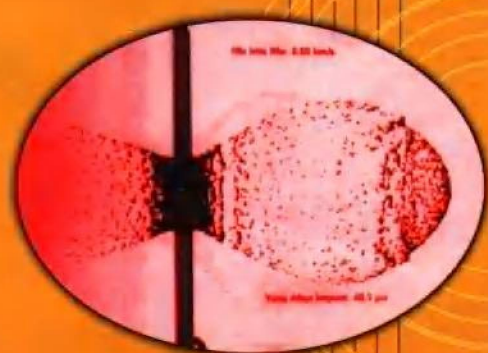


张庆明 黄风雷 编著

# 超高速碰撞 动力学引论



科学出版社

# 超高速碰撞动力学引论

张庆明 黄风雷 编著

科学出版社

2000

## 内 容 简 介

超高速碰撞动力学是近 40 年来兴起的爆炸力学的一门分支学科,现正处在发展时期。本书总结了国内外在超高速碰撞领域某些方面的研究成果,以便使读者了解超高速碰撞动力学的发展现状。本书共分七章,内容包括绪论、经典物态方程、超高速碰撞下材料的相变、超高速弹丸对厚板及中厚板的侵彻、薄板的冲击与碎片云的形成、超高速碰撞动力学的应用与超高速弹丸驱动技术。

本书可供力学、机械、航空航天、天体物理等学科的工程技术人员、高校教师、高年级学生和研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

超高速碰撞动力学引论/张庆明,黄风雷编著.-北京:科学出版社,2000

ISBN 7-03-007696-6

I. 超… II. ①张 ②黄… III. 超高速碰撞-动力学  
IV. O313.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 27472 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

丽泽印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

2000 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/32

2000 年 1 月第一次印刷 印张:7 3/4

印数:1—2 000 字数:167 000

定价:15.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

# 前 言

超高速碰撞动力学随着工程应用的需要而产生,同时也将随着工程应用的深入而发展。它的历史始终与工程应用紧密联系在一起。50年代,为了研制洲际弹道导弹、航天飞行器 and 人造卫星,需要搞清楚破片或陨石碰撞引起的破坏效应以及有效防护的结构形式,开始了超高速碰撞动力学的研究。四十多年来,超高速碰撞动力学已应用在反导技术、航天飞行器的防护技术、轻质装甲与反装甲设计技术、类地行星地面陨石坑研究等诸多领域。现在,空间竞争日趋激烈、空间破片日益增多、动能武器正在发展等因素无疑会给超高速碰撞动力学提供更加广阔的应用舞台,同时也将进一步促进超高速碰撞动力学的发展。

超高速碰撞又总是与高技术领域联系在一起的。历史经验证明,总是尖端带动常规和民用。超高速碰撞动力学的深入研究将带动轻气炮、电炮、X光脉冲照相、高速照相、动态测试技术、数值计算方法、瞬态高温高压下材料的物态方程与力学性质、爆炸力学理论模型的发展,这又是发展常规武器和培养力学队伍必需的条件。

