

钱伟长 编著

穿甲力学

国防工业出版社

穿 甲 力 学

钱伟长 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地论述了弹体和靶体的撞击所产生的侵入和击穿现象，包括了近三十年来关于穿甲力学的主要进展。其中有一部分是作者的研究成果。

本书共分九章，内容包括弹体、靶体，撞击的实验和理论；半无限靶体、薄靶、中厚靶、厚靶的各种理论和经验计算公式以及一些计算方法。本书特别强调撞击的弹塑性理论。

本书可供有关国防科学研究人员、工程技术人员和高等学校师生参考。

穿 甲 力 学

钱伟长 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 12 $3/4$ 322 千字

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷 印数：0,001—1,450册

统一书号：15034·2753 定价：2.80元

序

自有枪炮以来就有穿甲力学。穿甲力学亦称末端弹道学。晚近由于科学技术的发展，穿甲力学和陨石撞击、钻井、入水诸技术相联系，总称高速和超高速撞击动力学，或简称撞击力学。

穿甲力学的发展约分三个时期。第一个时期是从十八世纪到本世纪三十年代二次大战前夕。在这个时期，人们既缺乏实验工具，又缺乏必要的如塑性力学的理论基础，而主要从事事实弹射击试验，从试验中综合各种各样的经验公式，以备设计枪炮子弹和防御装甲之用。始于四十年代初期的第二个时期是由于二次大战的冲击而兴起的分析理论时期。这个时期有着各种重要的理论发展。这种发展是密切地联系着塑性力学、粘塑性力学特别是塑性动力学的发展而进行的。著名的英国力学权威 G. I. 泰勒有关动力屈服强度的测定和弹塑性扩孔理论的建立等工作，把穿甲力学的研究活动推向了一个理论高潮。在这个时期内，人们着重分析靶板的各种破坏模式，根据不同模式建立不同的有效的分析理论。在四十年代，美国加利福尼亚大学和普林斯登大学各自建立的穿甲力学研究组，从收集整理历史数据资料到建立有效分析模型，进行了不少工作。在法国、德国同样也有类似活动。这个时期大概结束于五十年代后期。第三个时期是从六十年代初起一直到现在，约有二十年的历史。这个时期的特点有三个方面：（1）新的实际问题，如陨石与宇宙飞船和人造卫星的撞击、鱼雷入水和地质勘探的钻井问题的提出，扩大了穿甲力学的对象和范围。人们开始研究超高速撞击、多孔松散介质和半无限靶体等问题。（2）创设了各种各样近代化技术试验装备，如轻气枪、高速照相技术以及计算机激光联合测定弹速技术等，大大推进了在可控条件下的科学试验，从而越出了长期以来用实弹打靶试验的束缚。在实

弹试验中一般不能控制实验条件,并不能有目的地进行研究工作。

(3)计算机的发展,给撞击过程的计算带来了极大的进步。人们有可能考虑多种因素联合作用下的撞击破坏过程,从计算空间场的数值结果来创立更合理的分析模型。到目前为止,业已有几十种有效的计算程序供研究设计工作使用。这一个时期是穿甲力学或高速和超高速撞击力学最兴旺发达的时期。在世界各国从事这一方面工作的科技人员数以万计。以美国为例,在很多大学有教授从事这一方面的科研工作;在国防科研机构方面,有马利兰州阿般丁靶场的美国弹道研究所,弗兰克福特兵工厂军械研究所;海军方面,有加利福尼亚中国湖的海军武器中心,摩各角的海军导弹中心,以及海军战术研究中心等;空军方面,有爱葛林空军基地的空军武器研究所,赖爱脱-派脱森空军基地的空军材料研究所,柯脱兰空军基地的空军武器研究所,诺顿空军基地的空间和弹体系统组织等。在民间,也有许多大企业设立了这方面的研究机构,其中有名的如:通用电气公司(G. E)在费城的飞弹和空间部,通用汽车公司(G. M)在加利福尼亚圣拜勃拉的国防研究所、加利福尼亚拉火牙的“系统科学和软件”(SSS)公司,华盛顿的美国国防战略协会等。其它还有象加利福尼亚大学的罗仑兹李佛玛研究所,丹佛大学的丹佛研究所,麻省理工学院的空气弹性力学和结构研究所,密苏里大学的岩石力学和爆炸研究中心,新墨西哥州的山提亚研究所,斯坦福大学的普尔脱研究所等,都是长期从事这方面的研究工作的。在加拿大,有魁北克的加拿大军器研究和发展中心。在法国,有圣路易的弹道研究所的法德武器研究中心——亦称法德弹道研究所。它们活动的活跃性可由下述情况看出:在1964年时,仅轻气枪加速器的设备,美国就有151套。从1955年~1969年,美国召开了八次超高速撞击的学术会议,自七十年代起,改由AIAA学会召开。从1974年起,还有国际弹道学术会议,每两年举行一次。从六十年代中期开始的国际高压学术会议和高速变形时有关材料性质的一些会议,都是交流和推动这一方面工作的发展的。根据调查,在最近二十年来,

