

侵彻弹体局部结构优化设计方法

王江波^{1,2}, 张庆明¹, 冯成良², 陈文², 李伟兵², 汪衡²

1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081
2. 重庆红宇精密工业有限责任公司, 重庆 402760

摘要 针对侵彻弹体结构优化设计中存在的主要问题, 提出了一种侵彻弹体局部结构自动优化方法, 实现了侵彻弹体结构设计方案初步优选和关键局部结构自动优化。采用基于 DOE 分析的材料参数调试方法, 调试获得了弹体侵彻混凝土数值模拟所需全部参数, 并进行了试验验证。结果表明, 材料参数在精度上满足要求; 对某型弹体的头部进行了自动优化, 优化结果可使弹体头部设计更加合理, 弹体所受阻力减小, 过载变小, 靶后余速变大, 侵彻能力变强。

关键词 优化设计; 弹体结构; DOE; 材料参数; 数值计算

中图分类号 TJ012.4

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.24.006

Optimization of a Partial Projectile Structure of the Penetration Warhead

WANG Jiangbo^{1,2}, ZHANG Qingming¹, FENG Chengliang², CHEN Wen², LI Weibing², WANG Heng²

1. State Key Laboratory of Explosion and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Chongqing Hongyu Precision Industrial Co, Ltd, Chongqing 402760, China

Abstract The optimization is a key issue for the penetrating projectile. This paper proposes an auto optimization method for a partial projectile structure of the penetration warhead. The preliminary optimization of the projectile structure and the auto optimization of a partial projectile structure are realized. With the DOE debugging method, all material parameters in the simulation model used in the numerical simulation for the projectile penetrating concrete are obtained. The numerical simulation results are compared with the experiment, and it is found that the material parameters have the desired precision. The auto optimization method is used to design the nose section of the projectile, which improves the nose section design, reduces the resistance and the acceleration of the projectile, and increases the residual velocity and the penetration ability.

Keywords optimization design; structure of projectile; DOE; material parameters; numerical calculation

0 引言

侵彻弹体的传统设计方法主要依托个人经验及工程算法。近年来, 随着计算力学、冲击动力学基础理论、计算机硬件等的发展, 广大工程技术人员相继开发出 AUTODYN、LS-DYNA 等大型有限元仿真软件, 并在侵彻弹体结构优化设计中得到了广泛应用^[1]。但这些应用还存在局限性, 如侵彻过程涉及大变形大破坏, 所用材料模型及参数直接决定计算结果的有效性和可靠性^[2]; 霍普金森压杆是研究材料高应变率下力学行为的一种最有效的实验装置^[3], 而混凝土试样的非均匀性导致测试结果的有效性 & 测试精度存在问题^[4-5], 迫切需要建立一种结合侵彻试验结果系统调试材料参数的方法, 该

方法可消除或减少材料参数测试误差对数值模拟精度的影响, 缺乏弹体关键局部结构自动优化设计方法, 因此目前只能对设计方案进行验证性的仿真计算, 不能实现弹体结构尤其是关键局部结构的自动优化, 在设计精度和效率方面均不能满足产品研制需要。

DOE (Design of Experiments) 实验设计是一种安排实验和分析实验的数理统计方法, 针对以上问题, 本文建立一种基于 DOE 分析的材料参数调试方法, 从而提高侵彻弹体结构仿真设计精度, 用于侵彻弹体结构设计方案初步优选; 同时基于 HyperStudy 和 LS-DYNA 相结合的多学科优化设计技术, 实现侵彻弹体关键局部结构的自动优化设计。

收稿日期: 2012-06-05; 修回日期: 2012-07-03

作者简介: 王江波, 博士研究生, 研究方向为高效毁伤和材料动力学, 电子信箱: jbwang2007@163.com; 张庆明 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S030000869M), 教授, 研究方向为高效毁伤和材料动力学等, 电子信箱: qmzhang@bit.edu.cn

