超高速撞击条件下铝合金材料参数识别方法

胡震东 黄 海 贾光辉

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 在超高速撞击过程中,金属材料在大变形、高应变率条件下的材料参数获取是一个研究难点.在确定 Steinberg 本构模型和 Gruneisen 状态方程前提下,结合已有的物理试验结果,采用 SPH(Smooth Particle Hydrodynamic)算法实现超高速撞击问题的数值模拟,定义优化目标为物理试验结果和仿真结果之间的相对误差值,利用连续响应面法 SRSM(Successive Response Surface Method)对铝合金 6061 的 Steinberg 本构模型中的 4 个关键参数进行优化识别计算.经过识别的材料参数与物理试验的结果近似程度更好,证明了这种方法的正确性和可靠性.

关 键 词: 超高速撞击; 数值仿真; 参数识别

中图分类号: TP 206^{+}.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)09-0999-04

Identification method for the material parameters of Al alloy under the condition of hypervelocity impact

Hu Zhendong Huang Hai Jia Guanghui

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In the research of hypervelocity impact, how to identify the metallic material's parameters under the extreme distortions and high strain rate is a key problem. Steinberg strength model and Gruneisen equation of state were selected to describe the characteristics of Al6061 under the condition of hypervelocity. The SPH algorithm was applied to simulate the hypervelocity impact. The error between the results of experiment and simulation was defined as the optimization objective and 4 parameters in Steinberg strength model were defined as optimization variables. Four parameters were identified automatically by successive response surface method(SRSM). The optimized parameters have a better simulation results than the initial parameters when comparing with the experiments results.

Key words: hypervelocity impacts; numerical simulation; identification

随着人类对外太空开发的不断深入,空间环境日益恶化.微流星和空间碎片对航天器的超高速撞击威胁着在轨航天器的安全.由于防护结构方案和防护材料的多样性、弹丸模拟各类空间碎片的局限性,以及超高速撞击试验设备有限的试验能力和昂贵的试验费用,使得数值仿真成为研究超高速碰撞的有力工具.超高速撞击数值仿真研究主要面临两个问题的挑战:包括数值算法和材料参数的确定.

目前国际上用于超高速撞击的数值算法已经有了较为成熟的商业软件,Autodyn 和 Ls-Dyna 软件中的 SPH(Smooth Particle Hydrodynamic)算法被公认为是解决超高速撞击问题的最好方法[1].在超高速撞击仿真研究中通常采用 Steinberg 和 Johnson-Cook 等本构模型来描述金属材料在高压、高应变率下的特性.超高速撞击条件下材料特性表现的比较复杂,以往的做法是在常温低应变率下对金属材料进行动态压缩实验 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)和准静态压缩 MTS(Mechanical Test System)等实验来获取材

收稿日期: 2007-08-02

作者简介: 胡震东(1978—),男,黑龙江大庆人,博士生,buaahuzd@sa.buaa.edu.cn.

料参数[2]，很难保证这些参数在超高速撞击条件下仿真计算的准确性，给数值仿真研究此类问题带来了很大的误差.

本文结合超高速撞击试验结果与SPH数值仿真方法，利用连续响应面优化算法对文献[3]中给出的铝合金6061在超高速撞击条件下Steinberg本构模型的关键参数进行优化识别，以提高数值仿真的准确性.

1 Steinberg本构模型及其参数

美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室的Steinberg等于1980年提出了一个适用于高应变率($10^5\ s^{-1}$)的本构方程[4]，屈服强度σ_y由式(1)、式(2)给出：

$$\sigma_y=\sigma'_0\left[1+bpV^{1/3}-h\left(\frac{E_i-E_c}{3R'}-300\right)\right]e^{-fE_i/E_m-E_i} \tag{1}$$

式中，σ'_0为初始屈服强度；p为静水压力；V为相对体积；E_i为内能；E_c为冷压能量；E_m为熔化能量. 如果E_m超过E_i，σ_y表示为

$$\sigma_y=\sigma'_0[1+\beta(\gamma_i+\bar{\varepsilon}^p)]^n \tag{2}$$

式中，γ_i为初始塑性应变；$\bar{\varepsilon}^p$为塑性应变. 为确定材料的力学性能，式(1)、式(2)中有β,n,b,h 4个关键参数需要试验测定.

