

金属在 脉冲载荷下的 性 态

J. S. 林哈尔脱、J. 培尔逊著



国防工业出版社

金屬在脉冲載荷下的性态

J. S. 林哈尔脫、J. 培尔遜 著

李景云、周兰庭等譯



國防工業出版社

1962

出版者的話

这本书討論金屬材料在爆炸和冲击載荷作用下的性态。书中对炸药在軍事及民用工业中的应用作了簡要的介绍，还介绍了炮弹和甲板的类型和性能，以及聚能装药的应用等。本书还讲述了金屬在脉冲載荷下的快速測量方法，特别是高速照相法。

本书簡明易懂，很少运用数学公式。

本书是李景云、周兰庭、陈鉄如、張錦云、黃友才、魏惠之、李逢春、張天泰及翁配英等同志集体翻譯的，最后由魏惠之、陈鉄如、李景云、周兰庭等同志校閱。在翻譯和校閱过程中参考了本书苏联外文出版社1958年出版的俄譯本。

书中的英制单位均已按照俄譯本改成了公制。插图是按照俄譯本复制的，书中的符号也都是按俄譯本排印的。书后附有大量参考文献，正文中方括号中的数碼就是参考文献的次序号。

J. S. Rinehart

J. Pearson

Behavior of Metals under Impulsive Loads

The American Society for Metals

Cleveland, Ohio 1954.

金屬在脉冲載荷下的性态

李景云、周兰庭等譯

*

國防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第074号

国防工业出版社印刷厂印刷 内部发行。

*

787×1092 $1/32$ 印張 7 $5/8$ 162 千字

1962年9月第一版

1962年9月第一次印刷

印数：001—600册 定价：1.95元

統一书号：15034·635

目 录

序言.....	4
第一章 脉冲载荷的概念.....	5
第二章 材料在脉冲载荷下的性能.....	14
第三章 瞬时扰动的传播.....	32
第四章 炸药与爆炸.....	49
第五章 脉冲载荷的特性.....	55
第六章 观察方法和装置 (非摄影法).....	65
第七章 高速照相技术.....	82
第八章 非脉冲载荷下的塑性性态.....	104
第九章 脉冲载荷下的破坏现象.....	122
第十章 脉冲载荷下的塑性变形.....	143
第十一章 脉冲载荷作用下结构的变化.....	167
第十二章 冲击下的性态.....	187
第十三章 炸药的实际应用.....	208
第十四章 結論.....	226
参考文献.....	231

序 言

本书討論脉冲载荷的性质，指出发生这种载荷的条件，并叙述材料（主要是金属）和物体系统在承受高速载荷的短期作用时，所发生的主要现象。

研究脉冲载荷下性态的方法，常常与一般载荷下所采用的研究方法有根本的不同。而适用于静止情况下的计算方法，也常常不能应用于脉冲载荷的情况。关于脉冲载荷下材料和系统强度的合理计算，可能是现今设计工程师所遇到的最常争论的问题。除此以外，材料对脉冲载荷的极高而又短促的压力所起的反应，也是物理学家极为重视和极感兴趣的问题。在这种情况下具有决定意义的塑性流动和破坏过程的基本性质，目前才开始有所明了。

我们的出发点是很广泛但又是一般的。可以相信，对此感兴趣的工程师和物理学家，通过本书将对脉冲载荷现象本质的了解有所得益；对其工程应用有一轮廓概念；并可掌握在此方面作进一步研究的主要问题和发展方向。也许在某些个别的问题上，由于叙述的简略和一般化而使专家感到失望，但本书终究可以扩大人们的眼界。书内所论述的基本概念和观点集自很多来源，但大部分实例则取自作者本人的研究。（下略）