1 基于 DOE 分析的材料参数调试

1.1 DOE 分析方法的建立

本文选取靶后余速为响应目标函数,设计变量为混凝土靶的材料参数,DOE 分析的目的是计算各材料参数对靶后余速的影响,为材料参数调试提供依据。

DOE 分析方法主要有全因子法、部分因子法、中心组合法、自定义法等。其中全因子法的计算精度最高,但是其调用 LS-DYNA 进行计算的次数太多,在时间上难以接受;部分因子法、中心组合法等虽然能减少计算次数,但在精度上不能满足要求^[6]。本文依据具体需要采用自定义算法,把每个材料参数设置成 3 个水平值,在计算每个材料参数影响度时,其他设计变量取参考值,只需计算 3 次,因此共只需计算 48 次,计算精度和计算时间均能满足要求。

1.2 材料参数

材料参数分成两类,第一类材料参数是指可获得准确值的参数,这些参数可设为固定值,对响应目标函数无影响,不参与影响度计算;第二类材料参数是指不能获得准确值的参数,把这些参数设为一个范围并参加影响度计算,然后通过 DOE 分析并结合靶场撞击试验进行调试修正。

由于弹体材料参数均可通过试验测试确定,可将其归为第一类材料参数,不参与参数调试。靶标使用典型的 40MPa 素混凝土,采用加入了失效的 JHC 模型进行描述,共涉及 19 个材料参数^[7]:材料密度 ρ_0 ,剪切模量 G ,黏聚强度 A ,压力硬化系数 B ,压力硬化指数 n ,应变率系数 C ,静态单轴强度 f_c ,最小断裂应变 β_{min} ,压碎体积压力 P_c ,压碎体积应变 μ_c ,压实体

积压力 P_l ,压实体积应变 μ_l ,损伤参数 D_1, D_2 ,压实后 $P-V$ 曲线系数 K_1, K_2, K_3 ,失效压力 P_{min} ,失效剪切应变 γ_{max} 。其中 ρ, G, f_c 可通过试验准确测试,归类为第一类参数,设为固定值;剩余 16 个参数不能获得准确值,归类为第二类参数。各参数具体数值及跳动范围见表 1。

表 1 混凝土材料参数
Table 1 Concrete material parameters

$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	2.4	P_l/MPa	300—1300
G/GPa	13	μ_l	0.07—0.13
A/GPa	75—85	D_1	0.02—0.056
B/GPa	155—165	D_2	0.8—1.2
n	0.55—0.65	K_1	0.80—0.90
C	0.005—0.009	K_2	-2.1—-1.3
f_c/MPa	40	K_3	1.6—2.6
β_{min}	0.008—0.012	P_{min}/MPa	-6—-2
P_c/MPa	4—16	γ_{max}	0.2—0.4
$\mu_c/10^4$	7—13		

1.3 计算案例分析

利用以上建立的算法及材料参数,使用 LS-DYNA 软件对某侵入弹体以 400m/s 撞击速度侵入 35mm 混凝土进行 DOE 分析,通过计算得到各材料参数对弹体余速影响见表 2。从表 2 可以看出,400m/s 时对弹体余速影响较大的材料参数有 $P_{min}, P_l, D_1, P_c, B$ 5 个参数,其他参数对弹体余速的影响均小于 10m/s,可忽略不计。

表 2 材料参数对余速影响大小及排序
Table 2 Effect of material parameters on residual velocity

排序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
参数	P_{min}	P_l	D_1	P_c	B	μ_c	A	N	C	K_1	μ_c	D_2	β_{min}	γ_{max}	K_2	K_3
对余速的影响/($m \cdot s^{-1}$)	184.1	25.1	21.4	12.3	12.1	8.1	7.1	6.8	5.9	5.3	4.8	3.4	1.0	0.2	0	0

1.4 试验验证

本节调试撞击速度为 400m/s 左右的材料仿真参数,并通过试验验证其通用性及准确性。在 400m/s 时只需重点调试 $P_{min}, P_l, D_1, P_c, B$ 5 个参数。