相对于Johnson-Cook本构模型，Steinberg本构模型更适合描述金属材料在超高速撞击这样的压力和应变率极高条件下的状态[2]. 在超高速碰撞过程中金属材料通常还会发生相变，在本文中由Gruneisen状态方程和Steinberg本构模型相结合用于描述金属在瞬态高压下的力学行为.

2 本构模型参数的优化识别方法

在超高速撞击的数值仿真过程中，软件的计算过程可以看作一个“黑匣子”；而速度、弹丸质量、靶板厚度和材料的各种参数可以看成输入变量；最终的穿孔直径和穿孔深度等计算结果就可以看作是响应. Steinberg本构模型参数识别的基本思想是通过比较仿真穿孔直径和物理试验穿孔直径之间的差别，即$|d-D|$(其中d为仿真穿孔直径，D为物理试验穿孔直径). 通过调整材料参数(β,n,b,h)使得两者之间的差别最小. 为了使获得的材料参数能够在不同撞击条件下都有较好的准确性，需要同时比较不同撞击条件下仿真结果与试验结果之间的误差，故问题可以描述为

$$\left.\begin{aligned}&\text{find}\{\beta,n,b,h\}\\&\min.\ F=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}[d_j(\beta,n,b,h)-D_j]^2}\\&\text{s.t.}\\&\beta_{\min}\leqslant\beta\leqslant\beta_{\max}\\&n_{\min}\leqslant n\leqslant n_{\max}\\&b_{\min}\leqslant b\leqslant b_{\max}\\&h_{\min}\leqslant h\leqslant h_{\max}\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中，m表示不同的撞击条件；$\beta_{\max},n_{\max},b_{\max},h_{\max}$和$\beta_{\min},n_{\min},b_{\min},h_{\min}$分别表示4个参数的上下限.

本文采用二次响应面方法构建数值仿真穿孔直径d和4个材料输入参数(β,n,b,h)之间的近似函数：

$$\tilde{d}(\beta,n,b,h)=\sum_{i=1}^{L}a_i\phi_i(\beta,n,b,h) \tag{4}$$

其中基函数为

$$\boldsymbol{\phi}=[\phi_1,\phi_2,\cdots,\phi_{15}]^T=[1,\beta,\cdots,h,\beta^2,\beta n,\cdots,\beta h,\cdots,h^2]^T$$

含4个参数的二次响应面函数有15个系数需要确定，即$L=15$. 试验点的选择采用5水平的D-优化试验设计，在参数空间选择23个试验点来构建穿孔直径d的二次响应面函数.

优化采用Ls-Opt软件包提供的基于连续响应面法SRSM(Successive Response Surface Method)的算法，通过优化目标函数，使4个材料参数(β,n,b,h)逐步收敛到最优值.

3 数值仿真与参数识别

文献[5]中收录了大量的超高速撞击试验结果，从中选取5个撞击试验(编号同文献[5])，弹丸和靶板材料均为铝合金6061. 建立超高速撞击仿真模型，见图1，试验的撞击条件与结果见表1.

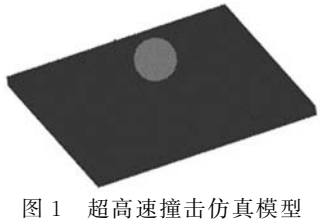


图1 超高速撞击仿真模型

表1 超高速撞击试验结果[5]

试验编号	撞击速度/(km·s⁻¹)	靶板厚度/cm	弹丸直径/cm	穿孔直径/cm
97	5.8	0.16	0.635	1.442
101	4.31	0.16	0.635	1.220
102	3.71	0.16	0.475	0.935
104	2.59	0.16	0.475	0.828

105	1.62	0.16	0.475	0.692

仿真算法采用 Ls-Dyna 提供的 SPH 算法,每个模型的单元总数约为 60 000.选用 Gruneisen 状态方程,状态方程具体参数见文献[6].为得到最终的穿孔直径,仿真时间设为 10 μs.超高速撞击会产生碎片云和穿孔直径,如图 2 所示.

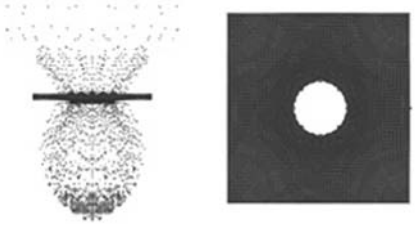


图 2　超高速撞击仿真结果

Steinberg 本构模型参数识别的实现是通过集成 LSTC 公司的前后置处理程序 Ls-Prepost,核心求解器 Ls-Dyna 971 和优化模块 Ls-Opt 3.1 来实现的,具体过程如图 3 所示.

