



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402766

引用格式:韩鹏飞,李映春,刘晶波,等.双钢板混凝土板抗弹体贯穿速度预测及因素评估[J].科学技术与工程,2025,25(10):3986-3995.
Han Pengfei, Li Yingchun, Liu Jingbo, et al. Prediction and factor evaluation of perforation velocity of steel-concrete-steel slab against missile impact[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(10): 3986-3995.

力学

双钢板混凝土板抗弹体贯穿速度预测及因素评估

韩鹏飞^{1,2}, 李映春^{3*}, 刘晶波⁴, 王菲⁵, 董振平²

(1. 西安建筑科技大学工程技术有限公司, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055;
3. 军事科学院国防工程研究院, 北京 100036; 4. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室/清华大学土木工程系, 北京 100084;
5. 陆军工程大学国防工程学院, 南京 210007)

摘要 为预测弹体撞击双钢板混凝土板的贯穿速度及获得结构因素对贯穿速度的影响排序,基于量纲分析和人工神经网络建立了贯穿速度无量纲方程和预测模型,并采用正交试验法确定有限元计算工况,结合方差分析定量评价了7种板的结构因素对贯穿速度的影响程度。结果表明,贯穿速度预测模型的预测值与实际值的误差小于12%;钢板厚度影响显著,对拉钢筋间距和混凝土厚度影响较大,钢板屈服强度、对拉钢筋屈服强度、对拉钢筋直径影响较小,混凝土抗压强度影响最小。建立的贯穿速度预测模型预测效果良好,从新的角度解决了贯穿速度的预测问题,可有效评估双钢板混凝土板抗弹体贯穿的能力,结构因素影响排序有益于双钢板混凝土板抗弹体贯穿的优化设计。

关键词 双钢板混凝土板; 贯穿速度; 预测; 结构因素; 影响排序

中图分类号 O385 TU398+.1; 文献标志码 A

Prediction and Factor Evaluation of Perforation Velocity of Steel-Concrete-Steel Slab against Missile Impact

HAN Peng-fei^{1,2}, LI Ying-chun^{3*}, LIU Jing-bo⁴, WANG Fei⁵, DONG Zhen-ping²

(1. Engineering Technology Co., Ltd., Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
3. Institute of Defense Engineering, Academy of Military Sciences, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100036, China;
4. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. College of Defense Engineering, Army Engineering University, Chinese People's Liberation Army, Nanjing 210007, China)

[Abstract] In order to predict perforation velocity of SCS (steel-concrete-steel) slab against missile impact and obtain influence sequence of structural factors of SCS slab on the perforation velocity, a dimensionless equation of the perforation velocity was established and a prediction model was obtained based on dimensional analysis and artificial neural network. Orthogonal experiment design was used to determine finite element calculation, and the influence degree of 7 factors of SCS slab on perforation velocity was quantitatively evaluated by variance analysis. The deviation between the predicted perforation velocity and the actual value is less than 12%, and the quantitative evaluation results of variance analysis show that the thickness of steel plate has a largest effect, followed by the distance of tie bar and the thickness of concrete, the yield strength of steel plate, the yield strength of tie bar and the diameter of tie bar have a smaller effect, and the concrete compressive strength has a smallest effect. The established model solves the prediction problem of perforation velocity from a new perspective with a good prediction effect, which can effectively evaluate the ability of SCS slab against perforation failure of missile impact, and the order of the factors is beneficial to the optimal design of SCS slab resisting perforation from missile impact.

[Keywords] steel-concrete-steel slab; perforation velocity; prediction; structure factor; influence sequence

收稿日期: 2024-04-16; 修订日期: 2024-12-30

第一作者: 韩鹏飞(1980—),男,汉族,山东青岛人,博士,高级工程师。研究方向:结构抗冲击与工程检测鉴定。E-mail: feixuehan2003@ sina.com。

*通信作者: 李映春(1982—),男,汉族,河南商丘人,工程师。研究方向:防护工程设计。E-mail: liyingchun0707@163.com。

双钢板混凝土(steel-concrete-steel, SCS)板作为一种新型组合结构,通常由两块外包钢板、混凝土及位于钢混组合界面的剪力连接件(栓钉或对拉钢筋等)组成。该结构表现出良好的延性、密闭性、承载力、抗冲击与抗爆性能、施工便捷等特点^[1],在核电厂房、高层建筑、储存罐体、沉箱隧道、近海工程设施、防护工程结构、极地工程防冰墙等工程结构中得到了广泛应用^[2-5]。

目前,SCS板已用于中国第三代核电站屏蔽厂房中^[6-7],以防止内部钢制安全壳和反应堆冷却系统受到飞射物的撞击破坏;SCS板用于防护工程结构中,以抵抗弹体的贯穿破坏或爆炸效应。因此飞射物或弹体(下文统称弹体)对SCS板的贯穿破坏是一项重要的研究内容,已成为中外的研究热点,并受到越来越广泛的关注。不过SCS结构相比于钢筋混凝土结构出现的比较晚,带对拉钢筋的SCS板抗弹体撞击贯穿问题的研究相对少见。

由于军用及核工业等部门的需求,弹体对钢筋混凝土板的贯穿问题得到了广泛研究,留下了宝贵的试验数据和相关经验公式,中外许多学者^[8-12]也对这些不同时期的经验公式进行过比较详尽的讨论比较,并指出了这些经验公式的使用条件和优缺点。Li等^[13-14]和Chen等^[15]基于空腔膨胀理论给出了刚性弹体贯穿素混凝土的最小混凝土厚度和贯穿混凝土的能量计算公式,给出公式的计算结果与试验结果吻合得较好,以及给出了刚性弹体贯穿钢筋混凝土的计算方法。张爽^[16]和武海军等^[17]获得了钢筋对弹体的阻力模型,采用微分面力法,建立刚性弹体贯穿有限厚钢筋混凝土靶的弹道计算模型,并验证了模型的准确性。宋春明等^[18]和王冰彬^[19]将弹体贯穿钢筋混凝土安全壳分为几个阶段来计算,给出的计算结果与试验结果匹配良好。

