

文章编号:1672-6553-2026-24(2)-026-011

DOI:10.6052/1672-6553-2025-086

超高速撞击下航天器 Nextel/Kevlar 填充式防护结构的 结构优化设计研究^{*}

李耀^{1,2} 叶科奇^{1,2} 朱柏洋^{1,2} 郭晓陶³ 姜宇³ 刘晓东^{1,2†}

(1. 中山大学 航空航天学院, 深圳 518107)

(2. 中山大学(深圳) 深圳市智能微小卫星星座技术与应用重点实验室, 深圳 518107)

(3. 西安交通大学 太空系统运控重点实验室合作部, 西安 710043)

摘要 为提升航天器在超高速撞击环境下的结构防护性能并实现轻量化设计, 本文针对 Nextel/Kevlar 填充式防护结构, 建立了包含球形弹丸与防护结构在内的三维数值模型, 并对撞击过程进行了模拟。研究采用拉丁超立方采样方法, 在防护结构的四个关键结构参数组成的设计空间内生成样本点, 并基于 LS-DYNA 获取对应的动能响应数据。以动能损失为响应输出, 构建克里金近似模型以高效替代显式动力学仿真。进一步, 以最小化结构面密度、最大化弹丸动能损失为优化目标, 采用 NSGA-II 多目标遗传算法开展结构优化设计。优化结果表明, 在确保防护性能的前提下, 结构的面密度降低约 2.56%, 弹丸动能损失提升约 1.91%。研究结果验证了克里金模型的预测能力及多目标优化策略的有效性。

关键词 Nextel/Kevlar 填充式防护结构, 空间碎片, 太空交通, 超高速撞击, 克里金模型, 多目标遗传算法

中图分类号: V414

文献标志码:A

Structural Optimization of Nextel/Kevlar-Filled Protective Structures under Hypervelocity Impact for Spacecraft^{*}

Li Yao^{1,2} Ye Keqi^{1,2} Zhu Boyang^{1,2} Guo Xiaotao³ Jiang Yu³ Liu Xiaodong^{1,2†}

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

(2. Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Microsatellite Constellation, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

(3. Cooperation Department of State Key Laboratory of Space System Operation and Control,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710043, China)

Abstract A numerical model of a Nextel/Kevlar-filled protective structure under hypervelocity impact is developed to investigate its structural response and optimize its configuration. Four key design parameters, namely the thicknesses of the front plate, Nextel and Kevlar layers, and rear plate, are chosen as variables. Latin hypercube sampling is employed to generate sample points, and high-fidelity simulations are carried out using LS-DYNA to obtain the projectile's kinetic energy dissipation. A Kriging surrogate model is built to approximate the simulation response with reduced computational cost. Based on the surrogate, a multi-objective optimization using the NSGA-II algorithm is performed, aiming to minimize the areal density and maximize energy dissipation. The optimized structure achieves a 2.56% reduction in areal density and a 1.91% increase in energy loss.

2025-08-02 收到第 1 稿, 2025-10-14 收到修改稿。

* 空间碎片与近地小行星防御科研专项 (KJSP2023020202); Special Research Project on Space Debris and Near Earth Asteroid Defense (KJSP2023020202).

† 通信作者 E-mail: liuxd36@mail.sysu.edu.cn

Key words Nextel/Kevlar-filled protective structure, space debris, space traffic, hypervelocity impact, Kriging model, multi-objective genetic algorithm

引言

随着人类航天活动的日趋频繁,太空活动增加引起的空间环境问题也日益突出,在轨运行的航天器遭受着多种空间环境因素的共同损害,其中微流星体/空间碎片(meteoroid/orbital debris,M/OD)的超高速撞击破坏^[1],会对人类的航天活动产生威胁。

目前国内外采用的空间碎片撞击防护结构主要是基于1947年Whipple^[2]提出的Whipple防护结构以及以该结构为基础形成的多种变形方案。填充式防护结构是一种常用的防护结构,航天器填充式防护结构需要对填充层层数、填充材料面密度匹配、填充材料间距匹配、防护结构总间距以及舱壁厚度等结构参数进行设计,以满足防护需求。NASA和马歇尔空间飞行中心^[3]提出的Nextel/Kevlar填充式防护结构是一种典型的多层复合防护结构,如图1所示,是由Nextel陶瓷纤维层和Kevlar高强度纤维层组合而成,其中Nextel层置于前方,利用其高模量特性在撞击瞬间产生强烈冲击压力以破碎入射粒子;Kevlar层位于后方,凭借其优异的强韧性,有效减速和捕捉残留碎片,实现动能耗散与结构防护的协同效果^[4]。

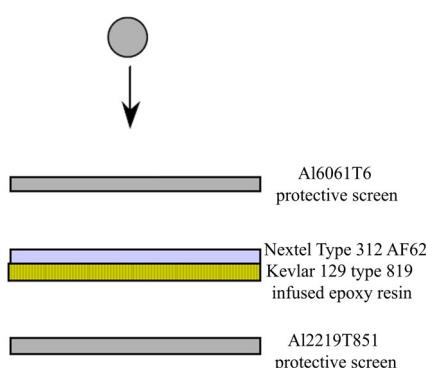


图1 Nextel/Kevlar 填充式防护结构
Fig. 1 Nextel/Kevlar-filled protective structure

国内外许多学者对Nextel/Kevlar填充式防护结构的超高速撞击特性进行了研究,基本分为试验研究和数值仿真研究两个方面。Christiansen等^[3]针对Nextel/Kevlar防护结构的防护性能进行了一系列的轻气炮试验研究,得出结论:与采用

