

# 弹丸冲击下材料微结构 演化及绝热剪切特性

段占强 商 艳 © 著



 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

# 弹丸冲击下材料微结构 演化及绝热剪切特性

段占强 商艳 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书研究了钢弹、钨合金穿甲弹在不同冲击速度下冲击不同材质、不同厚度的靶板，分析在冲击条件改变时，靶板材料的微观结构变化，并对材料的破坏机制、破坏过程进行了分析。本书从材料学角度研究了绝热剪切带的分类及形成机理，提出了位错塞积崩塌的绝热剪切形成机理；研究了连续梯度材料中绝热剪切特性，提出了剪切带孕育区和发散的观点。

本书适用于关注材料研究工作的科研人员、军工企业研发人员，以及军工院校材料专业师生。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目（CIP）数据

弹丸冲击下材料微结构演化及绝热剪切特性/段占强，商艳著. —北京：电子工业出版社，2019.3

ISBN 978-7-121-35330-7

I. ①弹… II. ①段… ②商… III. ①装甲板—显微结构—研究 ②装甲板—绝热—剪切带—研究 IV. ①TJ810.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 245537 号

策划编辑：刘小琳

责任编辑：刘小琳 特约编辑：宋 扬

印 刷：北京虎彩文化传播有限公司

装 订：北京虎彩文化传播有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：710×1 000 1/16 印张：8.75 字数：145 千字

版 次：2019 年 3 月第 1 版

印 次：2019 年 3 月第 1 次印刷

定 价：39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltts@phei.com.cn](mailto:zltts@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式：（010）88254538，[liuxl@phei.com.cn](mailto:liuxl@phei.com.cn)。

## ■ 前 言

# PREFACE

随着科学技术的迅速发展,高速碰撞问题越来越得到人们的重视。材料在高应变速率下变形行为的研究不仅在航空航天、装甲防护领域,而且在高速切削、爆炸焊接等材料加工领域也得到迅猛发展。在日常生活中,高速列车、汽车的安全防护也涉及这些问题。材料在高应变速率下的变形行为已成为现代材料研究的热点之一。

虽然关于高应变速率下材料微结构演化的论文数量巨大,但由于高速变形问题的复杂性和不可复制性,目前国内外尚无从材料学角度系统论述高应变速率下材料变形行为的专著,更多的是从力学研究及力学与材料学结合的角度来论述。本书以弹丸侵彻靶板为研究对象,力图从材料微观结构演化中给出一些高速冲击现象的材料学解释,为高应变速率下材料的理论研究提供一些新思路。

材料在冲击作用下的高速变形特征与准静态时不同。在高速变形时伴随着材料的流动、破碎等现象,而观察材料的微观结构会发现,其中出现了绝热剪切带等特征。对此,以往的研究结果表明,绝热剪切带的出现会使材料发生突然、灾难性的破坏。本书通过不同材料的弹丸对不同材料的靶板进行穿甲试验,分析在冲击条件改变时材料微观结构的变化,并对材料的破坏机制和绝热剪切带的形成进行分析。

钨合金弹丸对45钢靶板的冲击,从弹靶界面到靶板内部可分为熔化快凝层、再结晶细晶层、变形细晶层、形变层和正常基体。弹丸的变形以垂直于侵彻方向被压缩成片层状为主,当压缩到临界值时弹丸破碎,弹丸的变形区域局限在距碰撞点3mm的范围内。

钢弹对45钢靶板的冲击,从弹靶界面到靶板内部的组织与钨合金弹丸冲击

45 钢靶板相同。而对残余弹体的分析表明,冲击过程中弹丸以脆性的绝热剪切方式破坏,弹体的碎片与弹靶基体的碰撞、摩擦使碎片周围出现如同爆炸焊接的组织。

钨合金弹丸对装甲钢靶板的冲击,从弹孔表面到靶板内部可分为熔化快凝层、扩散层、变形层和正常基体。弹丸以剪切变形为主,在残余弹体内出现初期的绝热剪切带。由于冲击速度不同,在穿孔和弹丸嵌入形成的弹孔周围出现了几类绝热剪切带,第一类是与侵彻方向夹角约为  $45^\circ$  的绝热剪切带;第二类是与侵彻方向反向夹角约为  $45^\circ$  的绝热剪切带;第三类在开坑阶段形成,绝热剪切带起始于材料内部,终止于材料内部