这一方面公开发表的论文和报告就有2100多篇，在本书中就引用约450篇。

到现在为止，刚性弹体的正面撞击靶板和半无限靶体的工作都已证明是有效的。对于挤凿破坏的研究更加成功，对薄板花瓣型击穿的研究也是成功的。对尖头弹体的弹塑性扩孔过程的研究，为尖头弹体的击穿理论创造了很好的条件。在超高速撞击方面，流体动力学理论解决了陨石撞击问题。在分析理论方面，动量守恒、能量守恒和阻力定律理论都已形成，有不少工作是可以信任的。在实验方面，取得了长足进步，用加速器把靶体装在空头弹体上向弹体撞击的技术，是最重大的突破，可获得可靠的按各种参数安排的实验数据，为理论的进一步发展创造了客观条件。1977年由美国联合技术协调组编制的，在马利兰州阿般丁靶场美国陆军弹道研究所发行的《侵入公式手册》，就集中记录了所有这些数据，为进一步研究提供了很完备的根据。当然，这二十年来，最大的进步在于数值计算。到目前为止，不仅有上百种计算程序可资利用，而且可以利用这些程序和实验结合在一起，设计为各种目的服务的弹体和靶板。

但是，远不是一切问题都解决了。一般说来，过去的工作大部分都是为处理某一特殊问题而进行的，它们都有局限性而互不联系，各种分析理论也千差万别或互相矛盾，任务完成后便不再有人过问。例如，对于超高速撞击的材料性能研究，当陨石问题提出来后，宇航部门提供了大量资金而红极一时，工作飞速发展，但1964年后，因宇航问题在工程上获得初步解决，不久即无人问津了。我们现在正处在这样一个时代——怎样把这些在局部领域中行之有效的、分析的和半分析的理论统一起来使之成为一个系统，建立几个指导原则，在特定的条件下，按这些指导原则把这个一般的系统简化为特定的系统。当然，要做到这点，人们对繁杂的实验结果还应进一步消化和理解，只有在这个基础上，才有可能建立一个较完备的理论体系，它包括一切特殊的系统和特殊的撞击条件。这就是说，我们现在对于高速和超高速的撞击

力学研究而言，正处于从特殊到一般的科学发展过程中。

对于数值计算而言，人们从运动方程和本构关系的微分方程出发，用连续介质理论建立了计算程序。我们相信，这些计算是可以给出我们所要求的信息的。然而先不论目前的计算程序既耗时间又耗资金，而且是非常复杂的。我们必须指出现在所有的计算中，常常蕴藏着重要的本质性的细节因我们察觉不到而被忽视。同时步长问题在目前还不能很好地控制，有时过大，有时过小；而且在动力方程的质量分配上，一般的集中质量法还是人为的，有时和实际情况出入很大。除了以上一般性的问题以外，还有不少方面，在过去很少进行工作，但恰好是很重要的，到目前为止，还没有很好地解决。

(1) 在分析模型方面，怎样决定弹道极限速度和破坏情节(如凿块的重量、尺寸)，在目前我们都是根据经验决定的。

(2) 在弹坑理论方面，还没有什么有效合理的分析模型，我们对弹坑邻域的非弹性区域、弹坑的受压过程、以及变形过程都不清楚。对这一方面的工作首先还缺乏可靠的实验观察和实验手段。这一方面的研究对于斜击、弹体轴线和弹道轨迹线的交角取向，以及变形弹体的研究都是密切相关的。

