



等质量异形粒子超高速撞击侵蚀

庄峰青 刘大有

中国科学院力学研究所, 北京 100080

摘要 用数值方法模拟双锥、圆柱、椭球、圆锥和倒圆锥五类等质量异形铝粒子五种高宽比共25种粒子对半无限铝靶的超高速撞击侵蚀。撞击速度为4km/s。给出了坑深、坑径、坑形参数和坑体积随粒子形状及高宽比的变化曲线。计算结果对非圆球异形粒子超高速撞击侵蚀计算有重要参考价值。

关键词 超高速撞击; 侵蚀; 数值模拟; 粒子云; 弹塑性流体

中图分类号 V211.1

0 引言

高速飞行器再入大气层时, 由于头激波的压缩作用以及飞行器同空气的强烈摩擦, 使空气温度显著升高, 引起飞行器表面烧蚀。当空气中含有雨滴、冰雪或尘埃等粒子时, 粒子同飞行器表面发生撞击, 导致飞行器表面材料(例如隔热层)损失, 即导致侵蚀。

理论和实验均表明, 有粒子时隔热层的损失大大超过无粒子时的损失。因此, 粒子云侵蚀是高速飞行器隔热层设计中要考虑的重要因素之一。我们曾用数值方法研究圆球形粒子超高速撞击侵蚀过程, 提出了确定最终坑形的新准则——坑面唇边动压准则。实际问题中遇到的粒子, 如雨滴、冰雪或尘埃等, 其形状丰富多彩, 因此有必要研究非圆球形粒子的超高速撞击侵蚀。

本文用数值方法探讨双锥、圆柱、椭球、圆锥和倒圆锥这5类铝粒子对半无限铝靶的超高速撞击侵蚀。粒子质量均等于半径为0.25cm的铝圆球质量。每类粒子又取5种高宽比: 0.25、0.50、1、2和4。因此, 共计算了25种不同粒子的算例, 撞击速度为4km/s。

计算结果表明, 最严重工况的坑深(即穿透深度)可为圆球情况的1.7倍。所以在设计对穿透深度有严格要求的高速飞行器时, 必须考虑粒子的具体形状, 以获得可靠数据, 设计出重量轻、隔热性能好的隔热层结构。

1 数值模拟

高速飞行器再入大气层时的粒子侵蚀问题属于撞击力学中的超高速撞击问题。本文

本文于1995年3月29日收到, 11月2日收到修改稿。

所利用的SOIL编码已对输运量的计算及坑形的确定方法作了改进^[1~3]。我们感兴趣的粒子侵蚀问题是超高速撞击中的厚靶问题。粒子为旋成体，它以超高速沿对称轴方向垂直地撞击无限厚靶(即飞行器表面)。粒子和靶材均视为弹塑性流体。

基本方程为二维柱坐标系的质量、动量和能量守恒方程。关于应力应变关系，弹性范围内满足虎克定律，塑性范围用理想塑性模型。采用Von-Mises屈服准则，再加上破坏准则和Tillotson状态方程，这样就构成封闭方程组。

SOIL 编码采用欧拉方法研究问题。差分计算中运用分裂算法。计算中最终坑形的确定仍采用文献中提出的坑面唇边动压准则。

2 计算实例

计算等质量异形铝粒子以4km/s速度撞击静止铝靶的侵蚀成坑情况。粒子为旋成体，其对称轴与粒子初始速度方向一致。粒子形状分为5类(见图1)：双锥(BCN)、圆柱(CYL)、椭球(ELP)、顶点撞击靶的圆锥(MCA)和底面撞击靶的倒圆锥(MCB)。图1各分图中上边长水平线代表厚靶下表面，粒子自下而上沿对称轴方向垂直撞击靶面。每一类粒子又分为5种高宽比：0.25、0.50、1、2和4，其中0.25对应最扁的粒子，4对应最细长的粒子。因此共计算了25种粒子的撞击侵蚀，其中高宽比为1的椭球即圆球。

