料自身的强度成正比,因此提高井壁的材料强度,可以有效提高井壁承载能力,从而减薄井壁厚度。基于此原理,姚直书等^[8-9]提出了基于混凝土强度提高系数和第四强度理论的井壁厚度减薄计算公式,并设计了一种新型双层钢板混凝土井壁。吴娟^[10]、徐进^[11]通过模型试验得出混凝土强度提高系数为1.73时井壁减薄效果最为明显。蔡海兵等^[12]对新型钢纤维弧板井壁的力学性能进行了相似模拟试验研究,并对影响该井壁极限承载力的因素进行了分析。陈晓祥和杨维好^[13]提出了一种新型单层冻结井壁以减薄井壁厚

度,并建立了考虑水平地应力场的不均匀性、孔隙水压作用和利用基岩承载力的单层冻结井壁设计理论。

这些新型井壁已在多个冻结井筒中得到应用。门克庆矿风井、赵固二矿副井、赵固二矿风井、赵固一矿西风井等井筒中分别采用C75、C80、C90、C100高强混凝土浇筑用于减薄井壁厚度^[14-15]。研究表明,提高混凝土强度可以显著提高井壁承载能力,进而减薄井壁厚度^[16],但井壁材料强度增大的同时也带来了高水化热、易开裂、浇筑困难等问题,且对因竖向附加力造成的井壁破坏改善效果不明显^[17]。

(2)减小井壁的外部荷载。在设计规范中,决定内壁厚度的主要因素是水压,姚直书等^[18]根据混凝土结构设计规范提出了深厚表土层高强钢筋混凝土内壁设计优化方法。周晓敏等^[19]根据第三强度理论,在考虑地下水渗流对围岩和井壁的受力有影响的前提下,引入了无限体中圆形硐室衬砌的弹性平面应变力学模型,推导了考虑围岩、井壁和高水压相互作用的井壁设计公式“包神公式”用于井壁减薄。这些研究在优化井壁厚度上做了大量开创性工作,但相关理论和计算方法还有待进一步的总结完善和推广。

(3)改变井壁形状。一些学者提出通过改变井壁的形状以更好地抵抗不均匀地应力。张建武^[20]提出在不同侧向压力条件下,采用外壁为椭圆,内壁为圆的井壁结构可以改善井壁上的应力分布并维持井壁结构的稳定性。陈振庭^[21]设计在松树山老大井-28 m以上采用长方形断面,-28~-95 m采用椭圆形断面可以更好地抵抗不均匀地应力。但这些异形井壁在设计、施工、机电设备安装等方面均不同于圆形井壁,实际工程中应用较少。

这些研究对井壁厚度减薄进行了许多有益的探索,并在实际工程得到了应用。但其中利用内壁、外

壁和围岩联合承载的方法减薄井壁厚度的研究较少。笔者探讨基于现有设计规范的内壁、外壁、围岩联合承载研究,并采用理论计算和数值模拟的方法,对联合承载受力机理和应力传递过程进行分析。

1 新型井壁提出

1.1 新型井壁设计原理

由双层冻结井壁设计原理可知,冻结壁解冻后,地下水进入内、外层井壁的间隙,使水压直接作用于内壁,因此内壁按照设计层位深度的静水压力计算厚度^[2],在深部地层中,巨大的水压造成内壁厚度较大。与此同时,为保证内壁的强度和抗渗性,浇筑内壁时在内外壁之间铺设一层塑料板,以减小内壁的温度应力及外壁对内壁的约束,避免内壁出现裂缝。

外壁主要作用是在承受水平冻结压力,阻止冻结壁变形,外壁厚度按照冻结压力计算。井筒建成后,冻结壁开始融化,冻结压力逐渐消失,因此外壁在井筒建成后的承载能力有较大冗余,但该冗余承载能力无法分担内壁受力。若采用连接构件连接内壁、外壁和围岩,使3者共同受力,则可以利用外壁和围岩的承载能力以减薄井壁厚度。

基于以上思路,将锚杆和钢丝绳作为连接构件引入深部软岩段井筒支护体系中^[22-23]。锚杆支护是一种重要的井巷支护方法,在井筒支护方面也有着广泛应用。内蒙古伊泰广联煤化有限责任公司红庆河煤矿副井-640~-660 m 冻结软岩段采用了锚网喷临时支护,锚杆长度 600 mm,直径 20 mm,间排距为 800 mm × 800 mm,锚杆外露长度为 100 mm。锚杆外露段可以连接外壁钢筋,使之和围岩连接,提高外壁强度;钢丝绳用于连接外壁与内壁。钢丝绳外层套橡胶软管,通过橡胶软管的可压缩性减弱对内壁的约束,避免内壁产生裂缝。井壁结构形式如图 1 所示。