(3) 在弹体阻力问题中，一般都只考虑了惯性力、靶的压缩和剪切力、摩擦阻力三种力，而忽视了与靶板隆起和盘状变形有关的力。这个力对于弹道极限速度附近的现象，有密切关系，和凿块的运动也有关系。

(4) 斜击的问题，在这方面的研究很少。特别在厚靶板、中靶板和半无限靶体方面，这种研究是很重要的。入水问题中也大量是斜击问题。

(5) 弹体轴线和射击线方向不同撞击问题，这一方面的研究很缺乏，而它实际是决定弹体跳飞、反弹的重要因素。

(6) 旋转弹体的撞击问题，对这一方面完全没有人研究过。

(7) 动力条件下的本构关系，目前我们都采用静力条件下

的本构关系。在动力条件下，这类静力本构关系是否通用，仍属疑问。自从泰勒提出了动力屈服强度可以比静力屈服强度高几倍以后，人们对动力材料性能有了新的认识，但对在高速变形下的本构关系还是缺乏研究。

(8) 破坏准则，对这问题，特别是多维应力破坏准则，它们和应变速度以及温度的关系，研究很少。这是目前数值计算中亟待解决的问题。

(9) 热学和力学耦合和散热问题，最近热学和力学耦合理论在航空部门有关结构上得到了很重大的发展，但在撞击问题上还没有考虑过这种耦合理论。

(10) 变形弹体问题，弹体在撞击中发生永久变形，这是影响到撞击过程全局的问题。但是，由于变形引起的问题很复杂，一般都略去弹体变形，在认为弹体是刚性的条件下进行研究的。这里也是一个模型问题，是从实验结果观察研究一个合理而易于处理的变形模型，就能把撞击问题的研究大大提高一步。

以上诸项只是举其大端，略述一二。可见对穿甲力学应该认为是方兴未艾的一门学问。

本书是应华中工学院邀请，为华中工学院和《应用数学和力学》编委会合办的应用数学和力学讲座所编著的讲义。该讲座将有全国高等学校有关教师、研究生，以及国防科研各有关部门的科技人员参加。希望通过本书能总结和介绍国外有关穿甲力学的进展，并能推动国内这一方面的工作。

本书的编著，得到华中工学院党委的关怀和积极支持，才能在庐山以较短的时间完成二十余万字的编著工作，特此表示感谢！在庐山期间，也得到庐山区党委和云中宾馆的领导和许多工作同志的亲切照顾，并此致谢！

本书中有若干章节是本人十几年来累积的工作，希能为祖国的国防现代化有所贡献。但有不少原稿业已毁失，只能按记忆写出大纲，因时间短促未及补足细节，如有不尽意处，请读者原谅并指正。

钱伟长于庐山
1981.9.14.

目 录

第一章 引论	1
§ 1.1 穿甲力学的历史	1
§ 1.2 一些基本术语的定义	3
§ 1.3 撞击分类	5
§ 1.4 靶元在撞击中发生的现象	6
§ 1.5 撞击相图	18
§ 1.6 理论处理方法	22
参考文献	25
第二章 穿甲力学的理论和实验方法概貌	29
§ 2.1 穿甲力学概貌	29
§ 2.2 实验结果的经验公式	29
§ 2.3 军用枪炮速度的分析模型	32
§ 2.4 超高速撞击的分析模型	34
§ 2.5 数值方法	35
§ 2.6 实验方法	54
§ 2.7 超高速弹体加速器	58
参考文献	71
第三章 弹体特性	78
§ 3.1 弹体分类	78
§ 3.2 动能侵入体(穿甲弹)	78
§ 3.3 装药的侵入体	80
§ 3.4 弹体参数	83
§ 3.5 弹体和轨迹线的取向	85
§ 3.6 刚塑性弹体、撞击变形的泰勒理论(1948)	86
§ 3.7 泰勒理论的修正(1982)	102
§ 3.8 刚塑性弹体和变形靶体撞击的里希脱理论(1977)	107
§ 3.9 刚塑性弹体和变形靶板的穿透撞击的里希脱 理论(1977~1978)	112
参考文献	118
第四章 靶体特性	119