P_c 可由文献[8]给出的计算公式计算,即

$$P_c = \frac{f_c}{3}$$

由文献[9]可知, D_1 值由下式给出

$$D_1 = \frac{0.01}{1/6 + T^*}$$

其中 $T^* = T/f_c$ (式中 T 和 f_c 的单位均为 MPa),而 T 可由美国混凝土协会提出的关系表征式^[10]计算,即

$$T = 0.62(f_c)^{0.5}$$

由此可知, P_c 和 D_1 两个参数可通过计算获得,因此只需

依据试验结果重点调试 P_{min}, P_l 和 B 3 个参数即可。依据试验重点调试后的材料参数见表 3,其他参数取表 2 中的参考值即可。

表 3 调试后的材料参数
Table 3 Material parameters after debugging

材料	P_{min}/MPa	P_l/MPa	D_1	P_l/MPa	B/GPa
混凝土	-4.2	13.3	0.038	853	161

针对 A、B 两种弹型开展不同撞击速度 v 下的侵入试验,对试验数据进行分析,各找出 5 组试验效果比较理想的数据。使用调试好的材料参数对以上试验进行仿真计算,仿真结果与试验结果对比分析如图 1、图 2 所示。

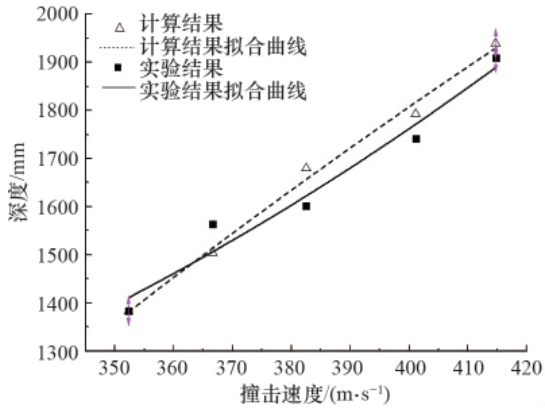


图1 A型弹仿真结果与试验结果对比

Fig. 1 Comparison between simulation results and experiment results for projectile shape A

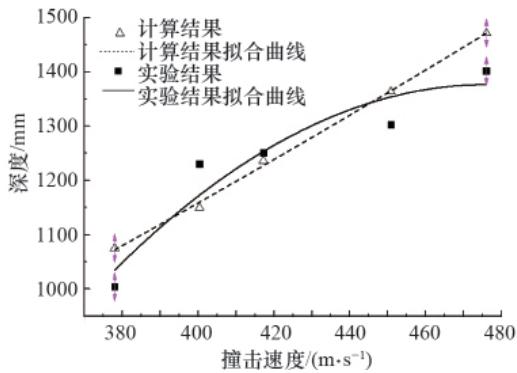


图2 B型弹仿真结果与试验结果对比

Fig. 2 Comparison between simulation results and experiment results for projectile shape B

从图1、图2可以看出,仿真结果与试验结果比较接近,验证了使用DOE分析方法调试的材料参数在精度上能满足设计要求,并且具有一定的适用范围。

2 局部结构自动优化

基于DOE分析的材料参数调试方法,调试获得了弹体侵彻混凝土数值模拟所需全部参数后,结合HyperMorph、HyperStudy、LS-DYNA等软件实现侵彻弹体头部结构自动优化设计,该方法也适用于弹体其他关键局部结构的自动优化设计。

首先使用HyperMesh软件建立了侵彻弹体的有限元模型(图3)。其次,使用HyperMorph模块的Morphing技术对弹体网格变形进行定义,曲线1为原始头部形状,曲线3为自定义的曲线1上的节点变化边界,头部形状可在曲线1和曲线3之间任意变化(图4)。该Morphing技术基于节点扰动矢量方法实现形状的参数化,得到各种可能的形状,其基本原

