

完井工具试压间围壁结构抗侵彻性能分析

周新卫

(中海油田服务股份有限公司, 天津 300450)

摘要: 对完井工具试压间围壁的抗侵彻性能进行分析, 根据井下工具压力试验的测试介质、测试温度、测试压力、在测试中可能脱出零件等条件, 提出了单钢板、双钢板+木材夹层、双钢板+混凝土夹层 3 种试压间围壁结构的组合方案, 通过有限元模拟计算分析得到满足试压要求的 3 种组合试压间围壁较为保守的结构尺寸, 并通过打击试验对组合 1 结构模拟分析结果进行了验证。

关键词: 试压间围壁; 抗侵彻性能; 完井工具

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)05-0066-06

混凝土凝固后通常表现出脆性, 特别是随强度的增加这一问题尤为突出。通过向混凝土中添加钢纤维, 可以有效地发挥其在抵抗裂纹、增强结构并提高韧性方面的作用。这种做法显著改善了混凝土基体的韧性与延性, 并且对混凝土的整体性能产生了积极影响。

杨正有等^[1]以 152 mm 一级轻气炮为实验平台, 对混凝土侵彻实验的实验结果进行了分析, 使用不同的侵彻计算公式, 分析比较不同侵彻计算公式的计算值和实测值, 最终得出 ACE 侵彻计算公式和 Forrestal 侵彻计算公式的计算值和实测值最为接近, 误差控制在 10% 之内, 符合工程计算的要求。葛涛等^[2]对不同等级的混凝土靶体进行了实际射击测试, 使用了不同速度的实弹。然后, 将实验结果与多种经验公式进行了比较, 以验证其准确性。王德荣等^[3]根据混凝土在遭受弹体侵彻时的介质状态和能量分布情况, 探讨了侵彻近区和耗散破碎区之间的比例尺度关系。通过进行不同体积掺量的轻骨料混凝土与钢纤维的试验研究, 分析了这些混凝土在抗冲击性能方面的差异, 以及它们对各种力学性能的影响规律, 并对超高强钢纤维混凝土、超高强混凝土和普通混凝土的相对韧性进行了比较^[4-5]。刘德华等^[6]对超高强混凝土 RPC 材料的尺寸效应和强度进行了科学研究和作用机理分析, 研究表明, 大尺寸试件的抗压强度较小, RPC 材料作为一种脆性材料, 尺寸效应表现比较明显。杜修力等^[7]经过一系列实验验证, 对钢纤维超高强混

土进行了力学性能的综合评估, 包括压缩强度、弹性模量等参数。实验结果明确显示, 钢纤维的添加能够显著提升超高强混凝土的强度水平。Zhang 等^[8]进行了深入研究, 探讨了钢纤维高强混凝土的抗断裂性。Banthia 等^[9]研究了钢纤维抑制混凝土裂程。戎志丹等^[10]研究表明, 针对不同强度等级的高强度和超高性能钢纤维混凝土材料, 随着混凝土的强度等级和纤维含量的增加, 该材料的抵御侵彻能力显著提升。这意味着, 它能够有效减小子弹侵彻的深度和速度, 并大大降低材料的破坏程度。曹海等^[11]通过射弹混凝土靶板侵彻的实验方法, 研究了含有聚合物的钢纤维混凝土的抗侵彻性能, 结果表明, 适当添加聚合物会提升钢纤维混凝土的抗侵彻性能。陈星明等^[12]认为在混凝土抗侵彻的数值模拟过程中, 必须准确确定关键参数的数值, 以提高模拟结果的精确度和可信度, 保证模拟结果与实验数据一致, 并合理规划试验的数量和方案。吴成^[13]进行了数值模拟研究, 探究了弹丸侵彻钢纤维混凝土的问题, 并成功地模拟了弹丸在侵彻混凝土靶时形成的坑和层裂现象。陈雍雍^[14]已对无粗集料超高强混凝土的配比进行了设计, 并研究了其制备和养护过程中的力学性能, 随后, 通过引入钢纤维(掺量为 3%), 对原有的混凝土进行了增韧改性, 形成了钢纤维无粗集料超高强混凝土。雷杰等^[15]研究了钢纤维超高强混凝土的力学性能, 特别是承载性能, 通过进行钢纤维超高强混凝土的受剪试验, 得出了随着承载台有效厚度和钢纤维体积率的

