

超高速冲击铝双层板的熔化效应

张庆明 谈庆明 张德良 郑哲敏

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 对超高速冲击铝双层板的熔化效应进行了实验研究和数值模拟, 用扫描电镜观察后板的弹坑发现: 当弹丸碰撞速度超过 5km/s 时, 后板出现熔坑; 随着弹丸碰撞速度的增加, 后板熔坑数目亦随之增加, 碎片云对后板的破坏明显减弱. 数值模拟表明, 击波加热和塑性功加热是熔化的两种机制, 有关熔化主要特征的数值模拟结果与实验结果基本吻合.

关键词 超高速冲击, 双层板, 碎片云, 熔化

引 言

双层板结构由前板、后板和一定的间隙组成. 这个结构最早是由天体物理学家 Whipple^[1] 提出来的, 用于防护高速陨石对宇航器的冲击破坏. 随着航天技术的飞速发展, 宇航器的数目越来越多, 空间垃圾也越来越多, 如何保证宇航器的安全、防止空间垃圾对宇航器可能的破坏, 是宇航工作者非常关心的问题. 已有的研究表明, 双层板结构具有良好的防护性能. 但是, 空间垃圾和宇航器的相对速度可达到或超过 10km/s, 在这种碰撞速度下, 材料通常要发生熔化甚至气化. 双层板结构在这种情况下的防护性能如何, 熔化(或气化)的机制是什么, 是迫切需要解决的问题.

国内外许多学者都对此进行了探索. Bjork^[2] 提出了超高速碰撞下材料熔化或气化的“击波加热机制”, 认为材料的熔化或气化与否是由经击波压缩并经等熵卸载后保留在材料中的剩余比内能决定的. Hopkins^[3] 用熔化性质不同的两种金属铝和镉作为弹靶材料, 确定了双层板结构中后板不被击穿的最小厚度随弹丸速度的变化规律. Liquornik^[4] 根据铅和钨密度接近、而熔点(或沸点)不同的特点, 考察了相变对碎片云的影响. 此外, 不少学者对碎片云的形成和发展进行了数值模拟^[5]. 我们^[6-8] 的目的是为了更好地了解碎片云对双层板结构的破坏效应.

本文从实验和数值模拟两方面探讨了双层板结构在超高速冲击下的熔化效应. 超高速冲击实验是在中国科学院力学研究所的二级轻气炮上进行的, 球形弹丸直径 5mm, 前、后板厚度都是 3cm, 弹板材料都是 LY12 铝合金, 弹丸速度为 4~7km/s. 用扫描电镜对回收到的后板弹坑进行观测分析, 发现有熔坑和未熔坑两种弹坑, 并发现熔坑的分布有一定的规律. 数值模拟表明击波加热和塑性功加热都是熔化产生的原因, 对熔坑的分布给出了定量的解释.

1994-05-16 收到第一稿, 1994-11-02 收到修改稿.

1 宏观破坏特征简述

前板受超高速弹丸冲击的明显特征是冲孔和在背面形成碎片云。碎片云冲击后板, 在后板形成许多小坑, 并在后板的背面形成鼓包。按坑径大小, 可将这些坑分为次弹坑(坑径大于 1mm) 和微弹坑(坑径一般为几十微米至零点几毫米) 两类坑。碎片云冲击后板的主要破坏特征如下:

1.1 弹丸速度小于 5km/s 时, 后板只有次弹坑, 没有微弹坑; 弹丸速度达到 5km/s 时, 后板出现微弹坑; 弹丸速度大于 5km/s 时, 随着弹速的增加, 微弹坑数不断增加, 次弹坑数不断减少, 而且微弹坑主要分布在一个中心区和一个外环带内, 弹丸速度大于 6.2km/s 时, 中心区和外环带连成一片。

1.2 弹丸速度小于 5km/s 时, 后板背面的鼓包数随着弹丸速度的增加而增加; 弹丸速度大于 5km/s 时, 鼓包数随着弹丸速度的增加而减少。

由此可知, 对于给定的弹板材料和几何参数, 弹丸冲击速度 5km/s 是一个特征速度; 而当弹丸速度为 6.2km/s 时, 分布在中心区和外环带的微弹坑开始连成一片, 因此, 6.2km/s 是弹丸的另一个特征速度。张德良等^[6]的实验分析说明: 中心区的微弹坑主要是由碎片云中下面两部分材料, 即由弹丸材料和受到弹丸冲击、与弹丸具有大致相同直径的前板材料, 在后板开坑形成的。有必要进一步弄清楚, 外环带内的微弹坑是如何形成的, 微弹坑形成的机制是什么, 是否与熔化有关。