§ 4.1 靶体类型	119
§ 4.2 决定靶体模式的各种假设	121
§ 4.3 局部影响假定	121
§ 4.4 刚体运动假定	122
§ 4.5 略去热效应的假定	122
§ 4.6 厚度判据	123
§ 4.7 靶元材料	124
参考文献	131
第五章 半无限靶体	134
§ 5.1 引论	134
§ 5.2 经验公式	137
§ 5.3 空穴膨胀理论	140
§ 5.4 数值计算	147
§ 5.5 EPIC 程序的基础(拉格朗日坐标)	148
§ 5.6 实验程序	161
§ 5.7 斜角撞击的轨迹线的计算	163
参考文献	168
第六章 薄板靶体的侵入和击穿(上)	170
§ 6.1 薄板靶体在弹体撞击下的特点	170
§ 6.2 经验公式	170
§ 6.3 分析模式	176
§ 6.4 未击穿的靶板变形理论之一——弹塑性靶 板变形理论(能量理论)(1971)	177
§ 6.5 未击穿的靶板变形理论之二——克莱-维尔 肖弹性粘塑性变形理论(1971)	181
§ 6.6 未击穿的靶板变形理论之三——弹性粘塑性 靶板大挠度理论	197
§ 6.7 尼龙或其它织品的防弹衣撞击分析	208
参考文献	214
第七章 薄板靶体的侵入和击穿(中)	218
§ 7.1 刚性钝头弹体对薄板靶体挤凿破坏的宏观理论	218
§ 7.2 刚性平头弹体对薄板靶体的挤凿过程的粘塑性	

理论(毕推尔-台维斯1963)	227
§ 7.3 尖头弹体对薄靶板的扩孔问题	237
§ 7.4 尖头弹体对薄靶板的泰勒塑性扩孔理论(1948)	238
§ 7.5 尖头弹体对薄靶板的弗拉埃堡格塑性扩 孔动力理论(1952)	256
§ 7.6 在泰勒扩孔弹塑性理论基础上的弹体运动理论	278
§ 7.7 扩孔的孔口对称性问题	280
§ 7.8 筒形弹孔的汤姆逊理论(1955)	281
参考文献	287
第八章 薄板靶体的侵入和击穿(下)	289
§ 8.1 截顶锥形弹头的弹体的击穿运动(勃朗1964)	289
§ 8.2 花瓣型击穿和采特-保尔动量理论(1957~1959)	290
§ 8.3 截顶弹头的花瓣型击穿的采特-保尔动量理论(1958)	298
§ 8.4 穿越靶板时的复合抗力函数模式	312
§ 8.5 变形弹体单一挤凿机理的弹塑性流体动力学理论	317
§ 8.6 变形弹体多阶段挤凿机理的塑性力学理论(1974)	321
§ 8.7 分为单纯压缩和没有压缩的两个阶段 的弹塑性挤凿理论	326
§ 8.8 靶元破坏速度的诸估算公式	335
§ 8.9 流体动力学撞击理论简述	336
§ 8.10 斜击时的运动方向变化, 里希脱-尹泼荪理论(1963)	340
§ 8.11 斜击时截顶锥头弹体的采特-保尔动量理论(1959)	344
§ 8.12 有关薄靶板的数值计算程序	364
参考文献	366
第九章 中厚靶板和厚靶板的撞击	369
§ 9.1 中厚靶板和厚靶板在撞击中的特点	369
§ 9.2 中厚靶板和厚靶板的经验公式	369
§ 9.3 培雷扩孔理论	375
§ 9.4 波恩-福赫斯的刚弹阻力厚板模型	378
§ 9.5 求击穿后剩余速度的里希脱能量法	380
§ 9.6 尖弹击穿厚板的五阶段理论	381
§ 9.7 潘松的半经验阻力公式(1974~1976)	383
§ 9.8 超高速撞击	385
§ 9.9 厚靶板的实验情况	392
§ 9.10 有关中厚和厚靶板的数值计算	393
参考文献	395

第一章 引 论

§ 1.1 穿甲力学的历史

穿甲力学在习惯上是指高速和超高速弹体撞击靶体后，钻入或穿透靶体的力学。它实际上是研究弹体接触靶体以后的弹道运动。所以，人们在早期把它当作弹道学的一部分，称之为末端弹道学。●