均质铝板作为第二缓冲层的结构相比,使用Nextel/Kevlar复合材料作为第二缓冲层的填充式防护结构在速度高达12 km/s的条件下,对空间碎片的超高速撞击展现出更优越的防护性能。2001年NASA的Christiansen以及Kerr等^[5]再次开展了针对Nextel/Kevlar填充式防护结构超高速撞击性能的试验研究。通过对比分析发现,Nextel陶瓷布作为缓冲层相比等质量的均质铝板具有更优的破碎能力和防护效果;整体结构能够有效抵御直径17 mm、速度7 km/s的铝球弹丸的超高速撞击。此外,意大利Alenia Aerospazio研究中心的Destefanis,Faraud等^[6]采用轻气炮试验方法对填充式防护结构的超高速撞击性能进行了研究。试验结果表明:当动能较高的碎片云撞击后板时,后板更易产生细小裂纹及轻微的塑性变形;而动能较低、形状短粗的碎片云则更可能在后板上造成明显的中心穿孔,并伴随周边小裂纹等损伤分布。

由于各种试验条件的限制,进行超高速撞击的模拟试验,往往耗费大量的人力、物力、财力和时间。因此通过数值模拟的方法,模拟超高速撞击过程,是一种有效而经济的手段^[7]。对于数值仿真研究,2001年,Hayhurst等^[8]进一步开展了填充式防护结构的数值仿真工作,深入分析了Nextel/Kevlar材料的本构模型与状态方程特性,并提出了采用AUTODYN软件中的光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics,SPH)算法进行模拟,同时为Kevlar材料引入孔隙状态方程模型,从而使数值仿真中预测的碎片云速度与试验结果更加吻合。2006年,Clegg等^[9]对填充式防护结构的超高速撞击性能开展了数值仿真研究,并改进了Nextel材料模型。与NASA在特定速度条件下的试验结果相比,其仿真结果表现出更好的吻合度。阎晓军等^[10]利用PAM-SHOCK软件对撞击速度约为3 km/s条件下的双层板结构进行了超高速撞击数值模拟,所得靶板破口直径与试验数据高度一致,验证了仿真结果的准确性。贾光辉等^[11]采用多指标优化方法,通过调整弹道极限方程系数,优化了填充式防护结构的弹道极限预测模型。研究基于国内实验数据,显著提升了方程预测精度。

本文首先建立 Nextel/Kevlar 填充式防护结构的超高速撞击模型,包括球形弹丸和防护结构,并在设计空间中选取合适的样本点进行仿真模拟,得到仿真数据,选取结构中前板、Nextel 填充层、Kevlar 填充层和后板的厚度四个结构参数作为输入,选取仿真得到的球形弹丸的动能损失作为输出,使用 Kriging 方法建立代理模型,并以四个结构参数作为优化变量,以最小化填充式结构的面密度、最大化球形弹丸的动能损失作为优化目标,采用多目标遗传算法(NSGA-II)进行结构优化设计,得到优化结果的最优解,为深入研究 Nextel/Kevlar 防护结构的超高速撞击特性及其结构优化提供了有力支持。

1 Nextel/Kevlar 防护结构超高速撞击模型的建立

1.1 几何模型

超高速撞击模型包括球形弹丸和 Nextel/Kevlar 填充式防护结构两部分组成。其中,Nextel/Kevlar 填充式防护结构是在双层板防护结构的缓冲板(前板)和后板之间填充 Nextel 陶瓷布和 Kevlar 纤维布,前后面板通常采用相同的材料。前板、Nextel 填充层、Kevlar 填充层以及后板厚度分别为 t_f 、 t_N 、 t_K 、 t_b ,如图 2 所示。

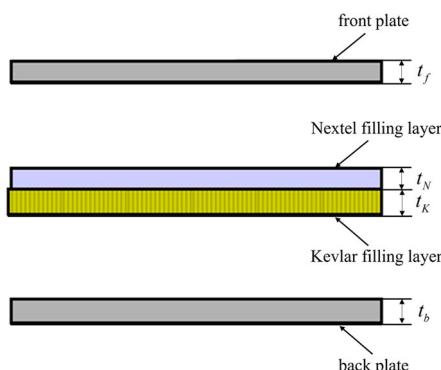


图 2 Nextel/Kevlar 防护结构几何模型示意图
Fig. 2 Geometric model of Nextel/Kevlar structure

本文建立的 Nextel/Kevlar 填充式防护结构每层板截面均为圆形,球形弹丸与防护结构的相对位置如图 3 所示,弹丸撞击点为板的中心位置。

1.2 模型与材料参数

本文中所有模型均采用光滑粒子流体动力学(SPH)法进行建模。SPH 法通过在计算域中填充具有独立材料性质的 SPH 粒子来替代网格划分,

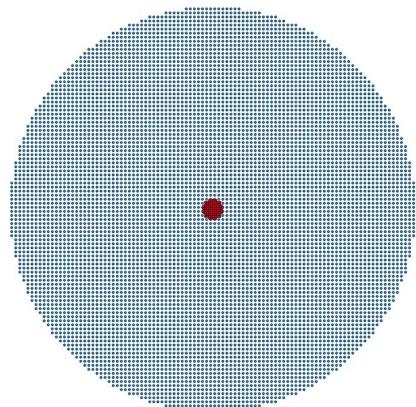


图 3 弹丸与 Nextel/Kevlar 防护结构 SPH 模型
Fig. 3 Pellet and Nextel/Kevlar structure SPH model

系统的状态用一系列的粒子来描述,这些粒子包含着独自的材料性质,粒子遵守质量、动量和能量守恒方程。传统有限元方法在处理大变形、严重破碎及材料分离等问题时往往面临网格严重畸变甚至失效的困境,而 SPH 法采用无网格拉格朗日描述,可自然地跟踪物质界面的演化,避免了网格重构问题。尤其在模拟弹丸与靶板间的高速碰撞、碎片形成与飞散过程中,SPH 法能够更准确地捕捉应力波传播和材料破坏的连续过程,因此在超高速撞击、爆炸及碎片云演化等强非线性动力学问题中,SPH 法具有更高的稳定性与适用性,能够很自然地处理一些具有极大变形的问题。