2 熔化现象及其效应

借助于扫描电镜, 可以对后板的弹坑进行微观分析。观察得到的坑口形状有三类: 圆形、椭圆形和不规则形。微弹坑的坑口形状多为圆形, 次弹坑的坑口形状多为椭圆形和不规则形状。

坑表面特征也有三类:

(1) 整个坑表面很光滑, 铺着一层光滑的覆盖层, 覆盖层中有许多小气孔(见图 1(a))。根据金属学知识可以判断, 坑表面的覆盖层是液滴开坑所致, 小气孔则是被融液封住的气泡受热膨胀而形成的。

(2) 整个坑表面粗糙不平, 无任何类似于(1)所具有的熔化迹象, 这类坑可解释为由碎片云中固体颗粒开坑所致(见图 1(b))。

(3) 坑底局部具有(1)的特征, 而其他坑表面具有(2)的特征(见图 1(c))。这类坑可解释为由碎片云中的固体颗粒在撞击后板过程中被又一次加热发生熔化而形成的。

上面具有不同表面特征的三种坑代表了三种不同的物理现象。特征(1)反映出弹丸与前板相撞所形成的碎片云已经出现熔化, 形成了液滴。特征(2)反映出碎片云中的固体颗粒在后板开坑过程中, 虽经两次冲击加热, 仍未出现熔化。特征(3)则反映出碎片云中的固体颗粒在后板开坑过程中, 经过第二次的冲击而出现了局部熔化。一般说来, 具有特征(1)的坑, 坑口形状为圆形和椭圆形(椭圆形的坑是液滴与后板斜撞击形成的); 具有特征(2)和特征(3)的坑的坑口形状多为不规则形和椭圆

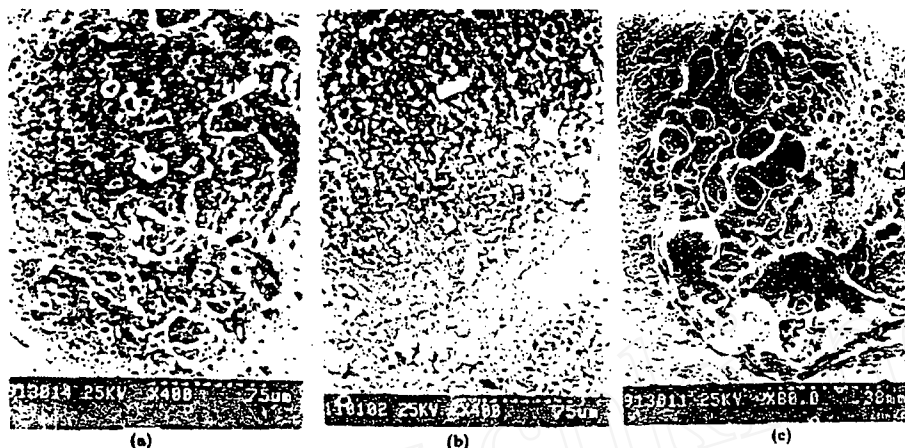


图 1 坑表面熔化特征
Fig.1 Morphology of the crater surface

形, 也有圆形的.

为了后面讨论方便, 把具有特征 (1) 的坑称之为熔坑, 其他两类坑称之为未熔坑. 扫描电镜观察得到的统计结果如下:

(1) 弹速 5km/s 是后板出现熔坑的最小速度, 当速度大于 5km/s 时, 熔坑数随着弹速 V_p 的提高而增加 (通常, 总坑数 N_0 随着弹速 V_p 的提高而增加).

(2) 绝大多数熔坑的直径小于 0.3mm. 不同速度下熔坑直径的统计结果表明, 熔坑的平均直径为 0.2mm, 而未熔坑的平均直径大于 0.42mm, 这说明, 碎片云中熔化颗粒对后板的破坏程度减弱了.