钨合金弹丸对具有连续梯度的微观结构和力学性能的装甲钢靶板的侵彻,形成了多种形式的绝热剪切带。通过金相观察得知,绝热剪切带不只在  $45^\circ$  方向上形成,而是沿多个方向形成,而且绝热剪切带有明显的孕育区。

本书提出了绝热剪切带形成的位错塞积模型,在强度越高的材料中,位错运动越容易在位错障碍处塞积,且位错塞积的程度也越大,使这种位错塞积发生崩塌所需的应力也越大。当位错障碍崩塌时,形成高密度的自由位错,导致材料局部的应力和应变大大超过周围的基体,这种变形沿剪应力最大的方向发展并最终形成绝热剪切带。

本书由段占强和商艳共同完成。感谢中国科学院金属研究所李守新研究员对本书进行审阅,并提出了许多宝贵意见;感谢程国强教授在本书的理论分析中给予的帮助;感谢张焯同学在钨合金穿甲弹对连续梯度装甲钢靶板侵彻研究工作中的贡献。

由于著者水平有限,书中难免有不妥之处,望读者给予批评指正。

著者

2019 年 1 月 2 日

于沈阳

# 目 录

## CONTEN

第 1 章 概述 .....	1
1.1 穿甲与装甲防护 .....	1
1.2 穿甲作用在碰撞问题中的地位 .....	1
1.2.1 穿甲作用的分类方法 .....	2
1.2.2 穿甲作用的应变率范围 .....	2
1.3 靶板 .....	2
1.4 弹体的碰撞现象 .....	5
1.5 材料高速变形的动态行为及试验方法 .....	6
1.5.1 穿甲过程中的力学问题研究 .....	6
1.5.2 穿甲过程中的材料学问题研究 .....	10
1.6 冲击过程中弹丸的损伤破坏研究 .....	19
参考文献 .....	20
第 2 章 钨合金穿甲弹对 45 钢靶板冲击穿孔的微观结构演化及其破坏机理 .....	23
2.1 试验材料和试验方法 .....	24
2.1.1 试验材料 .....	24
2.1.2 试验过程 .....	25
2.2 试验结果与讨论 .....	25
2.2.1 靶板的显微组织 .....	25
2.2.2 残余弹体的显微组织 .....	40
2.2.3 侵彻过程分析 .....	42

参考文献	43
<b>第 3 章 钨合金穿甲弹对 45 钢靶板冲击的微观结构演化及其破坏机理</b>	<b>45</b>
3.1 试验材料	45
3.2 试验过程	46
3.3 结果和讨论	46
3.3.1 钨合金穿甲弹嵌入 45 钢靶板的显微组织	46
3.3.2 钨合金穿甲弹穿透 45 钢靶板的显微组织	47
3.3.3 残余弹体的显微组织	51
<b>第 4 章 钢弹对 45 钢靶板冲击的微观结构演化</b>	<b>53</b>
4.1 试验材料	53
4.2 试验过程	54
4.3 结果和讨论	54
4.3.1 弹坑的宏观形貌	54
4.3.2 残余弹体与靶板的显微组织	55
4.3.3 显微硬度试验	59
4.4 侵彻过程分析	60
参考文献	61
<b>第 5 章 钨合金穿甲弹对 30CrMnMo 装甲钢靶板垂直侵彻和斜侵彻的     微观结构演化</b>	<b>62</b>
5.1 钨合金穿甲弹对 30CrMnMo 装甲钢靶板垂直侵彻的显微组织研究	62
5.1.1 试验材料	63
5.1.2 试验过程	64
5.1.3 结果和讨论	64
5.1.4 30CrMnMo 装甲钢靶板 5 号弹坑周围的绝热剪切带	72
5.1.5 残余弹体的显微组织	73
5.1.6 侵彻过程分析	76