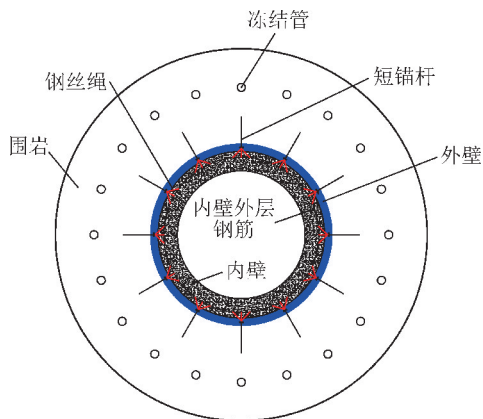


图 1 新型井壁结构形式

Fig. 1 Schematic of new shaft lining structure

1.2 新型井壁的组成

在深部软岩段,外壁钢筋绑扎结束后向围岩打入锚杆,锚杆在围岩中采用高强药卷粘接,锚杆端头留在外壁钢筋内侧,同时在钢筋外侧设置抗拔板,可以有效避免锚杆在外壁中产生滑移。托盘和抗拔板尺寸大于钢筋网空隙,如图 2 所示。锚杆端头采用锁扣闭锁 4 根钢丝绳,施工时外壁模板上开钢丝绳可通过的小孔,浇筑内壁前将钢丝绳拉出。外壁浇筑完成后,捆扎内壁钢筋时,将钢丝绳采用张拉机具闭锁在内壁钢筋上,锚杆和钢丝绳采用楔形倒扣式闭锁机构连接,可有效提高钢丝绳抗拔能力。钢丝绳材料选用 304 不锈钢以提高抗腐蚀能力,后分块铺设塑料板,并使钢丝绳穿出,再浇筑内壁混凝土。

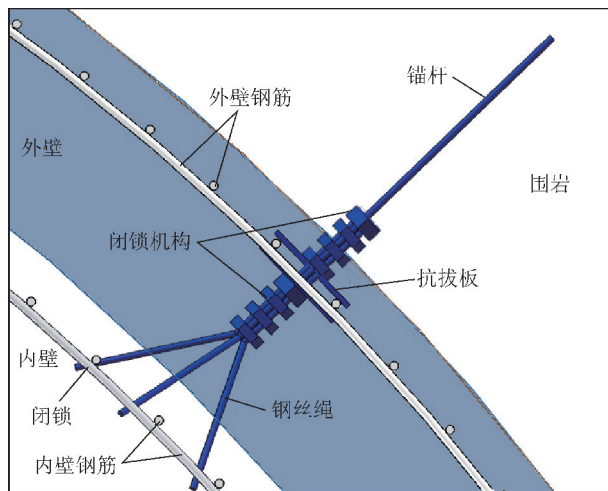


图 2 内壁、外壁、围岩联合承载示意

Fig. 2 Schematic diagram of the combined bearing of inner wall, outer wall and surrounding rock

内外壁联合承载方法将增加施工步骤,较现有冻结双层井壁施工工序繁琐,笔者仅研究冻结井筒深部井筒软岩段内外壁联合承载机理,为井壁减薄研究提供思路。为计算新型井壁的承载力,笔者取红庆河煤矿副井-640~-660 m 冻结段井壁参数,基于实际地层条件,结合副井中已施工的锚网喷支护参数,对内壁、外壁、围岩联合承载能力进行计算。考虑施工可行性,锚杆间排距由实际施工的 800 mm × 800 mm 改为 2 000 mm × 1 000 mm。参数见表 1。

2 新型井壁受力

2.1 外壁、围岩锚杆支护计算

外壁设计时,外荷载按照承受的冻结压力标准值^[2]计算,该数值与实际冻结设计有关。因该参数无法得知设计方采用的实际数据,故外荷载取西部基岩段冻结压力最高经验值 2.065 MPa^[24],计算得出的外壁厚度是偏保守、偏安全的。

表 1 红庆河煤矿副井-640~-660 m 冻结段井壁参数
Table 1 Auxiliary shaft lining parameters of section from -640 to-660 m in Hongqinghe coal mine

序号	参数	数值
1	内壁内半径/m	5.25
2	内壁厚度/m	1.6
3	外壁内半径/m	6.85
4	外壁厚度/m	0.6
5	岩石平均抗压强度/MPa	20
6	锚杆长度 h_a /mm	600
7	锚杆直径/mm	20
8	锚杆水平间距 a /m	2
9	锚杆垂直间距 b /m	1