第一章 脉冲载荷的概念

引 言

物体对外加力的反应常常是复杂的，并且，这种反应常常难于描述。本书叙述在这样一种载荷下所产生的作用，即当炸药与物体相接触而爆炸时，或当一物体冲击另一物体时所发生的载荷。这种载荷称之为脉冲载荷。脉冲载荷首先以其作用的突然性和短促性区别于一般载荷；此外，其强度也很大，常常足以在所作用的物体中产生破坏和很大的永久变形。

载荷、试件和材料，是讨论物体对任何类型载荷发生反应时所必须考虑的三个主要元素。从最一般的观点言之：载荷是作用在试件上一个表面或多个表面上的外力；试件是特定形状的固体，其表面可能予以限定或不予限定；载荷即作用在这些表面上；材料是指制造试件的物质。通常，这三个元素互相作用，这种作用的结果即引起内力（或应力）、变形和位移的出现，它们可能是可逆的，也可能是不可逆的，并同时表现在微观与宏观两个方面。在脉冲载荷下的反应，常常具有极其短促的和动力的性质，所以，在碰到这类载荷时，必须估计到许多新现象的发生。一般载荷与脉冲载荷间性态的明显差别，也正是由于这种载荷的短促性所致。

当考虑材料在不同情况下可能呈现的性态时，仔细了解载荷、试件形状影响、材料机械性能等彼此间存在的共同点

与非共同点，尤其弄清这些因素間的互相影响（它們可能是有意义的，也可能是沒有意义的），往往是有益的。此外，考虑载荷非常不同的两个方面：（*a*）承受载荷各試件的性态，及（*b*）試件材料由于载荷而引起的变化，也是有益的。

力或载荷可以用不同的方式加到物体上。简单的载荷可以在試件上引起压缩、延伸、剪切或扭轉。载荷也可能只有更复杂的性质：如压缩和剪切的合成或液体靜压缩。靜载荷、动载荷、冲击载荷、脉冲载荷及其他等等术语，都用以表示物体承受载荷的方式。首先，这些术语用以給出加载速度的概念。根据随时间的变化来看，载荷可以大致分为以下几类：（1）靜载荷，即加载过程与时间无关；（2）漸加载荷，即加载时间以秒計；（3）脉动或交变载荷，即载荷随时间呈规律性或周期性的变化，变化速度每秒达几百次或几千次；（4）快速载荷，即加载时间以微秒計；（5）脉冲载荷或冲击载荷。脉冲载荷的特征是，载荷几乎在瞬間內（小于零点儿微秒）即增长至很大的值（也是最后的值），紧接着载荷又迅速地减小。脉冲载荷的作用时间通常以微秒数量級来計。加载的方式常常是这样的——虽不全然如此，即在試件的局部一开始就受到极为强烈的压缩。当然，上述各类载荷不能彼此截然区分开来，而且，这里也不打算这样做。前四类可以归并为一般载荷的范围內。对第五类载荷特別把它提出来，因为本书所叙述的现象与該类载荷有关。当研究载荷时，我們主要注意到载荷在受载物体上的空間和时间分布。

試件的形状和試件的約束状态对载荷的分布有很大影响，因而，在确定物体內各点的內力（即应力）时，它是一个很重要的因素。载荷类型不同，則各种因素对应力分布的

影响也可能不同。实际上，在一般载荷下与在脉冲载荷下，由于边界对应力分布的影响情况不同，则在此二条件下发生的性态也有某些本质上的差别。

試件某部分材料的性态在很大程度上决定于該部分材料的机械性能。在一般载荷情况下，整个試件在受載过程中的机械性能是保持完全一致的，因此，試件各部分間性态的差别一般不大。但在脉冲载荷下发生的情形恰巧相反。脉冲载荷以其极高的压力和很快的加载速度显著地改变着受載材料的机械性能。在很多場合下，变化可能达到如此之大，足以对材料的性态产生很大的影响。当性态具有不可逆的性质时，如永久变形或破裂，則上述影响更为显著。因此，由于材料机械性质的变化，使脉冲载荷下物体的性态完全不同于同种材料物体在一般载荷下的性态。在另些場合下，承受脉冲载荷物体各部分的性态，也由于载荷接触点附近处机械性能的改变，而发生差别。此外，某些在一般载荷下并不重要的机械性能，在脉冲载荷下却可以变得十分重要。例如材料的密度和彈性扰动的傳播速度就属于这种情况。