模型中球形弹丸与前后板的材料均采用铝合金,填充材料分别设定为 Nextel 陶瓷布与 Kevlar 纤维布。对于球形弹丸与前后板的铝合金材料,其动态响应和高应变率下的塑性行为复杂,为了准确描述材料在大塑性变形、应变率效应及温度软化等条件下的力学特性,本构模型采用 Johnson-Cook (JC) 强度模型^[12]。该模型能够综合考虑应变硬化、应变率敏感性及热软化效应三者的耦合关系,形式简单且参数易于获取,适合用于模拟铝合金在超高速撞击过程中的动态屈服特性和失效行为。该模型能有效描述金属材料在高应变率、大塑性变形及高温下的行为。在 JC 模型中,屈服应力 σ_y 表示为

$$\sigma_y = (A + B\dot{\epsilon}_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{* m}) \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 为无量纲的等效塑性应变率; A 为准静态下材料的屈服强度; B 、 n 为应变硬化影响因子; C 为应变率敏感系数; m 为温度软化指数; T^* 为相对温度,表示为

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

式中: T 为材料的温度; T_r 为室温; T_m 为熔化温度。

填充层材料的本构关系采用塑性动力学模型进行描述,该模型能够表达材料的线性强化行为,适合描述布层材料在冲击载荷下的弹塑性特性。

由于防护结构的超高速撞击过程是个强压缩过程,因此状态方程均选用 Gruneisen 方程^[13]的压缩形式,该状态方程能较好地反映材料在冲击压缩、高温下的体积变化与压强关系,适用于描述填充层在超高速撞击过程中所经历的高压、高温状态下的热力学行为。计算材料的压力 p 为

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (3)$$

式中: ρ_0 为材料的初始密度; C 为曲线 $vs-vp$ (激波-粒子速度曲线) 的截距; μ 为压缩率 ($\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ 为当前密度); γ_0 为 Gruneisen 系数; a 为 γ_0 的一阶修正系数; S_1, S_2, S_3 是 $vs-vp$ 曲线的斜率系数; E 为单位初始体积的内能。

铝合金与 Nextel 陶瓷布、Kevlar 纤维布的具体材料参数^[14]如表 1、表 2 所示。

表 1 铝合金材料结构参数

Table 1 Structural parameters of aluminum alloy materials

材料参数	铝合金
A/MPa	337
B/MPa	343
n	0.41
C	0.01
m	1
T_m/K	877
T_r/K	293
$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	2.7
E/GPa	70
ν	0.33
$c_0/(m \cdot s^{-1})$	5320
S	1.34
γ_0	2
$c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	896

表 2 填充材料结构参数

Table 2 Structural parameters of filling materials

材料参数	Nextel	Kevlar
$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	3.05	1.44
E/GPa	280	76
ν	0.22	0.36
A/MPa	120	75
E_T/MPa	140	10
C	0.001	0.001
$c_0/(m \cdot s^{-1})$	5000	2600
S	1.2	1.1
γ_0	0.9	0.5

1.3 数值模拟结果及合理性验证

超高速撞击模拟的场景为一个直径为 5 mm 的球形弹丸以 6 km/s 的速度正撞击一填充层为 Nextel/Kevlar 的填充式防护结构, Nextel/Kevlar 填充式防护结构的几何参数如表 3 所示, 为保证结构尺度一致性, 设定其中四个面板的直径均为 100 mm。

表 3 Nextel/Kevlar 防护结构几何参数

Table 3 Geometric parameters of Nextel/Kevlar structure

几何参数	前面板	Nextel	Kevlar	后面板
厚度/mm	1.00	0.35	0.50	1.00

在本结构中,前板主要用于初始拦截和破碎高速弹丸; Nextel 层依靠其高硬度实现弹丸粉碎; Kevlar 层则通过拉伸断裂、纤维拔出等机制吸收碎片云动能; 后板起兜底作用,用于阻滞残余破片并保持结构完整性。因此各板层之间距离的设置对撞击能量耗散和整体防护性能具有关键作用。前板与 Nextel 填充层之间设定为 3.5 cm, 主要用于为弹丸的破碎与初步扩展创造空间, 减小弹丸破碎后的能量集中。填充层中的 Nextel 陶瓷布和 Kevlar 纤维布彼此紧密堆叠,有助于最大限度发挥这两种材料的耗能机制,并提高结构稳定性。填充层与后板的间距设定为 7.5 cm, 用于给碎片云提供足够的传播路径,使其能进一步减速并扩展横向范围,能够有效降低碎片云对后板的冲击压力。

通过 ANSYS LS-DYNA 对上述模型进行数值模拟,仿真撞击过程如图 4 所示。约在 1 μ s 时,球形弹丸高速撞击铝合金前面板,在极短时间内发

生破碎,同时前面板局部也被高速剥离,弹丸碎片与前板剥落物混合形成高速碎片云。在 $7.8 \mu\text{s}$ 左右,碎片云撞击到填充层中的 Nextel 陶瓷布,部分动能被耗散,同时发生进一步破碎与扩展。随后,碎片云进入 Kevlar 纤维层,其柔性拉伸特性使纤维经历牵引、断裂与拔出过程,显著吸收动能,减缓了碎片云速度,从而削弱了碎片云对后板的损伤。约在 $25 \mu\text{s}$ 时,碎片云进入最后一段铝合金板,此时碎片云对后板的损伤已经大幅降低。至 $63 \mu\text{s}$ 之后,碎片云动能已基本不再变化,维持在较低的能量状态。