(3) 熔坑主要分布在一个中心圆区和一个外环带内. 把用扫描电镜观察得到的熔坑分布的中心圆区的半径和环状带的半径, 与观测坑径大小所得到的微弹坑的中心圆区半径和环状带半径进行比较 (见表 1), 发现两者的数据基本一致. 这说明, 微弹坑的散布与熔坑的散布基本是一致的.

表 1 中心区半径、环带外半径
Table 1 Sizes of central area and ring band

V_p (km/s)	Radius of central area(mm)		Outer radius of ring band(mm)	
	By eyes	By microscope	By eyes	By microscope
5.0	22	17	35	39
5.2	25	23	40	39
5.6	33	30	50	57
6.2	40	39		

从而可以得出, 微弹坑的出现与熔化有关, 并且, 碎片云的熔化区有两部分, 一部分形成后板中心区内的熔坑, 一部分形成外环带的熔坑.

3 熔化效应的数值模拟

这里将用数值模拟说明双层板冲击熔化的机制以及熔坑的分布规律, 主要讨论

下面几个问题：弹丸以多大速度撞击前板，碎片云会发生熔化；碎片云熔化区域的分布及其与后板熔坑分布的关系；塑性功加热对碎片云的熔化的作用；碎片云中的颗粒冲击后板时，后板和颗粒自身会不会发生熔化。

本文将把质点经受了冲击并且卸载以后的剩余比内能与材料的熔化能进行比较，判断材料是否发生了熔化。通常，熔化能可分为初始熔化能和完全熔化能，若剩余比内能小于初始熔化能，则材料仍处于固态；若剩余比内能大于初始熔化能而小于完全熔化能，则材料处于固液混合态；若剩余比内能大于完全熔化能（但小于气化能），则材料处于液态。对 LY12 硬铝，其初始熔化能 $E_{im} = 0.7\text{kJ/g}$ ，完全熔化能 $E_{cm} = 1.1\text{kJ/g}$ ^[9]。

弹丸对前板的撞击是薄板撞击问题，而碎片云中的颗粒对后板的撞击在本文的情况里可认为是厚板撞击问题^[8]。两者都具有轴对称性，可在二维柱坐标系下用流体弹塑性模型进行计算，计算时采用 SOIL 程序^[10]。

3.1 引起碎片云初始熔化的最小弹丸碰撞速度

一般来说，最容易发生熔化的地方在弹丸与薄板的碰撞点附近。考察不同 V_p 下碰撞点处质点的剩余比内能，发现 $V_p = 5.0\text{km/s}$ 是引起薄板初始熔化的最小弹丸速度。图 2 给出了 $V_p = 5.0\text{km/s}$ 在碰撞点 (0,0) 处比内能随时间的变化关系。图中可以看出，稀疏波卸载后，剩余在物质中的比内能约为 0.7kJ/g ， $V_p = 5.0\text{km/s}$ 就可以认为是引起碎片云初始熔化的最小弹丸速度。

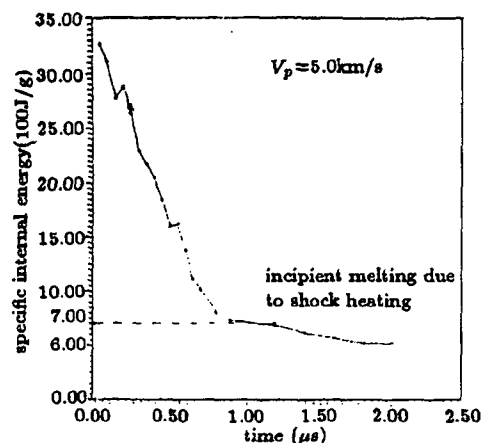


图 2 碰撞点处比内能随时间的变化曲线
Fig.2 Specific internal energy versus time at the impact point

3.2 考虑强度与不考虑强度的比较

为了考察塑性功对冲击熔化的作用，分别用流体弹塑性模型（强度 $Y \neq 0$ ）和流体模型（强度 $Y = 0$ ）进行了模拟计算，通过对一系列 V_p 下比内能的计算，发现考虑强度与不考虑强度所得的结果是不一样的。这里以 V_p 为 6.2km/s 为例说明两种情况下所得结果的异同。