收稿日期: 2024-10-22

作者简介: 周新卫(1986—), 男, 河北石家庄人, 工程师, 研究方向为石油机械。

增加,承台受剪承载力显著提高的结论,并对承载计算公式进行了深度的补充和拓展。李亚^[16]为了深入研究碳纤维复合材料新型结构的抗侵彻特性,通过构建碳纤维复合结构侵彻模型解析碳纤维的抗侵彻特性和毁伤机制,并通过搭建高速运动分析系统总成对碳纤维模型进行验证,结果表明,弹丸以250 m/s速度侵彻,无法击穿靶板,但是靶板的最内层会产生拉伸损伤。铝合金耐冲击效能一般,聚氨酯泡沫对弹丸的动能损失较小,而碳纤维材料铺层结构具有较高的抵御侵彻的能力。

基于上述研究,本文提出单钢板、双钢板+木材夹层、双钢板+混凝土夹层3种试压间围壁结构的组合方案,通过有限元模拟设计出刚好不被子弹打穿的试压间围壁厚度,按照该厚度制作靶板并进行打击试验,以验证有限元模拟分析得到的围壁结构尺寸数据的安全性。

1 概述

井下工具为完井过程中重要的系统设备,主要的井下工具包括封隔器、井下安全阀、滑套、放气阀等。井下工具多在高温高压的环境下使用,所以为了保证设备质量,在设备出厂前会进行压力试验。压力试验多在厂区内试压间进行,试压间工况参数见表1。从表1中可知,设备测试压力最高超过100 MPa,设备零件突然脱落可能会导致严重的事故或损害。所以,执行试压间围壁抗侵彻性能的相关分析非常重要。

表1 井下工具试压间测试工况参数

项目	液体测试	气体测试	水压密封性能试验	气体密封性能试验
测试介质	液压油	氮气	液压油	氮气
测试温度/℃	室温	室温	80~232	80~232
测试压力/MPa	34.47~172.37	34.47~68.95	34.47~103.42	34.47~103.42

本文主要针对完井中心现有试压间的试压工件、工装结构提出3种试压间围壁结构组合方案,根据测试介质、温度、压力条件,给出不同零件(图1)的侵彻分析结果,模拟计算出满足试压要求的围壁结构尺寸。

2 研究方法

参考邓云飞等^[17]实验系统与方法建立有限元模型,对比文献中的实验结果验证有限元的可行性。建立试压间围壁的有限元模型,通过有限元计算出四种零件对应的弹道极限速度。在试压间内部压力的作用下,当零件脱离时,这种压力能可以

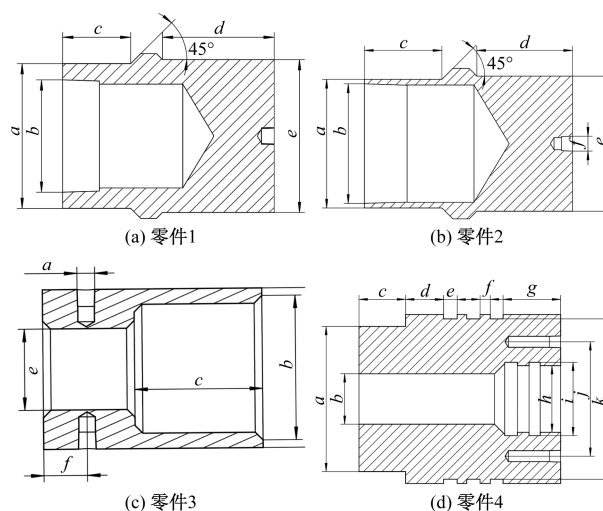


图1 零件示意图

被转化为零件飞出时的动能,并使用张金梅等^[18]提出的计算方法,变换的压力能 N_p 为

$$N_p = PAS \quad (1)$$

式中: P 为试压间内部压力,MPa; A 为受力面积, m^2 ; S 为在最大压力情况零件飞出飞行的距离, m 。

根据文献和实际情况确定当试压间测试介质为气体时取 $S = 0.1 m$,为液体时取 $S = 0.3 m$ 或 $0.4 m$ 。

零件的动能 N_v 为

$$N_v = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

式中: m 为飞出零件的质量, kg ; v 为模拟得出的零件弹道极限速度, m/s 。

令零件的压力能与动能相等,即 $N_p = N_v$ 。反算出不同零件对应的最大允许压力值 P ,从而验证3种试压间结构设计是否满足指定抗侵彻要求。

3 抗侵彻性能分析

为满足试压间压力值 25 000 psi(172.37 MPa)的要求,需要对试压间围壁的结构抗侵彻性能进行分析。现有单钢板、双钢板+木材夹层、双钢板+混凝土夹层3种组合方案,分别对这3种方案进行有限元模拟,计算出满足目标要求的围壁结构尺寸。