(1) 岩石容许抗压强度

$$[f_c] = \bar{f}_c K_e \quad (1)$$

其中, $[f_c]$ 为岩石容许抗压强度, MPa; $\bar{f}_c$ 为岩石单向极限平均抗压强度^[25]; K_e 为自然条件影响系数, 取 0.55。得出 $[f_c] = 11$ MPa。

(2) 锚杆加固后岩体强度

$$V_T = \frac{T}{10abh} \quad (2)$$

$$[\sigma_{kn}] = 1.48[f_c]V_T^{0.27} \quad (3)$$

其中, V_T 为强度容积系数; T 为锚杆初始拉力, kN; a 为锚杆水平间距, m; b 为锚杆垂直间距, m; h 为锚杆的有效长度, m; $[\sigma_{kn}]$ 为岩石与锚杆支护体系的容许应力, MPa。可得 $V_T = 1$, $[\sigma_{kn}] = 16.28$ MPa。

(3) 围岩锚杆支护体系的支承能力 P' ^[26]

$$P' = 0.25[\sigma_{kn}] \left[1 - \left(\frac{R_B}{R_B + h_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中, $R_B = R_l + r'$, R_l 为掘进半径, mm; h_0 为岩石锚杆体系的工作厚度, mm; $h_0 = h_a - 2r'$, h_a 为锚杆长度, r' 为锚杆之间岩石拱的高度, 取 0.2 m^[26]。得出 $P' = 0.407$ MPa。

围岩施加锚杆支护后, 岩石锚杆支护体系增加了 0.407 MPa 的支撑能力, 外壁设计水平外荷载可相应减小, 外壁设计水平外荷载 $P_N = P_Y(2.065 - 0.407)/2.065 = 0.803P_Y$, 其中, P_Y 为外荷载, 取西部基岩段冻结压力最高经验值 2.065 MPa。

2.2 外壁竖向钢筋计算

外壁自上而下短段掘砌, 由于混凝土入模温度较高及水泥水化热的影响, 使井壁外围的冻土融化。融化段高内的井壁自重产生吊挂力, 外壁的竖向钢筋按吊挂力计算, 一般设计中取吊挂段高为 $15 \sim 20$ m^[26]。在新型井壁中, 外壁增加了由外壁锚固入围岩的锚

杆, 锚杆端部浇筑在外壁内部, 可以承担部分井壁的自重应力, 因此可以用于减少外壁的竖向配筋。其中, 锚杆在外壁吊挂过程中主要承受剪应力, 由材料力学可知

$$\tau = \frac{Q}{A} \leq [\tau] \quad (5)$$

$$[\tau] = (0.6 - 0.8)[\delta] = (0.6 - 0.8) \frac{\delta_s}{n} \quad (6)$$

其中, τ 为钢筋所受切应力; Q 为剪力; A 为钢筋截面积; δ_s 为锚杆屈服强度极限; n 为安全系数, 取 2。许用切应力 $[\tau] = 117.25$ MPa, 计算得出外壁内部锚杆可承受最大剪力为 $Q = n_w A [\tau] = 883.6$ kN, 其中 n_w 为外壁中的锚杆根数。外壁截面积 $A_w = -26.9$ m², 厚度为 0.6 m, 钢筋混凝土密度 $\rho = 2550$ kg/m³, 计算可得单圈锚杆可以承担外壁自重的高度为 $h_b = 2.15$ m, 大于锚杆垂直间距 1 m, 外壁内部锚杆可以承载全部外壁吊挂段高的自重。

2.3 内壁所受荷载计算

内壁所受荷载按静水压力设计^[2], 荷载标准值为

$$P_{n,k} = -0.01K_z H \quad (7)$$

其中, $P_{n,k}$ 为内壁所承受荷载的标准值, MPa; K_z 为荷载折减系数, 一般取 $0.81 \sim 1.00$; 0.01 为水的容重, MN/m³; H 为地层计算深度。根据现行井壁设计原则, 研究对象冻结深度为 640 m, K_z 取 0.81 , 计算可得 $P_{n,k} = 5.184$ MPa。