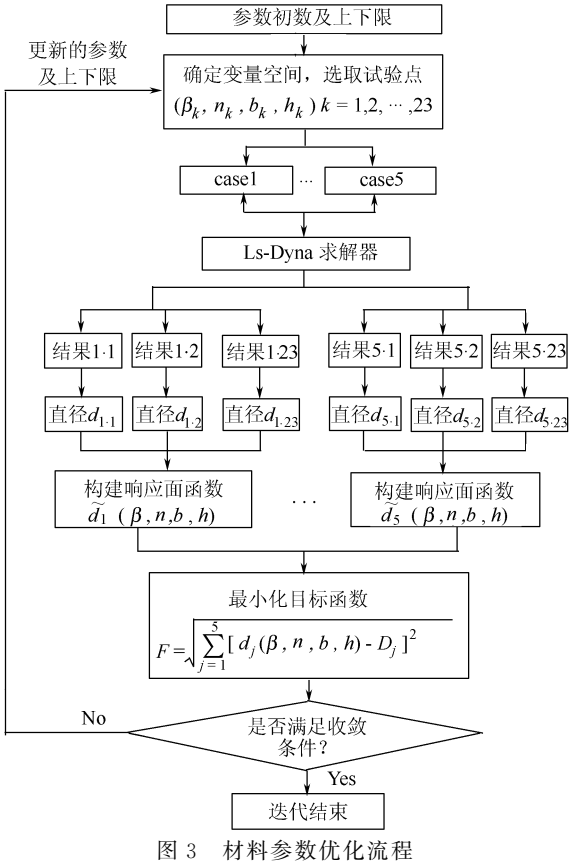


图 3　材料参数优化流程

首先以国外文献[3]中提供的材料参数为初值,定义参数的变化的上下限,构建参数空间,利用 D-优化试验设计方法从参数空间中选取 23 个试验点,记为(β_k, n_k, b_k, h_k),$(k=1,2,\cdots,23)$.将(β_k, n_k, b_k, h_k)分别输入到 5 个撞击试验工况进行仿真,提交给 Ls-Dyna 求解器进行计算,需要完成 23×5=115 次仿真运算,共输出 115 个包含节点位置的结果文件,标记为 $j\cdot k$,其中 j 表示第 j 个工况,k 表示输入模型的试验点编号($j=1,2,\cdots,5$;$k=1,2,\cdots,23$).

由于软件不能直接从计算给出穿孔直径的大小,本文采用如下的方法获得(如图 4 所示):选取距离靶板表面中心点(坐标原点)大于弹丸半径以外一定范围内的位于靶板中性层上的几十个节点(初始坐标为 x_i),跟踪记录这些节点在撞击发生后节点坐标的变化 Δx_i,取穿孔半径 $r=\min(x_i+\Delta x_i)$,$2r$ 即为穿孔直径.

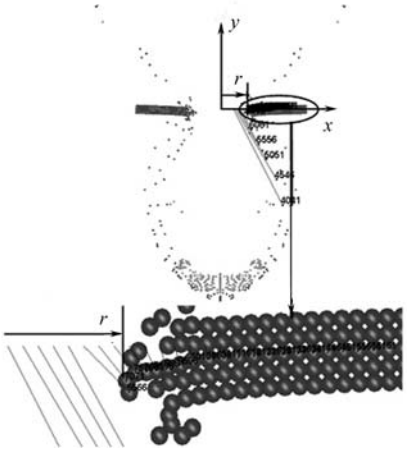


图 4　数值仿真穿孔直径的获得

利用最小二乘法确定式(4)中 a_i,建立穿孔直径 d 的二次响应面函数$\tilde{d}_j(\beta,n,b,h)$.

最小化目标函数:

$$F=\sqrt{\sum_{j=1}^{5}[\tilde{d}_j(\beta,n,b,h)-D_j]^2}$$

求得材料参数(β,n,b,h).

设定优化收敛的判据$(F_{i+1}-F_i)/F_i\leqslant 0.01$,若不满足,则以最近获得的参数优化点为中心,根据优化模块 Ls-Opt 3.1 提供的方法缩放或平移新的参数关心区域,重新取得试验点.本文迭代 10 次实现收敛,在工作站上运行时间约为130 h,完成了 1150 次仿真模型的运算.表 2 列出了 4 个变量的最终优化结果.图 5 给出了其中一个变量 b 的优化过程,图 6 为目标函数 F 的优化过程,通过对比可知,目标函数值减小了 42%.