Bruhl等^[20]给出了单钢板混凝土抗刚性弹体贯穿的计算方法,以此计算方法来代替SCS板的抗贯穿计算方法,没有考虑对拉钢筋的作用,也没有考虑前钢板的作用。Han等^[21-22]分析了弹体撞击SCS板的贯穿机制,建立了基于能量方法的抗贯穿计算公式,公式计算结果与试验结果,以及数十个有限元工况分析结果匹配良好,该计算公式能有效评估带对拉钢筋SCS板的贯穿破坏;并指出了运用解耦方法研究飞机撞击屏蔽厂房的关键问题是:获取正确撞击力时程曲线和确定合理的撞击力加载面积,两者缺一不可。程毅等^[23]基于动能守恒定律,运用钢板单独抗贯穿经验公式将钢板转换为等效混凝土,并利用混凝土抗贯穿经验公式得到3个不同的剩余速度预测公式,没有考虑对拉钢筋的作用,得

出的剩余速度预测公式依赖于所使用经验公式的准确性。王武等^[24]基于能量守恒原理,提出了双钢板混凝土遮弹层防贯穿设计六步法,给出了弹体临界贯穿速度和弹体余速计算公式,但是计算过程比较复杂,SCS板的整体耗能大致分为3个部分的耗能,忽略了SCS板的整体相互作用,而且每部分的耗能需要在以往研究成果中选取合理的计算公式来计算。Xu等^[25]基于能量守恒原理,将SCS板耗散的能量分为前、后钢板和钢筋混凝土分别耗散的能量3部分,钢筋混凝土耗散的能量依据4种现有的经验公式来计算,并根据4炮次贯穿试验数据修正了剩余速度的计算公式,不过剩余速度的计算公式没有考虑对拉钢筋的作用,依赖于经验公式的准确程度,而且修正公式的试验数据过少。Kim等^[26-27]进行了缩比SCS板抗弹体贯穿的试验和有限元计算,目的是验证Bruhl等^[20]给出的抗贯穿计算方法的有效性和SCS板的破坏形式;Bruhl等^[20]的计算方法给出的贯穿速度计算结果偏于保守,保守率达到6%~32%,而且指出修正的美国国防研究委员会(National Defence Research Committee, NDRC)方法在某些条件下计算结果并不理想,与试验结果偏差较大。

目前,对SCS板抗弹体撞击贯穿速度的研究途径主要有:撞击试验、理论分析和数值计算。本文研究梳理钢筋混凝土板抗弹体贯穿的研究成果,以期受到启发而利于本文研究内容的开展,通过梳理可以发现:由于撞击试验成本高、实施难度较大,撞击试验数据较少,因此通过撞击试验获得SCS板抗弹体贯穿速度的计算公式相对困难;SCS板抗弹体贯穿的复杂特性,导致理论计算很难给出贯穿速度的解析解,而且计算过程复杂,利用经验公式又需要考虑经验公式的限制条件,准确度有待调高;而数值计算主要运用数值计算软件来完成,经试验数据验证过的数值计算模型可得到不同工况下的贯穿速度,利用数学计算软件MATLAB预测SCS板的贯穿速度比较少见,可直接用于工程中达到便捷、高效、批量化计算的抗弹体贯穿实用计算模型更为缺乏;从SCS板结构方面来定量分析评价不同因素对SCS板贯穿速度的影响程度大小,且给出影响因素排序,鲜见相关文献报道。

因此,现建立SCS板的贯穿速度预测模型,以实现便捷、高效、准确、批量化,并给出SCS板的结构因素对贯穿速度影响程度的大小排序,以利于SCS板结构抗弹体贯穿的优化设计。

1 量纲分析

有些现象或问题的研究,可以借助或采用现成的物理和数学模型和方程;然而,更多的复杂现象

或问题,无法利用现成的数学方程来表述,这时,更需要采用量纲分析的方法来分析问题^[28]。为了建立 SCS 板抗弹体的贯穿速度预测模型,就需要分析 SCS 板抗弹体贯穿的影响因素,其主要存在两大方面:弹体方面和 SCS 板方面,并进行量纲分析。

(1)弹体方面:弹体形状系数 ψ , 直径 d , 长度 l , 弹性模量 E_p , 剪切模量 G_p , 密度 ρ_p , 屈服强度 σ_p , 泊松比 γ_p , 命中角 β , 旋转角速度 ω 。

(2)SCS 板方面:钢板厚度 H_s , 弹性模量 E_s , 剪切模量 G_s , 密度 ρ_s , 屈服强度 σ_s , 泊松比 γ_s ; 混凝土厚度 H_c , 弹性模量 E_c , 剪切模量 G_c , 密度 ρ_c , 抗压强度 σ_c , 泊松比 γ_c ; 对拉钢筋间距 s_t , 对拉钢筋直径 d_t , 弹性模量 E_t , 剪切模量 G_t , 密度 ρ_t , 屈服强度 σ_t , 泊松比 γ_t 。

从上面的诸多因素中可以看出,要预测弹体对 SCS 板的贯穿速度 V_p ,就需要获得 V_p 与上述因素的某种函数关系 f 。

$$V_p = f(\psi, d, l, E_p, G_p, \sigma_p, \rho_p, H_s, E_s, G_s, \sigma_s, \rho_s, H_c, E_c, G_c, \sigma_c, \rho_c, s_t, d_t, E_t, G_t, \sigma_t, \rho_t, \gamma_p, \gamma_s, \gamma_c, \gamma_t, \beta, \omega) \quad (1)$$

由式(1)可知影响弹体贯穿速度的变量为 29 个。首先由于本文拟分析的弹体为平头刚性弹体,那么弹体形状系数 ψ 、弹性模量 E_p 、剪切模量 G_p 、屈服强度 σ_p 和泊松比 γ_p 可以在式(1)中去掉;其次,弹体撞击 SCS 板时,仅考虑垂直撞击,且不考虑旋转角速度,所以这两个因素变量也可以在式(1)中去掉;最后,钢板、对拉钢筋、混凝土在得知弹性模量、泊松比的情况下,其剪切模量可通过近似公式进行估算,所以三者的剪切模量在式(1)中也可去掉。所以式(1)简化为

$$V_p = f(d, l, \rho_p, H_s, E_s, \sigma_s, \rho_s, H_c, E_c, \sigma_c, \rho_c, s_t, d_t, E_t, \sigma_t, \rho_t, \gamma_s, \gamma_c, \gamma_t) \quad (2)$$