5.2 钨合金穿甲弹对 30CrMnMo 装甲钢靶板斜侵彻的显微组织研究	76
5.2.1 试验材料和试验过程	77
5.2.2 试验结果	77
5.3 本章结论	81
参考文献	81
<b>第 6 章 钨合金穿甲弹对 25SiMnMo 装甲钢靶板侵彻的微观结构演化</b>	<b>83</b>
6.1 试验材料	83
6.2 试验过程	84
6.3 结果和讨论	84
6.3.1 三个弹孔及其宏观形貌	84
6.3.2 三个弹孔周围的显微组织	85
6.3.3 弹丸对靶板的侵彻过程及靶板破坏机理分析	95
6.4 本章结论	95
参考文献	96
<b>第 7 章 钨合金穿甲弹对连续梯度装甲钢靶板侵彻的研究</b>	<b>97</b>
7.1 连续梯度装甲钢的制备及性能	97
7.2 试验结果分析	102
7.2.1 靶场试验	102
7.2.2 弹孔的宏观形貌	102
7.2.3 靶板中出现的几种绝热剪切带	102
7.2.4 纳米压痕仪测试结果及分析	106
7.3 本章结论	110
参考文献	111
<b>第 8 章 弹丸对靶板侵彻过程的理论探讨</b>	<b>112</b>
8.1 靶板厚度的特性分析	112
8.2 弹坑容积	114



8.3 钨弹对 45 钢靶板侵彻过程中穿孔表面的冷却 .....	116
8.4 绝热剪切带的形成原因 .....	118
8.4.1 绝热剪切带形成原因的力学分析 .....	118
8.4.2 绝热剪切带形成的材料学分析 .....	122
8.5 本章结论 .....	128
参考文献 .....	129

# 第1章 概述

## 1.1 穿甲与装甲防护

由弹丸碰撞装甲引起的侵彻和破坏效应称为弹丸的穿甲作用。穿甲作用问题及其反面问题——装甲防护问题，历来为军事科学家和兵器设计者所重视。自19世纪起，穿甲弹便随着钢甲兵舰的出现而问世，在此以后的200多年里，随着科技水平的提高，穿甲弹和穿甲防护这对相互制约的矛盾事物总是交替领先地出现在海、陆、空战场上，一直发展到现今的水平。在200多年前，Euler<sup>[1]</sup>和Robins<sup>[2]</sup>就曾研究过穿甲的经验关系。在19世纪，Martel<sup>[3]</sup>研究过挤齿模型。1935年，Gabeaud首先提出了穿透靶板的多种机理的联合作用观点。同时期，Öpik使用了流体力学观点研究了半无限靶体上弹坑形成的理论。而从Zenner和Hollomon<sup>[4]</sup>发布关于高速变形中绝热剪切带的报道以来，关于材料在高速侵彻中显微组织的研究一直是人们关心的热点问题之一。

## 1.2 穿甲作用在碰撞问题中的地位

物体的相互碰撞会使碰撞对象各自发生变形、破坏等现象。这些变形、破坏现象发生在很短的时间内，其行为和常见的静态变形、破坏大不相同，穿甲问题引起的各种现象更为复杂，因而有必要明确一下穿甲作用的分类及其发生变形时的应变率范围。

### 1.2.1 穿甲作用的分类方法

弹丸的穿甲作用可由几种方法来分类,如按照弹丸着靶时的着靶角分类,按装甲的结构和材料特性分类,按弹丸的结构和材料特性分类,按弹丸着靶时的速度范围分类等<sup>[7,8]</sup>。

按弹丸着靶时的着靶角分类,有垂直穿甲和倾斜穿甲之分,倾斜穿甲又可分为小倾角斜穿甲和大倾角斜穿甲,一般认为着靶角小于  $30^\circ$  时为小倾角,大于  $60^\circ$  时为大倾角。