结合井壁设计原理^[2], 将其所受压应力换算为压力, 取两排锚杆的中间段进行计算, 如图 3 所示。

$$F_c = 2\pi r_n P_{n,k} h_c \quad (8)$$

其中, h_c 为一个锚杆段高度, 取 1 m; r_n 为内壁外缘半径, 计算得出一个锚杆段高的内壁所受压力 $F_c = 242$ MN。

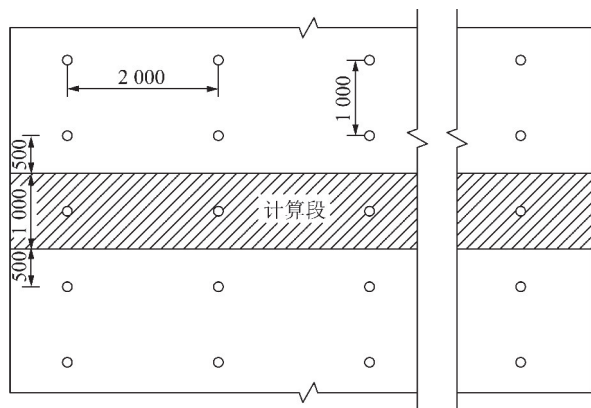


图 3 内壁外缘剖面图

Fig. 3 Sectional view of inner wall outer edge

内壁受水压作用出现变形时,钢丝绳随之受拉。钢丝绳使用 18×7 圆股 304 不锈钢钢丝绳,直径 20 mm,则钢丝绳最小破断拉力为

$$F_0 = \frac{K'D^2R_0}{1\ 000} \quad (9)$$

其中, F_0 为钢丝绳最小破断拉力, kN; K' 为钢丝绳的最小破断拉力系数值, 查表^[27]得 $K' = 0.328$; 可得 $F_0 = 291$ kN; D 为钢丝绳公称直径, mm; R_0 为钢丝绳公称抗拉强度, MPa, 查表得 $R_0 = 2\ 220$ MPa。设计单根锚杆上闭锁 4 根钢丝绳与内壁钢筋连接, 按照 2 m×1 m 的锚杆间距, 内壁外侧共计安装 24 根锚杆, 以钢丝绳平均水平夹角 45° 计算, 合计可提供拉力 $F_s = n_1 n_2 F_0 / \sqrt{2} = 19.7$ MN。由此得知, 内壁设计时外荷载可相应减小, 即内壁设计时外荷载 $P'_N = \frac{2.42 \times 10^5 - 1.97 \times 10^4}{2.42 \times 10^5} P_{n,k} = 0.919 P_{n,k}$ 。

2.4 井壁厚度减薄计算

采用新型井壁结构形式后, 内壁、外壁的设计外荷载都相应减少, 则井壁厚度相应减薄。内壁厚度 h_1 和外壁厚度 h_2 计算公式分别为

$$h_1 = r \left(\sqrt{\frac{f_{cz}}{f_{cz} - 2\nu_k P_{n,k}}} - 1 \right) \quad (10)$$

$$h_2 = (r + h_1) \left(\sqrt{\frac{f_{cz}}{f_{cz} - 2\nu_k P_d}} - 1 \right) \quad (11)$$

$$f_{cz} = f_c + \mu f_y \quad (12)$$

式中, h_1 为内壁厚度, mm; r 为井筒净半径, mm; f_{cz} 为钢筋与混凝土综合强度计算值, N/mm²; ν_k 为设计荷载系数, 计算内壁时取 1.4, 按冻结压力计算外壁时取 1.05; h_2 为外壁厚度, mm; P_d 为井筒计算深处的冻结压力, MPa; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值, N/mm²; μ 为配筋率; f_y 为钢筋强度设计值, N/mm²。

由表 2 可知, 新型井壁的内壁厚度为 1.48 m, 相较原内壁厚度减薄 0.12 m; 外壁厚度为 0.45 m, 相较原外壁厚度减薄 0.15 m。

3 新型井壁应力传递分析

采用数值分析的方法, 对新型井壁内的应力传递过程进行研究。

3.1 有限元模型

数值分析仍以红庆河煤矿副井-640~ -660 m 冻结段井壁为研究对象, 采用有限元软件 ANSYS 对井壁受力传递过程进行分析, 共建立两组有限元模型, 两组模型与原型井壁完全相同, 建立内壁、外壁、围岩、锚杆、钢筋等全部模型。第 1 组模型为原井壁模

型, 外壁与内壁结构之间无连接, 内壁单独承担水荷载。第 2 组模型为新型井壁模型, 按照减薄后的井壁厚度进行建模, 钢筋直径按照配筋率相等原则进行换算, 内壁通过钢丝绳和锚杆与外壁和围岩相连, 联合承受水压。建立的原井壁有限元模型与实际井壁相同, 新型井壁模型与理论计算模型相同, 2 组模型参数见表 3。