自从超高速碰撞动力学兴起以来,国内外有许多学者在本领域默默无闻地追求着、耕耘着,出现了大批研究成果。本书力图较系统地对他们的工作进行总结,并介绍给读者。

因作者的水平有限,对有些问题的分析不够深入、不够全面,也可能存在很多错误,恳请广大读者给予批评指正。

作 者

1999年5月

# 目 录

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>1 绪论</b>                 | <b>1</b>   |
| 1.1 超高速碰撞的基本概念              | 1          |
| 1.2 超高速碰撞动力学研究背景            | 3          |
| 1.3 超高速碰撞动力学研究进展            | 7          |
| <b>2 超高速碰撞下材料的相变</b>        | <b>20</b>  |
| 2.1 相变热力学                   | 20         |
| 2.2 具有双波结构的 Hugoniot 曲线     | 25         |
| 2.3 冲击熔化与气化                 | 44         |
| <b>3 经典物态方程</b>             | <b>55</b>  |
| 3.1 Mie-Gruneisen 方程        | 55         |
| 3.2 Tillotson 物态方程          | 67         |
| 3.3 分段物态方程                  | 73         |
| <b>4 超高速弹丸对半无限厚板和中厚板的侵彻</b> | <b>77</b>  |
| 4.1 弹坑的形成                   | 77         |
| 4.2 厚板开坑模型律                 | 87         |
| 4.3 厚板开坑的进一步讨论              | 98         |
| 4.4 超高速弹丸对中厚板的侵彻            | 103        |
| 4.5 高温弹丸对厚板的侵彻              | 107        |
| <b>5 薄靶的碰撞与碎片云的形成</b>       | <b>110</b> |
| 5.1 碎片云形成的物理过程              | 110        |
| 5.2 碎片云的形成机理                | 118        |
| 5.3 双层板结构的破坏特征              | 121        |
| 5.4 后板弹坑的金相分析               | 137        |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 5.5 碎片云的熔化规律 .....         | 144        |
| 5.6 关于熔化的讨论 .....          | 147        |
| <b>6 超高速碰撞动力学的应用 .....</b> | <b>153</b> |
| 6.1 航天领域的应用 .....          | 153        |
| 6.2 天体物理领域的应用 .....        | 166        |
| 6.3 军事领域的应用 .....          | 174        |
| 6.4 其他方面的应用 .....          | 183        |
| <b>7 超高速弹丸驱动技术 .....</b>   | <b>186</b> |
| 7.1 二级轻气炮 .....            | 186        |
| 7.2 电磁炮 .....              | 194        |
| 7.3 电热炮 .....              | 211        |
| 7.4 混合电炮 .....             | 215        |
| 7.5 爆炸加速器 .....            | 219        |
| <b>参考文献 .....</b>          | <b>223</b> |

H. Fair 在 1987 年指出,把宏观物体加速到超高速的能力对社会所产生的影响,很可能相当于核动力的发展或像激光之类的定向能武器的发展所产生的影响。这段话指出了超高速的获得以及对它的现象和物理学研究的意义。事实上,超高速碰撞动力学的研究,在反弹道导弹技术、空间碎片或陨石撞击下宇宙飞船的防护技术、核反应堆外壳安全防护设计、轻质装甲设计、类地行星表面陨石坑等方面都做出过重要贡献。

## 1.1 超高速碰撞的基本概念

超高速碰撞是指这样一种碰撞:碰撞所产生的冲击压力远大于弹丸和靶的强度。此定义确保弹丸和靶材料在碰撞过程最初阶段的性态类似于可压缩流体。因此为描述流体动力学过程而发展起来的比较简单的关系就可相当精确地描述超高速碰撞过程的初期阶段。

在超高速碰撞的定义中,最初有人提出,以某一碰撞速度的最小值作为超高速碰撞的定义。但不同种类的物质很难规定出一个统一的速度下限。也有人赞成把一种特殊碰撞现象的开始的速度值作为超高速碰撞的定义。这一特殊现象是指,在弹、靶初始接触点的附近区域内,弹丸和靶材料完全粉碎。根据这种定义,不同的材料会有不同的速度值。例如,石腊弹丸对石腊靶的碰撞中,这个速度值约为  $1\text{km/s}$ ;对于金属铅、

锡、金和铟等,这个速度值为  $1.5 \sim 2.5 \text{ km/s}$ ,对典型的结构材料和坚硬的材料如铝、石英等需要到达  $5 \sim 6 \text{ km/s}$  方可达到超高速碰撞值。在强度高、密度小的材料如铍、硼、陶瓷、碳化硼和金刚石中,超高速碰撞的速度值达  $8 \sim 10 \text{ km/s}$ 。当弹丸和靶由两种性质差异很大的材料制成时,还可能出现另一类有趣的现象。这时,一种材料的行为类似于流体,而另一种材料的行为却仍受其强度效应所控制。例如,在这样的情况下,弹丸可能保持其完整性,并深深地钻入其软质低强度的靶中;或者软质弹丸碰撞高强度靶,弹丸平摊于靶表面,靶仅发生微小变形或发生层裂等破坏现象。从上面分析中,这种定义的“粉碎”一词仍不够确切。不同的弹丸和靶板材料的组合会有不同的速度值,因而显得非常复杂。所以,采用“冲击压力远大于弹和靶材料强度”这一定义包含了超高速碰撞的物理含义,甚至可以包括上述有关以特殊现象开始的速度值的超高速碰撞的定义。另一方面,该定义言简意赅,不论弹靶材料的组合如何,只要冲击压力远大于靶或弹的强度,都属超高速碰撞的研究范畴。