按装甲的结构和材料特性分类,可根据靶板的厚薄程度分为薄板穿甲、中厚板穿甲、厚板穿甲和半无限厚靶。

按弹丸的结构和材料特性分类,可按弹丸的长径比分为普通穿甲弹和长杆弹。按制造穿甲弹的材料可分为合金钢、碳化钨(WC)、钨合金(W合金)和铀合金(U合金)等。

按弹丸着靶时的速度范围可分为低速穿甲、高速穿甲和超高速穿甲。

### 1.2.2 穿甲作用的应变率范围

穿甲作用是碰撞问题的一个方面,弹—靶作用时所对应的应变率范围为  $10^2 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ ,处于弹性碰撞和流体碰撞之间的较大范围内。在这样高的应变率条件下,材料的力学性能和静态负荷下大不相同,如钨合金在静态加载条件下,表现为脆性破坏,而在冲击载荷下,当其应变率达  $10^2 \text{ s}^{-1}$  以上时,表现为流动性很好的塑性破坏,其强度极限也有大幅度提高,常达静态值的 1.5 倍,且随应变率提高这种效应更加显著。但这里的应变率指受侵彻影响的材料的整体应变率,在应变产生局部化时,部分区域的应变率甚至可达  $10^6 \text{ s}^{-1}$  或者更高。这时,在材料的微结构中出现绝热剪切带。

## 1.3 靶板

在现代战场上,穿甲弹对付的主要是飞机、军舰、自行火炮、装甲运兵车

及各种类型的坦克等这些装甲目标，其中，尤其以坦克为主。目标的装甲部分都可以认为是穿甲弹的靶体。这些靶体因其结构和材料性能的不同，可分为三类：均质靶和非均质靶、三层间隔靶板和复合装甲靶板。

为了理论和试验研究的方便，对靶板做了以下几个必不可少的假设：

- (1) 局部影响的假设。
- (2) 忽略靶板的整体运动。
- (3) 忽略一切热效应。
- (4) 所有的靶板都是平面的。
- (5) 靶板的初始应力为零。

为研究方便，在上述假设的基础上对靶板按厚度进行分类。根据局部性假设，可把靶板看成横向尺寸无限大，因而可以通过靶背表面对侵彻影响的大小来衡量靶板的厚薄。靶背表面效应传递所需的时间长短可以把弹—靶的几何尺寸联系起来。假设靶背表面效应是以应力波速率传播的，那么在应力波在弹丸内完成一次传播的时间内，靶板中波的传播次数为：

$$n = \left( \frac{c_t}{c_p} \right) \left( \frac{l}{b} \right) \quad (1.1)$$

或者用量纲为一的量表示为：

$$n = \left( \frac{c_t}{c_p} \right) \frac{(l/d)}{(b/d)} = \left( \frac{c_t}{c_p} \right) \left( \frac{\lambda}{c_e} \right) \quad (1.2)$$

式中， $c_t$ 和 $c_p$ 分别表示应力波在靶板内和弹丸内的波速； $l$ 为弹长； $d$ 为弹径； $b$ 为靶厚； $\lambda=l/d$ 为弹丸的长径比； $c_e=b/d$ 为靶板相对厚度。规定当 $n \geq 5$ 时，为薄靶板，在弹—靶作用过程中，在整个靶板厚度方向上不存在应力梯度的变形梯度；当 $1 < n < 5$ 时，为中厚板，在整个或几乎整个侵彻过程中，靶板远方边界表面对变形过程都有明显的影响；当 $n \leq 1$ 时，为厚靶板，仅仅在弹丸显著地侵入靶板后，其远方边界才会对侵彻过程发生影响。本书所研究靶板的 $n$ 值大都在1附近，属于中厚板的范围。

根据靶板在碰撞过程中所出现的各种现象，可以区分弹丸着靶的速度范围。当着速很低时，靶板只产生弹性变形，这是实验室中经常遇到的低速范围。当

撞击速度达到和超过某一极限值，或者弹体，或者靶板或两者的碰撞应力达到材料的压缩屈服极限时，它们将产生永久变形，这种变形通常是一种较为复杂的力学过程。在穿甲问题的速度（大于使材料压缩屈服的速度极限）范围内，各种现象都会在弹靶材料中产生，其中包括弹性、塑性和流体动力学的波传播，以及造成局部或整体的变形和摩擦生热等。在更高的速度下，当变形速度超过固体中压缩波的传播时，就会在材料中产生冲击波，碰撞时会发生粉碎、相变、汽化甚至冲击爆炸等现象。

