



移动扫码阅读

谢立栋,东兆星,张涛,等.爆破冲击下单层井壁接茬钢板参数优化数值模拟研究[J].煤炭科学技术,2019,47(12):18-23. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.003

XIE Lidong, DONG Zhaoxing, ZHANG Tao, et al. Research on numerical simulation of jointed steel plates parameters optimization in single-walled wall under blasting impact[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 18-23. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.12.003

爆破冲击下单层井壁接茬钢板参数优化数值模拟研究

谢立栋^{1,2,3}, 东兆星^{1,2}, 张涛^{1,2}, 齐燕军^{1,2}, 宋雷³

(1.中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116;
3.徐州工程学院 土木工程学院,江苏 徐州 221018)

摘要:为了提高深立井井筒断面利用率,出现了带接茬钢板的新型单层井壁;爆破掘进中,经常发生接茬钢板区域混凝土开裂渗漏水现象。采用数值模拟方法分析接茬钢板与混凝土间耦合相互作用。研究结果表明:每模井壁中存在4个震动加强区域,震动按从强到弱排序,竖钢板外侧混凝土>井壁、岩壁接触面处混凝土>每模底端斜钢板上侧混凝土>每模顶端斜钢板下侧混凝土,该结论对同类型井壁均适用。综合考虑上述区域混凝土损伤、塑性应变大小,所研究背景工程下接茬钢板竖板厚度取8 mm最优,混凝土最大损伤值6.0%,损伤比例占整模混凝土的0.57%,上述定量结果受岩石性质、爆破方案、井壁结构几何尺寸与井壁混凝土强度等级影响,研究方法在同类型井壁结构中具有适用性。采用优化后竖钢板厚度的取值,使井壁混凝土开裂渗漏水现象大幅降低,工程质量良好。

关键词:爆破冲击;单层井壁;接茬钢板;混凝土损伤;钢板-混凝土

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)12-0018-06

Research on numerical simulation of jointed steel plates parameters optimization in single-walled wall under blasting impact

XIE Lidong^{1,2,3}, DONG Zhaoxing^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}, QI Yanjun^{1,2}, SONG Lei³

(1.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

2.State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

3.School of Civil Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221018, China)

Abstract: In order to improve the utilization rate of the section of the deep shaft, a new single-layer shaft wall with jointed steel plates has been invented. In blasting excavation, the phenomenon of concrete cracking and leakage in the adjacent area to the joint steel plate often occurs. In this paper, the numerical simulation method was used to analyze the coupling interaction between the steel plate and the concrete. The simulation results show that there are 4 vibration strengthening zones in the wall of each mold well, sorted from strong to weak, the outer concrete of vertical steel plate > the concrete at the interface of shaft wall and rock wall > the upper concrete of inclined steel plate at the bottom of each mold > the lower concrete of inclined steel plate at the top of each mold, this conclusion is applicable to the same type of shaft wall. Considering the damage and plastic strain of concrete in the above-mentioned areas, the optimum thickness of vertical plate of the background steel is 8 mm, the maximum damage value of the concrete is 6.0%, and the damage ratio accounts for 0.57% of the concrete. The above quantitative results are influenced by rock properties, blasting scheme, geometric size of shaft lining structure and strength grade of concrete. The geometrical dimensions of the borehole structure and the strength grade of the borehole concrete, the research method has applicability in the same type of borehole wall structure. The thickness of the vertical steel plate of the background engineering is optimized, and the phenomenon of cracking and seepage of the concrete wall is greatly reduced, and the quality of the project is good.