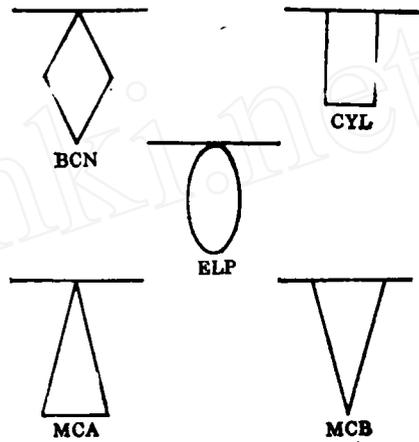


图 1 粒子与靶初始位置示意图
Fig. 1 Schematic of initial locations of equal-mass particles and targets

计算结果如下：

(1) 坑深，即侵蚀深度、穿透深度(图 2)：基本上随高宽比的增加而增加，即细长粒子穿透力强。所有类粒子在高宽比为 4 时达最大值。圆柱类粒子在高宽比为 0.50 时达

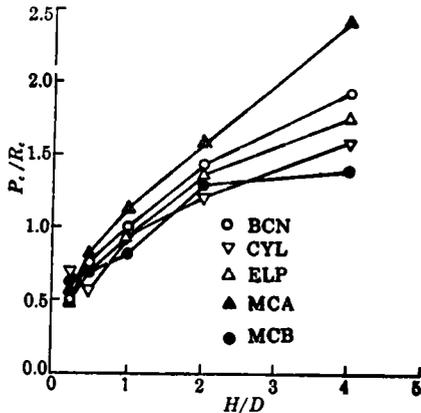


图 2 坑深 P_c 随粒子形状及高宽比 H/D 的变化曲线
Fig. 2 Crater depth P_c versus particle shape and aspect ratio

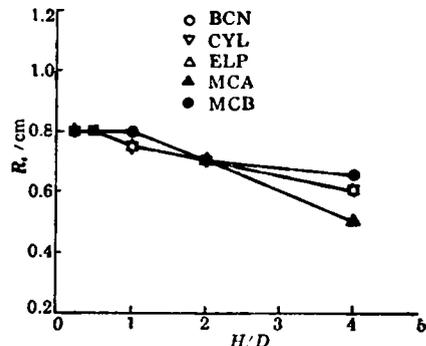


图 3 坑径 R_c 随粒子形状及高宽比 H/D 的变化曲线
Fig. 3 Crater radius R_c versus particle shape and aspect ratio

最小值，其它类粒子则在高宽比为0.25时取最小值。

(2) 坑径(图3)：随高宽比增加(即粒子变细长)坑径变小。当高宽比为0.25, 0.50和2时坑径不随粒子种类而变。

(3) 坑形参数，即坑深坑径比(图4)：基本上随高宽比增加而增加，即粒子细长，坑也细长。各类粒子均在高宽比为4时取最大值。至于最小值，圆柱类粒子在高宽比0.50时达到，其它类粒子在高宽比0.25时达到。

(4) 坑体积(图5)：坑体积最大值所对应的高宽比，倒圆锥类粒子为0.5和1，其它类粒子为2。坑体积最小值所对应的高宽比，倒圆锥和圆柱粒子为4，其它类粒子为0.25。