理为

$$x = x_0 + \sum DV_i \cdot PV_i$$

其中, x 为节点坐标矢量, x_0 为节点设计初始的坐标矢量, PV_i 为与设计变量 DV_i 有关的矢量扰动。最后,把侵彻余速设为优化目标函数,使用HyperStudy软件和LS-DYNA软件进行联合求解,经过6次迭代的优化计算过程如图5所示。

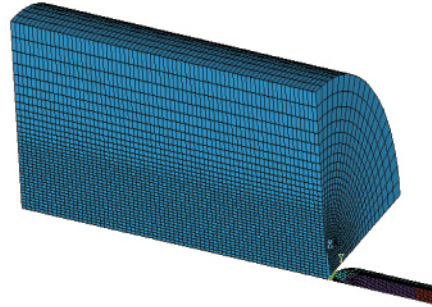


图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

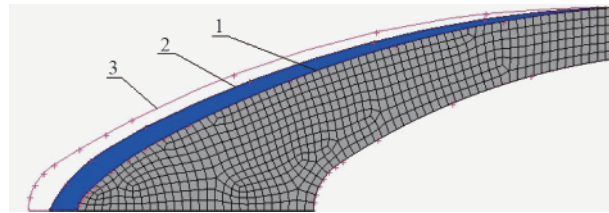


图4 弹体网格变形

Fig. 4 Displacements of projectile node

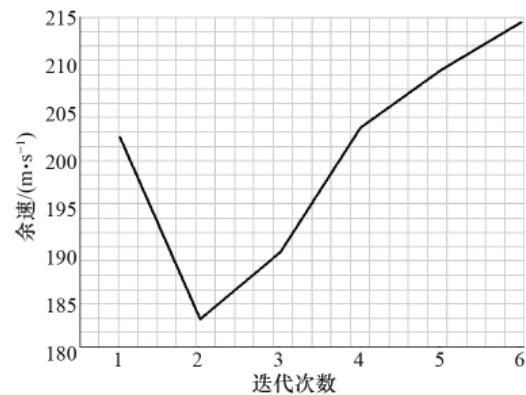


图5 迭代优化计算过程

Fig. 5 Computing process of iterative optimization

经过优化计算后获得的弹体头部形状如图4中的曲线2,方案优化前后的靶后余速分别为202、214m/s,优化前后加速度 a 对比分析如图6所示。优化仿真分析使得弹体头部曲线设计更加合理,弹体所受阻力减小,过载变小,靶后余速变大,侵彻能力变强。

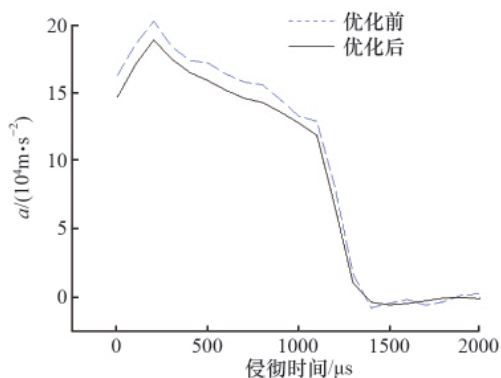


图 6 优化前后加速度对比分析

Fig. 6 Comparison of acceleration before and after optimization

3 结论

(1) 建立了一种用于材料参数调试的 DOE 分析方法, 应用该方法对某弹体进行仿真分析得出撞击速度为 400m/s 左右时, 只有 P_{min} 、 P_l 、 D_1 、 P_c 、 B 5 个参数对弹体余速影响大于 10m/s, 其中 P_c 和 D_1 两个参数可通过计算获得, 因此只需依据试验结果重点调试 P_{min} 、 P_l 和 B 3 个参数即可。

(2) 结合试验调试出一组适用于撞击速度为 400m/s 左右的材料仿真参数, 并通过试验证明, 调试的材料参数在精度上能满足设计要求, 且具有一定的适用范围, 可用于侵彻弹体结构设计方案的初步优选。