Key words: blasting impact; single-layer shaft lining; joint steel plate; concrete damage; steel plate-concrete

收稿日期:2019-04-25;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600904);国家自然科学基金重点资助项目(51734009);中建材联结基金资助项目(2016-m-1)

作者简介:谢立栋(1981—),男,江苏徐州人,博士研究生,讲师。E-mail:xielidong@cumt.edu.cn

通讯作者:东兆星(1966—),男,河北石家庄人,博士,教授,博士生导师。E-mail:dongzx1966@163.com

0 引 言

随着浅部煤炭资源枯竭,深度超过 500 m 的井筒逐渐成为常态,传统双层井壁结构,井筒断面利用率在 40%以下,对于深立井从工期到造价均很难接受^[1],新型单层井壁结构成为深立井未来发展趋势^[2-3]。井壁结构按模段循环施工,利用接茬钢板改善上下模段混凝土连接性能^[4]。钻爆法是开拓基岩段立井唯一可用工法,爆破震动不可避免要对邻近新浇井壁结构产生一定负面作用^[5]。在使用带接茬钢板单层井壁井筒中,出现接茬钢板局部区域混凝土损伤破坏现象,直观表现就是接茬钢板处漏水,解决此问题成为深立井开拓迫在眉睫的工作^[6-7]。

国内外关于爆破掘进地震波对带接茬钢板单层井壁影响文献较少,能查阅到与研究内容最类似的是爆破震动对不带接茬钢板素混凝土井壁影响。文献[8-11]采用模型试验研究爆破震动对素混凝土井壁影响,得到素混凝土井壁损伤值;王二成^[12]现场实测,囿于爆破安全生产原因,未能对距工作面最近的底模井壁震动进行监测。笔者研究内容实质是爆破震动作用下井壁混凝土中钢板结构的动力计算问题,是混凝土-钢板相互作用过程,需要考虑二者耦合关系。文献[13-14]对土中浅埋结构的动力相互作用进行了理论分析,给出了动力反应曲线的简易设计方法。柳锦春等^[15]采用一维波动理论方法分析爆炸荷载作用下内衬钢板的混凝土组合结构局部效应。

鉴于理论复杂性,物理试验高成本,笔者采用数值模拟方法开展研究。首先制备井壁混凝土试块,测试其相关力学参数,并将这些参数应用到井筒有限元模型中^[16]。根据应力波在层状结构中传播理论及有限元模拟结果确定井壁结构 4 个局部危险区域,研究这些区域损伤、塑性累积应变随接茬钢板竖板厚度改变的变化情况,最后综合确定最优竖钢板厚度。

1 工程概况

内蒙古门克庆矿副立井采用冻结钻爆法施工,井壁结构采用带接茬钢板的新式单层井壁。井筒设计深度 785 m,井筒掘进半径 10.9 m,井壁厚度 1.3 m。炮孔深度 4.5 m,直径 55 mm,选用 0、25、50、75、100 ms 五段毫秒延期电雷管,采用 T220 岩石水胶炸药,药卷长度 400 mm,直径 45 mm,爆破参数见表 1,炮眼布置如图 1 所示。

表 1 爆破参数

Table 1 Blasting parameters

圈别	眼数/个	圈径/m	角度/ (°)	每圈药 量/kg	眼间 距/mm	分段	药量/ kg
1	8	1.7	90	41.0	651	I	41.0
2	14	3.4	90	71.7	757	II	161.3
3	20	5.2	90	89.6	813		
4	27	6.9	90	121.0	801	III	268.8
5	33	8.6	90	147.8	817		
6	40	10.4	90	153.6	816	IV	153.6
7	65	12.3	89	208.0	594	V	208.0