由式(2)可知,影响弹体贯穿速度的因素变量变为 19 个。选取物理量 $l, \rho_c, \sigma_c, \gamma_c$ 4 个具有独立量纲的物理量作为基本量,其他物理量都可以用这些基本量变化成无量纲的量,于是可得到无量纲的函数关系,即

$$\frac{V_p}{(\frac{\sigma_c}{\rho_c})^{1/2}} = f\left(\frac{l}{d}, \frac{l}{H_s}, \frac{\rho_p}{\rho_c}, \frac{E_s}{\sigma_c}, \frac{\sigma_s}{\sigma_c}, \frac{\rho_s}{\rho_c}, \frac{l}{H_c}, \frac{E_c}{\sigma_c}, \frac{l}{s_t}, \frac{l}{d_t}, \frac{E_t}{\sigma_c}, \frac{\sigma_t}{\sigma_c}, \frac{\rho_t}{\rho_c}, \frac{\gamma_s}{\gamma_c}, \frac{\gamma_t}{\gamma_c}\right) \quad (3)$$

2 神经网络和样本

神经网络,是一种通过对大脑神经网络记忆、处理信息而建立起来的智能算法^[29-30]。它具有强

大的非线性处理能力,大规模的并行处理和分布式的信息存储能力,良好的自适应性、自组织性及很强的学习、联想、容错及抗干扰能力,可为那些难于建立准确计算公式的问题提供解决方法。目前神经网络中应用较多的是 BP 网络模型,已应用于多个学科领域,对不确定性模式识别具有独到之处。根据文献^[31]可知,BP 网络模型是一种多层前馈型神经网络,由一个输入层、一个输出层及一个或多个隐层组成,每一层可以有若干个节点,不同层之间的联系方式是全连接,相同层的神经元之间是不发生任何连接的。BP 网络模型通过不断调整层与层之间的连接权值使目标函数最小化,如果输出响应与期望输出模式的误差不能满足要求,则误差值沿连接通路逐层反向传送并修正各层连接权值,当各个训练模式都满足要求时,则学习训练结束。本文研究拟采用 BP 网络模型来预测弹体撞击 SCS 板的贯穿速度。

对于训练样本,可以来自相关试验,也可以来自数值计算分析。SCS 板抗弹体撞击的有关试验在文献报道中比较少见, Kim 等^[32]对 SCS 板遭遇钝头弹体撞击的动态毁伤特性进行了试验研究,遗憾的是试验次数仅有几次,而且试验中 SCS 板未设置对拉钢筋。Han 等^[21]对 Kim 等^[32]的试验进行了有限元模拟计算,有限元计算结果和试验结果匹配程度较高,验证了有限元模型和参数设置的合理性,并给出了数十个工况的贯穿速度。本文研究从 Han 等^[21]的研究中选取 39 个工况作为本文的部分训练样本,并利用有限元模拟计算增加训练样本数量。本文的有限元计算工况,主要是考虑变化 SCS 板中的钢板厚度、钢板屈服强度、混凝土抗压强度、混凝土厚度、对拉钢筋直径、对拉钢筋间距和对拉钢筋屈服强度这 7 种因素,每种因素从常用材料和常规设计出发变化 3 次。为了节约有限元模拟计算次数,又能科学分析本文所研究的问题,采用正交试验设计法来获取有限元计算工况。正交试验是使用正交表来分析多因素试验的一种高效率、快速、经济的研究方法,通过探讨典型组合案例来对整个试验的情况进行探究。本文研究采用 7 因素 3 水平的正交设计表格,得到了 18 种有限元计算工况,如表 1 所示,则可代替 2 187 次有限元计算工况。由本文的 18 个有限元计算工况与 Han 等^[21]研究中的 39 个工况组成本文基于神经网络所建贯穿速度预测模型的样本。

3 试验和有限元模拟

弹体撞击 SCS 板的试验^[32]目的是研究 SCS 板遭遇弹体撞击的动态毁伤特性,弹体头部为拱顶头部,弹体规格如图 1 所示。弹体质量约为 40 kg,试

表 1 贯穿速度有限元计算工况正交试验设计表
Table 1 Orthogonal design table for perforation velocity of finite element calculation

试验数	钢板厚度/mm	钢板屈服强度/MPa	混凝土强度/MPa	混凝土厚度/mm	对拉钢筋直径/mm	对拉钢筋间距/mm	对拉钢筋屈服强度/mm
1	8	250	30	175	10	50	307
2	8	307	40	250	13	75	345
3	8	345	50	300	16	150	400
4	10	250	30	250	13	150	400
5	10	307	40	300	16	50	307
6	10	345	50	175	10	75	345
7	14	250	40	175	16	75	400
8	14	307	50	250	10	150	307
9	14	345	30	300	13	50	345
10	8	250	50	300	13	75	307
11	8	307	30	175	16	150	345
12	8	345	40	250	10	50	400
13	10	250	40	300	10	150	345
14	10	307	50	175	13	50	400
15	10	345	30	250	16	75	307
16	14	250	50	250	16	50	345
17	14	307	30	300	10	75	400
18	14	345	40	175	13	150	307

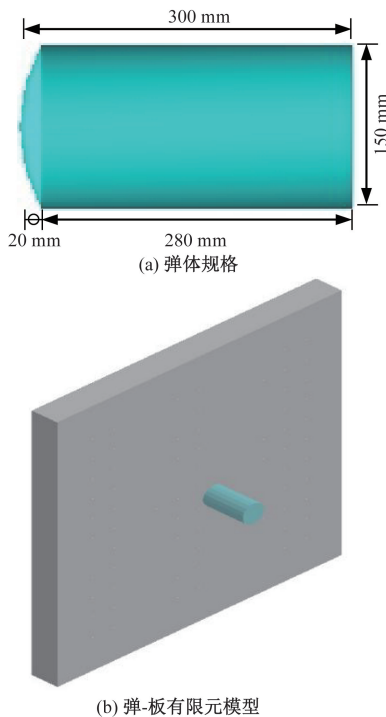


图 1 弹体规格及弹-板有限元模型示意图
Fig. 1 Overview of missile size and finite element models of missile-slab

验中弹体的初始撞击速度约为 150 m/s, SCS 板靶体大小为 2 000 mm × 2 000 mm, 靶体厚度分别为 175 mm 和 250 mm, 钢板的厚度约为 6 mm, 靶体试验模型中没有对拉钢筋, 栓钉的直径为 13 mm, 长度为 80 mm, 栓钉间距为 150 mm。