表 2 正常井壁与减薄井壁参数

Table 2 Parameters of original and thinned shaft lining

序号	参数	内壁	外壁
1	混凝土标号	C70	C60
2	外荷载折减系数	0.919	0.803
3	f_{cz} /MPa	33.97	28.43
4	ν_k	1.40	1.05
5	井筒净半径 r /m	5.25	由内壁第 8 项取值
6	外荷载/MPa	5.184	2.065
7	正常厚度/m	1.6	0.6
8	新型井壁厚度/m	1.48	0.45
9	减薄厚度/m	0.12	0.15

表 3 有限元计算参数

Table 3 Parameters in finite element model

模型	原内壁	新型内壁	原外壁	新型外壁
厚度/mm	1 600	1 400	600	480
环向钢筋/mm	36/32/36@ 250	34/32/34@ 250	25@ 250	23@ 250
纵向钢筋/mm	36@ 250	34@ 250	25@ 250	23@ 250
混凝土标号	C70	C70	C60	C60
环向配筋率/%	0.71	0.71	0.33	0.33

注: @ 为土木工程中钢筋间距的表达方法, 25@ 250 为 25 mm 直径的钢筋间隔 250 mm 排列。

根据设计图纸, 内壁中布设 3 层钢筋, 外壁布设 1 层钢筋, 建模时, 采用梁单元模拟井壁中的钢筋, 采用实体单元模拟混凝土, 如图 4 所示。2 组井壁模型高度均为 15 m, 井壁与围岩网格最大尺寸为 0.25 m。新型井壁共划分 472 272 个单元, 其中实体单元 384 480 个, 梁单元 87 792 个, 其中, 内壁与外壁网格节点不共用, 且在内、外壁接触部位设置自动接触单元防止网格穿透, 新型井壁中钢丝绳节点与内壁最外侧钢筋节点连接, 以模拟新型井壁的真实受力状态。

3.2 计算结果分析

计算完成后提取数据, 结果如图 5~7 所示。

(1) 内壁受压变形。周晓敏^[28]、杨维好、申明亮^[29]等学者研究得出, 随着外荷载增加, 井壁混凝土进入塑性阶段, 在相同外荷载条件下, 井壁破坏首先是内缘混凝土到达强度极限, 引起内缘混凝土剥落进

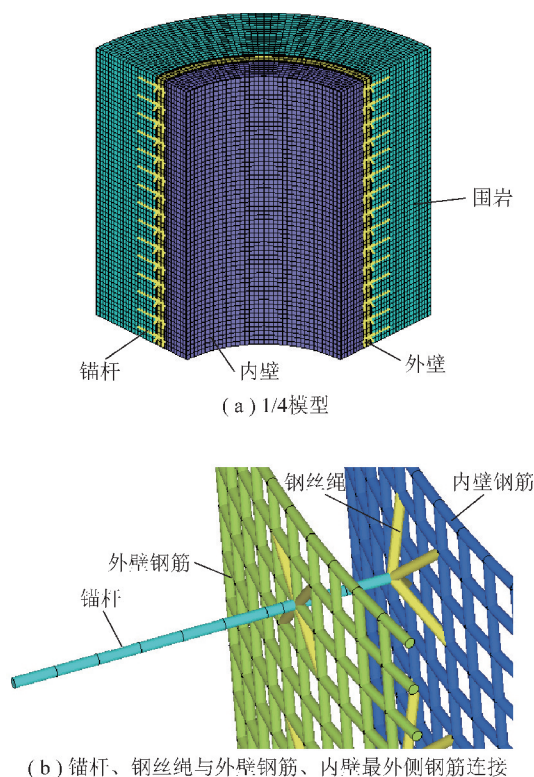


图4 新型井壁模型示意

Fig. 4 Schematic diagram of new shaft lining model

而产生破坏。提取内壁内缘混凝土压应力云图,如图5所示。

新型井壁和原井壁内壁内缘混凝土所受压应力分别为 24.5 MPa 和 46.6 MPa,新型井壁内缘所受压应力小于原井壁,分别是极限承载力的 1/3 和 2/3,表明新型井壁结构中内壁的承载能力得到了显著提高。