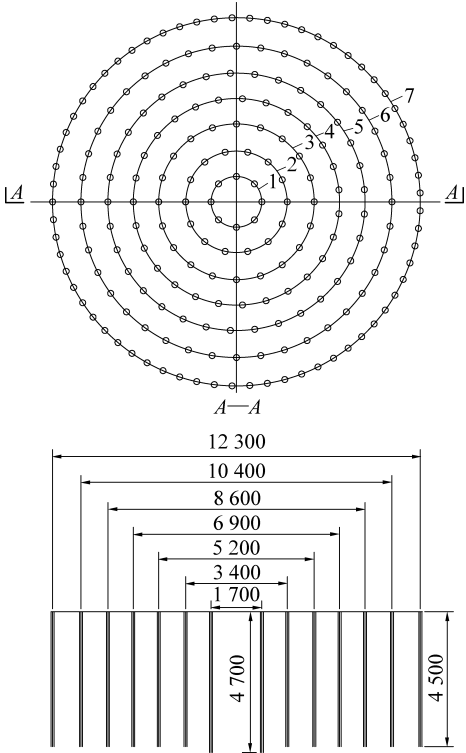


图 1 炮眼布置

Fig.1 Blast holes arrangement

接茬钢板几何尺寸见表 2。接茬钢板横截面及井壁施工如图 2 所示。

表 2 接茬钢板几何参数

Table 2 Geometric parameters of joint steel plate

上竖板高	下竖板高	斜板长	角度	竖板厚	斜板厚
H_1 /mm	H_2 /mm	L_1 /mm	α /(°)	T_1 /mm	T_2 /mm
200	200	1 657	45	8	12

井筒自上往下按模段施工,每模循环进尺 4 m,耗时 2.5 d,井壁采用 C65 混凝土,新浇混凝土底端距工作面 4 m。刃脚支座立于工作面岩石上,接茬钢板安放在刃脚上,内侧是整体下行钢模板,下移至刃脚上,外侧是岩壁,在围护结构内浇筑井壁混凝土。

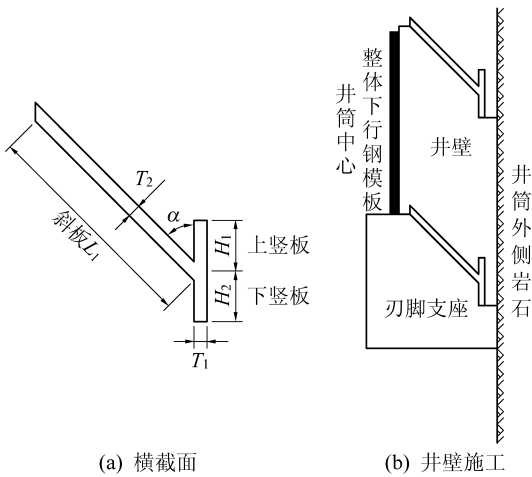


图 2 接茬钢横截面及井壁施工示意

Fig.2 Cross-section of joint steel plate and illustration of shaft wall construction

2 井壁爆破数值模型与材料参数

2.1 数值模型

根据立井结构对称性,模型取 1/4 结构,井筒净半径 6.15 m,考虑到岩石粉碎圈、破裂圈范围为炮孔直径的 10~30 倍,约 1.5 m;数值模拟计算范围取炮孔直径的 100 倍左右^[17],约 5 m,加上最外圈炮孔直径 6.15 m,共计 11.15 m,所以,模型外边界半径取 12.0 m。工作面以下高度 9.0 m,工作面以上高度 17.0 m,模型共 4 个井壁模段。

施工现场爆破方案为 7 圈 5 段(图 1),按实际情况建模会出现大量异型单元,计算过程出现负体积现象,不收敛,无法完成计算,所以,数值模型很难做到与现场炮眼完全对应。考虑到药量等效原则,根据圣维南原理,为使数值模型与工程实际尽可能相似,有限元模型中设 5 段炸药,每段 1 圈,从内到外每圈 1、2、3、4、5 个炮孔,根据每段炸药量及炮孔个数确定数值模型中每圈炮孔直径,如图 3 所示。炸药、空气采用 ALE 多物质算法,井壁、围岩采用 lagrange 算法,围岩、井壁和空气间流固耦合。为消除应力波在模型边界处反射对结果影响,对模型两径向面施加对称约束,井壁内表面为自由边界,其余面为无反射边界。