对穿甲力学的基本认识，是由人类长期斗争经验所形成的。古代的箭头就是弹体，盾和甲就是靶体。弹体的破坏作用主要靠弹体的重量、速度和刚度。古代人类用金属箭头替代石制箭头，其目的就是为增加弹体的重量和刚度；从弓发展成弩，就是为增加弹体的速度。以后发展了抛石机，即古代的炮，无非是增加弹体的射程和重量的一种措施。在另一方面，人们用盾和甲来抗拒箭矢的撞击。靶体的抗拒作用主要依靠靶体的刚度和厚度，当然重量也有一定的作用。用碉堡和城堞作为靶体，无非是利用它们的厚度和重量，当然城堡的建筑材料如砖石本身，也有刚度作用。

穿甲力学的科学基础，是在十九世纪初形成的。拿破仑时代的法国军事工程学院中，开始有关穿甲力学的科学试验工作。邦锡莱(J. V. Poncelet)在他的《工业力学教本》(1829~1835)^[1-1]中曾综合了当时的试验结果，提出了有名的邦锡莱公式。这个公式曾被西欧兵工人士延用了五十年之久^[1-2]。在有名的法国经典著作，在海莱(F. Helié)的《弹道试验学》(1840)^[1-3]中，曾有四章叙述了各种有关穿甲试验的数据和许多经验公式。接着德国的克鲁伯(F. Krupp)在他的著作《装甲板的穿透》(1885和1890)^[1-4]中提供了更多的资料。

● 弹道学中又称终点弹道学。——编者注

第二次大战开始不久(1941),美国的罗伯森(H. P. Robertson)写的《末端弹道学》^[1-5],曾汇集了过去的许多试验结果,按靶体的材料(即按混凝土、钢、木、土和沙)分类处理,并汇集了有关的经验公式以及钻穿的各种机理。在第二次世界大战中,美国曾对这个问题进行了不少研究试验,其结果都已汇集在一本国防科委(NDRC)的专题报告^[1-6]内。它阐明了靶体破坏的概念以及和各种有关因素之间的关系,它列出了不同弹体的影响、垂直撞击和斜向撞击以及靶体参数之间的关联。本问题于是按靶体材料分为若干类(它是分为装甲板、混凝土板、塑料掩蔽层和土层),对每类靶体提供了许多定性的、唯象的和经验的资料。法国萨脱林(R. Sutterlen)曾写过一本专著(1966, 1967)^[1-7],涉及整个法国弹道学的研究,其中有很大一部分讲末端弹道学。它报导了许多经验的和半经验的力-钻穿公式,其中包括了斜向入射、钝头和锥头的弹体等问题。它也报导了有关力的定律、透射后的子弹速度、以及易碎子弹的质量损失等问题的各种研究模型。另有两种总结报告(1961, 1962)^[1-8, 1-9],也有较多处涉及穿甲力学的某些方面。

近十年来,有不少关于弹体射入、钻进靶体的研究,例如:美国海军兵器实验室(NWL)曾公布^[1-10]了弹体钻进靶体的经验数据及其有关曲线,还有关于末端弹道学的其它资料;法国杜福尼(M. Duforeaux)在1971年公布^[1-11]了有关弹体钻进硬靶的半经验公式,以及有关物理模型;里希脱(R. F. Recht)在1972年公布^[1-12]了钻穿过程的半经验模型的简编;萨特等(A. I. O. Zaid, A. El-Kalay, F. W. Travis)在1973年^[1-13]公布了有关穿甲力学的广博的文献目录;戈德斯密司(W. Goldsmith)在1974年^[1-16]发表了描述刚性弹体穿过薄板靶体过程的分析解;柏刻曼(M. E. Backman)在1976年^[1-14]的最新教本《末端弹道学》中着重讲述了弹体的内弹道、外弹道和末端弹道的基本理论,以及有关弹头的分析。所有这些资料都涉及穿甲力学的各个方面。晚近^[1-16],柏刻曼和戈德斯密司又联名发表(1978)了弹体