3.1 有限元建模方法及参数设置

3.1.1 单元选取与几何模型

零件和试压间围壁模型均使用 ANSYS 17.0 的 LS-DYNA 板块采用 SOLID164 单元,为避免沙漏效应的影响,提高计算精度,采用完全积分计算。围壁设置为边长 1 m 的方形板。零件和围壁采用侵彻面接触(ERODING_SURFACE_TO_SUR-

FACE), 围壁板之间采用自动面接触 (AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE), 板周边采用全约束固定, 对称面处约束垂直对称面方向的位移。为减小计算量, 利用 1/2 轴对称模型进行模拟, 零件与围壁模型如图 2 所示。

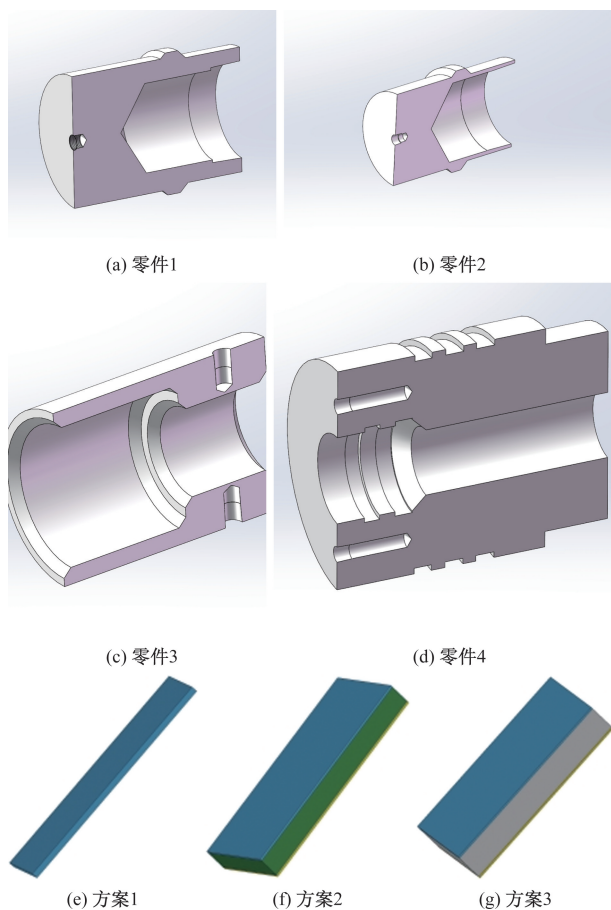


图 2 零件与围壁模型

3.1.2 材料本构关系

零件材料为 45 号钢, 围壁钢板采用 Q235B 钢, 木板夹层按照进口松木考虑, 混凝土强度等级为 C20。钢材均采用 MAT_015 (MAT_JOHNSON_COOK) 即 Johnson-Cook 本构关系和断裂准则, 文献[19]给出了 45 号钢和 Q235 钢的材料参数。木材采用 MAT_143 (MAT_WOOD) 模型, 文献[20]给出了不同情况下松木材料的模型参数, 偏安全考虑选用默认值。混凝土夹层采用 MAT_111 (MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE) 模型, 周志强^[21]总结了该材料模型参数的含义并给出了参数修正的方法。表 2 汇总了围壁材料的参数取值。

3.2 有限元模拟结果

运用第 2 节的方法计算出试压试验达到要求压

力值 25 000psi (172.37 MPa) 时, 如果零件脱出时的速度。通过计算发现当试验压力相同时, 若零件脱出, 零件 1 和零件 3 最容易打穿围壁, 故只需考虑零件 1 和零件 3。零件脱出时的速度见表 3。通过有限元模拟, 试算出零件刚好不能击穿的围壁尺寸, 见表 4。

表 2 试压间围壁材料的参数取值

参数	Q235 钢	木材	C20 混凝土
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 850	673	2 400
弹性模量/GPa	206	顺纹 11.35, 横纹 0.25	25.5
泊松比	0.30	0.16	0.20
抗压强度设计值/MPa	200	顺纹 13.32, 横纹 2.57	9.6
抗拉强度设计值/MPa	200	顺纹 40.03, 横纹 0.96	1.1