对本次试验用有限元软件 LS-DYNA 建模, 其参

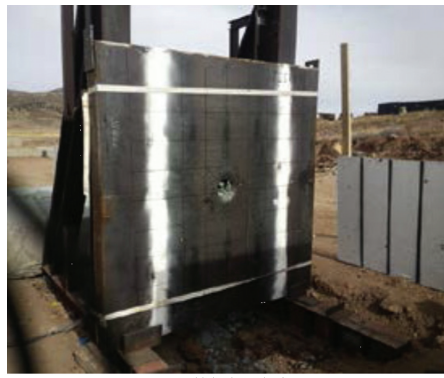
数设置如下^[21]: 混凝土的本构模型采用 MAT072R3, 单元失效采用 MAT_ADD_EROSION 的最大应变控制, 混凝土密度为 $2.37 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 抗压强度为 50.075 MPa, 泊松比为 0.19; 钢材模型采用 MAT003, 应变率模型采用 Cowper-Symonds 模型, 如式(4)所示; 混凝土采用实体单元, 钢板和栓钉分别采用壳单元和梁单元, 栓钉和混凝土共节点, 弹体与 SCS 板的接触采用 *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE; 板四周在撞击方向上施加约束。钢材模型参数如表 2 所示。

$$\sigma_{yd} = \sigma_y \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{Q} \right)^{1/P} \right] \quad (4)$$

式(4)中: σ_{yd} 为动态屈服强度; σ_y 为屈服强度; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; P 、 Q 为与材料相关的常数。

对于 SCS-175-6T 板的毁伤特点, 图 2 进行了数值计算结果和试验结果的对比。弹体的撞击速度为 152.4 m/s, 由图 2 不难看出试验中 SCS 板的破坏形态为贯穿, 有限元模拟结果与试验结果一致, 前后钢板均被破坏, 并出现孔洞。对于 SCS-250-6T 板, 有限元计算结果和试验结果如图 3 所示, 弹体的撞击速度为 147.7 m/s, 由图 3 可以看出试验的破坏形态为鼓包, 有限元模拟结果与试验结果一致。前钢板完全被穿透, 但是后钢板并没有被贯穿, 弹体完全侵入 SCS 板中, 在撞击中心位置有较大的鼓包形成。

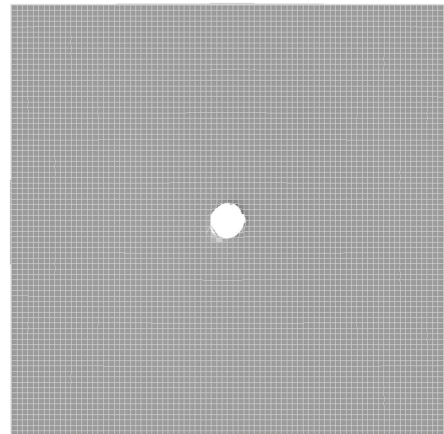
对于弹体剩余速度和破坏形态, 有限元计算结果和试验结果如表 3 所示。SCS-175-6T 试验中弹体



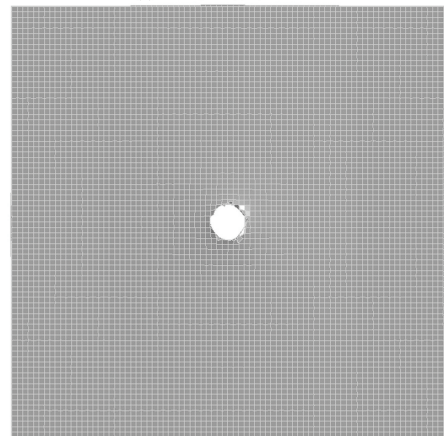
(a) 前钢板-试验



(b) 后钢板-试验

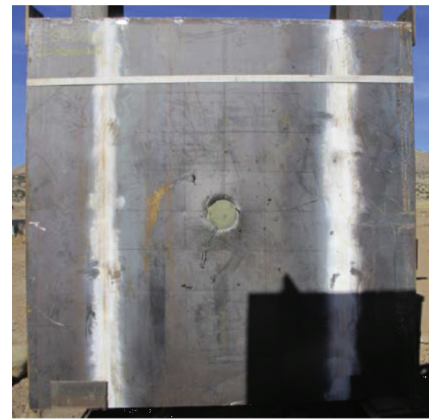


(c) 前钢板-有限元分析

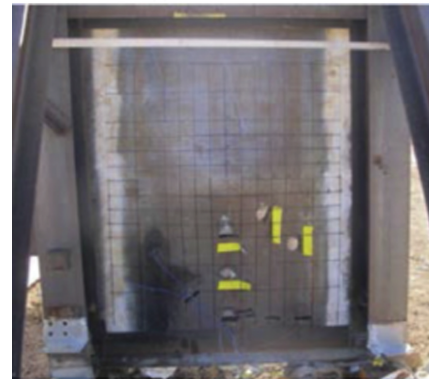


(d) 后钢板-有限元分析

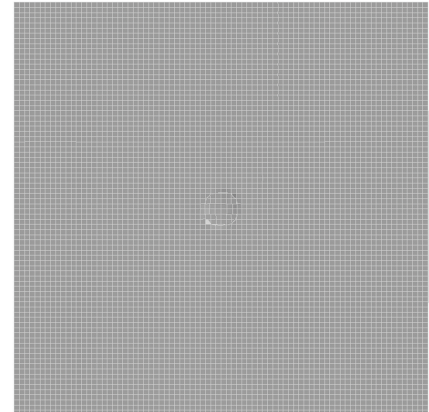
图2 双钢板毁伤情况对比(SCS-175-6T)
Fig. 2 Comparison of SCS slab response(SCS-175-6T)



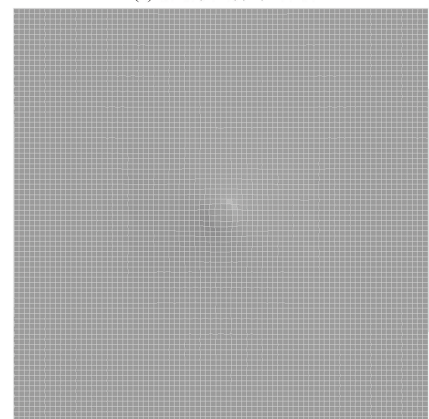
(a) 前钢板-试验



(b) 后钢板-试验



(c) 前钢板-有限元分析



(d) 后钢板-有限元分析

图3 双钢板毁伤情况对比(SCS-250-6T)
Fig. 3 Comparison of SCS slab response(SCS-250-6T)