(3) 提出弹体局部结构自动优化方法, 使用该方法可实现弹体头部结构自动优化, 使弹体头部设计更加合理, 弹体所受阻力减小, 过载变小, 靶后余速变大, 侵彻能力变强。同时, 该方法适用于弹体其他关键局部结构的自动优化设计。

参考文献 (References)

[1] 田占东, 李守苍, 段卓平, 等. 弹丸在混凝土靶中运动轨迹的数值模拟

[J]. 高压物理学报, 2007, 21(4): 354-358.
 Tian Zhandong, Li Shoucang, Duan Zhuoping, et al. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2007, 21(4): 354-358.
 [2] 熊益波, 胡永乐, 徐进, 等. 混凝土 Johnson-Holmquist 模型极限面参数确定[J]. 兵工学报, 2010, 31(6): 746-751.
 Xiong Yibo, Hu Yongle, Xu Jin, et al. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(6): 746-751.
 [3] 巫绪涛, 孙善飞, 李和平. 用 HJC 本构模型模拟混凝土 SHPB 实验[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2): 137-142.
 Wu Xutao, Sun Shanfei, Li Heping. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(2): 137-142.
 [4] 朱珏, 胡时胜, 王礼立. 率相关混凝土材料 SHPB 试验的若干问题[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 78-87.
 Zhu Jue, Hu Shisheng, Wang Lili. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(1): 78-87.
 [5] 巫绪涛, 杨伯源, 李和平, 等. 大直径 SHPB 装置的数值模拟及实验误差分析[J]. 应用力学学报, 2006, 23(3): 431-434.
 Wu Xutao, Yang Boyuan, Li Heping, et al. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2006, 23(3): 431-434.
 [6] Altair Engineering Inc, Hyper Study introduction [M]. Detroit: Altair Engineering Inc, 2011: 87-94.
 [7] 王政, 倪玉山, 曹菊珍, 等. 冲击载荷下混凝土动态力学性能研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 519-527.
 Wang Zheng, Ni Yushan, Cao Juzhen, et al. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(6): 519-527.
 [8] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures [C]. 14th International Symposium on Ballistics, Quebec, Canada, 1993: 591-600.
 [9] 张凤国, 李恩征. 混凝土撞击损伤模型参数的确定方法 [J]. 弹道学报, 2001, 13(4): 12-16.
 Zhang Fengguo, Li Enzheng. *Journal of Ballistics*, 2001, 13(4): 12-16.
 [10] 黄土元, 蒋家奋. 近代混凝土技术 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.
 Huang Shiyuan, Jiang Jiafen. *Modern concrete technology* [M]. Xi'an: Shaanxi Technology Press, 1998.

(责任编辑 马宇红, 代丽)

· 科学共同体介绍 ·

中国水力学会

中国水利学会 (Chinese Hydraulic Engineering Society) 成立于 1931 年 4 月, 前身是中国水利工程学会, 出版会刊《水利》, 李仪祉任第一任会长; 中华人民共和国建立后, 于 1957 年重建学会, 更名为中国水利学会, 张含英任第一任理事长。

中国水利学会是在中国科学技术协会和水利部领导下的全国性水利科技工作者的学术组织, 具有社团法人

资格。学会个人会员 86000 人、外籍会员 16 人、专业委员会 43 个、工作委员会委员单位会员 80 个。学会的宗旨是: 促进水利科学技术的繁荣和发展, 促进科技创新与人才的成长。

中国水利学会与国际大坝委员会中国大坝委员会、国际水文科学协会中国国家委员会、国际灌溉排水委员会中国国家委员会、国际水资源协会中国地区委员会等都有组织联系。学

会出版发行会刊《水利学报》, 及《水科学进展》、《岩土工程学报》等学术期刊。学会所设“大禹水利科学技术奖”是面向全国水利行业的行业科学技术奖。

2009 年 5 月, 中国水利学会在京召开第九次全国会员代表大会, 选举敬正书为第九届理事会理事长, 李赞堂为秘书长。

(责任编辑 秦政)