2.2 材料参数

按现场井壁混凝土配合比制作试块,根据每模井壁混凝土龄期测出其材料参数见表 3。炸药选用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料;岩石材料采用随动硬化弹塑性本构模型,关键字为 MAT_PLASTIC_KINEMATIC;混凝土采用 HJC 材料模型。

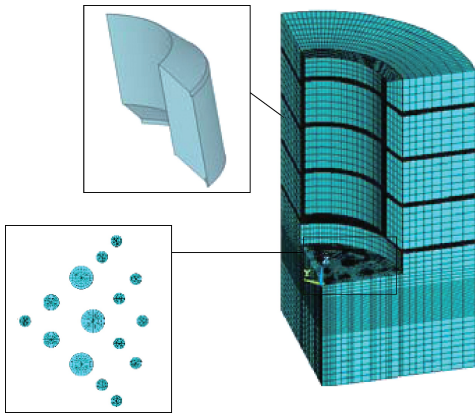


图 3 立井有限元模型

Fig.3 Finite element model of shaft

表 3 不同龄期 C65 混凝土试块力学参数^[16]

Table 3 Mechanical parameters of C65 concrete test blocks with different ages^[16]

模数	1	2	3	4
龄期/d	1.0	3.5	6.0	8.5
单轴抗压强度/MPa	16.4	37.0	50.7	58.7
剪切模量/GPa	9.5	12.7	14.0	14.5

3 钢板厚度优化与结果分析

3.1 研究区域选择

根据接茬钢板单层井壁结构特点,选取离爆源最近的第一模井壁为分析对象。爆破应力波经围岩绕射进入井壁结构,井壁结构在局部区域呈现层状复合结构特点,应力波透、反射复杂,如图 4 所示。

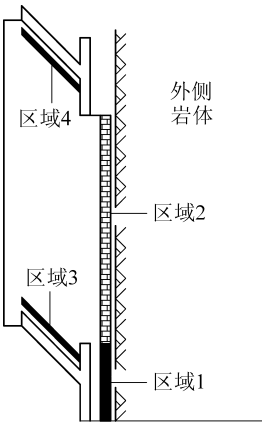


图 4 第一模井壁局部震动加强区域

Fig.4 Vibration enhanced local area of one mold wall

钢板密度 $\rho_s = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,钢板波速 $C_s = 5170 \text{ m/s}$,钢板波阻抗 $\rho_s C_s = 4.0 \times 10^7 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$;岩壁为红砂岩,其密度 $\rho_r = 2.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,红砂岩波速 $C_r = 2390 \text{ m/s}$,红砂岩波阻抗; $\rho_r C_r = 5.0 \times 10^6$

$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;第一模井壁 C65 混凝土密度(龄期1 d)
 $\rho_c = 2.4 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$, 1 d 龄期混凝土波速 $C_c = 3\ 125$
 m/s , 1 d 龄期混凝土波阻抗 $\rho_c C_c = 7.5 \times 10^6 \text{ kg}/$
 $(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;红砂岩与混凝土波阻抗比 $\rho_r C_r/(\rho_c C_c) =$
 0.67 , 钢板与混凝土波阻抗比 $\rho_s C_s/(\rho_c C_c) = 5.33$ 。区域 1 混凝土为软-硬-更硬 3 层介质, 区域 2, 区域 3
 和区域 4 混凝土为软-硬 2 层介质。井壁中传播的
 三维应力波, 理论解析推导非常困难^[7-8]; 此处, 按
 一维应力波进行近似分析, 根据界面两侧介质波阻
 抗, 爆破压缩波在上述 4 个区域反射、透射均为压缩
 波, 最终上述区域爆破震动得到增强。

炸药峰值时刻应力如图 5—图 6 所示(t 为爆
 破时间, Von Mises 应力简称 V-M 应力), 从数值模拟

结果可以看出:整模井壁绝大部分区域应力分布较
 均匀, 因材料分层波阻抗不匹配, 仅 4 个分界面局部
 应力增大。区域 1、区域 2 和区域 3 因爆心距小, 应
 力数值较大。区域 4 因爆心距大, 应力波衰减迅速,
 增强效果不明显, 数值模拟结果与按一维波动理论
 分析结果一致。