图 3 是 $V_p = 6.2\text{km/s}$ 时位于前板中截面，且半径 $r = 0$ ，即 (0,1.5) 处比内能随时间的变化曲线。图中的实线与虚线分别代表 $Y \neq 0$ 和 $Y = 0$ 两种情况。可见两种

情况下比内能的峰值是一样的;但卸载后保留在物质中的比内能值是不一样的.考虑强度的比不考虑强度的要大,而两者的差别不是很大,说明在该处击波加热对比内能的贡献是决定性的.如果考察位于前板中截面,且半径 $r = 2.5\text{mm}$,即 $(2.5, 1.5)$ 处质点的比内能情况(图 4),就会发现此处考虑强度和不考虑强度得到的剩余比内能的差值比 $(0, 1.5)$ 处大得多,塑性功加热对比内能的贡献不可忽略.因此,对于 $r = 2.5\text{mm}$ (即弹丸的半径)附近的板材来说,塑性功加热的作用也很重要,必须考虑击波加热和塑性功加热的联合作用.

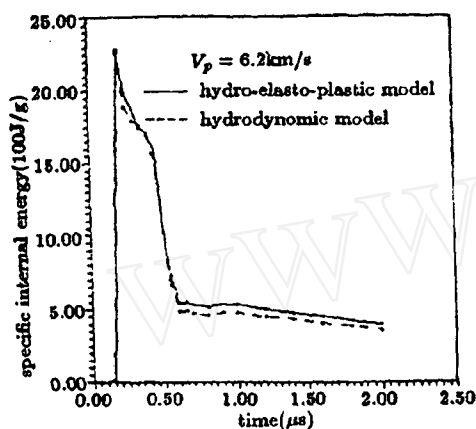


图 3 $(0, 1.5)$ 处比内能随时间的变化曲线
Fig.3 Specific internal energy at the center
in the mid-section of the shield

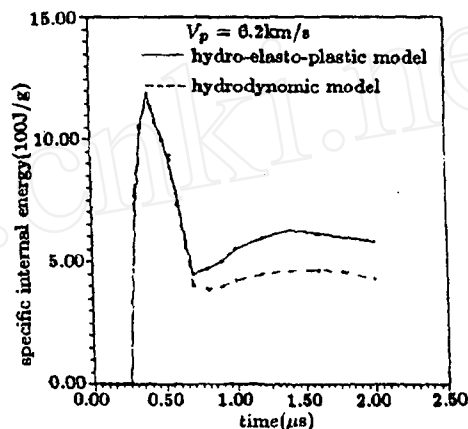


图 4 $(2.5, 1.5)$ 处比内能随时间的变化曲线
Fig.4 Specific internal energy at off-axis point
($r = 2.5\text{mm}$) in the mid-section of the shield

3.3 前板熔化区域的确定

我们关心的是,前板的材料在受冲击后哪一部分发生了熔化.计算表明,在 V_p 大于引起熔化的最小弹丸速度的情况下,随着 V_p 的增加,熔化区域不断扩大,当 V_p 小于 6.2km/s 时,熔化(只发生初始熔化)区域由两部分组成.图 5(a) 给出了 $V_p = 5.7\text{km/s}$ 时,用流体弹塑性模型得到的熔化区域(斜线部分)的分布.由图可知,熔化区域由两部分组成,并且在 r 方向没有联成一片.当 V_p 大于 6.2km/s 以后,两部分区域在 r 方向联成一片(图 5(b)).图 5(c) 给出了 $V_p = 6.2\text{km/s}$ 时用流体模型得到的熔化区域,可见,熔化区域仅由碰撞点附近的一个区域组成.由上述比较分析可得:碰撞点附近的熔化区域是由击波加热决定的,而弹半径($r = 2.5\text{mm}$)附近的熔化区域反映了击波加热和塑性功加热的联合作用,塑性功加热对熔化所起的重要作用是不可忽略的.

