

圆球形粒子超高速撞击侵蚀过程的数值模拟^{*}

庄峰青 刘大有

(中国科学院力学研究所·北京·100080)

摘要 本文利用数值方法模拟单个圆球形粒子超高速撞击所致侵蚀过程。提出了确定最终坑形的新准则——坑面唇边动压准则:当坑面唇边动压等于0.44倍静态屈服强度时的坑形为最终坑形。按此准则进行了大量计算,计算结果与实验结果、经验公式符合很好。

关键词 超高速撞击 侵蚀 数值模拟 粒子云 弹塑性流体

1 引言

超高速撞击现象的研究具有广泛的应用背景。

洲际导弹穿过含有雨滴冰晶雪片等粒子的空间时,粒子同导弹表面的超高速撞击所引起的防热层损失大大超过气动加热所引起的^[1]。因此,粒子侵蚀是一个重要课题。

随着航天事业发展,人们运用宇航器(人造卫星、航天飞机等)探索太空的次数越来越多,但危及宇航器的“空间垃圾”也越来越多。据美国宇航局1991年的估计,在2000km近地空间内有 3×10^6 kg“空间垃圾”,其平均速度大于10km/s。因此,“空间垃圾”同宇航器的超高速撞击是宇航工作者非常关心的问题。

天体物理学家希望超高速撞击研究能解答行星表面陨石坑尺寸和形态、影响成坑现象的因素、成坑对行星表面和大气演化的影响等问题。

此外,常规武器的发展对装甲和穿甲提出了更高的要求,高达2km/s到4km/s弹速所引起的物理现象也是超高速撞击研究的内容。

粒子与板的超高速撞击是研究得最多的问题。实验中使用的粒子主要是圆球形弹丸,因此本文数值研究中也采用圆球粒子。

本文借助微型计算机,对单个圆球粒子对厚板的超高速撞击侵蚀过程进行了数值模拟,提出了确定最终坑形的新准则,并以图表形式给出了计算所得的坑深、坑形参数(坑深坑径比)和坑体积随粒子撞击速度的变化规律。本文结果同实验结果、经验公式符合得很好。

2 单粒子侵蚀的数值模拟

* 本文于1994年6月13日收到

超高速撞击的物理特点是高温、高压和高应变率, 撞击速度为几 km/s 到几十 km/s, 撞击过程中压强远大于材料的屈服强度, 因此涉及弹性、塑性、流动和断裂等力学现象以及由固相向液相或气相的相变。

本文用数值方法模拟单个圆球粒子超高速撞击物体所引起的物体材料损失过程即侵蚀过程。考虑圆球粒子垂直撞击无限厚靶的情况。粒子和靶材均视为弹塑性流体。问题具有轴对称性, 采用二维柱坐标系。

2 1 基本方程

基本方程为二维柱坐标中的质量、动量和能量的守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\frac{\partial \rho u}{\partial r} - \frac{\partial \rho v}{\partial z} \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial r} + p + \frac{\partial s_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial z} - s_{\theta} - \frac{\partial \rho u^2}{\partial r} - \frac{\partial \rho uv}{\partial z} \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\partial s_z}{\partial z} - \frac{\partial \rho uv}{\partial r} - \frac{\partial \rho v^2}{\partial z} \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} &= -\frac{\partial p u}{\partial r} - \frac{\partial p v}{\partial z} + \frac{\partial (u s_r + v \tau)}{\partial r} + \frac{\partial (u \tau + v s_z)}{\partial z} - \frac{\partial \rho u E}{\partial r} - \frac{\partial \rho v E}{\partial z} \end{aligned}$$

2 2 初边值条件

初始条件。粒子为圆球形, 靶取圆柱形, 圆球粒子与圆柱形靶下底面相切(见图 1)。粒子有向上的初始速度, 靶材初速为零。

边界条件。物质间界面处法向应力及法向速度相等。自由表面处应力为零。圆柱体的高和半径都足够大, 在有限时间内撞击处的物理量变化和影响均传不到外边界。

2 3 本构关系

假设粒子和靶的材料均为弹塑性流体。把应力 σ_{ij} 分解为静水压 $-p \delta_{ij}$ 和应力偏量 S_{ij} 两部分, 相应地应变率 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 分解为体积变化率 $\frac{1}{3} \frac{V}{V} \dot{\epsilon}_{ij}$ 和应变率偏量 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 两部分。其中应力应变的变化服从弹塑性关系、屈服准则和破坏准则。