超高速碰撞与低速碰撞、高速碰撞的区别在于其物理现象的不同。一般地说,在低速碰撞时,所研究的问题属于结构动力学问题,这时,局部侵彻与结构物体的总体变形效应紧密地耦合在一起;在稍高碰撞速度下,碰撞点附近区域靶材料性质主要指密度和强度起主要作用,结构效应退居次要地位;碰撞速度继续提高到超高速范围时,材料的惯性效应甚至可压缩性效应或相变效应会起重要的作用。在极高的超高速碰撞速度( $>12 \text{ km/s}$ )下,撞击区的能量沉积速度很快,以致发生气化爆炸现象。表 1.1 列出了不同碰撞速度下材料的物理现象及加载手段。

表 1.1 不同碰撞速度下材料的物理效应

| $v_p$                                     | 效 应                          | 加载方法       |
|-------------------------------------------|------------------------------|------------|
| $>12\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$        | 爆炸碰撞(相撞物体气化)                 | 电炮         |
| $3\sim12\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$    | 流体动力学(不能忽略材料的压缩性)            | 爆轰加速、电炮、气炮 |
| $1\sim3\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$     | 材料中的流体行为;压力接近或超过材料强度;密度是主要参数 | 火药炮、气炮     |
| $0.5\sim1.0\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ | 粘性(材料强度效应明显)                 | 火药炮        |
| $50\sim500\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$   | 主要是塑性                        | 机械装置,空气炮   |
| $<50\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$         | 主要是弹性,局部地点塑性                 | 机械装置,空气炮   |

1.2 超高速碰撞动力学研究背景

超高速碰撞的研究到如今也不过四十多年的历史,但它走过了兴起、衰落和复兴三个阶段。

1.2.1 兴起

50 年代中期,为了研制洲际弹道导弹、航天飞行器 and 人造卫星,需要搞清楚碎片或陨石碰撞引起的破坏效应以及有效防护的结构形式,开始了超高速碰撞的研究。其标志就是 1955 年 1 月 31 日~2 月 2 日召开的第 1 届超高速碰撞学术会议。在这次会议上,会议参加者介绍了美国利用探空火箭搜集到的流星体冲击方面的资料,并介绍了达到超高速的三种实验工具:轻气炮、电磁炮和聚能射流。

到 1958 年,由于前苏联在之前已将 2926 磅(1 磅 = 0.453592 公斤)的重量送到了轨道,而美国当时记录的卫星重量仅是 23 磅。在这种刺激下,美国把国家航空咨询委员会(NACA)升级为国家航空航天局(NASA),组成了远景规划局

(ARPA),由它来统一组织和协调有关弹道防御、抗超高速冲击装甲领域的研究。此时,超高速碰撞在弹道导弹防御中的中心作用已展现出来。超高速碰撞的研究进入了繁荣兴旺的时期。在这个时期,超高速碰撞学术讨论会每隔 18 个月举行一次。

表 1.2 兴起时期超高速碰撞学术会议

|                                                           |                                                 |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Rand 超高速冲击讨论会<br>资助者:Rand 公司和空军研究发展司令部的科研局<br>主持者:Rand 公司 | 1955 年 1 月 31 日<br>~2 月 2 日<br>Santa Monica, CA |
| 第 2 届超高速冲击效应讨论会<br>资助者:海军研究实验室和空军研究发展司令部<br>主持者:海军研究实验室   | 1957 年 5 月 22 日~24 日<br>Washington, DC          |
| 第 3 届超高速讨论会<br>资助者:三军<br>主持者:ITT 装甲研究财团                   | 1958 年 10 月 7~9 日<br>Chicago, IL                |
| 第 4 届超高速冲击讨论会<br>资助者:三军<br>主持者:空军研究和发展司令部                 | 1960 年 4 月 26~28 日<br>Eglin AFB, FL             |
| 第 5 届超高速冲击讨论会<br>资助者:三军<br>主持者:Colorada 矿业学院              | 1961 年 10 月 30 日<br>~11 月 1 日<br>Denver, CO     |
| 第 6 届超高速冲击讨论会<br>资助者:三军<br>主持者:耐火轮胎和橡胶公司                  | 1963 年 4 月 30 日<br>~5 月 2 日<br>Cleveland, OH    |
| 第 7 届超高速冲击讨论会<br>资助者:三军<br>主持者:Martin 公司(Orlando)         | 1964 年 11 月 17~19 日<br>Orlando, FL              |
| 美国航空与航天学会(AIAA)超高速冲击会议<br>资助者:美国航空与航天学会<br>主持者:美国航空与航天学会  | 1969 年 4 月 30 日<br>~5 月 2 日<br>Cincinnati, OH   |

### 1.2.2 衰落

在 50 年代和 60 年代,超高速碰撞研究的资助来源主要是军事部门和国家航空航天局。它们关心的主要问题是:流星数量究竟大到什么程度?当它击中宇航器空间结构时,会发生什么情况?能否研制出用以防护流星碰撞的保护罩?怎样防御敌方弹道导弹的袭击?