钻入靶体的综合报告。在同年, 国际工程科学杂志^[1-17]出版了专集, 专门从理论和实践各个角度讨论了这一问题的最新发展。

另一方面, 从五十年代后期和六十年代中, 超高速撞击受到了广泛的注意。美国在 1955~1969 年间十五年来, 连续召开了八次超高速撞击的会议, 会议的文集^[1-18]提供了不少分析和轻气枪实验的研究成果。麻省理工学院的汉曼 (W. Herrmann) 和琼斯 (A. H. Jones)^[1-19], 曾汇集总结了有关超高速撞击产生的弹坑和钻进靶体的所有知识(1961)。美国兰德公司的皮约克(R. C. Bjork)^[1-20], 总结了人们所知道的超高速撞击的一切物理过程(1963)。通用汽车公司国防研究所的基里斯曼(D. R. Christman 等^[1-21]在 1963 年也发表了一份总结报告, 对流星体撞击的超高速撞击现象, 从经验处理、理论处理和工程考虑等方面予以探讨, 每节都有详尽的文献资料目录。在同时期(1963)还有两篇有关流星体撞击的报告^[1-22, 1-23], 也都附有丰富的参考文献目录。此外还有一篇有关超高速射流和弹体对岩石作用的总结报告(1968)^[1-24]。最后京斯劳(R. Kinslow)主编的《高速撞击现象》(1970)^[1-25]一书, 发表了不少这方面研究的最新成果。

在1963年, 美国航空界曾召开了高速撞击下的结构力学会议, 会议上宣读了一批有价值的论文^[1-26]。在 1973 年, 美国兵工界曾召开了固体力学兵工会议, 研究了穿甲力学、靶体的断裂、弹体的分裂、碎裂和靶体的弱点等, 以及有关军工弹道学问题^[1-27]。还有三本较近期出版的专著^[1-28, 1-29, 1-30], 也有大量涉及高速撞击下材料反应的资料。

从上述情况可以看到, 由高速和超高速撞击所产生的穿甲力学的各个方面, 在最近二十多年来, 有大量的科技人员在进行着工作, 并已取得了很大进步。

§ 1.2 一些基本术语的定义

由于穿甲力学是长期以来通过兵工的、物理的、材料学的和力学的人员, 从不同专业角度努力探讨而后综合形成的学问, 各

家用词并不统一。所以,本书将对一些基本术语规定统一的定义。

(甲) 撞击靶体的物体规定有三种通称名词: (一) 弹体 (projectile) 指满足弹道性能的一切物体, 如子弹、炸弹、炮弹等, 它们可以有具有特殊性能的子结构。(二) 侵入●体 (penetrator) 指纯粹用以侵入或钻进靶体而从定义上完成末端弹道作用的一切物体。(三) 撞击体 (striker) 是泛指一切从事撞击的物体, 它不受什么功能要求的限制。

(乙) 靶体 (target) 为弹体撞击的对象, 它不论是功能上或结构上, 都是自成一体的最小物体。靶体指穿甲弹体所撞击的整个构造物, 如坦克等, 而不是单纯指弹体射击时打成小孔而穿透的那块靶板。

(丙) 子结构 (substructure) 指靶体所属而有单一功能的任一构造单元。

(丁) 靶体元素或靶元 (target element) 指靶体子结构受到弹体撞击的那一部分, 它是人们为被撞击物制定物理模型时, 具有所有撞击特性的基本部件。

(戊) 侵入或钻进 (penetration) 指侵入体钻进靶体任一部分的过程。我们必须指出, 靶体的侵入, 常常是一系列弹体对子结构的撞击所得到的总结果。在这许多反复撞击的过程中, 弹体既有穿透的, 也有 embedment 的, 还有跳飞的。所以, “侵入” 的意义是包括 “穿透”、“embedment”、“跳飞” 等过程的。这里: 穿透 (perforation) 指侵入体穿越了靶元; embedment 指侵入体在接触了靶元以后, 停止 (或埋藏) 在靶元内部; 跳飞 (ricochet) 指弹体既未能穿透靶元, 又未 embedment 在靶元内部, 而是被靶元反弹回去了。

靶元以其厚度分为下列类型:

(甲) 半无限体靶元 当侵入过程不受远方边界表面的影响时, 这种靶元可以看作为半无限体靶元。

(乙) 厚靶元 当侵入体在靶元中通过了相当远的距离后,才感到远方边界表面的影响时,这种靶元可以看作是厚板靶元,或简称厚靶元。

(丙) 中厚靶元 当侵入体在靶元中通过时,远方边界表面对侵入全程都有不可忽视的影响。这种靶元可以看作是中等厚度的靶元,或简称中厚靶元。

(丁) 薄靶元 当侵入体在靶元中通过时,靶元中的应力和变形沿厚度方向没有梯度,或可以把梯度略去。这种靶元可以看作是薄板靶元,或简称薄靶元。

靶体破坏指靶体中产生了永久变化,它和**机能障碍**(dysfunction)有别。机能障碍指由于靶体破坏而造成的任一靶体子结构的功能失效。一般说来,靶体破坏总是和弹体侵入过程有关,而靶体机能障碍是由靶体作为整体与其子结构的功能关系所决定的。

§ 1.3 撞 击 分 类

弹体侵入靶体的现象,可以按各种因素分类。例如:

- (一) 按撞击时的入射角分类;
- (二) 按靶体的形状和材料特性分类;
- (三) 按侵入体的形状和材料特性分类;
- (四) 按撞击的初速度的范围分类。

其中,由于撞击速度对撞击现象的影响特别明显,而比其它因素的影响突出得多,所以人们通常都采用第四种分类,即以撞击速度的范围分类。

侵入力学或穿甲力学,有许多非军事性的应用。例如:采矿和建筑工程,宇宙飞船的保护设计,核反应堆工程,以及转动机械的设计等。在现在军用目的仍是穿甲力学研究的主要动力时,军用装备无疑是侵入体的主要发射者。所以,简要地叙述这些发射装备的特性,对于侵入速度的分类应是必要的。

最常见的发射装置是常规枪、炮。它们所发射的弹体,都是

在弹体后侧用燃烧的火药气体推进的，离开枪口或炮口的瞬时速度在500~1300米/秒之间。这个射弹的速度范围称为常规军用弹速范围，简称弹速范围。用气枪或其它实验室装置所得的射弹速度，在25~500米/秒之间，称为亚弹速范围。用落锤或其它实验装置所得到的自由落体末端速度，在0~25米/秒之间，那是最低速度范围。弹头散片和其它特种枪、炮的子弹速度，在1300~3000米/秒之间，称为高弹速范围。由于轻气枪装置^{[1-31];[1-32]}，定向爆炸的锥形装药，以及流星体运动中达到的速度，比高弹速范围更高，称为超高速范围。得到超高速的轻气枪装置，是近二十年来的实验室创造，将在下文中介绍。

§ 1.4 靶元在撞击中发生的现象

另一种区划弹体撞击速度范围的根据，是靶元在撞击中所出现的各种现象。在撞击体的撞击速度很低时，靶元只产生弹性变形，这是某些实验室中实验时经常遇到的低速范围。当撞击体的撞击速度达到某一极限值 v_{EA} 时，不是靶体就是弹体的接触应力达到压缩屈服应力 σ_{YC} 。这时靶体或弹体或两者同时产生永久变形，这种变形经常是一种较为复杂的力学过程。现在让我们首先研究弹性撞击的弹性应力和撞击速度的关系。

设有一平头柱形撞击体，以速度 v_E 垂直撞击靶体的某一平面（见图1-1）。撞击体的密度为 ρ_P ，撞击柱体上的弹性波速为 c_{oP} ，它为

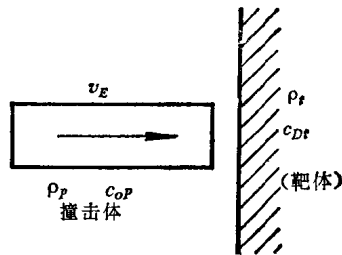


图1-1 平头柱形撞击体撞击靶体

$$c_{oP} = \sqrt{E_P / \rho_P} \quad (1.1)$$

其中 E_P 为撞击体的杨氏模量；靶体中膨胀压缩弹性波的传播速度为 c_{Dt} ，它为

$$c_{Dt} = \sqrt{[(\lambda_t + 2G_t) / \rho_t]} \quad (1.2)$$