3.2 接茬钢板优化参数选择

接茬钢板变化因素(表 2)包括竖板长度、斜板
 倾角、竖板厚度和斜板厚度。因井壁结构特点与施
 工情况:竖板长度、斜板倾角已确定不作变化, 仅竖
 板厚度和斜板厚度可作调节, 爆破震动波传播路径
 先经竖板传入井壁, 竖板厚度对结果影响最重要, 结
 合理论解析^[13-14], 研究竖板厚度对结果的影响。

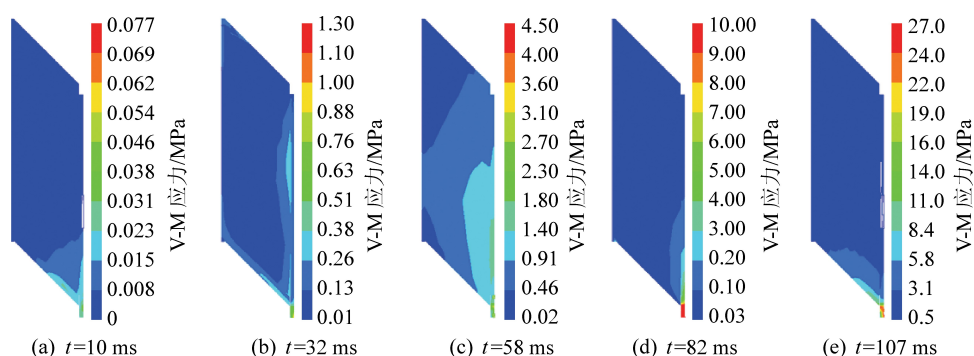


图 5 一摸井壁 V-M 应力

Fig.5 V-M effective stress of one mold wall

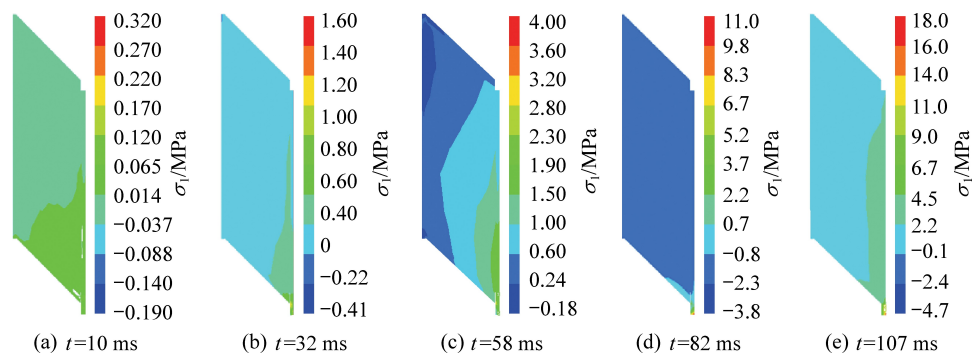


图 6 第一模井壁最大主应力 σ_1

Fig.6 Maximum principal stress σ_1 of No.1 mold wall

3.3 结果分析

有限元模型中竖钢板厚度取 6、8、10、12 mm 4
 种工况。钢板改变了局部区域应力场分布, 钢板厚
 度变化, 钢板中应力波延滞时间变长; 钢板与混凝
 土间相对刚度发生变化, 钢板厚度影响组合结构变
 形协调, 最终影响钢板变形吸收能量的多少^[13-15]。

区域 1 井壁混凝土损伤如图 7 所示, 横坐标位
 置起点位于竖钢板底端, 终点位于竖钢板顶端。损
 伤主要位于下竖钢板外侧, 这也符合井壁结构特点,

区域 1 是伸出条状结构, 相对刚度较小, 动力作用系
 数大, 与理论研究结果相符^[13]。随竖板厚度增大,
 损伤值先减小再增大再减小, 厚度 12 mm 最优, 最
 大损伤值 1.6%, 厚度 8 mm 良好, 最大损伤值 6.0%,
 损伤范围是整模混凝土的 0.57%。