3.4 碎片云熔化区域的确定

在已经确定的前板的熔化区域里的物质,有一部分向前运动,成为碎片云中的颗粒,打在后板上,另一部分反向飞溅.为了确定前板熔化区域里的物质有多大一部分会成为碎片云中的颗粒,首先得确定反向飞溅区域.为此,要看不同 z 剖面上质点的轴向速度沿径向分布.图 6(a) 是 $V_p = 5.7\text{km/s}$ 时不同 z 剖面上质点的轴向速度沿径向的分布.由图可得反向飞溅区域(图 6(b),图中的熔化区域由图 5(a) 确定).可以看出,熔化区域里有一部分反向飞溅,除去反向飞溅的那一部分外,剩余部分的

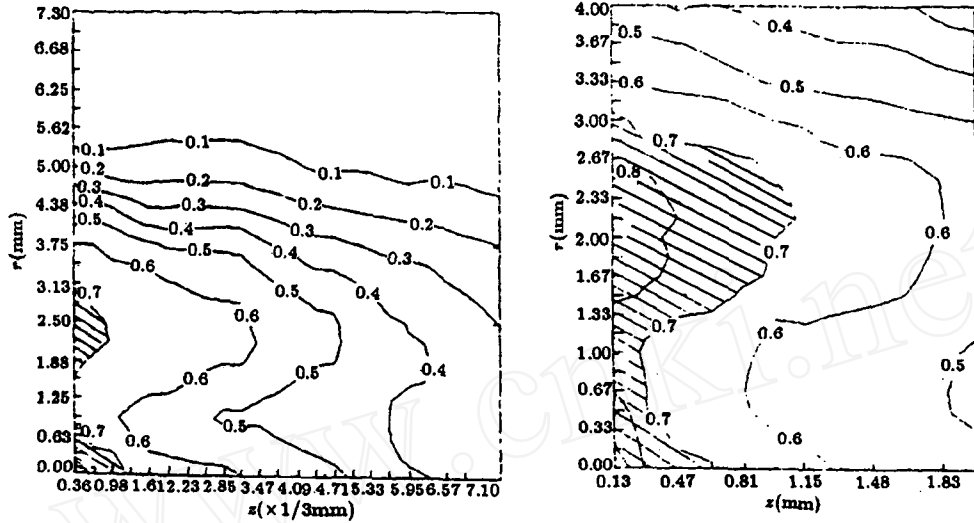
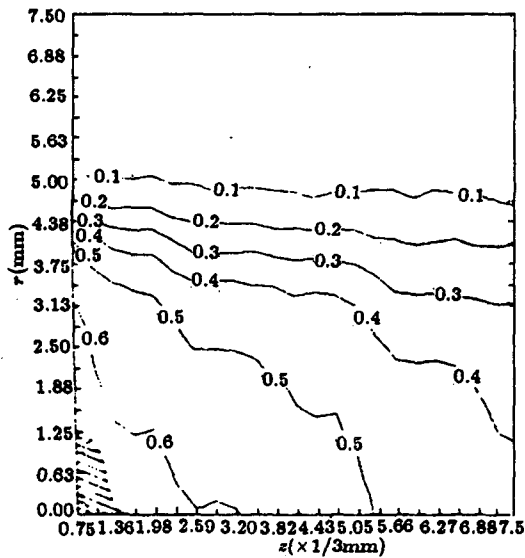
(a) $V_p = 5.7 \text{ km/s}$ $(Y \neq 0)$ (b) $V_p = 6.2 \text{ km/s}$ $(Y \neq 0)$ (c) $V_p = 6.2 \text{ km/s}$ $(Y = 0)$

图5 剩余比内能等值线图

Fig.5 Isolines of remained specific internal energy

物质则成为碎片云的颗粒, 打在后板上, 对后板造成破坏. 对于 $V_p = 6.2 \text{ km/s}$ 的情况, 只是两部分熔化区域已连成一片, 反向飞溅区域与图 6(b) 类似.