1965 年,美国流星体卫星证明流星的威胁是值得关心的,但这种威胁被夸大了。宇宙飞船登月的成功排除了一些天文学家的担心,它们担心月球表面受到亿万年来流星的撞击,已形成了很厚的尘埃海,从而使宇宙飞船无法登月。然而,事实证明这种担心是多余的。月球表面是坚实平整的,国家航空航天局失去了资助超高速碰撞基础研究的兴趣。

60 年代中期,美国的 U2 侦察机和间谍卫星发现前苏联的导弹并不像原先想象的那么先进,于是,军方对超高速碰撞的研究失去了兴趣。事实上,他们有着比建立导弹防御系统更重要的事情要做,那就是越南战争。而且,经过价格估算,建立导弹防御系统比洲际导弹更贵。面对当时苏联导弹的成功,当时的美国国防部确立了把国防建立在与敌方“同归于尽”的原则上。从 1965 年开始,导弹防御计划的预算大幅度削减。超高速碰撞研究失去了军方的资助。到 1969 年,军方终止了犹豫不决的导弹防御计划,超高速碰撞研究走向衰落。1969 年美国航空航天学会举办的超高速碰撞学术会议和 Kinslow 的著作“High Velocity Impact Phenomena”中,对这一时期的研究成果进行了总结。

超高速碰撞研究在这个阶段并没有完全终止。在 70 年代至 80 年代初,某些因素的出现甚至给超高速碰撞的研究注入了一些新的活力,如宇宙空间移民、行星科学、古生物和聚变

研究。其中最重要的是 Princeton 大学物理学家 Gerard O'Neill,他在 1974 年建议用同轴线性加速电磁炮—“质量驱动器”发射月球矿石到 L-5 轨道,以便在宇宙空间建立城市、农场和工业。NASA 给 O'Neill 提供了 1975~1978 年基金,供他完成这些大城市空间结构和质量驱动器的原理性设计,其研究证实了加速较大质量的能力。

这时期超高速碰撞的研究是零散的、局部的。这种局面直到 1983 年才开始改变。

1.2.3 复兴

1983 年 3 月 23 日,美国里根总统向科学界和工程界发表讲话,提出在外层空间摧毁敌方核武器的倡议,被称为 SDI (Strategic Defence Initiative),即战略防御倡议。从此,超高速碰撞的研究再度热了起来,走向了复兴阶段。其标志是 1986 年开始的每两年一次的超高速碰撞会议。到 1998 年共开了 6 次,而且仍会继续下去。表 1.3 列出了这一时期的超高速碰撞学术会议。

表 1.3 1986~1998 年历届超高速碰撞会议

| 届 次    | 时 间                   | 地 点                  |
|--------|-----------------------|----------------------|
| 第 9 届  | 1986 年 10 月 21 日~24 日 | San Antonio, Texas   |
| 第 10 届 | 1989 年 12 月 12 日~14 日 | San Antonio, Texas   |
| 第 11 届 | 1992 年 11 月 17~19 日   | Austa , Texas        |
| 第 12 届 | 1994 年 10 月 17 日~19 日 | Santa Fe, New Mexico |
| 第 13 届 | 1996 年 10 月 8 日~10 日  | Freiburg, Germany    |
| 第 14 届 | 1998 年 10 月 8 日~10 日  | Huntsville, Alabama  |

## 1.3 超高速碰撞动力学研究进展

超高速碰撞现象按板的厚度可分为三类:即厚板、中厚板和薄板。厚板是指板厚大大超过坑深,中厚板是指板厚与侵彻深度相差不大,薄板是相对来说的,指碰撞过程中板被击穿并在板的背面形成碎片云。板厚的不同将导致在高速碰撞中所发生的物理现象也不同。厚板的主要现象是开坑,中厚板是冲塞,薄板则是碎片云。具有理想的防护性能的双层板兼有多种典型现象,前靶可以认为是薄板,后板是在不同的条件下可以看成厚板也可以看成中厚板,所以现象也最复杂。