(2) 钢丝绳和锚杆受力。新型井壁结构中,锚杆和钢丝绳所受轴力如图6所示。

由图6可知,当内壁受水压作用产生变形时,内壁钢筋产生形变,并拉动钢丝绳和锚杆,继而将外力传递给外壁混凝土和钢筋。钢丝绳所受拉力最大为 21.34 kN,在外壁中的锚杆所受最大轴力为 29.93 kN,在围岩中的锚杆最大轴力为 4.25 kN。由此可知,锚杆在软岩地层内所受拉力较小,锚固在软岩地层中的锚杆对外壁和内壁提供锚拉作用较少。钢丝绳传递的外力大部分由外壁变形承担,只有很小一部分传导至围岩中。基于该结果可以对新型井壁进行改进,缩短锚杆在围岩中的钻入长度,避免锚杆施工打穿冻结管。

(3) 外壁受力变形。钢丝绳和锚杆受拉后,将力通过抗拔板传导至外壁,引起外壁变形。新型井壁中内壁最外侧钢筋和外壁钢筋位移如图7所示。

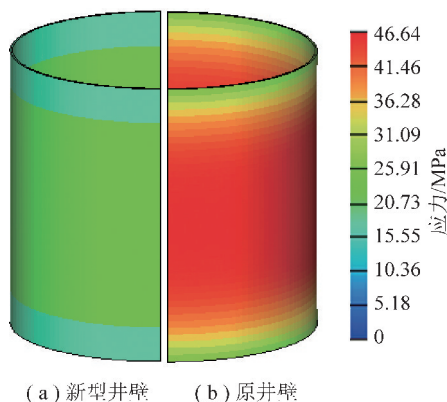


图5 内壁内缘混凝土压应力

Fig. 5 Compressive stresses of the concrete on the inner edge of inner walls

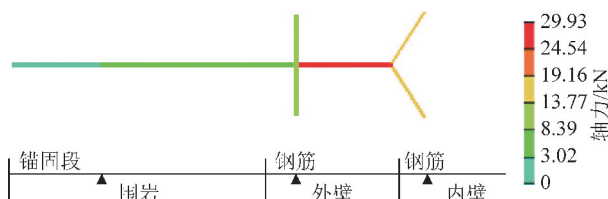


图6 锚杆和钢丝绳的轴力云图

Fig. 6 Axial forces of anchor and wire rope

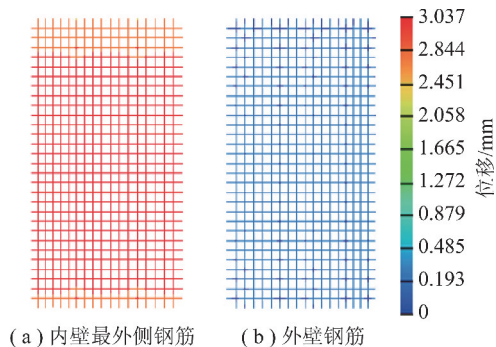


图7 内、外壁钢筋变形

Fig. 7 Reinforcement deformation of inner and outer walls

内、外壁的环向和竖向钢筋均处于受压状态,内壁最外侧钢筋变形为 3.037 mm,外壁钢筋变形为 0.52 mm,说明外壁通过钢丝绳与内壁连接后产生了变形,有效地参与了内壁承载。由模拟结果可知,外壁的强度越大,对内壁的承载越有利。原井壁中外壁厚度为 0.6 m,外壁厚度已经较薄,同时考虑外壁的稳定性的要求,因此在设计新型井壁时,可以不减薄外壁厚度。

数值计算结果表明,在整个应力传递体系中,内壁受水压作用产生变形,继而引起钢丝绳与锚杆变形,该过程可视为从面力向点力的转化,钢丝绳和锚杆作为介质将力传导至外壁钢筋网和围岩,使外壁产生形变并抵消部分内壁外荷载,提高了内壁的承载力。

4 结 论

(1)提出了基于现有井壁设计规范的西部地区深部软岩段冻结井壁厚度减薄方法,设计了新型锚固式双层钢筋混凝土井壁,该井壁将外壁强度通过钢丝绳和锚杆连接纳入内壁的承载体系中,实现了冻结井筒内、外壁和围岩的联合承载,提高了井壁的承载能力,进而减薄了井壁。

(2)以红庆河煤矿副井-640~-660 m 冻结段为研究对象对新型井壁厚度进行了计算,得出新型井壁结构内壁厚度为 1.48 m,较原井壁厚度减薄 7.5%;外壁厚度为 0.45 m,较原井壁减薄 25%。表明通过内外壁联合承载的方式可以有效减薄井壁厚度。

(3)数值计算结果表明,在相同外荷载作用下,新型井壁内缘混凝土的压应力远小于原井壁内缘混凝土的压应力,说明减薄后的新型井壁结构安全性优于原井壁。新型井壁结构可以为冻结法凿井在千米深井中的应用提供思路。