表 2 MAT003(钢材)参数
Table 2 Parameters of MAT003 (steel)

参数	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	屈服强度/ MPa	弹性模量/ MPa	切线模量/ MPa	泊松比	P	Q	失效参数 FS
钢板	7.8×10^3	307	2.1×10^5	603	0.3	40	5	0.28
栓钉/对拉钢筋	7.8×10^3	345	2.1×10^5	504	0.3	40	5	0.3
弹体	7.8×10^3	250	2.1×10^5	502	0.3	40	5	0.3

表 3 有限元计算和试验结果对比
Table 3 Result comparison of test and finite element calculation

工况	混凝土厚度/ mm	钢板厚度/ mm	撞击速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	破坏形态		剩余速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
				有限元计算	试验	有限元计算	试验
SCS-175-6T	175	6	152.4	贯穿	贯穿	31.1	33.9
SCS-250-6T	250	6	147.7	鼓包	鼓包	0	0

贯穿板后的剩余速度为 33.9 m/s, 而有限元模拟结果为 31.1 m/s, 两者比较接近; SCS-250-6T 试验中剩余速度有限元计算结果和试验结果均为 0。如图 2、图 3 和表 3 所示, 在这两次撞击试验中, 通过有限元计算所得到的毁伤形式、剩余速度与试验结果符合得较好。通过对比分析, 本文的有限元模型和参数设置合理性得到了验证, 可用于下文多种工况的有限元模拟计算。

在有限元计算过程中, 要恰好得到 SCS 板的贯穿速度, 既能贯穿, 又使得弹体剩余速度恰好为 0, 需要繁冗的试算工作, 为了减少试算工作, 本文中遵循的原则是: 贯穿速度的误差不大于 1 m/s。按照表 1 所示的 18 个工况进行有限元计算, 弹体为刚性平头弹, 直径为 150 mm, 质量约为 70 kg, 弹体垂直撞击 SCS 板。通过有限元计算分析, 弹体撞击 SCS 板的贯穿速度如表 4 所示。

4 贯穿速度预测及结果分析

根据 Han 等^[21] 的 39 个工况和本文的 18 个工况, 可以获得 57 组数据, 经过式(3)的量纲分析, 变化成无量纲输入参数, 将其中的 38 组数据作为贯穿速度预测模型的训练样本, 用于对该模型进行训练; 剩余的 19 组数据作为贯穿速度预测模型的预测样本, 输入训练好的预测模型, 用于比较预测模型贯穿速度输出值与有限元计算结果(作为实际值)的对比, 从而可评价所建预测模型的预测效果。由式(3)可以看出, 影响贯穿速度的无量纲变量为 15 个, 可通过训练样本来训练这 15 个无量纲变量组成的预测模型。因此输入节点为 15 个, 运用 MATLAB 编程, 并设计隐层为 2 层, 输入训练样本, 经过不断调整和试算, 确定隐层第 1 层节点数为 20 个, 隐层第二层节点数为 9 个, 传递函数依次为 tansig、tansig、purelin, 输出函数为 trainscg, 训练计算过程如图 4 所示。

表 4 贯穿速度有限元计算结果
Table 4 Finite element calculation results of perforation velocity

工况	贯穿速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	工况	贯穿速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	工况	贯穿速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	136	7	167.5	13	157
2	151	8	185.5	14	167
3	147	9	207	15	174
4	155	10	153	16	198
5	186	11	144	17	181
6	160	12	161	18	175.9

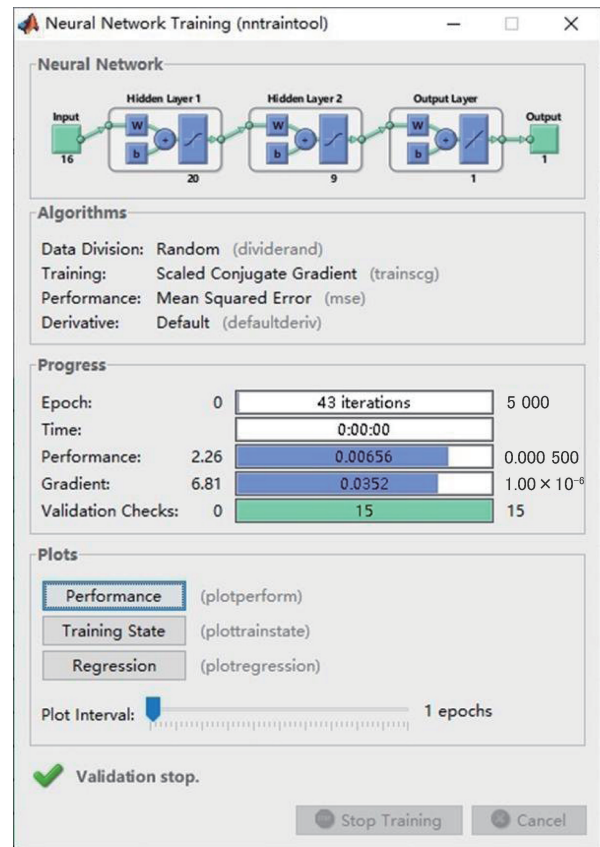


图 4 神经网络训练过程
Fig. 4 Training process of artificial neural network

当建立的预测模型训练好后,将训练样本再次输入到模型中,计算模型的输出值,并与有限元计算值比较,比较结果如图 5 和表 5 所示;将预测样本输入到训练好的模型中,计算模型的预测值,并与有限元计算值比较,比较结果如图 6 和表 6 所示。由表 5 可以看出,训练输出值与有限元计算值相对误差均控制在 10% 内。由表 6 可以看出,预测值与有限元计算值进行对比,仅有 2 组数据相对误差超过 10%,分别达到了 -10.34% 和 -11.97%,其余数据相对误差均在 10% 以内。从结果分析可以看出,模型对贯穿速度的预测取得了较为满意的结果,为解决 SCS 板抗弹体贯穿速度的预测问题提供了一种新的方法,利用训练好的模型,可以发挥人工神经网络的优点,能便捷、高效、批量化地给出贯穿速度的预测结果。