应力应变关系。假设可采用弹性-理想塑性模型来描述弹塑性关系, 在弹性范围内满足虎克定律。

屈服准则。如果应力状态满足 Von-Mises 屈服准则, 即 $S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} Y^2$, 则材料屈服。其中 Y 是考虑了应变率、压强和内能等效应的屈服强度。

破坏准则。若 $(\rho/\rho_0) < (\rho/\rho_0)_{max}$, 则认为材料破坏, 并规定此时该网格的应力偏量为零。其中 ρ_0 为初始密度, $(\rho/\rho_0)_{max}$ 为材料临界破坏常数。

状态方程。采用超高速撞击问题数值模拟中常用的 Tillotson 方程。

2 4 离散化

图 1 圆球粒子超高速撞击侵蚀数值模拟中粒子与靶初始位置示意图

本文用欧拉方法研究问题, 欧拉方法容易处理大畸变。这方面具代表性的程序是由 Walsh J.M. 和 Johnson W. E. 等人发展起来的 O L 编码和 SO L 编码以及 Hageman L. J. 和 Walsh J.M. 的 HEL P 编码。本文使用 SO L 编码。

差分计算中用分裂算子法把压强、应力偏量和输运等多种物理因素的综合作用分裂成多个单因素作用的迭加。同理可把高维问题分裂成低维问题的迭加。

有关计算方法可参看文献[2~ 3]

2.5 坑形的定义

粒子与厚靶超高速撞击过程中典型的坑形如图 2 所示。图中水平直线 $A I$ 为初始靶面, $B C D E F G H$ 为坑面, $B C D$ 及 $F G H$ 为坑形唇部。

实际问题中密度在坑面处出现间断, 因此可用密度间断来定义坑形。计算中由于自由面附近出现小密度的伪扩散, 使坑面处密度的间断分布成为连续分布, 所以实际问题中的密度间断应为计算中密度大于零但小于初始密度的某条等密度线。文献[4]以 75% 初始密的等密度线作为坑形, 本文也采用此方法。

2.6 最终坑形的确定

图 2 坑形示意图

用数值方法模拟粒子超高速撞击侵蚀过程时存在一个困难, 即当坑深几乎不变时坑径还继续扩大。因此, 需要给定一个准则, 以确定最终坑形。

文献[4]认为坑底速度达到粒子初速的 1% 时的坑形是最终坑形。

从物理上讲, 最终坑形与靶材的屈服强度直接相关, 应把坑面的动压 $P_{\text{动}} = (1/2)\rho v^2$ 与屈服强度联系起来, 以确定最终坑形。这种确定最终坑形的准则称为动压准则。

考虑到激波通过后靶材中有剩余温度, 因此其屈服强度将降低。本文提出如下的坑面唇边动压准则: 当弹坑唇边(图 2 中 D 点或 F 点所对应的圆周线)处的动压等于静态屈服强度 Y_0 的 0.44 倍时, 即

$$(P_{\text{动}})_{\text{唇}} = \left(\frac{1}{2}\rho v^2\right)_{\text{唇}} = 0.44Y_0$$

时的坑形为最终坑形。

从下述算例中可知, 这一准则优于文献[4]中的坑底速度准则。

3 计算实例

本文应用坑面唇边动压准则计算了不同粒子速度同质撞击侵蚀情况和粒子速度为 4km/s 的异质撞击侵蚀情况。计算结果令人满意。

3.1 同质撞击侵蚀

首先计算了铝粒子撞击铝靶的情况, 粒子速度分别为 2.3、4.5、6 和 7.35km/s, 粒子直径为 0.5cm。其结果示于图 3、图 4 及表 1 中。

图 3 铝圆球粒子撞击铝靶时坑深坑径比的计算值与实验值的比较

图 4 铝圆球粒子撞击铝靶时坑体积计算值()及其拟合曲线(实线)同经验曲线(虚线)的比较

表 1 球形铝粒子撞击铝靶时坑深 P_c (cm) 随粒子撞击速度 V (km/s) 的变化。粒子直径 0.5cm。表中 P_{c1} 为经验公式值, P_{c2} 为本文数值计算值, P_{c3} 为文献[4] 的数值计算值。显然, P_{c2} 比 P_{c3} 更接近经验公式值。