在各类载荷下的性态，取决于载荷、試件与材料間的相互作用。也正是这种互相作用，在材料中引起了内力（即应力）、变形、材料介质联系的破坏与位移。在脉冲载荷下，相互作用的形式以及由此在材料内部引起的应力、变形等特性，由于下面的情况，常与一般载荷下不同：

第一，在脉冲载荷下，载荷本身强烈地受材料的反作用的影响。例如，在冲击的情况下，力的大小、作用時間和其分布在很大程度上都决定于两物体間相互作用的性质。同样，爆炸力常常随受載試件的性态而变化。一个明显的例子是装

爆炸药的物体爆炸时的完全破坏。

第二，一般說来，由脉冲载荷所引起应力的分布是移动的，而且十分集中。在一般载荷下，受载物体每部分可能影响到其他部分的应力和变形。然而，在脉冲载荷下，应力和变形则仅限止于物体的某一部分，而与其他部分正在发生和已发生的现象完全无关。应力状态之所以产生这种明显的不均匀性，与下列因素有关：（1）在脉冲载荷情况下，通常，载荷在一开始就具有比静载荷下更为大的不均匀性；（2）試件内部应力分布所需的时间有限（一般只有几微秒），（3）試件的界面及其约束的影响；（4）随着载荷的分布，能量被迅速地吸收。

第三，脉冲载荷作用下的材料要发生位移，因此，在研究脉冲载荷时，所遇到的很多现象皆具有动力学的性质，这种动力学性质在决定性态时是极为重要的，然而，它在静载荷中却完全不会出现。

由以上看来，显然，脉冲载荷不只是一个简单的术语，更正确一点說，它是一个概念，或思考方法，这种概念或思考方法能把很多不同的和似乎无关的现象联系起来，并在这个联系的基础上提供一些可以用来解决工程和物理领域内某些重要问题的一般原则。的确，令我們欣慰的是：在脉冲载荷下必須用統計法解决的性态問題，似乎比一般载荷情况下为少。

本书的计划 and 范围

为编写本书而选择材料时，具有这样一些困难：材料性质的多样性以及某些观念的矛盾性和爭論性（而在这些观念

的基础上却可以給出十分完备的图景)。书中一般地討論了：
 (1) 脉冲载荷的性质；(2) 通常出現这种载荷的情况；(3) 这种载荷产生的和所具有的主要現象；(4) 进行脉冲载荷实验研究时所用的技术和装备。主要的重点放在破坏現象上，特别是討論可能发生的特殊的破坏形式。編入了許多預备材料，这些材料給出了大量靜载荷下的特殊性态，它对研究脉冲载荷下的性态也十分有益。另外，这些材料还給出了脉冲载荷与一般载荷下性态間的关系。

载荷与脉冲加载时所发生的力将在第四、五、十二和十三章中細致地討論。第四章“炸药和爆炸”，第五章“脉冲载荷的特性”，叙述冲击和爆炸时产生的力和载荷的許多重要屬性。为了清楚地示出这些力的基本特征，作了許多重要的簡化。第十二章“冲击下的性态”，第十三章“炸药的实际应用”，讲到在实际工程条件下所发生的脉冲力的某些其他方面。