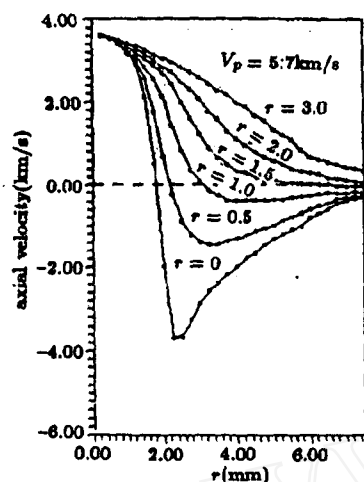


图 6(a) 不同 z 剖面质点轴向速度
沿径向分布

Fig.6(a) Axial velocity at various z
sections versus radius

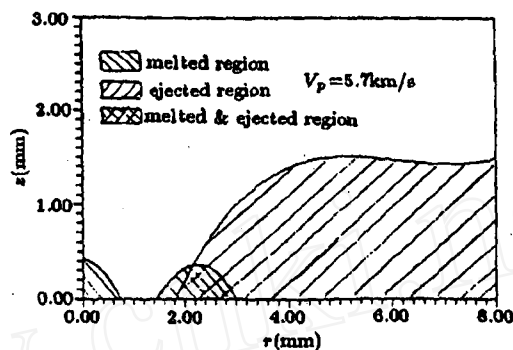


图 6(b) 熔化区与反向飞溅区

Fig.6(b) Melted region and
back-ejected region

3.5 碎片云颗粒撞击后板的熔化效应

碎片云中的颗粒有液滴和固相颗粒之分。固相颗粒在撞击后板前已具有相当高的比内能和速度，而且，来自前板不同地方的固相颗粒所具有的比内能和速度也不相同。在液滴、固相颗粒撞击后板的过程中，后板材料或固相颗粒自身可能发生熔化。一般来说，在弹板材料都已选定的情况下，引起后板熔化的主要因素是冲击后板颗粒的速度和比内能。从前面的计算可知，如果弹丸以 $V_p = 6.2 \text{ km/s}$ 冲击前板，碎片云中颗粒的最大速度（也即碎片云头部速度）为 4 km/s ，最大比内能为 1.0 kJ/g 。为此，把颗粒当作弹丸，而弹丸速度就取碎片云中颗粒的最大速度，即 $V_r = 4.0 \text{ km/s}$ ，弹丸的初始比内能取碎片云中颗粒的最大比内能，即 $E_r = 1.0 \text{ kJ/g}$ ，考察这样的弹丸冲击后板是否会引起后板的熔化（这里的 E_r ， V_r 分别是指碎片云中颗粒的比内能和速度，也就是这里弹丸的初始比内能和速度，下同）。为了比较弹丸不同的初始比内能对后板熔化的影响，这里还给出了 $E_r = 0.5 \text{ kJ/g}$ ， $V_r = 4 \text{ km/s}$ 的计算结果（见图 7）。图中的实线和虚线分别是在 $V_r = 4 \text{ km/s}$ ， $E_r = 1.0 \text{ kJ/g}$ 和 $V_r = 4 \text{ km/s}$ ， $E_r = 0.5 \text{ kJ/g}$ 的情况下得到的比内能随时间的变化曲线。从图中可知，实线和虚线基本一致，说明弹丸初始比内能的不同对后板的熔化没有影响，同时，从图中发现，碰撞点处剩余比内能都小于 E_{im} 即 0.7 kJ/g ，说明后板没有熔化。由此可得：后板的熔化与否取决于碎片云中颗粒速度，而与颗粒所具有的比内能无关。

由前面得到的结果还可以推断，如果碎片云中的颗粒速度小于 5 km/s ，它在与后板相撞过程中不会引起后板的熔化，但它可能引起自身的熔化。那么，具有多大的速度和比内能的颗粒在撞击后板过程中会引起自身熔化呢？先来考虑两种特殊情况：如果碎片云中颗粒的初始比内能为零，速度大于（或等于） 5 km/s ，则它在撞击后板过程中肯定会熔化；如果颗粒的初始比内能大于（或等于） 0.7 kJ/g ，即使碰撞速

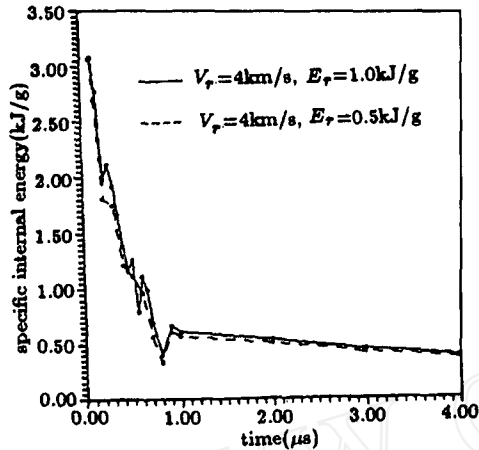


图7 碰撞点处比内能随时间的变化曲线
Fig.7 Variation of specific internal energy of backup material at point of impact with time