在弹丸的冲击作用下，比较常见的靶板破坏形式归纳起来有以下八种类型：初始压应力波造成的轴向（靶板背侧）破坏、脆性靶的径向断裂破坏、崩落破坏、冲塞、靶前花瓣形破坏、靶后花瓣形破坏、脆性破碎、延性扩孔。其中，对钢靶来说，又以冲塞穿甲、花瓣形穿甲、延性扩孔穿甲和破碎形穿甲四种形式最为常见。这几种破坏形式如图 1-1 所示<sup>[7]</sup>。

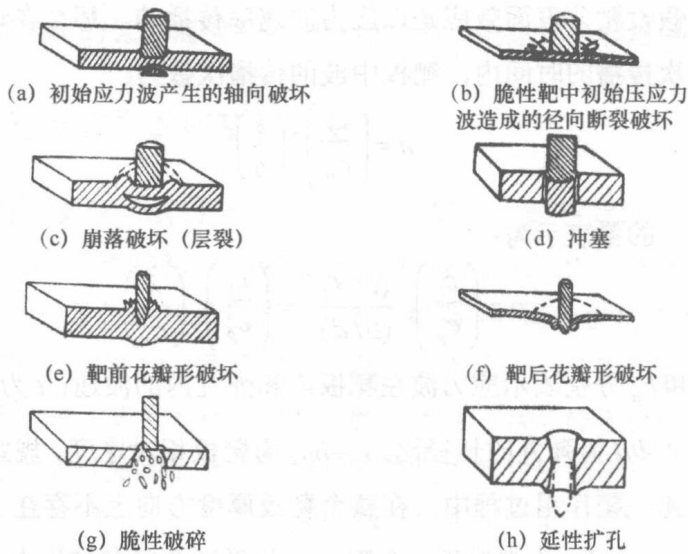


图 1-1 比较常见的靶板破坏形式

上述各种典型的靶板破坏现象，主要是指对靶板正面垂直射击时出现的。当靶板相对于弹丸着靶弹道倾斜时，其现象有所不同<sup>[5,6]</sup>。靶板的法线与弹丸着靶弹道之间的夹角称为着靶角。当着靶角在  $20^\circ$  以内时，穿甲现象与垂直穿甲的现象基本相同；但当着靶角大于  $30^\circ$  时，穿甲现象则显著不同，此时容易发

生“跳弹”，即弹丸在装甲板上划一条浅沟“跳飞”出去了。由于现代坦克的前装甲倾角均大于  $30^\circ$ ，因此，研究跳弹发生条件和防跳弹的办法对装甲防护和穿甲弹的设计均有重要的意义。

## 1.4 弹体的碰撞现象

弹体和靶板的碰撞现象和许多因素有关，研究工作者非常关心弹体在撞击后的情况。一般弹体在撞击后的三种运动形式为嵌埋、穿透和跳飞，其形状的三种可能性为完整、变形和破裂。其中，完整指弹体保持完整和原有形状，变形指弹体形状发生较大变化，破裂指弹体破裂成两块以上的散块。有时人们把破裂细分为两类，一类称为破裂（破裂为两三块），另一类称为粉碎（破裂为许多块）。弹体碰撞后有九种可能的形态如图 1-2 所示<sup>[8]</sup>。