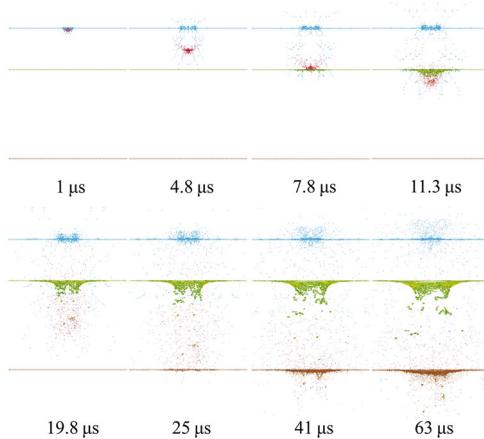


图 4 弹丸超高速撞击 Nextel/Kevlar 结构仿真过程
Fig. 4 High speed impact on Nextel/Kevlar simulation

作出弹丸撞击过程的合速度随时间变化的图线,如图 5 所示。可见,弹丸速度分别在 $0 \sim 1.2 \mu\text{s}$ 、 $7.8 \sim 10.8 \mu\text{s}$ 和 $25 \sim 40 \mu\text{s}$ 三个时间段有明显的下降趋势,分别对应图 4 中弹丸撞击前板、填充层和后板的撞击过程,在此之后弹丸的速度基本无变化。

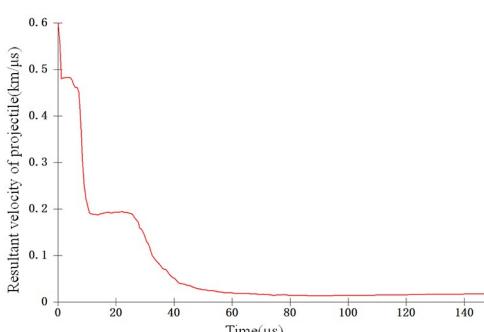


图 5 弹丸超高速撞击过程合速度随时间变化
Fig. 5 The velocity of the projectile during high-speed impact varies with time

在超高速撞击的过程中,弹丸在穿透防护层的同时,其动能迅速损失,速度呈持续下降趋势。考虑弹丸在穿透过程中的受力情况,尤其是材料阻尼、

纤维拉断、摩擦等因素对运动的综合阻碍,弹丸速度 $v(t)$ 与时间 t 的关系可表示为:

$$v(t) = A \cdot t^{-\alpha} \quad (4)$$

式中: A 为与初始速度及材料条件相关的常数, α 为反映阻力影响强度的参数。当该关系成立时,取对数可变为线性形式:

$$\ln v = \ln A - \alpha \ln t \quad (5)$$

该式表明,在对数坐标系下,速度与时间应呈现近似线性关系。

基于此,为了验证仿真模型的合理性,本文将更改 Nextel/Kevlar 结构各板的厚度再次进行模拟,一共得到三组不同结构的仿真参数,如表 4 所示。

分别提取三组仿真弹丸撞击过程的 $25 \sim 40 \mu\text{s}$ 阶段合速度一时间的数据,将仿真数据进行对数变换,通过线性回归评估数据的拟合优度,来验证模型是否合理。图 6 分别为普通坐标系与对数坐标系下的合速度一时间拟合曲线。

不难发现,在超高速撞击 $25 \sim 40 \mu\text{s}$ 阶段内,弹丸合速度与时间在普通坐标系下能够较好拟合

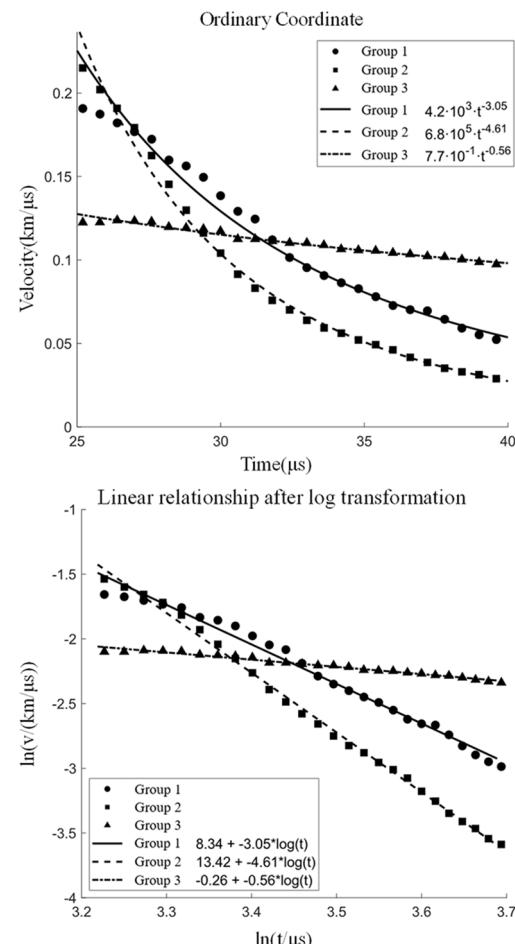


图 6 不同坐标系下弹丸合速度与时间的拟合曲线
Fig. 6 Fitting curves of velocity and time in different

表 4 3 组仿真 Nextel/Kevlar 结构参数

Table 4 3 sets of simulated Nextel/Kevlar parameters

序号	前板厚度/mm	Nextel 厚度/mm	Kevlar 厚度/mm	后板厚度/mm
1	1.00	0.35	0.50	1.00
2	0.86	0.39	0.17	0.85
3	1.10	0.53	0.59	0.41

成速度关于时间的幂函数关系曲线;在对数坐标系下也呈现出较好的线性相关性.为了定量评价拟合效果,计算决定系数 R^2 ,定义如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (6)$$

式中: v_i 为仿真速度值, \bar{v}_i 为拟合值, n 为数据个数. R^2 取值范围为 [0, 1], 越接近 1 表示拟合效果越好. 本研究中三组数据的 R^2 分别为: $R_1^2 = 0.9852$, $R_2^2 = 0.9971$, $R_3^2 = 0.9762$, 均接近于 1, 三组数据拟合效果较好, 表明本文采用的弹丸超高速撞击 Nextel/Kevlar 填充式防护结构的数值模拟模型较为合理, 该模型可以应用于后续对于该结构的优化研究中.