(4)新型井壁结构中,外壁有效地参与了内壁的承载,内壁通过钢丝绳和锚杆传递出的外力主要由外壁承担,外壁强度越大,对内壁的承载越有利,因此在新型井壁设计时,可以不对外壁进行减薄。同时数值计算结果表明,锚杆在软岩地层中所受拉力较小,实际应用中可以缩短锚杆的钻入长度或不钻入锚杆,避免锚杆施工过程中打穿偏斜的冻结管。

在实际冻结井壁设计与施工中,井壁厚度减薄受地质条件等多种因素影响,该研究针对冻结井壁厚度过大问题,基于现有煤矿立井井筒设计规范,提出在深部软岩段局部采用内外壁联合承载的新型井壁,为冻结法凿井中的内层井壁厚度减薄提供一种思路。

参考文献(References):

- [1] 刘志强,洪伯潜. 改革开放 30 年煤矿井筒建设技术及装备发展[J]. 建井技术,2011,32(S1):4-7.
LIU Zhiqiang, HONG Boqian. Coal mine shaft construction technology and equipment development within 30 years of reform and opening up[J]. Mine Construction Technology, 2011, 32(S1):4-7.
- [2] GB 50384—2016, 煤矿立井井筒及硐室设计规范[S].
- [3] 韩涛,杨维好,任彦龙,等. 钢骨混凝土井壁水平极限承载特性的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(2):181-186.
HAN Tao, YANG Weihao, REN Yanlong, et al. Horizontal ultimate bearing capacity of encased steel concrete shaft lining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2):181-186.
- [4] 张涛,杨维好,陈国华,等. 大体积高性能混凝土冻结井壁水化热温度场实测与分析[J]. 采矿与安全工程学报,2016,33(2):290-296.
ZHANG Tao, YANG Weihao, CHEN Guohua, et al. Monitoring and

analysis of hydration heat temperature field for high performance mass concrete freezing shaft lining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2):290-296.

- [5] 李宁. 核桃峪副井冻结工程难点及解决对策[J]. 煤炭技术, 2015, 34(7):56-57.
LI Ning. Difficulties and countermeasures of freezing engineering in Hetaoyu auxiliary shaft[J]. Coal Technology, 2015, 34(7):56-57.
- [6] 姚直书,程桦,荣传新. 西部地区深基岩冻结井筒井壁结构设计优化[J]. 煤炭学报,2010,35(5):760-764.
YAO Zhishu, CHENG Hua, RONG Chuanxin. Shaft structural design and optimization of deep freezing bedrock shaft in west area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5):760-764.
- [7] 赵春来,陈文豹,赵明祥. 龙固副井冻结井壁结构形式探讨[J]. 建井技术,2003,24(4):24-27.
ZHAO Chunlai, CHEN Wenbao, ZHAO Mingxiang. Discussion on the structure form of freezing shaft wall in Longgu auxiliary shaft[J]. Mine Construction Technology, 2003, 24(4):24-27.
- [8] 姚直书,秦一雄,程桦,等. 双层钢板混凝土复合井壁设计计算方法研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2008,28(3):14-18.
YAO Zhishu, QIN Yixiong, CHENG Hua, et al. Study on design method of composite shaft lining with concrete and double steel cylinder[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2008, 28(3):14-18.
- [9] YAO Zhishu, CHENG Hua, RONG Chuanxin. Research on stress and strength of high strength reinforced concrete drilling shaft lining in thick top soils[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 17(3):432-435.
- [10] 吴娟. 西部地区冻结井筒内层井壁力学特性研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2013.
WU Juan. Study on mechanical characteristics of inner shaft lining at frozen shaft in west area[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013.
- [11] 徐进,姚直书,王凤娇,等. 深基岩冻结井筒外层井壁力学特性试验研究[J]. 煤炭技术,2016,35(11):55-57.
XU Jin, YAO Zhishu, WANG Fengjiao, et al. Experimental study on outer shaft linings structural mechanical behavior of deep freezing bedrock shaft[J]. Coal Technology, 2016, 35(11):55-57.
- [12] 蔡海兵,姚直书,荣传新. 钢纤维混凝土弧板井壁结构的力学特性[J]. 煤炭学报,2010,35(1):46-50.
CAI Haibing, YAO Zhishu, RONG Chuanxin. Mechanical characteristic of steel fiber concrete arc shaft wall structure[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1):46-50.
- [13] 陈晓祥,杨维好. 新型单层冻结井壁水平极限承载特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(S2):3740-3748.
CHEN Xiaoxiang, YANG Weihao. Experimental study of horizontal ultimate loading capacity of new type monolayer freezing shaft lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2):3740-3748.
- [14] 李功洲. 中国冻结法凿井理论与技术综述[J]. 建井技术, 2017, 38(4):1-10.
LI Gongzhou. China mine shaft lining theory and technology sum-