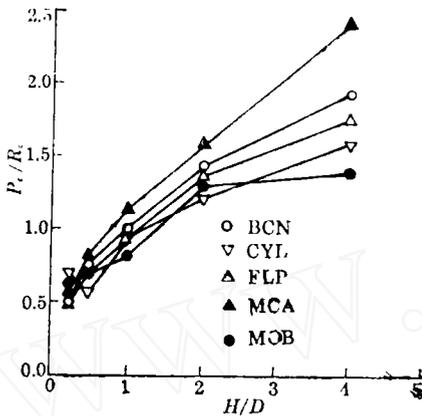


图4 坑形参数 P_c/R_c 随粒子形状及高宽比 H/D 的变化曲线

Fig. 4 Crater depth-radius-ratio P_c/R_c versus particle shape and aspect ratio

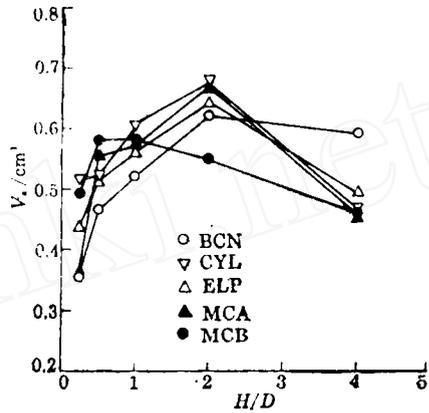


图5 坑体积 V_c 随粒子形状及高宽比 H/D 的变化曲线

Fig. 5 Crater volume V_c versus particle shape and aspect ratio

(5) 最大值最小值之比：就25种计算情况而言，坑深、坑径、坑形参数及坑体积诸量的最大值与最小值比依次为3.00、1.60、4.80和1.90。

(6) 最大值与圆球值之比：坑深、坑径、坑形参数和坑体积的最大值与圆球值比分别为1.71、1.07、2.60和1.20。

(7) 最大值与平均值之比：平均值为25种计算情况所得值的算术平均值。坑深、坑径、坑形参数和坑体积的最大值与平均值比依次为1.60、1.10、2.22和1.27。

(8) 平均值与圆球值之比：坑深、坑径、坑形参数和坑体积的这个比值分别为1.07、0.97、1.16和0.95。

3 结束语

(1) 用改进了的SOIL编码研究等质量异形铝粒子撞击铝靶的侵蚀问题。撞击速度为4km/s。计算了5类粒子形状5种高宽比共25种不同粒子的实例，给出了坑深、坑径、坑形参数和坑体积随粒子形状和高宽比的变化曲线。

(2) 超高速撞击实验所用粒子形状通常为圆球形，而实际问题中的粒子形状则变化多端。根据计算结果，可以圆球实验结果推算非圆球粒子撞击侵蚀时坑深、坑径和坑体积。

(3) 由最大值与圆球值之比可知, 最严重工况的坑深(即穿透深度)可达圆球的 1.7 倍, 坑体积为圆球的 1.2 倍。因此, 在飞行器防粒子侵蚀设计中要考虑具体粒子形状的影响, 以便获得可靠数据。

(4) 从平均值与圆球值之比可知, 如果实际粒子由计算的 25 种粒子组成, 且每种粒子的数密度相同, 则用圆球粒子值代替实际粒子平均值, 就坑深、坑径和坑体积来说, 带来的误差最大仅为 7%。

(5) 对实际情况中多姿多态的粒子云超高速撞击侵蚀, 可按下述方法求得平均值。以本文的 25 种粒子为标准, 将组成粒子云的粒子按形状分为 25 种并计算出各自的数密度, 然后以数密度作权函数, 求出粒子云侵蚀时单个粒子超高速撞击侵蚀的坑深、坑径和坑体积的平均值。此平均值即可用于粒子云侵蚀的工程设计中。

参 考 文 献

- 1 Dienes J K, Walsh J M, Theory of Impact, Some General principles and the Method of Eulerian Codes, in High-Velocity Impact phenomena, ed by kinslow R, Academic press, 1970.
- 2 Harrison J T, Johnson W E, HOIL, A Two-Stage Hydrodynamic Numerical Scheme Linking HEMP and SOIL. *Int. J. Impact Engineering*, 1986, 5
- 3 Johnson W E, Anderson C E, History and Application of Hydrocode in Hypervelocity Impact. *Int. J. Impact Engineering*, 1986, 5

Hypervelocity-Impact Erosion of Equal-Mass Particles with Various Shapes

Zhuang Fengqing Liu Dayou

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080)

Abstract The erosion caused by hypervelocity impact into semi-infinite targets is studied numerically of twenty five equal-mass particles with various shapes, which fall into five kinds (bi-cone, cylinder, ellipsoid, cone and upside-down cone) with five aspect ratios (0.25, 0.50, 1, 2, 4). The particles and targets are of the same material aluminium. The impact velocity is 4km/s, variations of crater depth, crater radius, crater depth-radius-ratio and crater volume are shown as functions of particle aspect ratio. The results presented in the paper are of great importance for the predictions of hypervelocity impact erosion caused by non-spherical particles.

Key words hypervelocity impact; erosion; numerical simulation; particle cloud; elastoplastic fluid