

# 冲击动力学进展

王礼立 余同希 李永池 编



中国科学技术大学出版社

O 347.1

361998

W28

# 冲击动力学进展

王礼立 余同希 李永池 编

中国科学技术大学出版社

1992·合肥

(皖) 新登字08号

**冲击动力学进展**

王礼立 余同希 李永池 编

\*

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号, 230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

\*

开本: 850×1168/32 印张: 13.25 字数: 342千

1992年8月第1版 1992年8月第1次印刷

印数: 1—2000册

ISBN 7-312-00374-5/O·120 定价: 8.50元

DVV 13/10  
内 容 简 介

本书由国内冲击动力学领域的有关方面专家共同撰写而成。全书共分六章，分别讲述了材料的动态力学性能、应力波和结构动力学、激光对材料的冲击效应、量纲方法对冲击动力学的应用、爆炸加工中的冲击动力学问题、冲击动力学的实验方法和技术等内容。书中不但包括基础知识介绍与有关研究工作综述，而且还包括发展趋势评介与一些作者的最新研究成果总结。各章既有相对的独立性，又有一定的联系和互补性，全书形成一个既较为完整，又可由读者适当取舍的体系。

本书可作为力学、材料科学、爆炸物理等专业研究生的教材或参考书，也可供高等学校有关专业的教师及高年级本科生、科研或工程单位的科学研究及工程技术人员参考。

## 献给朱兆祥教授（代序）

时间过得真快，兆祥同志已过了七十岁了。

我和兆祥有一段很不平常的共同工作的时期。在1948和1949这两年中，我们同在一个党的组织，同在《科学时代社》，《中国科学工作者协会》，《华社》等团体之中，共同从事迎接杭州解放的工作。这主要是团结广大科技工作者，保护好所在的机构不受破坏，使能为新中国服务。1949年5月3日杭州解放后，我们推荐了一批科技工作人员参加接管工作，组织科技工作者为恢复经济出谋献策和从事科学普及工作。这一段时期的工作是颇有成效的，兆祥同志在其中起着重要的作用。他大我五岁，比我成熟，我经常得到他的教益。

接着他调到全国科普协会工作。后来又到了中国科学院力学研究所和中国科学技术大学从事科研和教学多年，至1985年还主持了宁波大学的创建，担任宁波大学首任校长四年。

在科学工作中，他有许多重要的贡献。他抓住难度很大的、具有重大理论意义和应用价值的新领域，如应力波理论及其工程应用、材料本构关系、高分子材料的动态力学性质、材料在冲击载荷下的损伤和破坏、结构的冲击屈曲等，作了深入研究，发表论文数十篇。在教学工作中，他坚持改革，锐意求新，在全国率先开出《冲击波物理》、《爆炸固体力学》、《线性和非线性波》、《材料本构关系》等二十余门本科生和研究生课程，写出多种优秀教材，并面向全国举办过许多次系列学术讲座，培养了许多高质量的人才，他是我国爆炸与冲击力学的开拓者之一。

他不仅是一位科学家、教育家，而且是科学和教育组织管理方面的能手。如在协助钱学森教授创建力学所的过程中，在中国科技大学工作的二十多年，特别是在根据钱学森教授的倡议

创办和发展我国第一个爆炸力学专业的过程中，在1981年至1983年作为中国科技大学近代力学系主要负责人推动和发展该系教学和科研工作的过程中，以及创办宁波大学的过程中，他都做了大量的和卓有成效的工作。

他事业心极强，无论在哪一阶段，在哪一岗位上，都表现出创新、奋进、开拓的精神。即使在一度身处逆境时，这种精神也从无改变。到了七十岁时，仍壮志不已，努力拼搏。

他对自己要求很高。尽管他已作了很大的贡献，但仍感到很不满足，他感到已做的事和所希望达到的目标还有很大差距，在和我谈话时还有年华虚度之叹。为此，我在中国科技大学庆贺他生日的座谈会上送给他二十个字：

韶华不虚度    古稀亦青春

业绩载史册    耕耘且从容

这四句话表示我对他的敬佩和希望。希望他继续为培养人才和发展科学而作出贡献，希望他和夫人邓爽同志保重身体，健康长寿。

谷超豪

1991年10月

# 目 次

献给朱兆祥教授 (代序).....谷超豪 ( i )

## 第一章 材料的动态力学性能

绝热剪切——材料在冲击载荷下的本构失稳.....王礼立 ( 3 )

冲击载荷下材料的损伤和破坏.....白以龙 ( 34 )

金属材料的热粘塑性本构理论及其应用

.....周光泉、程经毅 ( 58 )