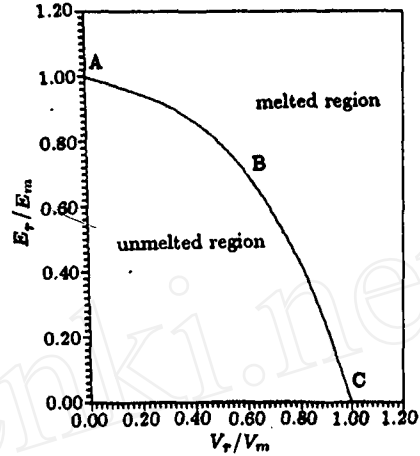


图8 由 V_r/V_m 和 E_r/E_m 确定的熔化区域
Fig.8 Margin curve separating melted and unmelted regions in $V_r/V_m \sim E_r/E_m$ plane

度为零,它也是熔化的.这样,就只要考察比内能在 $0 \sim 0.7\text{kJ/g}$ 之间、速度在 $0 \sim 5\text{km/s}$ 的颗粒,在撞击后板过程中,颗粒自身是否熔化.可取下面六种情况作为算例进行考察:① $E_r = 0.4\text{kJ/g}$, $V_r = 4\text{km/s}$;② $E_r = 0.5\text{kJ/g}$, $V_r = 4\text{km/s}$;③ $E_r = 0.6\text{kJ/g}$, $V_r = 3\text{km/s}$;④ $E_r = 0.6\text{kJ/g}$, $V_r = 2\text{km/s}$;⑤ $E_r = 0.5\text{kJ/g}$, $V_r = 3\text{km/s}$;⑥ $E_r = 0.3\text{kJ/g}$, $V_r = 4\text{km/s}$.根据六个算例的结果,可得到弹丸在与后板相撞过程中出现熔化时 E_r 和 V_r 应满足的关系(见图8).图中熔化区域是指剩余比内能超过初始熔化能的区域,ABC是熔化区与不熔化区的分界线.横坐标 V_r/V_m 中的 V_m 是室温下使材料熔化所需的最小碰撞速度,LY12铝的 V_m 为 5km/s ;纵坐标 E_r/E_m 中的 E_m 是静止状态下材料的初始熔化能,LY12铝的 E_m 为 0.7kJ/g .通过拟合,得到 E_r/E_m 和 V_r/V_m 的关系式为

$$\frac{E_r}{E_m} = 1 - 0.27\left(\frac{V_r}{V_m}\right) + 0.19\left(\frac{V_r}{V_m}\right)^2 - 0.92\left(\frac{V_r}{V_m}\right)^3$$

式中的 E_m 和 V_m 与材料性质有关. E_r 和 V_r 为碎片云中颗粒所具有的比内能和速度.

4 分析与讨论

在后板破坏特征的宏观观察中,已经发现弹丸速度 V_p 为 5km/s ,是一个特征速度,经过对后板弹坑的微观观察,发现 $V_p=5\text{km/s}$ 是后板出现熔坑的最小速度.数值模拟进一步表明, $V_p=5\text{km/s}$ 是碎片云初始熔化的最小速度.由数值模拟和实验结果可以得出同一个结论:在选定弹板材料和几何参数的情况下, $V_p=5\text{km/s}$ 是硬铝弹丸撞击硬铝板初始熔化的最小速度.出现熔化后,碎片云中将有液相颗粒——液滴,液滴在飞行中要发生碎裂,不断雾化,使液滴的尺寸不断减小,因而在后板上出现微弹坑,对后板的破坏明显减弱.