- mary with ground freezing method[J]. Mine Construction Technology, 2017, 38(4): 1-10.
- [15] 张英. 深厚冲积层冻结法 C100 高强高性能混凝土井壁结构设计[J]. 煤炭工程, 2017, 49(9): 10-13.
- ZHANG Ying. Structure design of C100 high performance concrete shaft wall with ground freezing in deep thick alluvium[J]. Coal Engineering, 2017, 49(9): 10-13.
- [16] 姚直书, 程桦, 杨俊杰. 深表土中高强钢筋混凝土井壁力学性能的试验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 41-45.
- YAO Zhishu, CHENG Hua, YANG Junjie. The experimental study on high strength reinforced concrete shaft lining in deep alluvium [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 41-45.
- [17] 洪伯潜. 约束混凝土结构在井筒支护中的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 150-154.
- HONG Boqian. The research and application of confined concrete in shaft lining[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 150-154.
- [18] 姚直书, 赵丽霞, 程桦, 等. 深厚表土层冻结井筒高强钢筋混凝土内壁设计优化与实测分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2125-2132.
- YAO Zhishu, ZHAO Lixia, CHENG Hua, et al. Optimization design and measurement analysis on inter lining of high strength reinforced concrete frozen shaft lining with deep topsoil[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2125-2132.
- [19] 周晓敏, 陈建华, 罗晓青. 孔隙型含水基岩段竖井井壁厚度拟订设计研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1174-1178.
- ZHOU Xiaomin, CHEN Jianhua, LUO Changqing. Research on the preliminary thickness design of shaft lining in porous rock aquifer [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1174-1178.
- [20] 张建树. 高应力不同侧压条件下井壁合理结构及稳定性[J]. 山西焦煤科技, 2013, 2(2): 54-56.
- ZHANG Jianwu. Reasonable structure and stability of mine shaft liner under high stress and uneven side pressure[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2013, 2(2): 54-56.
- [21] 陈振庭. 松树山老大井椭圆形竖井施工测量[J]. 金属矿山, 1982(12): 15-18, 30.
- CHEN Zhenting. Construction measurement of elliptical shaft in Songshan Mountain[J]. Metal Mine, 1982(12): 15-18, 30.
- [22] 康红普, 林健, 杨景贺, 等. 松软破碎井筒综合加固技术研究与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 447-452.
- KANG Hongpu, LIN Jian, YANG Jinghe, et al. Study on practice and combined technology for reinforcing soft and fractured shaft [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 447-452.
- [23] 康红普. 高强度锚杆支护技术的发展与应用[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(2): 1-4.
- KANG Hongpu. Development and application of high strength bolt support technology [J]. Coal Science and Technology, 2000, 28(2): 1-4.
- [24] 韩博, 宁方波, 王桦, 等. 西部侏罗系深基岩立井井壁冻结压力实测与分析[J]. 建井技术, 2015, 36(5): 27-30.
- HAN Bo, NING Fangbo, WANG Hua, et al. In-situ measurement and analysis of freezing pressure of shaft lining in western Jurassic stratum deep bedrock [J]. Mine Construction Technology, 2015, 36(5): 27-30.
- [25] 孙利辉, 纪洪广, 杨本生. 西部典型矿区弱胶结地层岩石的物理力学性能特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 206-214.
- SUN Lihui, JI Hongguang, YANG Bensheng. Physical and mechanical characteristic of rocks with weakly cemented strata in western representative mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 206-214.
- [26] 张荣立, 何国纬, 李铎. 采矿工程设计手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [27] GB8918—2006, 钢丝绳国家标准[S].
- [28] 周晓敏, 周国庆, 胡启胜, 等. 高水压基岩竖井井壁模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2514-2522.
- ZHOU Xiaomin, ZHOU Guoqing, HU Qisheng, et al. Model test research on shaft lining built in high pressure rock aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2514-2522.
- [29] 申明亮, 张勇, 薛庆峰, 等. 局部荷载作用下立井井壁破坏形式研究[J]. 燕山大学学报, 2009, 33(6): 528-534.
- SHEN Mingliang, ZHANG Yong, XUE Qingfeng. Damage form research of shaft sidewall under local load [J]. Journal of Yanshan University, 2009, 33(6): 528-534.