区域 2 井壁混凝土虽未出现损伤, 但出现较大
 塑性应变。区域 1、区域 2 井壁混凝土塑性应变如
 图 8 所示, 横坐标位置起点位于该模井壁底端, 终
 点位于该模井壁顶端, 塑性应变主要发生在每模井壁

下部。竖板厚度 6、10、12 mm 上述区域混凝土塑性应变相近,竖钢板厚度 8 mm 时塑性应变数值较小,效果最优,厚度 6 mm 效果良好。

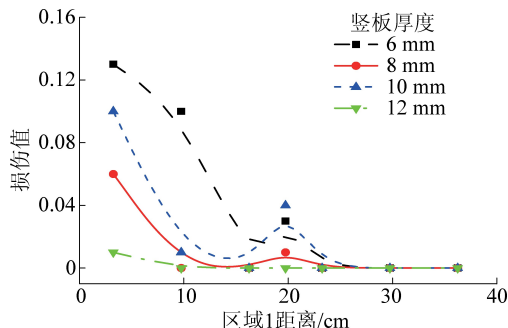


图7 竖钢板外侧井壁损伤范围(区域1)

Fig.7 Damage range of outside shaft wall of vertical steel plate (Area 1)

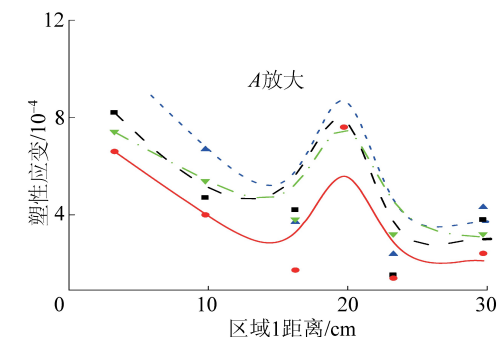
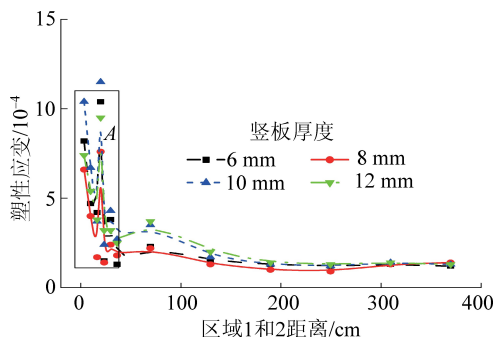


图8 井壁、岩壁接触区域塑性应变(区域1和2)

Fig.8 Plastic strain in interface area between shaft wall and rock wall (Area 1 and 2)

区域3井壁混凝土虽未出现损伤,但出现较大塑性应变,如图9所示,坐标位置起点位于竖板与斜板交点处,终点位于斜板末端,塑性应变沿斜板长度范围整体变化平缓(10 mm 除外)。竖钢板厚度选用 8 mm 最优,选用 6 mm 良好。

区域4井壁混凝土虽未出现损伤,但出现较大塑性应变,如图10所示,坐标位置起点位于竖板与斜板交点处,终点位于斜板末端,塑性应变沿斜板长度先减小再增大。4种厚度的钢板应变结果较接近,竖钢板厚度选用 6 mm 最优,选用 10 mm 良好。