固体高分子材料非线性粘弹性本构关系

.....王礼立、杨黎明 ( 88 )

材料的冲击相变 .....唐志平 ( 117 )

## 第二章 应力波和结构动力学

冲击载荷下结构塑性稳定性的研究 .....王 仁 ( 157 )

结构的冲击屈曲问题 .....杨桂通、王德禹 ( 177 )

结构塑性动力响应的研究进展 .....余同希 ( 211 )

复合应力波理论的某些问题 .....李永池、王肖钧、陈立 ( 243 )

## 第三章 激光对材料的冲击效应

强激光的冲击力学效应 .....陈大年、经福谦 ( 277 )

## 第四章 量纲方法对冲击动力学的应用

高速冲击模型律 .....谈庆明 ( 303 )

## 第五章 爆炸加工中的冲击动力学问题

粉末的爆炸烧结机制和加卸载状态方程

..... 邵丙璜、刘志跃、王晓林 (323)

爆炸复合中的冲击力学 .....张 凯 (355)

## 第六章 冲击动力学的实验方法和技术

材料动力学实验技术 .....胡时胜 (379)

后记 ..... (414)



# 绝热剪切——材料在冲击

## 载荷下的本构失稳

王礼立

(中国科学技术大学, 宁波大学)

**摘要:** 本文把材料在冲击载荷下的绝热剪切归结为材料的热粘塑性本构失稳, 并着重讨论了应变率和温度对这一失稳现象的作用。文章在较详尽地叙述了绝热剪切带之萌生和发展过程的显微观察以及对应的宏观本构行为实验研究结果的基础上, 对绝热剪切分别用表观均匀变形模型和非均匀变形(局部化)模型作了热粘塑性本构失稳分析。两种分析给出了一致的结果, 并为实验观察所证实, 即绝热剪切是一个包含多阶段发展过程的本构失稳现象, 并表明宏观应变、应变率和环境温度都是影响这一失稳过程的重要因素。由此建立了一个基于材料热粘塑性失稳的三变量绝热剪切准则。

### 一、引言

绝热剪切 (adiabatic shearing) 现象是材料在冲击载荷下力学行为的一个重要方面。这一现象相当普遍地存在于高速撞击、侵彻、冲孔、高速成型、切削、冲蚀等涉及冲击载荷的高速变形过程中, 而且不论金属或塑料、岩石中均存在。之所以称之为绝热剪切是由于这一现象一般具有两个最基本的特征: 其一, 在显微观察上总以形成剪切变形高度局域化的、宽约 $10-10^3 \mu\text{m}$

量级的所谓剪切带 (shear band) 为主要特征；其二，从热力学的角度来说总与冲击载荷下材料的高速变形接近于绝热过程这一特征分不开；这时，变形过程中的非弹性功所转化的热量将引起绝热温升，从而引起剪切带的形成和发展。

正是从这两个基本特征出发，Zener 和 Hollomon 在 1944 年首先把绝热剪切解释为热塑性失稳<sup>[1]</sup>，即归因于塑性应变硬化和绝热温升所致热软化两者之间的平衡消长。当塑性应变硬化超过绝热温升的热软化时，材料处于图 1 所示应力-应变 ( $\tau-\gamma$ ) 曲线的稳定塑性变形阶段 ( $d\tau/d\gamma > 0$ )；当绝热温升的热软化超过塑性应变硬化时则进入非稳定塑性变形阶段 ( $d\tau/d\gamma < 0$ )，进一步的塑性变形是在愈来愈小的应力下发生的，从而对应于一失稳过程，直至破坏。既然稳定塑性变形与非稳定塑性变形的分界点即应力极大点 ( $d\tau/d\gamma = 0$ ) 表征这一热塑失稳的临界条件，由此可建立各种形式的绝热剪切临界准则，如以 Recht 为代表的临界应变率准则<sup>[2]</sup>和以 Culver 为代表的临界应变准则<sup>[3]</sup>等等。

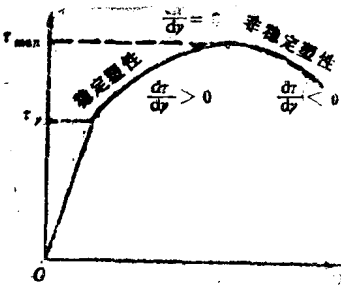


图 1  $\tau-\gamma$  曲线

半个多世纪以来，特别是近 10 余年来，力学家和材料学家们对绝热剪切的研究已取得了很大进展，也已发表了不少有价值的评述综论<sup>[4-6]</sup>。但即使从现在的观点来看，Zener 和 Hollomon 的热塑失稳模型仍不失其历史光辉：它把材料显微组织上出现的