在第九章“脉冲载荷下的破坏”，第十章“脉冲载荷下的塑性变形”，第十一章“脉冲载荷下結構的变化”中，叙述了脉冲载荷下材料破坏的基本特性。这里和全书內所用[破坏]这一术语的意义是广义的，指发生了不可逆的变化。根据这一观点，則可以存在很多类型的破坏，因此，使用[破坏品质]这一术语可能比較更为明显些，虽然一般并不这样做。第九章叙述破裂（破坏的一种形式）或在材料中所形成的永久伤裂。第十章研究宏观可見的塑性变形的特性，亦即材料在承受脉冲载荷时所发生的塑性破坏或流动。第十一章叙述多晶体金属晶粒結構的变化形式，即瞬时扰动通过材料时所引起微观的强度破坏。在这三章中叙述各种发生过程的重要特

点，并指出物体几何形状、物体约束、机械性能、载荷条件以及其他重要因素对所发生的破坏形式和其发展的影响。

对于材料在脉冲载荷下的性态具有重大的意义的那些工程实践，与其说它是基于对各基本原则的应用，不如说它是基于工程的实际经验。第十二章和十三章依据九、十和十一章内所讲的材料破坏的基本论点和第四、五章内所述的脉冲载荷的基本特性，讨论了很多这些工程的运用。第十二和十三章主要带有说明的性质。

在任何特殊领域中，知识的发展在很大程度上决定于该领域内所遇参数的测量技术与测量设备的发展。在脉冲载荷下，对于性态发生影响的现象和条件的定量数据，特别难于获得，因为这些现象的延续时间很短，力很大，并且又常常使研究试件遭到强度破坏或完全破坏。第六章“观察的方法和仪器（非照相的）”和第七章“高速照相技术”，叙述进行观察的技术方法，其中有些很简单，另一些则已高度专门化了；这两章也叙述了仪器，特别是高速照像设备；并通过例子示出如何应用这些技术和设备来进行定量的测量和定性的研究观察。

第二、三和八章是一般性质的材料。第三章“瞬时扰动的传播”，把有关适用于瞬时扰动传播法则的知识加以收集和加工，以便在利用它们来研究脉冲载荷时最为方便。第二章“脉冲载荷下的非弹性性态”，讨论塑性变形和破坏的问题，及应力状态、温度、变形速度等的影响；这些作为了解脉冲载荷现象的基础是很有用的。

在那些领域中，如航空工业、炮兵发展、重型设备设计、地球物理探矿、公路建筑等等工艺的改进，要求工程师

了解脉冲载荷下材料的性态。这种了解应比經驗知識更为广泛；虽然，对于經驗知識的意义不应低估。从广泛与一般的观点，本书有意地多接触現象，以便使得概念清楚突出，而不致被多余的細节所模糊。本书的讀者将逐漸清楚，在脉冲载荷领域中現代知識仍是比較有限的。

历史和目前的情况

有关脉冲载荷下性态的問題还没有广泛研究过。为什么这样是有些难于理解的，因为几世紀以来冲击力就已經用来打撿、粉碎矿石、軍事上破坏目标及改变各种物体的形状。这时所发生的現象，本来对物理学家似乎应该是十分誘人的，但物理学家却喜欢与蜡、弦等类的东西打交道。对工程师來說，就不得不在設計和制造工作中克服与这些現象有关的困难，他們沒有直接提醒物理学家。

多年以来，研究者已認識到金屬在靜止情况下的性态与动态情况下不一样。例如，早在1872年，英国曾經对鉄絲进行过仔細的試驗，指出了鉄絲能經受大小几乎两倍于其彈性极限且大大超过其靜止破断应力的瞬間应力，而其彈性性能并无重大改变。在此以前多年，已經在受突然冲击作用的鉄的显微结构中发现了奇怪的标志（現在知道为牛曼綫）。

軍事部門常对冲击的反应感兴趣，因为在軍事上，破坏一般是由这种或那种冲击作用所引起的。自从炮兵火药被广泛使用以来，軍事部門迫切地关心脉冲载荷下材料性态的研究。1835~1845年法国早期的工作是特別有趣的。在此工作中用实验的方法研究了装有炸药的空心鋼质炮弹破裂时的破片特性。軍事研究多半帶有技术发展的性质，并且主要目的