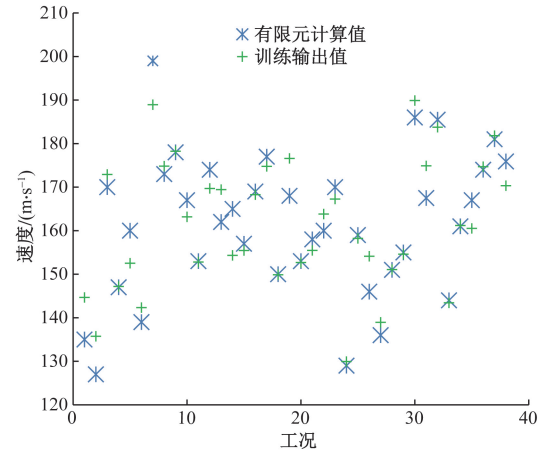


图 5 贯穿速度有限元计算值和预测模型输出值对比
Fig. 5 Value comparison of perforation velocity between finite element calculation and output of prediction model

表 5 贯穿速度有限元计算值和预测模型输出值对比

Table 5 Value comparison of perforation velocity between finite element calculation and output of prediction model

序号	有限元计算值/(m·s ⁻¹)	训练输出值/(m·s ⁻¹)	误差/%	序号	有限元计算值/(m·s ⁻¹)	训练输出值/(m·s ⁻¹)	误差/%	序号	有限元计算值/(m·s ⁻¹)	训练输出值/(m·s ⁻¹)	误差/%
1	135	144.66	7.16	14	165	154.33	-6.47	27	136	138.95	2.17
2	127	135.74	6.88	15	157	155.45	-0.99	28	151	151.08	0.05
3	170	172.91	1.71	16	169	168.27	-0.43	29	155	154.60	-0.26
4	147	147.18	0.13	17	177	174.77	-1.26	30	186	189.90	2.10
5	160	152.53	-4.67	18	150	149.88	-0.08	31	167.5	174.89	4.41
6	139	142.33	2.39	19	168	176.60	5.12	32	185.5	183.76	-0.94
7	199	188.94	-5.05	20	153	152.69	-0.20	33	144	143.44	-0.39
8	173	174.82	1.05	21	158	155.46	-1.61	34	161	161.19	0.12
9	178	178.25	0.14	22	160	163.82	2.38	35	167	160.52	-3.88
10	167	163.18	0.11	23	170	167.27	-0.44	36	174	174.69	0.40
11	153	152.80	-0.13	24	129	129.94	0.73	37	181	181.82	0.45
12	174	169.70	-2.47	25	159	158.22	-0.49	38	175.9	170.34	-3.16
13	162	169.44	4.59	26	146	154.12	5.56				

表 6 贯穿速度有限元计算值和预测模型预测值对比

Table 6 Value comparison of perforation velocity between finite element calculation and prediction of prediction model

序号	有限元计算值/(m·s ⁻¹)	预测值/(m·s ⁻¹)	误差/%	序号	有限元计算值/(m·s ⁻¹)	预测值/(m·s ⁻¹)	误差/%
1	151	155.34	2.87	11	168	163.63	-1.43
2	152	159.51	4.94	12	174	159.38	-8.40
3	183	164.08	-10.34	13	187	164.62	-11.97
4	160	159.97	-0.02	14	147	133.10	-9.46
5	147	148.85	1.26	15	160	152.10	-4.94
6	176	174.92	-0.62	16	207	199.14	-3.80
7	138	145.97	5.77	17	153	156.87	2.53
8	184	172.22	-6.40	18	157	150.79	-3.95
9	199	186.81	-6.12	19	198	193.12	-2.46
10	159	159.61	0.38				

5 贯穿速度影响因素排序分析

为了得出各因素对贯穿速度影响程度的大小

排序,拟依照数理统计原理,采用方差分析法对 18 个有限元工况的计算结果进行分析。方差分析可以研究不同因素的影响程度,通过确定总变异中不

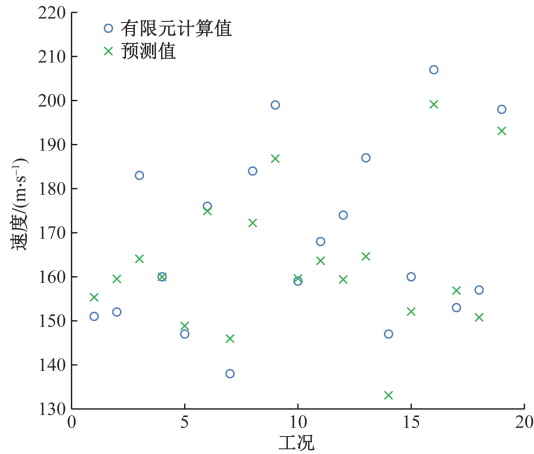


图6 贯穿速度有限元计算值和预测模型预测值对比

Fig. 6 Value comparison of perforation velocity between finite element calculation and prediction of prediction model

同因素的贡献程度实现影响力分析, 方差分析主要通过 F 检验分析不同因素变异对总变异贡献的大小, 步骤具体如下。

(1) 计算总偏差的平方和 S_T 。

$$S_T = \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 = \sum_{k=1}^n x_k^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2 \quad (5)$$

式(5)中: \bar{x} 为样本的总平均值; n 为试验的总次数; x_k 为第 k 次试验结果。

总偏差平方和 S_T 的数值表示试验结果的总体差异, 其得到的数值越大, 说明试验的差异越大。

(2) 计算各因素偏差的平方和, 以计算因素 1 的偏差的平方和 S_1 为例说明, 可看作单因素试验, 则有

$$S_1 = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{n_a} \left(\sum_{j=1}^a x_{ij} \right)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^{n_a} \sum_{j=1}^a x_{ij} \right)^2$$

$$= \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{n_a} (K_i)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2 \quad (6)$$

式(6)中: x_{ij} 为因素 1 的第 i 个水平的第 j 个试验的结果; n_a 为因素 1 的水平数; a 为每个水平的试验数; K_i 为因素 1 的第 i 个水平 a 次试验结果的总和;