2 试验空间的最优设计与数值仿真模拟

2.1 试验空间的最优设计

试验空间的最优设计方法指在给定资源和实验次数有限的情况下, 最大化所获得信息的价值. 本部分内容采用 McKay 和 Beckman^[15] 于 1979 年首次提出的拉丁超立方设计方法(latin hypercube sampling, LHS)进行试验空间的设计, LHS 是一种常用的试验设计方法, 能够在高维空间中实现变量在各维度上的均匀分布. 其主要优点是采样效率高、结构简单、易于实现, 并能显著减少所需样本数量, 特别适用于建立克里金等代理模型时作为初始样本选点方法. 同时, 它具备良好的空间覆盖性, 在高维情况下相比全因子设计更具优势^[16].

2.2 试验空间样本仿真结果

本文通过调控 Nextel/Kevlar 填充式防护结构中四层板的厚度参数, 优化其几何构型, 来提升 Nextel/Kevlar 结构的防护能力. 选取 Nextel/Kevlar 结构主要的四个参数: 前板厚度 t_f 、Nextel

填充层厚度 t_N 、Kevlar 填充层厚度 t_K 和后板厚度 t_b 作为优化变量, 调研文献, 设定具体的参数初始值及取值范围如表 5 所示.

表 5 Nextel/Kevlar 结构优化变量及取值范围

Table 5 Nextel/Kevlar optimization variables and value range

优化变量	初始值/mm	下限/mm	上限/mm
前板厚度 t_f	1.00	0.20	1.50
Nextel 填充层厚度 t_N	0.35	0.20	1.00
Kevlar 填充层厚度 t_K	0.50	0.10	1.50
后板厚度 t_b	1.00	0.20	2.00

基于拉丁超立方设计方法, 建立了 20 个取值范围在前板厚度 0.2~1.5 mm, Nextel 填充层厚度 0.2~1 mm, Kevlar 填充层厚度 0.1~1 mm, 后板厚度 0.2~2 mm 的样本点构成的试验空间. 该方法在保证随机性的同时具有一定的分层规律性: 在每个设计变量的取值范围内, 将区间均匀划分为若干子区间, 并在每个子区间内随机选取一个样本点, 从而实现各变量方向上的均匀分布. 因此, 样本点的参数相对于初值的变化并非完全随机, 而是在全局均匀分布基础上的局部随机变化, 既保证了设计空间的代表性, 又避免了样本点的聚集. 保持弹丸直径 5 mm 和正撞击速度为 6 km/s 不变的情况下, 分别对 20 个样本点进行数值模拟.

在超高速撞击过程中, 最终形成的碎片云主要由弹丸破碎后的碎片以及 Nextel/Kevlar 防护结构中后面板破坏产生的次生碎片共同构成. 因此, 弹丸动能的损失可在一定程度上反映结构, 尤其是 Nextel/Kevlar 结构对冲击能量的吸收与耗散能力, 因而可作为衡量 Nextel/Kevlar 结构防护性能的重要评价指标. 分别提取模拟结果中弹丸撞击前的初始动能和撞击结束后形成的碎片云动能, 计算二者差值即为弹丸动能损失, 部分数据如表 6 所示.

表 6 拉丁超立方试验设计部分仿真值

Table 6 Partial simulation values of Latin hypercube experimental design

序号	t_f /mm	t_N /mm	t_K /mm	t_b /mm	动能损失/kJ
初值	1.00	0.35	0.50	1.00	3.210
1	0.93	0.70	0.97	1.32	3.250
2	1.15	0.56	0.74	1.02	3.247
3	0.86	0.90	1.32	1.77	3.248
4	1.47	0.43	0.51	0.73	3.252

表6 续表

序号	t_f/mm	t_N/mm	t_K/mm	t_b/mm	动能损失/kJ
5	0.28	0.47	0.58	0.81	3.073
6	1.21	0.34	0.35	0.52	3.117
7	0.34	0.93	1.38	1.84	3.249
8	0.22	0.77	1.09	1.48	3.197

3 构建 Nextel/Kevlar 结构的近似撞击模型

3.1 近似模型的构建

在本研究中,为了高效地预测弹丸撞击 Nextel/Kevlar 防护结构后的响应行为,本节采用克里金(Kriging)方法构建弹丸撞击 Nextel/Kevlar 复合防护结构的近似模型。克里金方法是一种基于统计学的插值方法,最初由 Krige^[17]在地质学中提出,后被广泛应用于工程优化和响应面建模中。其核心思想是在已有样本点上构建一个高斯过程模型,能够同时提供预测值和不确定性估计。本节基于 LHS 生成的 20 组设计样本,训练克里金模型预测弹丸的动能损失,实现对结构响应的快速预测。

与其他常见代理模型相比,克里金模型在本研究中具有更显著的优势。多项式响应面模型(RSM)虽然形式简单、计算效率高,但在处理高度非线性或强耦合的结构响应时精度有限;径向基函数(RBF)模型在插值精度上表现较好,但缺乏全局误差估计能力。相比之下,克里金模型不仅能够通过协方差函数灵活刻画复杂非线性关系,还可提供预测方差,用于评估模型不确定性,从而在保证预测精度的同时提高优化过程的稳健性与可靠性。克里金方法不仅保留了高精度,同时显著降低了后续优化所需的计算成本。

建立克里金模型^[17]步骤如下:

假设有 n 个已知的样本点 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 每个样本点对应观测值为 $Z(x_1), Z(x_2), Z(x_3), \dots, Z(x_n)$, 目标是预测未知点 x_0 的值 $Z(x_0)$ 。未知点 $Z(x_0)$ 的预测值 $\hat{Z}(x_0)$ 是已知点 $Z(x_i)$ 的加权和:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (7)$$

式中: λ_i 为待定加权系数。

Kriging 插值的关键就是求解加权系数 λ_i , 必须满足两个条件:

(1)无偏性条件:由于模型空间变异性的存在, $Z(x_i), \hat{Z}(x_0)$ 以及 $Z(x_0)$ 均视为随机变量,为无偏差估计时

$$E[\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)] = 0 \quad (8)$$

需要满足

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (9)$$

(2)最小化预测方差: 协方差

$$\text{Cov}[Z(x_i), Z(x_j)] = C(x_i - x_j) \quad (10)$$

预测方差表示为

$$\begin{aligned} & \text{Var}[\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)] \\ &= \text{Var}\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) - Z(x_0)\right] \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) - \\ & \quad 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_0) + C(0) \end{aligned} \quad (11)$$

为了最小化预测方差,需要对加权系数 λ_i 进行优化。引入拉格朗日乘数 μ 并构造拉格朗日函数

$$\begin{aligned} L &= \text{Var}[\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)] + \\ & \quad 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \end{aligned} \quad (12)$$

对 λ_i 和 μ 求偏导并置零,得到 Kriging 方程组:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) + \mu = C(x_i - x_0), \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases}, i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

3.2 模型精度检验

在进行优化前,为了检验克里金模型的精度,采用留一交叉验证的方法进行验证。留一交叉验证(leave-one-out cross-validation, LOO-CV)首次由 Stone^[18] 提出,是一种常用的模型评估方法,用于检验模型的泛化能力。具体做法:对于样本集中的每个样本点将其从训练集中剔除,利用剩余的 $N-1$ 个样本训练模型,并用该模型预测剔除的样本点的响应值 \hat{y}_i ,通过对所有样本点依次执行这一过程,得到预测值集合 $\{\hat{y}_i\}_{i=1}^N$,从而全面评估模型性能。

本节采用 LOO-CV^[18] 对克里金模型进行了精度检验,具体体现在以下指标:

(1)均方误差(MSE)

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (14)$$

表示预测值与真实值误差的平方的平均值。MSE 越小,模型的预测误差越小。本模型的 MSE 值为 0.004 115,模型的误差较小。

(2) 预测残差平方和(MAE)

$$\text{PRESS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (15)$$

表示预测误差的绝对值平均,反映平均预测偏差。MAE 的大小反映了平均偏差的实际量级,接近 0 时表示模型预测非常准确。本模型的 MAE 值为 0.044 074,模型的预测较为准确。

(3) 决定系数(R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (16)$$

衡量模型对响应变量变异的解释能力,取值范围为 $(-\infty, 1]$ 。 R^2 越接近 1,模型的拟合效果越好,解释力越强。本模型的 R^2 值为 0.8541,模型的拟合效果较好。

在对近似模型进行误差分析的基础上,为进一步验证其泛化能力,从优化设计空间内随机选取几组尽可能远离已知样本点的设计参数,进行数值仿真,并将仿真结果与近似模型的预测值进行对比,如表 7 所示。结果显示,克里金模型对于几组非样本点数据的弹丸撞击过程的动能损失预测值的误差在 2.5% 以内,属于能够接受的范围。

表 7 随机非样本点检验值

Table 7 Random non sample point test value

参数	1	2	3
t_f/mm	1.34	1.22	1.19
t_N/mm	0.51	0.46	0.54
t_K/mm	0.45	0.64	0.68
t_b/mm	0.43	0.82	0.54
动能损失预测值/kJ	3.2531	3.2783	3.2641
动能损失仿真值/kJ	3.1882	3.2448	3.1922
误差	2.04%	1.03%	2.25%

4 Nextel/Kevlar 填充式结构的结构优化

在完成 Nextel/Kevlar 填充式防护结构的 Kriging 近似撞击模型构建之后,进一步开展结构

优化研究显得尤为关键。通过近似模型能够有效预测不同结构参数下的撞击响应,为后续的优化设计提供了计算效率高、资源消耗低的仿真基础。本节将基于前文的 Kriging 近似模型,采用遗传算法对 Nextel/Kevlar 填充式防护结构进行结构优化。

4.1 优化问题描述

在本优化问题中,目标是在满足 Nextel/Kevlar 填充式防护结构对超高速撞击具备足够防护能力的前提下,尽可能减小结构的面密度。面密度作为衡量结构单位面积质量的指标,直接影响航天器的总质量和运载效率。Nextel/Kevlar 结构的面密度由前板、Nextel 板、Kevlar 板和后板的密度及厚度决定,因此 Nextel/Kevlar 结构的面密度可表示为:

$$\rho = t_f \rho_f + t_N \rho_N + t_K \rho_K + t_b \rho_b \quad (17)$$

式中: ρ_f 为前板密度, ρ_N 为 Nextel 填充层密度, ρ_K 为 Kevlar 填充层密度, ρ_b 为后板密度。

优化设计需在确保结构能够有效吸收弹丸动能、阻止破片穿透的基础上,通过调整各组成层的厚度与材料分布,寻求质量最小化与防护性能之间的最优平衡,最终实现结构轻量化与高效防护性能的协同优化目标。以最小化 Nextel/Kevlar 结构的面密度、最大化球形弹丸的动能损失为设计目标进行结构优化设计,该问题的数学描述如下。

设计变量:

$$\bar{x} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4\}^T = \{t_f, t_N, t_K, t_b\}^T \quad (18)$$