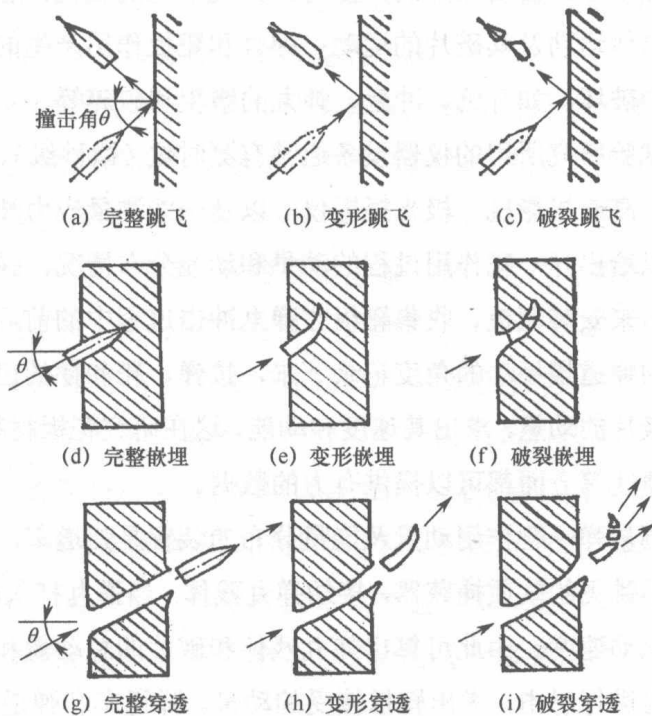


图 1-2 弹体碰撞后的九种可能形态

## 1.5 材料高速变形的动态行为及试验方法

### 1.5.1 穿甲过程中的力学问题研究

关于穿甲过程中力学问题的研究进行得比较早,尤其是对火炮速度范围内(500~2000m/s)的穿甲问题已经进行得非常广泛和深入,并取得了许多令人满意的结果<sup>[7-11]</sup>。力学问题的研究主要有以下几种方法。

(1) 试验研究。穿甲问题非常复杂,试验研究是最主要的、最基本的研究手段。采用这种方法的目的是建立经验公式(包括弹靶材料性能、几何形状特征和着靶速度等弹道参量的基本关系)或用来核对理论分析方法提供的预测值。

表示终点弹道过程特征的基本参量为弹丸着速、着靶前飞行方向和方位、系统各部件的外形等。需要测量的参量有:弹丸轨迹的变化,包括弹体破片的轨迹;靶板的总体运动及其破片的运动;弹丸和靶板作用产生的外形变化,包括各种机制下的破坏,如开坑、冲塞、弹丸的镦粗和破碎等。

穿甲作用试验研究所用的仪器设备通常有测时仪(微秒级)、弹道摆、X射线闪光摄影仪、高速摄影机、极光摄影仪,以及一些测量应力波效应的设备。

弹道摆可以给出弹—靶作用过程的动量和动能分布情况。弹道摆是悬挂着的单摆,可以用来安装靶板、收集靶板在弹丸冲击过程中的前后破片。将被弹丸或破片打击的弹道摆摆动的角度记录下来,按弹、靶和摆的已知质量,就可换算出靶板或破片的动量,求出其速度和动能,这在研究靶板材料的抗弹能力、弹丸的结构合理性等方面都可以提供有力的数据。

另外一种测量弹—靶作用动量及能量分布的装置是弹道车,弹道车内装有使破片嵌入而不跳飞的软质捕获器,接纳弹丸残体,当弹丸打入时,使车运动,测出弹道车的运动速度,由此可算出弹丸残体和破片的总动量和动能。也可以将靶板放在车内进行射击,求出靶板接受的动量。弹道车和弹道摆与X射线闪光摄影仪配合使用,可记录穿甲的整个表现过程。从所获得的照片中可处理出

弹丸洞穿靶板时的位移、速度、加速度和受力情况随时间的变化规律。

为了节省大量的弹靶材料和时间，并且比较方便地测出穿甲过程的各种数据，观察各种穿甲现象，通常采用模拟的试验方法。模拟方法的理论基础是相似理论和量纲分析。

其中一种试验方法是带有传感器的弹靶碰撞试验，这种方法早在 20 世纪 50 年代就有人使用。它是指在靶板或弹体内装传感器测量仪表来测量弹—靶碰撞过程中弹—靶的响应参数。如在靶板内或弹体内贴上电阻应变片测量碰撞过程中的应变场。

(2) 经验（半经验）公式。由于试验条件、理论研究及计算能力方面的限制，人们往往在宏观上根据试验的初始条件和结果，以及对发生穿甲现象的理解，总结出有一定近似程度的经验公式，来指导弹、靶的设计工作。由于这种方法涉及的主要参量少，使用起来直观、方便，所以现在仍被工程技术人员广泛使用。但是，由于公式是根据一定经验总结的，其中包含的参量又少，不可避免地使公式预估的量带有片面性和近似性，同时，采用经验公式也不可能使人们增加对复杂的穿甲现象和发生机理的理解。