S_1 为因素 1 对试验结果的影响差异。其他各因素的偏差平方和也可以用此方法得到。

(3) 计算试验误差的偏差平方和 S_e , 不考虑交互因素的作用, 则有

$$S_e = S_T - \sum_{k=1}^7 S_k \quad (7)$$

式(7)中: S_k 为第 k 个因素偏差的平方和, 对于本文的正交试验案例共有 7 个因素。

(4) 计算自由度, 试验总自由度 $f_{\text{总}} = n - 1$; 各因素的自由度, 以因素 1 为例, $f_1 = n_a - 1$ 。

(5) 计算平均偏差平方和, 则有

$$MS_k = \frac{S_k}{f_k} \quad (8)$$

式(8)中: MS_k 为第 k 个因素的平均偏差平方和; f_k 为第 k 个因素的自由度。

(6) 对因素进行显著性检验, 以因素 1 为例, 取统计量 F , 即

$$F = \frac{MS_1}{MS_e} \sim F(n_a - 1, f_e) \quad (9)$$

式(9)中: f_e 为误差自由度。

对给定的 α , 查出 $F_\alpha(n_a - 1, f_e)$ 的值, 可与式(9)计算所得的 F 值进行比较。

根据式(6)计算每种因素的偏差平方和, 并根据式(8)计算得每种因素的平均偏差平方和, 根据式(5)、式(7)和式(8)计算给出误差偏差平方和、平均误差偏差平方和, 然后根据式(9)给出每种因素的统计量, 从而查表进行显著性检验, 有限元计算结果的方差分析结果如表 7 所示。通过 F 检验, 7 种因素的显著性检验统计量 (MS_k/MS_e) 大小排序为: 因素 1 > 因素 6 > 因素 4 > 因素 2 > 因素 7 > 因素 5 > 因素 3, 根据上述方差的分析结果可知, 各因素对贯穿速度的影响程度大小排序为钢板厚度 > 对拉钢筋间距 > 混凝土厚度 > 钢板屈服强度 > 对拉钢筋屈服强度 > 对拉钢筋直径 > 混凝土抗压强度。钢板厚度的统计量最大, 达到 61.02, 对拉钢筋间距和混凝土厚度次之, 两者的统计量大小较为接近, 对拉钢筋屈服强度和对拉

表 7 有限元计算结果方差分析

Table 7 Variance analysis of finite element calculation results

因素	方差来源	偏差平方和	自由度	平均偏差平方和	统计量 MS_k/MS_e	统计量临界值
因素 1	钢板厚度	4 142.57	2	2 071.28	61.02	
因素 2	钢板屈服强度	323.48	2	161.74	4.76	
因素 3	混凝土抗压强度	18.37	2	9.18	0.27	$F_{0.01}(2, 3) = 30.81$
因素 4	混凝土厚度	668.30	2	334.15	9.84	$F_{0.05}(2, 3) = 9.55$
因素 5	对拉钢筋直径	120.02	2	60.01	1.77	$F_{0.1}(2, 3) = 5.46$
因素 6	对拉钢筋间距	743.83	2	371.92	10.96	
因素 7	对拉钢筋屈服强度	141.30	2	70.65	2.08	
	误差 e	101.83	3	33.94	—	

钢筋直径统计量大小较为接近,混凝土抗压强度统计量最小,仅为 0.27。对于 $\alpha = 0.05$, $F_1 = 61.02 > F_{0.05}(2, 3)$, $F_6 = 10.96 > F_{0.05}(2, 3)$, $F_4 = 9.84 > F_{0.05}(2, 3)$, 说明钢板厚度对贯穿速度的影响显著,对拉钢筋间距和混凝土厚度对贯穿速度的影响较为显著。

6 结论

为了给出 SCS 板抗弹体撞击贯穿速度的预测方法,通过量纲分析给出了贯穿速度与诸多因素的无量纲函数关系,并基于人工神经网络,通过设计和编程,建立了贯穿速度预测模型。通过预测模型的训练和预测验证,对于贯穿速度,预测样本 19 组数据中误差绝对值有两个是 10.34% 和 11.97%,其余在 10% 以内;训练样本 38 组数据中误差绝对值在 10% 以内。这说明本文建立的贯穿速度预测模型给出的计算结果是合理可信的,从新的角度解决了 SCS 板抗弹体贯穿速度的预测问题,能有效评估 SCS 板的贯穿破坏和进行相关工程设计。

影响 SCS 板贯穿速度的因素有很多,本文从 SCS 板的结构方面进行研究,有益于 SCS 板抗弹体贯穿的优化设计,主要从 7 个因素:钢板厚度、钢板屈服强度、混凝土厚度、混凝土抗压强度、对拉钢筋间距、对拉钢筋直径、对拉钢筋屈服强度出发,评价了这些因素对贯穿速度的影响程度。通过正交试验方法,确定了 7 因素 3 水平的正交试验方案,获得了 18 种有限元计算工况。根据 18 种工况的有限元计算结果,结合方差分析,定量评价了 7 种因素对贯穿速度的影响程度,钢板厚度影响显著,对拉钢筋间距和混凝土厚度影响较大,钢板屈服强度、对拉钢筋屈服强度、对拉钢筋直径影响较小,混凝土抗压强度影响最小,影响程度大小顺序依次是:钢板厚度 > 对拉钢筋间距 > 混凝土厚度 > 钢板屈服强度 > 对拉钢筋屈服强度 > 对拉钢筋直径 > 混凝土抗压强度。

在后续的研究中,首先 SCS 板抗弹体贯穿速度的人工神经网络预测模型可进一步优化,选取不同的网络模型或者算法,获取更加优化的计算模型,使得模型计算结果与实际结果的误差进一步缩小;其次,可对弹体方面的影响因素进行影响程度大小排序研究,也可从弹体和 SCS 板的两方面因素进行综合排序;最后,本文研究中探讨的贯穿速度属于较低的速度范围,变化 SCS 板的规格,对于更高的贯穿速度,采用何种方法合理预测,以及探讨影响因素排序,也是后续值得研究的问题。