表 3 各工况零件脱出速度

工况	模型面积/ m^2	模型质量/kg	零件脱出速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	试验压力/MPa
零件 1 (S=0.3)	0.01	9.25	355.50	172.37
零件 1 (S=0.4)			410.50	
零件 3 (S=0.3)	0.06	33.85	422.50	
零件 3 (S=0.4)			488.00	

表 4 试压间尺寸

组合	零件 1		零件 3	
	钢板厚度 (S=0.3)/mm	钢板厚度 (S=0.4)/mm	钢板厚度 (S=0.3)/mm	钢板厚度 (S=0.4)/mm
组合 1	33.00	37.00	47.00	65.00
组合 2	24.00	28.00	28.00	32.00
组合 3	19.00	24.00	23.00	28.00

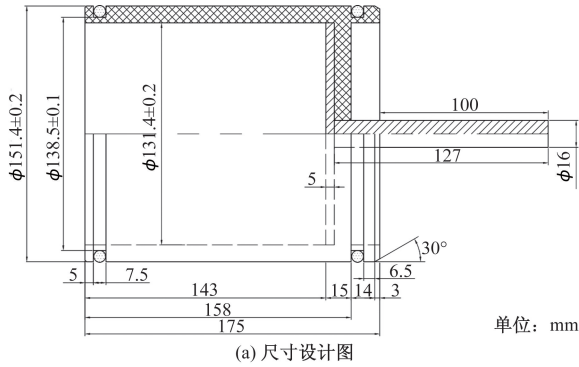
4 打击试验验证

参考第 3 节的计算结果, 设计试件进行打击试验。试验选用组合 1 形式, 即单钢板围壁结构, 钢板采用 Q235B。首先确定子弹打击的初始速度, 通过有限元模拟设计出刚好不被子弹打穿的试压间围壁厚度, 按照该厚度制作靶板并进行打击试验, 如果试验中子弹未能打穿靶板, 则证明有限元计算的围壁结构数据是安全的, 即可以通过有限元模拟计算出试压间围壁的尺寸。

4.1 弹体与靶板

轻气炮发射管外径为 151.4 mm, 子弹设计为弹头加弹壳的形式, 整体重量控制在 1.7 kg, 如图 3 所示。经过计算, 保证子弹整体重心在水平长度的中点处, 从而保证弹头飞出发射管时不会倾斜。

将轻气炮气压设置为 0.5 MPa, 计算得到子弹的初始速度, 然后通过有限元计算出靶板厚度为 12 mm, 外形尺寸为 1 m \times 1 m。根据计算结果制作



(b) 实体图(1:7)

图 3 打击试验子弹

靶板试件并根据夹具开孔位置,在靶板的相应位置进行开孔,靶板固定方法如图 4 所示。

4.2 打击过程分析

图 5 为利用高速摄像机拍摄子弹冲击靶板的典型过程。将高速摄像机的帧率调定为 2 500 fps,即每 400 μ s 左右拍摄一张图像,图 5 截取了子弹弹头撞击靶板以及子弹整体未打穿靶板而被弹开的瞬间。可以发现,弹体在整个撞击过程中保持刚性,未发生变形,并且弹头在打击过程中保持水平移动。子弹打击靶板过程中,弹头首先接触靶板并开始减速,此刻之后弹头与弹壳分离,故在进行有限元分析时,只需要模拟弹头打击靶板的过程。试验结果为子弹最终未能打穿试件,则说明有限元分析给出的结果数据作为试压间围壁尺寸的设计值是安全的。

4.3 试验结果与有限元结果

有限元模拟时子弹的初速度为 110.7 m/s,是靶板的弹道极限速度,试验轻气炮压力设置为 0.5 MPa,通过高速摄像机影像计算出试验中子弹初始速度为 120 m/s。如图 6 所示,观察试验现象可得,弹头在靶板上留下了一个圆形的浅坑,与有限元模拟一致,验证了有限元计算出的围壁尺寸是安全的。

5 结论

根据试压间进行压力试验的测试介质、温度、



(a) 靶板正面(1:40)



(b) 靶板侧面(1:40)

图 4 靶板固定方法

压力等条件,对 3 种试压间围壁结构组合方案进行抗侵彻性能分析,使用 ANSYS 17.0 的 LS-DYNA 板块模拟计算出了满足试压要求的围壁结构尺寸,并进行了打击试验验证。主要结论如下。