局域化剪切带与宏观应力应变曲线上的非稳定塑性变形相联系，确立了细观-宏观相结合研究观点；它通过绝热条件，把材料的力学性能与热性能相联系，确立了热学-力学相耦合的研究观点；以及更重要地，它把绝热剪切与失稳或分叉理论相联系，把绝热剪切归结为材料的某种形式的本构失稳。这些是至今仍应予

以肯定的。

Zener 和 Holomon 热塑失稳的不足之处主要在于：首先，最大应力准则只能或者用来判断绝热剪切带形成的开始，或者用来判断绝热剪切带破坏的开始，而未能反映绝热剪切是一个包含多个阶段的发展过程。为此，本文将在给出绝热剪切带形成发展过程的显微观察事实的基础上，介绍一个能反映这一发展过程的绝热剪切准则。

其次，热塑失稳概念虽然把材料失稳现象从纯力学分析发展到了热学-力学耦合分析，但尚未具体计及应变率效应，因此实质上还是一种准静态分析。如本文集中前两章所述，材料动力学核心问题是应变率效应。在冲击载荷下，不仅应考虑到应变率对本构关系的影响，还应考虑到应变率对各种临界准则包括失稳准则的影响。这是一切建立在热塑失稳概念基础上的绝热剪切准则所欠缺的。为此，本文将在分析应变率对本构失稳影响的基础上，介绍能反映这一效应的热粘塑性失稳准则；并进而考察环境温度，特别是低温对绝热剪切的影响。

再次，采用最大应力准则时，虽然承认局域化剪切带在显微观察中的客观存在，但在进行宏观的失稳分析时，是把变形材料表观地作为一个均质材料来处理的。这样的模型对于工程应用虽然是方便的，但难以从机理上分析剪切带的发生和发展。为此，本文除采用这类表观均质材料模型进行绝热剪切分析外，还平行地采用具体计及剪切带存在的分区的局部化分析来讨论本构失稳过程。可以想象得到，对于同一物理现象，不管采用表观均匀变形模型还是采用局部化非均匀变形模型，照理应殊途同归，得到统一的结果。

此外，所谓“绝热”当然是一个近似假定，任何的实际变形过程总伴随着不同程度的热交换，而不是严格的绝热过程。但正如我们常把应力波传播过程近似作为绝热过程，或常把联系冲击波参量间的 Rankine-Hugoniot 曲线称为冲击绝热线一样<sup>[9]</sup>，冲

击载荷下的高速变形一般可近似作为绝热过程来处理。这并不排斥我们作必要的计及热交换效应的修正。但至少本文不讨论诸如等温失稳或不能近似按绝热失稳来处理的那类现象。

关于冲击动力学中的失稳现象，应该注意区分结构失稳和本构失稳。前者是指结构物的动态失稳，如动态屈曲等，属于结构动力学的稳定性分析；后者则是材料本构响应上的动态失稳，如材料的动态屈服降和绝热剪切失稳等，属于材料动力学的稳定性分析。与静力学的稳定性分析相比，前一类问题一般应计及结构的惯性效应或应力波效应，而后一类问题一般应计及材料本构响应的应变率效应。在绝热剪切的稳定性分析中，虽然也有计及惯性效应并强调惯性效应的重要性的<sup>[10]</sup>，但本文把绝热剪切作为材料的本构失稳来研究。因此如同研究材料的本构关系一样，不必考虑惯性效应而应考虑应变率效应。

## 二、绝热剪切的显微观察及相应的本构行为

在绝热剪切的早期研究中，材料科学家常常侧重其显微结构而不太注意其与本构关系的定量联系；力学家则常常侧重于材料宏观本构规律而不太注意显微组织的变化。现在人们已认识到重要的是把两者联系起来。

对绝热剪切的显微观察研究表明：绝热剪切带有两种基本类型，即：以应变高度集中、晶粒剧烈拉长和碎化为主要特征的形变带 (deform band)，以及以发生相变或重结晶为主要特征的转变带 (transformed band)。前者常常在非铁金属中观察到，而后者主要在钢和钛合金中观察到。特别是钢中的转变带常以其侵蚀后发亮的外观和高硬度为特征，被称为“白带” (white band)。

现在已经清楚，形变带和转变带是绝热剪切过程中不同发展阶段的形态。对同一材料在适当的条件下可以观察形变带向转变

带的演变。

以对 $\beta$ -钛合金(Ti-8Cr-5Mo-5V-3Al)(以下称TB2)的试验研究为例,显微观察结果表明<sup>[11-13]</sup>:

(1)与准静态变形过程中试件主要以常规的均匀滑移方式来实现塑性变形(图2)不同,在高速变形过程中试件主要以绝热剪切的变形方式实现塑性变形,图3给出这样一个典型的形变剪切带的金相照片,可以清楚地看到,剪切带是一个应变高度集中的区域(变形量高达1000%量级),带内晶粒沿带的方向被剧烈拉长,甚至碎化,而带外晶粒的变形程度则小的多,甚至不存在可见的滑移线。

(2)对于高速变形中变形量更大的试件,则形成如图4所示的转变带,带内的晶粒变得十分细小,以至于难以用光学显微镜分辨。用扫描电镜在3500倍下观察到两种不同形态的细晶组织:其一如图5所示(对应于图4中左侧较窄的剪切带),呈一种细条状的微晶结构,略带方向性;其二如图6所示(对应于图4中右侧较宽的剪切带),呈等轴微晶结构。这说明在足够高的应变率和足够大的应变下,绝热温升高得足以引起带内显微组织的

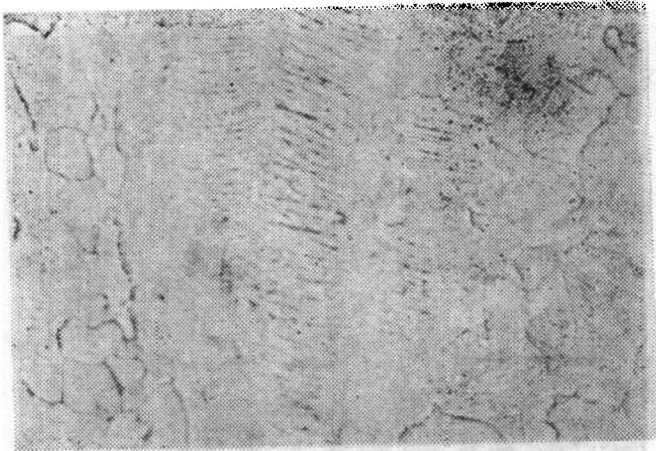


图2 TB2试件准静态变形10%后的显微组织

转变；也说明转变带是形变带进一步发展的必然后果。事实上，我们还观察到兼有形变带和转变带显微组织的“混合型剪切带”<sup>[12]</sup>。

(3) 不论形变带或转变带都有一个沿带宽度和长度生长发展过程，并且可发展到两剪切带的交汇（如图4所示），甚至多

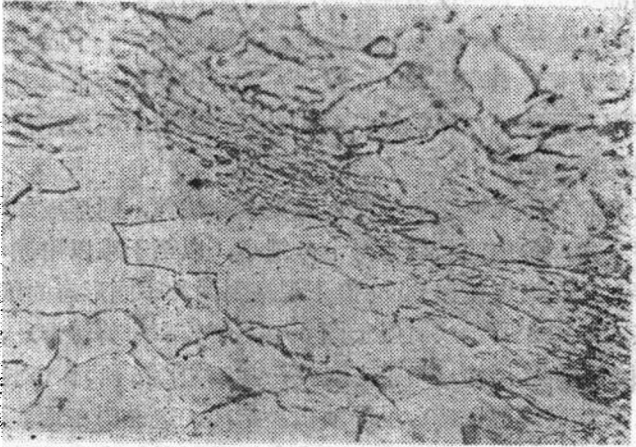


图3 TB2试件高速变形30%后的显微组织（形变带）

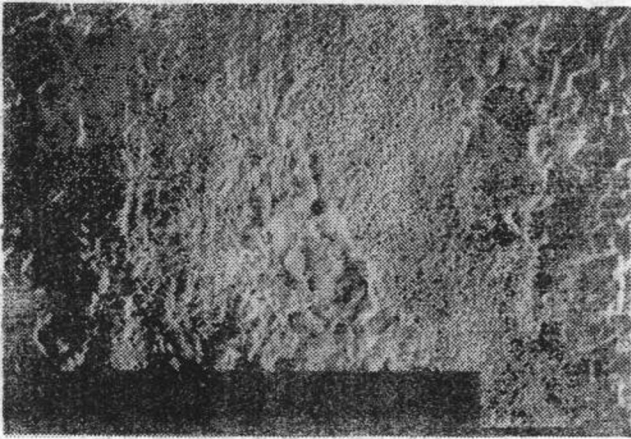


图4 TB2试件高速变形46%后剪切带的SEM照片（转变带）

条剪切带的相交而成网状结构，如图7所示。

(4) 绝热剪切变形发展到一定程度后会导致绝热剪切破坏。显微观察表明，裂纹一般均沿绝热剪切带扩展，并基本上处于剪切带中心部位，如图8所示。在主裂纹尖端前方的带区中可