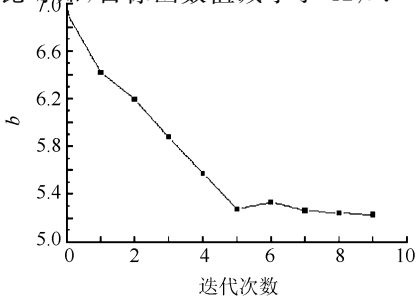


图 5　变量 b 的优化过程

表 2 优化结果统计表

数值	β	n	b	h	目标函数值
初始值	125	0.1	6.92	0.000 616	0.383 0
优化值	132	0.11	5.21	0.000 638	0.222 5

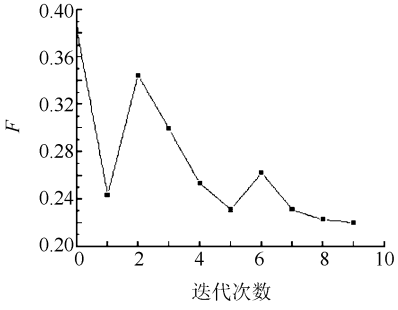


图 6 目标函数的优化过程

4 结果验证

为验证获得材料参数的准确性，从文献[5]选取另外 6 个工况进行优化效果比较，见表 3. 仿真结果 1 为文献[3]提供材料参数所得到的直径，仿真结果 2 为采用优化后的参数所得到的直径. 从与物理试验的对比中可以看出，采用最初的材料参数的仿真结果有 18.5%的平均误差，优化后的材料参数仅有 10.6%的平均误差，使数值仿真的精度提高了 8%.

表 3 试验和仿真的穿孔直径比较

编号	厚度/cm	弹丸直径/cm	速度/(km·s^{-1})	试验穿孔直径/cm	仿真 1 穿孔直径/cm	仿真 2 穿孔直径/cm
152	0.52	0.38	7.13	1.85	1.48	1.70
72	0.41	0.38	5.14	1.40	1.04	1.12
73	0.41	0.38	6.04	1.47	1.26	1.36
109	0.41	0.38	4.82	1.45	1.18	1.26
110	0.41	0.38	3.37	1.40	1.18	1.26
112	0.41	0.38	4.23	1.45	1.20	1.36

由上述结果可见数值仿真结果同物理试验结果之间还有 10%左右的误差，分析其中的原因有两个：①超高速撞击的结果受多种因素影响，本文通过优化方法仅完善了本构模型中参数的识别；②从物理试验中提取的信息量不足也是引起误差的主要原因.

5 结 论

本文通过寻优建立了一种 Steinberg 本构模型参数的识别方法. 通过与物理试验进行比较，基于本方法确定的参数，穿孔直径预测精度明显提高. 如果能够从物理试验中提取更多的数据来与数值仿真结果进行对比研究，并且同时对状态方程参数进行优化计算，可望进一步提高材料参数的准确性.

参考文献（References）

[1] 曲广吉，韩增尧. 空间碎片超高速撞击动力学建模与数值仿真技术[J]. 中国空间科学技术，2002(5)：26－30
Qu Guangji, Han Zengyao. Dynamical modeling and numerical simulation of hypervelocity space debris impact [J]. Chinese Space Science And Technolog, 2002(5): 26－30 (in Chinese)

[2] 彭建祥. Johnson-Cook 本构模型和 Steinberg 本构模型的比较研究[D]. 北京：中国工程物理研究院，2006
Peng Jianxiang. Comparative study of Johnson-Cook constitutive model and Steinberg constitutive model [D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2006 (in Chinese)

[3] Steinberg D J. Equation of state and strength properties of selected materials [M]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1991

[4] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A constitutive model for metals applicable at high strain rate [J]. J Appl Phys, 1980, 51(3): 1498－1503

[5] Christiansen E L. Meteoroid/debris shielding[R]. TP-2003. 210788, 2003

[6] 张庆明，黄风雷. 超高速碰撞动力学引论[M]. 北京：科学出版社，2000
Zhang Qingming, Huang Fenglei. The introduction of hypervelocity impact [M]. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)

(责任编辑：张 嵘)