目标函数:

$$\begin{cases} \rho(\bar{x}) |_{\min} = t_f \rho_f + t_N \rho_N + t_K \rho_K + t_b \rho_b \\ E(\bar{x}) |_{\min} \end{cases} \quad (19)$$

约束条件:

$$\bar{x}_L \leq \bar{x} \leq \bar{x}_U, \rho(\bar{x}) \leq \rho_{\text{initial}}, E(\bar{x}) \geq E_{\text{initial}} \quad (20)$$

式中: \bar{x}_L 和 \bar{x}_U 分别为设计变量的下限和上限; ρ_{initial} 为初始模型的面密度; E_{initial} 为初始模型的弹丸动能损失。

4.2 多目标优化遗传算法

遗传算法(genetic algorithm,GA)是一种基于自然选择和遗传机制的全局优化搜索算法,能够在复杂、高维、非线性甚至非连续的设计空间中有效寻找最优或近优解。受达尔文进化论的启发,遗传算法模拟自然选择过程,迭代改进候选解,使其广

泛应用于复杂的优化问题^[19]. 其基本原理是将设计变量编码为“染色体”, 构成“种群”, 通过模拟自然界中生物的进化过程(包括选择、交叉、变异)不断迭代优化。遗传算法适用于连续或离散变量问题, 尤其适合求解目标函数不易求导或存在多个局部最优解的结构优化问题。其通用流程如下^[19].

(1) 初始化种群: 在设计变量允许的范围内随机生成初始种群 $\mathbf{P}(t) = \{x_1^{(t)}, x_2^{(t)}, \dots, x_N^{(t)}\}$ 其中 N 为种群规模, t 为代数。

(2) 适应度评估: 对每一个个体 $x_i^{(t)}$ 根据目标函数 $f(x)$ 计算其适应度。对于最小化问题, 常将目标函数值映射为适应度:

$$\text{Fitness}(x) = \frac{1}{1 + f(x)} \quad (21)$$

适应度越高表示个体的性能越优越。

(3) 选择: 采用轮盘赌选择、锦标赛选择等方法, 从当前种群中优先选择适应度高的个体参与繁殖, 保留优秀基因。

(4) 交叉: 选取部分个体对其染色体进行交叉操作以产生后代。设两个父代个体为 x_p 和 x_q , 则交叉后的子代表示为:

$$x_{\text{new}} = \alpha x_p + (1 - \alpha)x_q \quad (22)$$

式中: $\alpha \in [0, 1]$ 为交叉系数, 实际应用中也可采用单点交叉或均匀交叉等方式。

(5) 变异: 以较小概率对个体的部分基因进行扰动, 增强种群的多样性, 防止过早收敛至局部最优。变异可表示为:

$$x_{\text{mut}} = x + \delta \quad (23)$$

式中: δ 为随机扰动值, 满足一定的分布。

(6) 种群更新与终止准则: 将当前种群与新生成的子代合并或选择部分个体组成新一代 $\mathbf{P}(t+1)$, 循环执行上述步骤, 直到满足终止条件。

在本研究中, 针对 Nextel/Kevlar 填充式防护结构在超高速撞击下的多目标优化问题, 采用了基于遗传算法的改进多目标优化方法——NSGA-II^[20] (non-dominated sorting genetic algorithm II)。该算法在标准遗传算法的基础上引入了快速非支配排序、拥挤度距离计算和精英保留机制, 能够在保证解的质量的同时有效保持解集的多样性。通过 NSGA-II 算法, 可同时优化多个目标函数, 在本问题中主要包括最小化 Nextel/Kevlar 结构面密度和最大化防护性能(最大化弹丸动能损失), 从而获得一组均衡质量与性能的 Pareto 最优解集,

为防护结构的轻量化设计与工程应用提供了多样化的设计方案。

4.3 优化结果

Nextel/Kevlar 填充式防护结构通过 NSGA-II 算法进行优化, 优化计算得到的 3 组候选结果如表 8 所示。

表 8 Nextel/Kevlar 结构优化值
Table 8 Nextel/Kevlar structural optimization value

参数	待优化	1	2	3
t_f/mm	1.00	1.09	0.93	0.93
t_N/mm	0.35	0.53	0.57	0.50
t_K/mm	0.50	0.41	0.54	0.71
t_b/mm	1.00	0.63	0.58	0.72
动能损失预测值/kJ	3.1148	3.2416	3.2255	3.2434
动能损失仿真值/kJ	3.2102	3.2119	3.2266	3.2716
误差	-2.97%	0.92%	-0.03%	-0.86%
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.71875	0.68776	0.65947	0.70035

各组优化数据与待优化组数据对比可以看出, 通过 NSGA-II 进行优化后, 弹丸的动能损失值变大, 同时结构的面密度减小。在优化方案的选取标准中, 弹丸动能损失反映了 Nextel/Kevlar 填充式防护结构在超高速撞击过程中的能量吸收能力, 是衡量防护性能的关键指标; 而结构的面密度则直接影响航天器的质量与系统总体设计要求。二者在工程应用中通常存在权衡关系: 提高吸能能力通常伴随质量增加, 而减轻质量可能削弱防护效果。因此, 本研究综合考虑防护性能与轻量化需求, 将弹丸动能损失作为主要评价指标, 在确保结构质量合理降低的前提下优先保证吸能性能。

分析三组数据可知, 第 2 组结构的面密度最小, 但是弹丸的动能损失没有明显提升; 而第 3 组结构的面密度在得到减小的同时, 弹丸动能损失相较于 1、2 组仍有明显提升。因此选择第 3 组为最终优化方案。同时在实际工程应用中仍需综合考虑制造工艺复杂性、材料成本及结构可实现性等因素, 以确保优化结果具备工程可行性。