是为得到多少能直接用来設計武器和防护裝置的經驗資料。

在本书中宁願把历史材料和技术材料混在一起而不作单独的历史介紹。虽然我們力求尽可能的把其他作者的大量著作編入书中，并且对爭論的观点提出各方面的意見，但是，作者显然要对自己研究的結果有所偏愛。在某些实例中編入了以前尚未公开的材料。強調出了最簡單类型实验的結果和价值，因为作者自己的研究多半具有这个方向。本著作不是一本对该主題包罗万象的手册；它提出自己广泛和一般的評論，目的在于叙述問題的主要情况，而不涉及个别科学家和工程师的貢獻。然而，有些科学家的成就是卓越的：英国約翰和柏查門·霍布金圣父子及美国科学家查利士·蒙罗，毫無疑問都是脉冲載荷問題方面的先驅，他們进行了很多的实验研究。

在脉冲載荷領域中，知識进展得如此慢的基本原因是所发生現象本质的多样性。爆炸动力学是热力学、流体动力学家和空气动力学家寬广的活动場地，但是他們的重要結論常常沒有为炮兵工程师和冶金学家所采用。地震学家曾研究过不均匀結構中瞬时扰动的傳播和它們的相互影响，但其結果主要用于解釋地球的运动和地球的結構。19世紀的数学家解决了一系列純彈性冲击的最有趣的問題。声学家和应用力学家在很大程度上注意了与非瞬間性质的（通常是彈性的）現象有关的問題。自从大約 20 世紀 30 年代中期起，应用力学家們开始研究有关瞬間現象的問題，这时材料的机械性质变得重要了。但是这一領域和其他知識領域間存在的相互联系，在近年中变得日益明显了。

工程师們曾用了很多不同的方法来評定材料在高速載荷

下的机械性能。由于金屬的很多机械性能一般借助于拉伸試驗所获得的应力变形曲綫来确定，并作为很多研究者的出发点，因此花了很大力量来确定載荷种类对这一曲綫的影响。試驗方法包括高速冲击試驗机的应用，高速彈丸对靶板的射击和装药直接接触于金屬物体时的爆炸。

脉冲載荷下性态的研究常会引入新的要素和概念“新”的意思是指它們在研究一般載荷时是不存在的。最重要的新要素是运动和与時間的关系。例如，当試件承受脉冲載荷时，运动可以达到所謂临界状态，这时开始了特殊的性态形式，近年来很注意以公式表示和确定这样的临界运动。其中临界冲击速度的概念是重要的。

脉冲載荷下材料的性态是复杂的和不十分明显的。完全了解它們并評定它們的技术应用，必須依据于很多研究工作者所积累的經驗和研究。在高的液体靜压力和低溫下的性态研究是众所周知的，这种研究提供很多具有理論和实践意义的結果。脉冲載荷領域和上述領域一样寬广和重要，虽然这方面的知識水平还不够高。

第二章 材料在脉冲载荷下的性能

引 言

材料在脉冲载荷所造成的极端物理条件下的反应，往往与一般载荷下的反应不同。对于这种差别的性质的充分了解，是为了对一般的试验数据在极端条件下的适用性作出估价，为了对制订更符合实际情况的试验方法进行指导。压力或应力状态、温度、变形速度、试件的化学成分和几何尺寸，都能对材料的机械性能，例如，屈服极限和塑性特征，产生显著的影响。能量吸收的形式和变形的类型，将随因各种载荷条件不同而使机械性能发生的改变而变化。例如，材料的变形是通过大塑性流动抑或通过脆性破坏的方式，常常取决于载荷的条件。尤其在极端的载荷条件下，这些效应变得更为明显。