### 1.3.1 实验研究

对超高速碰撞的研究,最早主要集中在厚板成坑方面。国外在 50 年代中期到 60 年代中期做了大量的工作。Kinsow 在其所著的“High Velocity Impact Phenomena”一书中对这一时期的工作作了很好的总结。近来国内在实验方面也做了一些工作。对于实际应用而言,人们最关心的是坑深,其次是坑的形态。在这两方面,总结出“坑深模型律”和“均匀膨胀律”。

“坑深模型律”是指坑深随弹速、弹、靶材料的密度、强度、声速等参量以及弹靶几何形状(如弹径)变化的规律,一般表示成:

$$p_c/d_p = C(\rho_p/\rho_t)^{a_1} \left( v \sqrt{\rho_t/Y_t} \right)^{a_2} (v/C_t)^{a_3}$$

这里  $C, a_1, a_2, a_3$  为无量纲常数,  $p_c$  是坑深,  $v$  是弹速,  $d_p, \rho_p$  分别是弹的直径与速度,  $\rho_t, Y_t, C_t$  分别是靶的密度、强度和声速。

虽然实验工作已经做了很多,但不同作者在整理数据时所强调的主定参数不尽相同,除惯性效应外,有的强调可压缩性,有的重视强度,Sedgwick 的计算给出了上述诸效应的比较全面的结果:

$$p_c/d_p = 0.482(\rho_p/\rho_t)^{0.537} \left( v \sqrt{\rho_t/Y_t} \right)^{0.47} (v/C_t)^{0.106}$$

比较已发表的众多经验公式,可以发现,公式中无量纲的系数和方幂值是有差异的。这也许是由于实验和计算中所选用的材料和撞击速度范围不同所造成的。

在坑的形态方面,人们总结出“均匀膨胀律”。所谓“均匀膨胀律”是指超高速碰撞情况下,随着弹速的增加,坑深的增量和坑半径的增量之比趋于常数 1,即随着弹速的增加,坑深方向和坑径方向以同样的速度“扩张”。在弹板同材的情况下,该规律退化为“半球说”,即在同种材料的超高速碰撞的条件下,坑的形状将为半球形。以上这些都是根据实验的终点效应得出的结果。而实际的物理过程如何,半球坑是怎样形成的,在实验中很难连续测量得到。而在计算中这是较易办到的,俞善炳、谈庆明等对此进行了分析总结。

为了深入了解双层结构中前板对主结构的防护性能,提出了研究薄板穿孔现象的问题。这一现象的主要特征是在薄板被击穿后,喷出由弹板材料形成的碎片云。国内外曾进行了一些实验,总结出双层结构最佳防护性能等规律。根据 X 光照相照出的碎片云密度分布及运动特征,理论上提出了碎片云均匀球形膨胀的模型来估计双层结构中板的防护性能。冲击薄板形成碎片云特别是发生熔化和气化的碎片云是近期研究的热点。

比较超高速碰撞薄板和厚板相变效应的实验研究,人们

把研究的兴趣放在薄板特别是双层板的相变效应研究上。1972 年, A. K. Hopkins 等人为了研究双层结构中后板不被贯穿的最小厚度随碰撞速度的变化规律(前板厚度、两板之间的间距及弹丸直径均固定), 设计了一系列实验方案, 其中一个实验方案如图 1.1(a) 所示。图 1.1(b) 中的纵坐标  $t_2$  是后板不被贯穿的最小厚度。从图 1.1(b) 可以看出, 在弹速  $v_p$  较小时,  $t_2$  随速度的增加几乎线性地增加。弹丸破碎后, 特别是在出现熔化以后, 随着速度的增加而变小。当完全熔化时,  $t_2$  出