(1)模拟计算出可以达到要求压力值 172.37 MPa 的 3 种围壁形式的尺寸,当试压间压力相同时,若零件脱出,零件 1 和零件 3 最容易打穿围壁,最保守的 3 种结构形式分别为 65 mm 钢板、32 mm 双钢板+100 mm 木板、28 mm 双钢板+155 mm 混凝土夹层。

(2)通过有限元模拟设计出刚好不被子弹打穿的试压间围壁厚度,按照该厚度制作靶板并进行打击试验,试验中子弹未能打穿靶板,证明了有限元模拟分析得到的围壁结构尺寸数据是安全的。

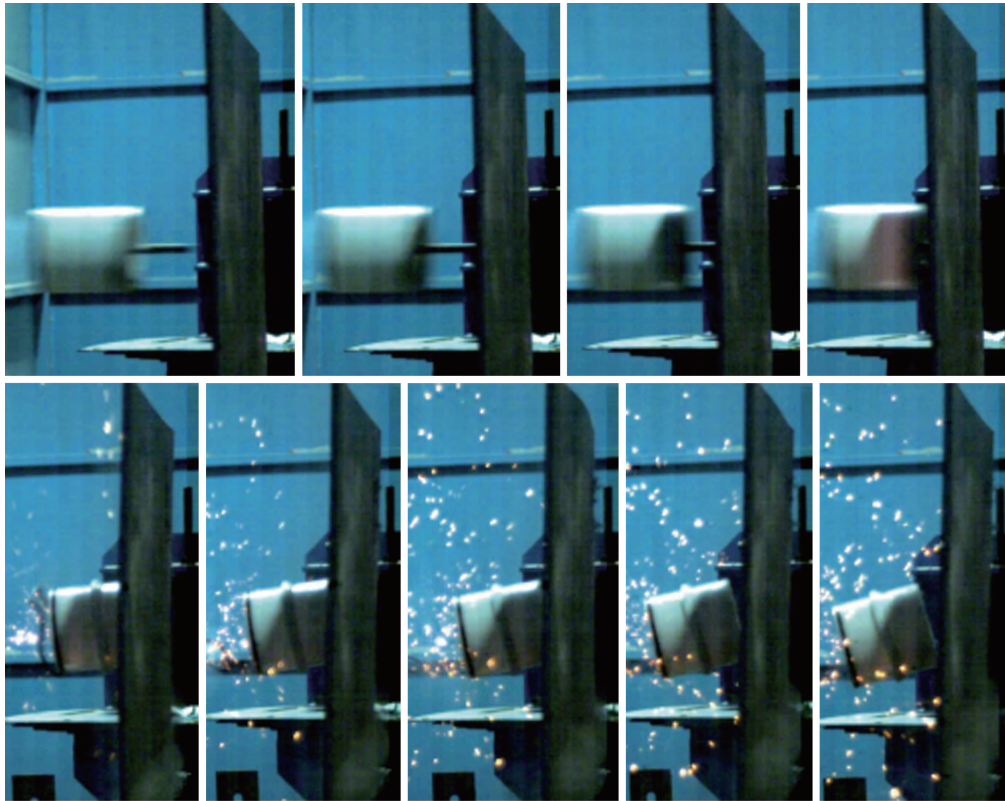
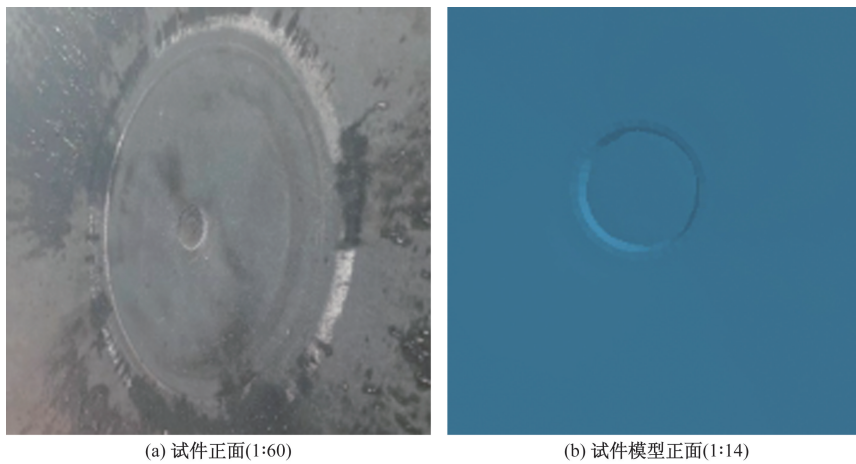