本章主要说明，脉冲载荷系统中可能遇到的各种条件的类型怎样影响材料的机械性能。本章包括了某些常用材料，尤其是给描述材料机械性能时所采用的术语下了定义。

材料的机械性能

一般性能 材料对载荷的反应有着如此重大的实际意义，许多量度这种反应的量均已制定出来。这些量用来表示某一材料的机械性能。

一般说来，当材料受有外加载荷时，或者呈弹性反应，或者呈非弹性反应。当材料在卸去载荷后，能恢复至原始状

态者，謂之彈性反应；如果材料仍殘留某些永恒的变形时，例如塑性流动和破坏，則謂之非彈性反应。由于在工程實踐中，材料多处于彈性状态的条件下，所以，对材料的彈性状态尤加注意。

在大多場合下，关于彈性的問題基本上屬於数学性质的問題。材料被視為均一的連續体。已导出載荷和变形間的关系式。对于各特定的条件应用这些关系式时，通常还需要引入能示出所研究材料应力和变形間联系的某些实验常数。当然，必須認識到：(1)最常用的金屬与其說是均一性的結構，不如說是晶粒聚集組成体；(2)在載荷作用下所发生的变形絕非完全彈性的；(3)变形不論在宏观上或微观上都不是均匀的。但是，这些从理論上推出的公式，在很多情況下，并不影响到解答的可用性。

另外，非彈性問題也不能用簡單的方法予以处理。材料的破坏（亦即非彈性性态），可以通过极为不同的方式，而每一具体的、实际上发生的方式又取决于多种因素，例如变形速率，化学成分和溫度。最常見的破坏形式，可能是宏观上的塑性流动，亦即試件形状上的永久改变与断裂。虽然为了描述各向同性与均一性塑性流动，早已提出某些基于无限小量变形和有限变形条件的理論，但对于塑性流动，至今仍未有充分和令人滿意的論述。

許多年來，采用不同的强度定理来推断导致材料破坏的条件。其中最著名的理論有：(1)最大应力理論；(2)最大变形理論；(3)最大剪切应力理論；(4)彈性变形能常量理論；(5)剪切变形能量理論或八面体剪切变形常量理論。虽然，上述諸理論在一般載荷条件下，可以給出較為正确的破

坏应力值，但当物体承受脉冲载荷时，应用它們却要十分慎重。例如，在利用上述理論解决脉冲载荷問題，而不很好地考虑靜载荷与脉冲载荷間重大的差別时，在很多場合下，甚至对一般破坏开始区域的位置問題，也会作出完全錯誤的定性解答。极端的载荷条件能显著地影响材料性能，并引起新的破坏方式和过程。

金屬的許多机械性能通常借根据一般的拉伸試驗繪制的条件应力-变形曲綫确定。应力值可由所加载荷除以起始橫断面面积获得。变形值則根据試件在长度上的变化而定。曲綫的概形取决于材料是否存有屈服点。图 1 上的曲綫相当于材料具有屈服点的情况；图 2 的曲綫相当于材料沒有屈服点的

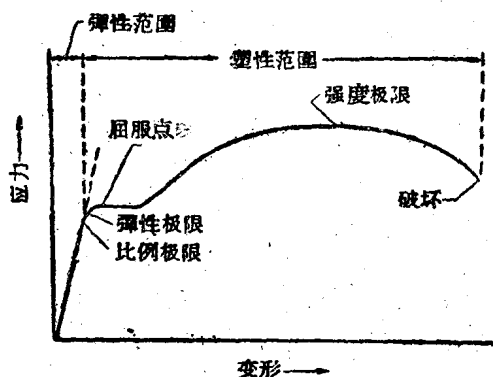


图 1 具有明显屈服点的金屬的条件应力-变形曲綫图。

情况。材料的**弹性极限**是这样一个极限应力，即达此应力以前，材料于移去载荷后不产生永久变形，它表示着弹性范围最高的极限。**比例极限**是这样一个极限应力，即此时的变形与其相应的应力仍呈比例。弹性极限常常較比例极限略高，因为大部分材料能承受比比比例极限稍高的载荷，并不发生