通常，在经验公式中包含的各种参量有：弹丸的尺寸（弹径  $d$ ，长径比  $\lambda$  等），质量  $m$ ，弹靶材料的特征参量，如下屈服强度  $R_{eL}$ 、硬度 HRC、密度  $\rho$  等，靶板厚度  $b$  及着靶速度  $v_0$  或极限穿透速度  $v_c$ ，着靶角  $\alpha$ ，侵彻深度  $L$ ，弹坑容积  $V$  等。不同的公式因描述的穿透物理图像不同，它包含的参量也不同。在这些公式中，Martel 假定是许多有关装甲侵彻理论分析的基础。Martel 在 1897 年第一个借助于物理描述写出了关于冲塞破坏侵彻过程的关系式。Martel 假定是：将一个任何形状的柱体侵入塑性变形材料中所需的功与其所排开的弹坑体积成正比。对一定的弹靶材料来说，弹坑容积和弹丸能量的关系与弹丸的种类无关，但是，弹丸材料和弹丸种类不同的时候将影响到弹坑形状。较硬材料的弹丸所产生的弹坑形状比较狭窄，强度低的弹丸产生的弹坑较粗宽。在此基础上，人们通过对大量试验的分析，得到常用的经验公式有很多，例如：

$$\text{莫林 (Morin):} \quad L/d = 2mv_0 / (a_1 \pi d^3) \quad (1.3)$$

$$\text{第代夯 (Dideon):} \quad L/d = a_2 \rho_t \ln(1 + a_3 v_0^2) \quad (1.4)$$



$$\text{海利 (Helie): } L/d = [4.608m/(a_4 d^3 \pi \rho_t)] \ln(1 + a_5 v_0^2) \quad (1.5)$$

$$v = a_7 \left( \frac{1}{2} m v_0^2 \right) \quad (1.6)$$

$$\text{德马尔 (De.Marre): } E_0 = a_6 d^{1.5} b^{1.4} \quad (1.7)$$

式中,  $E_0$  为穿透靶板所需要的弹丸最少动能;  $a_1, a_2, \dots, a_7$  均为有量纲的常数。

由于经验公式是按照一定的试验现象, 根据大量数据统计而建立起来的, 有很大的局限性, 所以使用这些公式时要特别注意它们的条件。如果超出了公式的适用范围, 预报值的误差就会很大, 甚至会得出荒谬的结果, 所以使用时要特别小心。

(3) 分析模型。分析模型是根据弹—靶系统相互作用的物理图像导出各参量之间的一组关系式。与经验公式有些相像, 但由于考虑了比较合理的简化物理模型, 从而引进的参量多一些, 在不失其简易性的同时使关系式比经验公式有所改进, 因此可在一定程度上解释某些现象, 显得更有道理。

有时, 一些基本物理量之间的关系可以通过经验规律和物理概念相结合用简单的关系式即可表达, 例如:

$$F = a + bv + cv^2 \quad (1.8)$$

式中,  $a, b, c$  为经验系数。式 (1.8) 右边三项分别代表弹丸侵彻固体介质时受到的静抗力 (与靶板材料性质、弹径有关, 与速度无关)、黏滞抗力 (与摩擦有关, 与速度一次方成正比), 以及靶板中与弹体接触的材料被弹体加速所产生的动抗力 (被弹丸推动加速的靶板材料的惯性力)。对于不同的靶板破坏形态, 力  $F$  的组成可能不同。在建立分析模型时, 常常采用如下限制性假设: 弹丸为理想刚体, 靶板为理想塑性状态, 靶板按特定的模式发生破坏 (如冲塞、崩落、侵彻和延性穿透等)。

分析模型有较强的理论根据, 所以它对穿甲问题有较深刻的揭示, 可以加深人们的认识, 但是, 因为分析模型也是针对某种特定的穿甲机制提出的, 所以它的使用也受到一定范围的限制, 由于实际穿甲过程复杂多变, 而分析模型往往是单一机制的, 并且有时采用经验参量或一些不易得到的材料参数, 这使