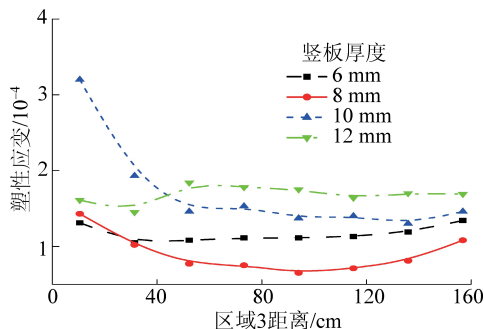


图9 区域3塑性应变

Fig.9 Plastic strain of Area 3

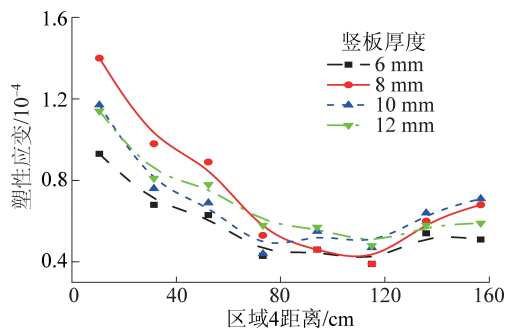


图10 区域4塑性应变

Fig.10 Plastic strain of Area 4

综合上述4个区域井壁损伤与塑性应变情况,竖钢板厚度取 8 mm 最优。研究结论与文献^[9]结论吻合较好;爆破震动使井壁混凝土不同部位质量降低程度不同,素混凝土井壁中下部质量降低最严重,带接茬钢板井壁竖钢板外侧(区域1)最严重。文献[5]中素混凝土井壁损伤最大值 1.59%,带接茬钢板井壁(竖板厚度取 8 mm)损伤最大值 6.5%。在所研究工程背景井筒建设中,当竖钢板厚度取 8 mm 时,接茬处混凝土开裂与渗漏水现象最轻。

4 结 论

1) 爆破冲击下带接茬钢板单层井壁中存在4个震动加强区域,分别为竖钢板外侧,井壁、岩壁接触面,每模底端斜钢板上侧,每模顶端斜钢板下侧。

2) 按照震动加强程度从强到弱排序:竖钢板外侧混凝土>井壁、岩壁接触面混凝土>每模底端斜钢板上侧混凝土>每模顶端斜钢板下侧混凝土,该结论对同类型井壁均适用。

3) 综合上述4个区域混凝土损伤、塑性应变大小,本工程接茬钢板竖板厚度取 8 mm 最优;混凝土最大损伤值 6.0%,损伤比例占整模混凝土的 0.57%,定量结果受岩石性质、爆破方案、井壁结构几何尺寸与井壁混凝土强度等级影响,需具体工程具体分析,研究方法适用于同类型井壁结构。

4)改变竖钢板厚度,上述区域混凝土的损伤、塑性应变均产生显著变化,说明接茬钢板与周围混凝土是耦合相互作用的,针对此类工程问题无法推导解析解,采用数值模拟方法求解是合理的。

参考文献(References):