参 考 文 献

- [1] Yan J B, Liew J Y R, Zhang M H, et al. Experimental and analytical study on ultimate strength behaviour of steel-concrete-steel sandwich composite beam structures [J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(5): 1523-1544.
- [2] Liew J Y R, Yan J B, Huang Z Y. Steel-concrete-steel sandwich composite structures-recent innovations [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 130: 202-221.
- [3] 徐宙元, 赵人达, 占玉林. 基于 ABAQUS 的钢板-混凝土组合桥面板非线性分析 [J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(28): 7275-7279.
Xu Zhouyuan, Zhao Renda, Zhan Yulin. Nonlinear analysis of steel-concrete composite bridge deck based on ABAQUS [J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(28): 7275-7279.
- [4] Shafaei S, Varma A H, Seo J, et al. Cyclic lateral loading behavior of composite plate shear walls/concrete filled [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2021, 147(10). DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003091.
- [5] 赵春风, 何凯城, 卢欣, 等. 双钢板混凝土组合板抗爆性能分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(9). DOI:10.11883/bzycj-2020-0291.
Zhao Chunfeng, He Kaicheng, Lu Xin, et al. Analysis on the blast resistance of steel concrete composite slab [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(9). DOI:10.11883/bzycj-2020-0291.
- [6] 樊健生, 丁然, 孙运轮. 钢板混凝土结构在核电厂工程中的应用研究 [J]. *工业建筑*, 2023, 53(9): 18-28.
Fan Jiansheng, Ding Ran, Sun Yunlun. Research on the application of steel-plate concrete structures in nuclear plant engineering [J]. *Industrial Construction*, 2023, 53(9): 18-28.
- [7] 韩鹏飞. 核工程双钢板混凝土结构抗大型商用飞机撞击研究 [D]. 北京: 清华大学, 2018.
Han Pengfei. Study on steel-concrete-steel structures in nuclear engineering subjected to a large commercial aircraft impact [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [8] Kennedy R P. A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1976, 37(2): 183-203.
- [9] Williams M S. Modelling of local impact effects on plain and reinforced concrete [J]. *ACI Structure Journal*, 1994, 91(2): 178-187.
- [10] 文鹤鸣. 混凝土靶板冲击响应的经验公式 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(3): 267-274.
Wen Heming. Empirical equations for the impact response of concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(3): 267-274.
- [11] Li Q M, Reid S R, Wen H M, et al. Local impact effects of hard missiles on concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32: 224-284.
- [12] Ranjan R, Banerjee S, Singh R K, et al. Local impact effects on concrete target due to missile: an empirical and numerical approach [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 68: 262-275.
- [13] Li Q M, Tong D J. Perforation thickness and ballistic limit of concrete target subjected to rigid projectile impact [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2003, 129(9): 1083-1091.

- [14] Li Q M, Reid S R, Ahmad-Zaidi A M. Critical impact energies for scabbing and perforation of concrete target[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236: 1140-1148.
- [15] Chen X W, Li X L, Huang F L, et al. Normal perforation of reinforced concrete target by rigid projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(10): 1119-1129.
- [16] 张爽. 弹体侵彻/贯穿钢筋混凝土靶机理与弹道轨迹研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- Zhang Shuang. Investigation on the mechanism and trajectory of projectile penetrating/perforating reinforced concrete target[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [17] 武海军, 张雪岩, 张爽, 等. 刚性弹体侵彻/贯穿有限厚钢筋混凝土靶的弹道预测[J]. 兵工学报, 2020, 41(S2): 12-25.
- Wu Haijun, Zhang Xueyan, Zhang Shuang, et al. Prediction of trajectory of rigid projectile penetrating/perforating a finite-thick reinforced concrete target[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(S2): 12-25.
- [18] 宋春明, 王明洋, 王德荣. 钢筋混凝土安全壳受撞击局部破坏作用计算[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(7): 113-117.
- Song Chunming, Wang Mingyang, Wang Derong. Calculating method for local damage of RC containment under impact[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(7): 113-117.
- [19] 王冰彬. 核电厂房钢筋混凝土墙抗冲切与抗冲击性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- Wang Bingbin. Study on punching and impact resistance of reinforced concrete wall in nuclear power plant[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [20] Bruhl J C, Varma A H, Johnson W H. Design of composite SC walls to prevent perforation from missile impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 75: 75-87.
- [21] Han P F, Liu J B, Fei B G, et al. A study on steel-concrete-steel wall to resist perforation from rigid projectile impact[J]. Shock and Vibration, 2021. DOI: 10.1155/2021/9986062.
- [22] Han P F, Liu J B, Fei B G. Comparative analyses of a shield building subjected to a large commercial aircraft impact between decoupling method and coupling method[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2022, 54(1): 326-342.
- [23] 程毅, 刘军, 郑雨晴, 等. 钢板混凝土复合靶抗贯穿性能的理论及数值分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4): 1441-1448.
- Cheng Yi, Liu Jun, Zheng Yuqing, et al. Theoretical and numerical investigation of perforation resistance of steel-concrete composite target[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(4): 1441-1448.
- [24] 王武, 杨军, 王安宝, 等. 基于能量法的双钢板混凝土遮弹层设计计算方法研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(11): 152-165.
- Wang Wu, Yang Jun, Wang Anbao, et al. A study of the design and calculation method of double-skin steel-concrete shield based on energy approach[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(11): 152-165.
- [25] Xu Z Y, Li Z C, Liu X, et al. An improved formula for perforation of the steel plate reinforced concrete subjected to the rigid missile[J]. Mechanical Engineering Journal, 2020, 7(3): 1-13.
- [26] Kim J M, Varma A, Seo J, et al. Steel-plate composite walls subjected to missile impact: experimental evaluation of local damage[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(2). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002806.
- [27] Kim J M, Varma A, Lee K, et al. Steel-plate composite walls subjected to missile impact: numerical evaluation of local damage[J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(10). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003417.
- [28] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005.
- Tan Qingming. Dimensional analysis[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005.
- [29] Yao X. Evolving artificial neural networks[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(9): 1423-1447.
- [30] 曹吉星. 碳纤维混凝土的动态本构模型及其有限元方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- Cao Jixing. Dynamic constitutive model of steel fiber reinforced concrete and its finite element method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [31] 刘增良, 刘有才. 模糊逻辑与神经网络—理论研究与探索[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996.
- Liu Zengliang, Liu Youcai. Fuzzy logic and neural network-theoretical research and exploration[M]. Beijing: Beihang University Press, 1996.
- [32] Kim K S, Moon I H, Choi H J, et al. A preliminary study on the local impact behavior of steel-plateconcrete walls[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, 102: 210-219.