图 7 为优化前后弹丸动能变化对比图。相比于优化前的设计, 优化后的 Nextel/Kevlar 填充式防护结构的前板和后板厚度减小, 中间的 Nextel-Kevlar 填充层厚度增加。减小前后板的厚度可以有效降低结构的面膜密度, 由于填充层具有优异的能

量吸收和破片扩散能力,增厚后能够更有效地削弱弹丸动能。模拟数据表明,优化后的结构相比于优化前的球形弹丸动能损失值提高约 0.061 kJ;Nextel/Kevlar 结构的面密度减小约 $0.018 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$,实现了在满足 Nextel/Kevlar 填充式防护结构对超高速撞击具备足够防护性能的前提下,尽可能减小结构的面密度的优化目标。

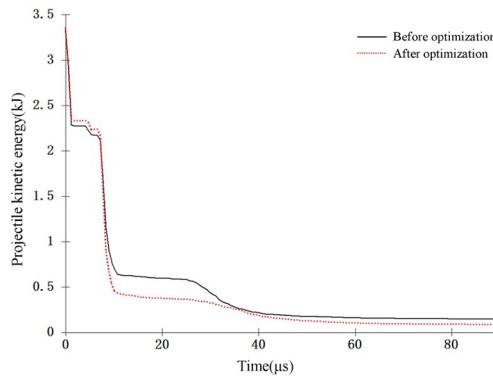


图 7 优化前后弹丸动能变化对比图

Fig. 7 Comparison chart of projectile kinetic energy changes before and after optimization

5 结论

(1) 通过 ANSYS LS-DYNA 建立了 Nextel/Kevlar 填充式防护结构的超高速撞击数值模型,较为准确地再现了撞击过程中的基本物理规律。在此基础上,仅对结构参数进行调整,开展系列仿真分析。结果表明,在相同时间尺度下,弹丸的合速度随时间演化呈现出明显的幂函数变化趋势,揭示了结构响应与动能耗散之间的非线性关系。

(2) 在建立 Nextel/Kevlar 填充式防护结构超高速撞击模型的基础上,采用拉丁超立方采样方法在设计空间内生成 20 组关键结构参数样本,并通过 LS-DYNA 开展数值仿真以获取响应数据,进而构建克里金近似模型,实现对高计算成本仿真的有效替代。随后,结合 NSGA-II 多目标优化算法开展结构优化设计,以弹丸动能损失和结构面密度为优化目标。对比优化前后的数值结果表明,优化后的结构在保持良好防护性能的前提下,使弹丸动能损失提升约 1.91%,结构面密度降低约 2.56%,实现了防护效能与质量控制的双重优化,为轻量化高效防护结构的设计提供了技术路径。

参考文献

- [1] 李怡勇, 王卫杰, 王建华. 空间超高速碰撞 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] WHIPPLE F L. Meteorites and space travel [J]. The Astronomical Journal, 1947, 52: 131.
- [3] CHRISTIANSEN E L, CREWS J L, WILLIAMS-EN J E, et al. Enhanced meteoroid and orbital debris shielding [J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 17(1/2/3): 217—228.
- [4] SCHÄFER F, LAMBERT M, CHRISTIANSEN E, et al. The inter-agency space debris coordination committee (IADC) protection manual [C]//4th European Conference on Space Debris. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 2005, 587: 39.
- [5] CHRISTIANSEN E L, KERR J H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26 (1-10): 93—104.
- [6] DESTEFANIS R, FARAUD M, TRUCCHI M. Columbus debris shielding experiments and ballistic limit curves [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 23(1): 181—192.
- [7] CARRIERE R, CHERNIAEV A, CARRIERE R, et al. Hypervelocity impacts on satellite sandwich structures: a review of experimental findings and predictive models [J]. Applied Mechanics, 2021, 2 (1): 25—45.
- [8] HAYHURST C J, LIVINGSTONE I H G, CLEGG R A, et al. Ballistic limit evaluation of advanced shielding using numerical simulations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26 (1-10): 309—320.
- [9] CLEGG R A, WHITE D M, RIEDEL W, et al. Hypervelocity impact damage prediction in composites: Part I: material model and characterisation [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1-12): 190—200.
- [10] 阎晓军, 张玉珠, 聂景旭. 超高速碰撞下 Whipple 防护结构的数值模拟 [J]. 宇航学报, 2002, 23(5): 81—84.
- [11] YAN X J, ZHANG Y Z, NIE J X. Numerical simulation of the Whipple shield under hypervelocity impact [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(5): 81—84. (in Chinese)
- [12] 贾光辉, 欧阳智江, 蒋辉, 等. 填充式防护结构弹道极限方程的多指标寻优 [J]. 北京航空航天大学

- 学报, 2013, 39(12): 1573—1577, 1583.
- JIA G H, OUYANG Z J, JIANG H, et al. Multiple indicators optimization for stuffed Whipple shield ballistic limit equation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(12): 1573—1577, 1583. (in Chinese)
- [12] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. [S. l.: s. n.], 1983.
- [13] GRÜNEISEN E. Theorie des festen Zustandes einatomiger Elemente [J]. Annalen der Physik, 1912, 344(12): 257—306.
- [14] CHRISTIANSEN E L. Meteoroid/debris shielding: NASA/TP-2003-210788 [R]. Washington, DC: NASA, 2003.
- [15] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. Technometrics, 2000, 42(1): 55—61.
- [16] HE X P, ZHU W W, SANTOSO R, et al. Fracture permeability estimation under complex physics: a data-driven model using machine learning [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2021.
- [17] KRIGE D G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand [J]. Journal of the Chemical Metallurgical & Mining Society of South Africa, 1951, 52(6): 119—139.
- [18] STONE M. Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological), 1974, 36(2): 111—147.
- [19] PÉTROWSKI A, BEN-HAMIDA S. Evolutionary algorithms [M]. New York: John Wiley & Sons, 2017.
- [20] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182—197.