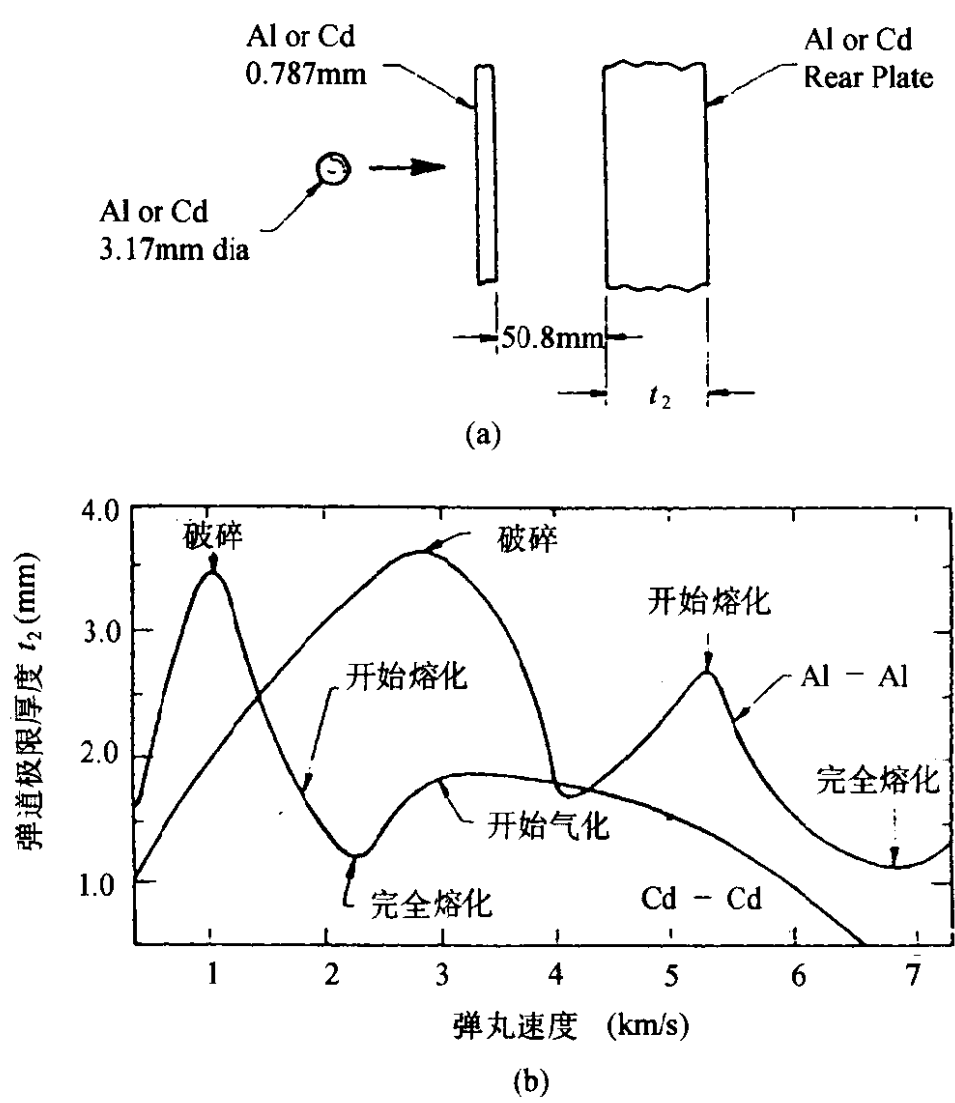


图 1.1 Hopkins 等人的实验装置与实验结果关系图

现一个极小值。但以后由于速度的进一步增大,碎片云中液滴的平均动能也增大,因而  $t_2$  也随之增大。而当出现气化时,  $t_2$  又随着速度的增大而变小。从这里可以得到:发生熔化和气化以后,  $t_2$  减小了,也即碎片云对后板的破坏减弱了。

1990 年, D. Liquornik 比较了不同材料性质对碎片云的影响。他根据铅和钨的密度相近(铅:  $11.35\text{g}/\text{cm}^3$ ; 钨:  $10.21\text{g}/\text{cm}^3$ ), 但熔点不同, 因而在同一速度上和同一直径下铅弹丸和钨弹丸具有相近的动能和能量的特点, 在弹板材料相同的情况下, 观察两者产生碎片云的异同。用质量为  $20\text{g}$  的球形铅弹丸和钨弹丸, 以同一速度  $6.58\text{km}/\text{s}$ , 分别撞击  $6.6\text{mm}$  厚的铅板和钨板, 用脉冲 X 光照相记录了碎片云的情况(见图 1.2 和图 1.3)。从两图中可以看出:钨弹丸撞击钨板所形成的碎片云只有少量的熔化现象, 没有气化现象;而铅的碎片云则不但有熔化现象而且有气化现象;从钨的碎片云的照片里能明显地看出单个破片, 而铅的碎片云里则没有单个破片。从后板的破坏情况看(后板材料为铝, 它距前板为