V	P_{c1}	P_{c2}	P_{c3}
2.00	0.43	0.33	0.25
3.00	0.56	0.47	0.65
4.00	0.68	0.73	0.85
5.60	0.85	0.93	1.06
7.35	1.02	1.15	1.25

图 3 表示坑形参数(坑深坑径比)的计算值与实验结果的比较。图中 P_c 、 D_c 分别为坑深、坑(直)径。

图 4 表示坑体积 V_c 本文计算值(以 \circ 表示)及其拟合曲线 $V_c = 0.0226V^{2.32}$ (实线)同经验公式 $V_c = 0.0427V^2$ (虚线)的比较,此经验公式是根据文献[5]中同质材料撞击的经验关系结合铝的特性而导出。

表 1 给出坑深 P_c 随粒子速度 V 的变化规律。从该表可知,同文献[4]的计算结果相比,本文计算结果更接近于经验公式值。

当 $V = 7.35$ km/s 时,实验结果为:坑深 1.02cm,坑直径 2.10cm^[6]。本文计算结果为坑深 1.15cm,坑直径 2.10cm。本文计算结果与实验结果符合得很好。

3.2 异质撞击侵蚀

本文还计算了粒子速度为 4km/s 时的几种异质撞击侵蚀情况,其坑形参数(坑深坑径比)及坑体积均示于表 2。圆球粒子直径仍为 0.5cm。为比较起见,表中列入了铝粒子撞击铝靶的结果。

表2 异质材料超高撞击侵蚀计算结果。粒子直径 0.5cm, 粒子速度 4km/s

粒子材料	铝	铝	铝	铝	塑料
靶材料	铝	铁	铜	塑料	铝
坑深坑径比 $\frac{P_c}{D_c}$	0.478	0.291	0.397	0.682	0.283
坑体积 V_c (cm ³)	0.580	0.179	0.678	16.0	0.132

从坑体积看, 由于材料不同, 差别很大, 其中铝打塑料时的坑体积最大。从坑形看, 本文计算结果符合文献[5]总结的三条规律: (1) 当 $\rho_p/\rho_t = 1$ 且 $Y_p/Y_t = 1$ 时半球坑, 铝打铝属此情况; (2) 当 $\rho_p/\rho_t < 1$ 且 $Y_p/Y_t < 1$ 时浅坑, 铝打铁和塑料打铝属此情况; (3) 当 $\rho_p/\rho_t > 1$ 且 $Y_p/Y_t > 1$ 时深坑, 铝打塑料属此情况。

综上所述, 按本文提出的坑面唇边动压准则计算的最后坑形同实验结果, 经验公式符合得很好。这说明该准则是可靠的。

4 结束语

(1) 本文提出计算粒子超高速撞击侵蚀最终坑形的新准则——坑面唇边动压准则: 当坑面唇边动压等于静态屈服强度的 0.44 倍时的坑形为最终坑形。

(2) 按此准则计算了不同速度的同质撞击侵蚀情况, 计算结果同实验结果, 经验公式符合得很好。

(3) 按此准则计算了粒子速度为 4km/s 时的质撞击侵蚀情况, 计算结果符合文献[5]中总结的规律。

(4) 此准则简单、可靠。

参考文献

- 1 刘大有 庄峰青 吴承康 粒子云侵蚀问题中粒子动能通量模拟的数值评估 见: 气动热力学论文集(专辑之四). 1991, 106-116
- 2 Kinslow R (ed). High-Velocity Impact Phenomena Academic Press, 1970
- 3 李德元等 二维非常流体力学的计算方法 科学出版社, 1987.
- 4 罗忠文 金属材料超高速碰撞的数值模拟[硕士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1990
- 5 Yu S B, Sun G C, Tan Q M. Experimental Laws of Cratering for Hypervelocity Impacts of Spherical Projectiles into Thick Target Int J Impact Engng, 1994, 15(1): 67-77.
- 6 Fair H. Hypervelocity Then and Now. Int J Impact Engng, 1987, 5(1-4): 1-11.