- [1] 刘志强,王 博,杜健民,等. 新型单平台凿井井架在深大立井井筒施工中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 24-29.
LIU Zhiqiang, WANG Bo, DU Jianmin, *et al.* New mine shaft sinking headframe with single platform applied to construction of deep and large diameter mine shaft[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 24-29.
- [2] 张 驰,杨维好,刘计寒,等.深厚冻结基岩中新型单层井壁的施工技术 with 混凝土应变实测[J].煤炭学报,2012,37(2): 192-199.
ZHANG Chi, YANG Weihao, LIU Jihan, *et al.* Construction technology and monitoring analysis on concrete strain of a new single-layer shaft lining in deep aqueous bed rock during freeze sinking[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 192-199.
- [3] 张 驰,杨维好,齐家根,等.基岩冻结新型单层井壁施工技术与监测分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(2):337-346.
ZHANG Chi, YANG Weihao, QI Jiagen, *et al.* Construction technology and monitoring analysis of a new single-layer shaft lining in deep aqueous bed rock during freezing sinking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 337-346.
- [4] 杨维好,黄家会,张 涛,等.现浇混凝土接茬板及其施工工艺[P].中国:CN101550833,2009-10-07.
- [5] 张召冉,郭义先,矫伟刚,等.大断面斜井基岩段钻爆法高效快速施工技术研究[J].煤炭科学技术, 2018, 46(2):126-130.
ZHANG Zhaoran, GUO Yixian, JIAO Weigang, *et al.* Study on high efficient and rapid construction technology of drilling and blasting-method in bedrock section of large section inclined shaft[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 126-130.
- [6] 王 博,刘志强,杜健民,等.双平台大型立井凿井井架设计方法[J]. 煤炭科学技术,2017,45(11):161-167.
WANG Bo, LIU Zhiqiang, DU Jianmin, *et al.* Design method of double platform sinking headframe of large mine shaft[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 161-167.
- [7] 周晓敏,谢琰珂,李德春,等.磁西副立井超千米单层井壁受力变形实测与分析[J].煤炭学报,2015,40(5):1015-1020.
ZHOU Xiaomin, XIE Yanke, LI Dechun, *et al.* Field monitoring & analysis on the stressing deformation of single layer lining of auxiliary shaft over 1000 m deep in Cixi colliery[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1015-1020.
- [8] 黄 琦,胡 峰.爆炸荷载下混凝土的力学特性测试研究[J].煤炭学报,1996,21(5):502-505.
HUANG Qi, HU Feng. Test of mechanical properties of concrete under the load of blasting[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(5): 502-505.
- [9] 黄 琦,胡 峰.立井爆破震动对短段砌壁砼强度影响的模拟测试研究[J].山东矿业学院学报,1995,14(1):68-72.
HUANG Qi, HU Fang. Simulation tests and studies on the influence of blast vibration upon concrete strength of short lining of shaft[J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1995, 14(1): 68-72.
- [10] 单仁亮,王二成,李 慧,等.西北冻结立井砼井壁爆破损伤模型[J].煤炭学报,2015,40(3):522-527.
SHAN Renliang, WANG Ercheng, LI Hui, *et al.* Damage model of frozen vertical shaft concrete under blasting load in Northwest China[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 522-527.
- [11] 单仁亮,耿慧辉,吕进阳,等.新喷混凝土强度受爆破荷载影响的模型试验[J].煤炭学报,2014,39(11):2157-2164.
SHAN Renliang, GENG Huihui, LYU Jinyang, *et al.* Model test on the strength of young shotcrete under blasting load[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2157-2164.
- [12] 王二成.西北地区冻结立井爆破对早期高强砼井壁损伤研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
- [13] 李国豪,刘泽圻,林润德.冲击波对土中浅埋结构的动力作用[J].同济大学学报,1980,8(3):1-9.
LI Guohao, LIU Zeqi, LIN Runde. The dynamic response of shock wave on the shallow-buried structure in soil[J]. Journal of Tongji University, 1980, 8(3): 1-9.
- [14] 钱七虎,陈震元.冲击波作用下浅埋结构复土层中的卸载波[J].爆炸与冲击,1982,2(1):24-37.
QIAN Qihu, CHEN Zhenyuan. Development of the unloading wave in soil cover under action of shock wave on buried structure[J]. Explosion and Shock Waves, 1982, 2(1): 24-37.
- [15] 柳锦春,方 秦,张亚栋,等.爆炸荷载作用下内衬钢板的混凝土组合结构的局部效应分析[J].兵工学报,2004,25(6):773-776.
LIU Jinchun, FANG Qin, ZHANG Yadong, *et al.* Analysis of local effects on steel-backed concrete composite structures under blast loading[J]. Acta Armament, 2004, 25(6): 773-776.
- [16] 谢立栋,东兆星,张 涛,等.立井爆破掘进空隙高度优化设计的小波包分析[J].煤矿安全,2018,49(12):229-234.
XIE Lidong, DONG Zhaoxing, ZHANG Tao, *et al.* Wavelet packet analysis for optimization of gap height in shaft blasting excavation[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(12): 229-234.
- [17] LS-DYNA Keywords User's Manual[M]. California: Livemore Software Technology Corporation, 2016.