微弹坑和熔坑在 V_p 为 5.0 ~ 6.2km/s 时主要分布在一个中心圆区和一个外环带内,而且,两者的分布与微弹坑的分布基本一致,这又说明了微弹坑的出现与熔化有关.现在可以分析为什么熔坑主要分布在一个中心圆区内和一个外环带内.根据实验观察^[6],可以近似认为碎片云中的颗粒在碰撞后板前一直作直线飞行.对于 $V_p=5.7\text{km/s}$ 的情况,由图 6(b) 确定的两部分熔化区域的物质在后板形成的熔坑范围,位于一个中心圆区和一个外环带内,三个半径值分别为 16mm, 23mm 和 35mm(本文中双层板前后板的间隙为 12cm),与实验得到的三个半径值 16mm, 22mm 和 40mm 基本一致.对于 $V_p=6.2\text{km/s}$ 的情况,前板两个熔化区连成一片,则熔化区域里的物质在后板的成坑范围位于一个圆形区域内,对应的半径为 42mm,实验得到的结果为 39mm,可见两者基本接近.由此可以得出,后板上中心圆区和外环带的熔坑,是由前板对应的两部分熔化区域的物质在撞击后板时形成的.中心圆区内熔坑的出现,反映了击波加热起决定性作用;而外环带熔坑的出现,则表明塑性功加热对熔化有重要作用.

5 结 论

我们从实验和数值模拟两方面入手,对超高速冲击铝双层板碎片云的熔化特征进行了研究,可以得到如下结论:

- 1) 对 LY12 硬铝合金双层板来说,碰撞速度 V_p 为 5km/s 是碎片云初始熔化的最小速度.
- 2) 碎片云熔化以后,对后板的破坏明显减弱.
- 3) 击波加热和塑性功加热是引起碎片云熔化的两种因素,在碰撞点附近,击波加热是引起熔化的决定性因素,在离对称轴为一倍弹半径处的附近区域,塑性功加热也起重要作用.
- 4) 后板的熔化与否,取决于碎片云颗粒的速度,与颗粒的温度无关.
- 5) 碎片云冲击后板的颗粒所具有的比内能和速度满足一定关系时,自身发生熔化.

致谢:对中国科学院力学研究所赵成修、俞善炳、张正信、葛学珍、张振松等同志和北京科技大学刘国权教授的帮助和支持表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- 1 Whipple FL. Meteorites and space travel, *Astronomical J*, 1947, (1161): 131
- 2 Bjork RL, Olshaker AE. The role of melting and vaporization in hypervelocity impact, MEMORANDUM RM- 3490- PR, May, 1965
- 3 Hopkins AK, Lee TW, Swift HF. Material phase transformation effects upon performance of spaced bumper systems, *J Spacecraft Rockets*, 1972, 9: 342-345
- 4 Anderson CE et al. Debris cloud dynamics, *Int J Impact Engng*, 1990, 9(1): 89-113
- 5 Holian KS, Holian BL. Hydrodynamic simulations of hypervelocity impact, *Int J Impact Engng*, 1989, 8(2): 115-132
- 6 Zhang Deliang, Tan Qingming, Zhao Chengxiu, Yang Yemin, Ge Xuezheng, Zhang Qingming. Experimental investigations of hypervelocity impact onto aluminium dual-plate structure. *Acta Mechanica*

Sinica, 1992, 8:374-382

- 7 Qing-ming Tan, Qing-ming Zhang, De-liang Zhang, Che-min Cheng. Damage characteristics of aluminum alloy dual-sheet structure in hypervelocity impact, IUTAM Symp on Impact Dynamics, Oct. 1993, Beijing
- 8 张庆明, 超高速冲击铝双层板的熔化效应, 中国科学院力学研究所博士论文, 1993
- 9 [日] 饭田修一、大野和郎等, 物理学常用数表, 科学出版社, 1987
- 10 Johnson WE. SOIL Notes, Private Communication, 1988

MELTING EFFECTS OF ALUMINUM DUAL-SHEET STRUCTURE IN HYPERVELOCITY IMPACT

Zhang Qingming Tan Qingming Zhang Deliang Cheng Che-min
(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract In this paper, melting effects of aluminum dual-sheet structure in hypervelocity impact are studied experimentally and numerically. With the help of SEM, melted craters are observed on the backup plate when projectile velocity is larger than 5km/s. As projectile velocity increases, there are more melted craters on the backup, and perforation failure of the backup is concurrently mitigated. Numerical simulations show that, there are two kinds of melting mechanisms, i.e., the shock heating and the plastic work heating. The numerical results of the main characteristics of melting agree with the experimental results.

Key words hypervelocity impact, dual-sheet structure, debris cloud, melting