图 5 子弹打击过程(1:20)



(a) 试件正面(1:60)

(b) 试件模型正面(1:14)

图 6 有限元与试验中靶板现象对比

参考文献

- [1] 杨正有, 吕中杰, 邬保月. 带攻角弹体斜侵彻混凝土深度计算公式对比分析[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(1): 37-40.
- [2] 葛涛, 王明洋, 李晓军, 等. 弹体冲击混凝土半无限靶的侵彻阻力与深度计算[J]. 振动与冲击, 2008, 31(1): 107-110, 186-187.
- [3] 王德荣, 葛涛, 周泽平, 等. 钢纤维超高强活性混凝土(RPC)抗侵彻计算方法研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 367-372.
- [4] 陈晶, 亢晋军, 梁雄雄, 等. 陶瓷纤维和钢纤维对轻骨料混凝土力学性能的影响[J]. 建筑科学, 2023, 39(9): 104-113.
- [5] 杨久俊, 刘俊霞, 韩静宜, 等. 大流动性超高强钢纤维混凝土力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 1-6.
- [6] 刘数华, 阎培渝, 冯建文. 超高强混凝土 RPC 强度的尺寸效应[J]. 公路, 2011, 56(3): 123-127.
- [7] 杜修力, 田予东, 田瑞俊, 等. 钢纤维超高强混凝土的力学性能试验[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(9): 1198-1203.
- [8] ZHANG T G, LI Q B, WANG Z L, et al. Fracture toughness and influencing factors of steel fibre high-strength concrete[J]. Journal of Silicate, 2012, 40(5): 638-645, 650.

- [9] BANTHIA N, SAPPAKITTIPAKORN M. Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(9): 1366-1372.
- [10] 戎志丹, 孙伟, 张云升, 等. 高与超高性能钢纤维混凝土的抗侵彻性能研究[J]. *弹道学报*, 2010, 22(3): 63-67.
- [11] 曹海, 张新乐, 郭晓辉, 等. 钢纤维聚合物混凝土板抗侵彻试验研究[C]//全国结构工程学术会议. 兰州: 中国力学学会, 中国力学学会《工程力学》编委会, 兰州理工大学, 2014: 11-14.
- [12] 陈星明, 刘彤, 肖正学. 混凝土 HJC 模型抗侵彻参数敏感性数值模拟研究[J]. *高压物理学报*, 2012, 26(3): 313-318.
- [13] 吴成. 细观尺度下混凝土靶的抗侵彻性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [14] 陈雍雍. 高抗盐无粗集料超高强混凝土材料的制备研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [15] 雷杰, 陈子夏, 史科, 等. 钢纤维高强混凝土二桩承台受剪性能及承载力计算[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(9): 234-245.
- [16] 李亚. 碳纤维复合结构的抗侵彻性能分析[J]. *中国新技术新产品*, 2023(9): 4-8.
- [17] 邓云飞, 张伟, 孟凡柱. Q235 钢板对平头弹抗侵彻特性研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(3): 54-59.
- [18] 张金梅, 刘成芬, 王晓红. 试压间防护墙厚度设计[J]. *油气田地地面工程*, 2006(5): 34.
- [19] 陈刚, 陈小伟, 陈忠富, 等. A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的数值分析[J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(5): 390-397.
- [20] MURRAY Y D, REID J D, FALLER R K, et al. Evaluation of LS-DYNA wood material model 143 [R]. McLean, VA: Federal Highway Administration, 2005.
- [21] 周志强. 混凝土材料在高温和冲击载荷耦合作用下的力学性能研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2020.

Analysing the Performance of the Perimeter Wall Structure against Penetration between Well Completion Tool Test Presses

ZHOU Xinwei

(China Oilfield Services Limited, Tianjin 300450, China)

Abstract: In this paper, the anti-invasion performance of the perimeter wall between the test pressures of the completion tool is analyzed. According to the conditions of the downhole tool pressure test such as test medium, test temperature, test pressure, and the possibility of dislodging the parts during the test, a combination of three types of perimeter wall structures is proposed: single steel plate, double steel plate + timber interlayer, and double steel plate + concrete interlayer. To meet the test pressure requirements, the three types of perimeter wall structure combinations are analyzed to determine more conservative structural dimensions by means of finite element simulation calculations and analyses, and the results of the analysis from the simulation of the Combination 1 structure are verified by means of the impact test.

Keywords: test pressure room enclosure; intrusion resistance; completion tool