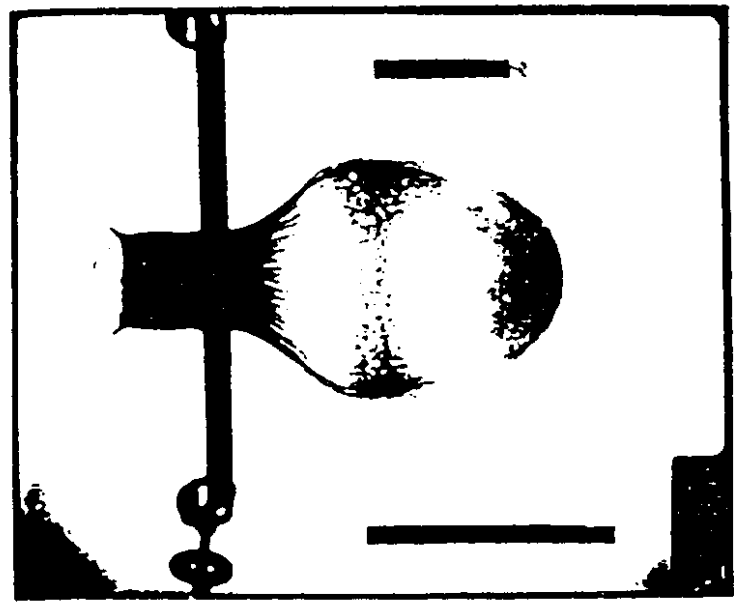


图 1.2 铅板碎片云的 X 光照片

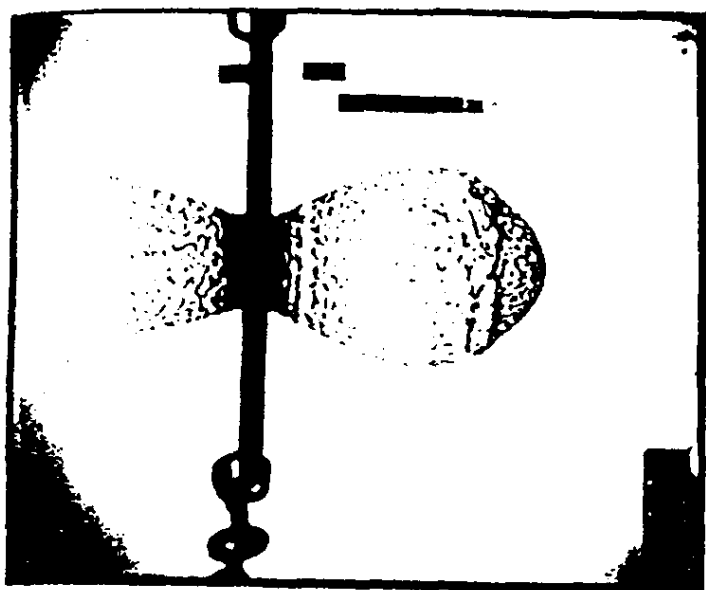


图 1.3 铝板碎片云的 X 光照片

500mm), 钨弹丸撞击铝板所形成的碎片云在后板上留下了明显的弹坑;而对于铅,则看不到明显的弹坑,但能在后板的表面上观察到一层薄薄的铅,这是铅气化后凝聚在后板上形成的。在这组实验里,尽管铅和钨的密度相近,但它们的材料性质却完全不同,就热力学性质而言,铅的熔点是  $327^{\circ}\text{C}$ , 沸点是  $1750^{\circ}\text{C}$ 。而钨的熔点是  $2617^{\circ}\text{C}$ , 沸点是  $4607^{\circ}\text{C}$ , 可见,钨的熔点比铅的沸点高。这就不难说明为什么这两种材料的碎片云会不相同。可见,材料不同就会引起碎片云有明显的不同。

就二级轻气炮而言,它能使质量为  $1\text{g}$  的弹丸达到的最大速度约为  $8\text{km/s}$ 。在这种速度下,只有几种低熔点、低沸点的金属(铝、铅、镉)才会出现熔化、气化现象。1990 年, J. R. Asay 和 T. G. Trucano 研究了铝、铅、镉三种材料的气化情况。结果发现,铝和镉的实验结果与计算结果符合较好,而铅的误差较大。于是,他们在飞片撞击铅板所产生的一维