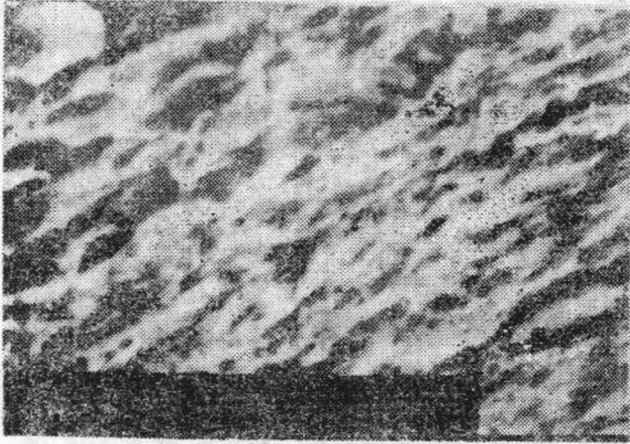


图5 图4左侧转变带的高倍SEM照片

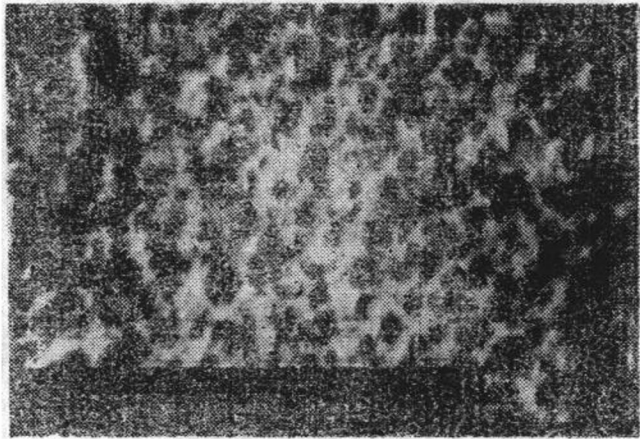


图6 图4右侧转变带的高倍SEM照片

见到细裂纹（图8）或孔洞（图9），裂纹通过孔洞向前沿伸。

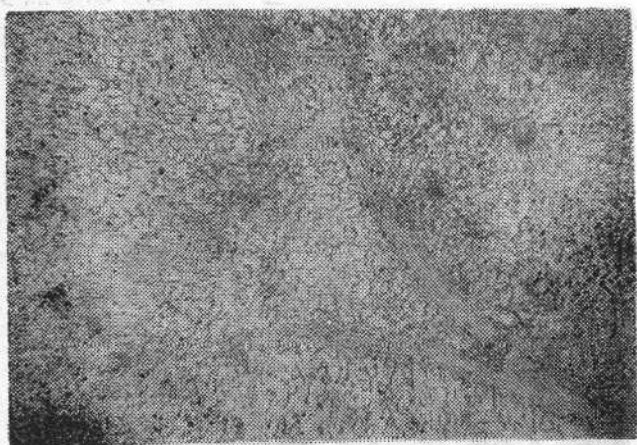


图7 TB2试件中的网状剪切带

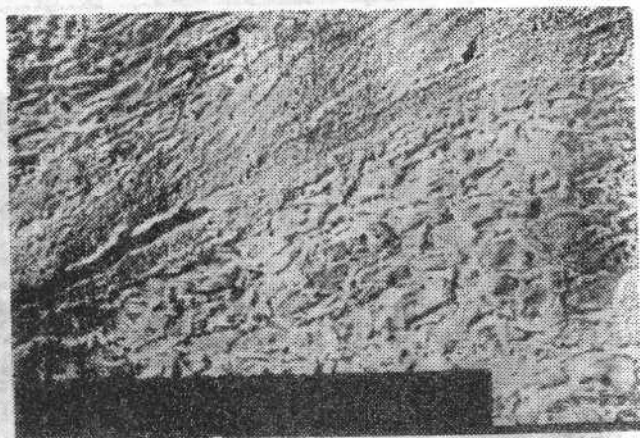


图8 TB2试件中沿剪切带扩展的裂纹

(5) 绝热剪切实际上是一个包含形变带的孕育和发展、形变带向转变带的转化（混合带的发展）、转变带的发展、直到裂



纹沿剪切带传播而导致破坏等一系列阶段的速率相关过程，并且如图10所示<sup>[12]</sup>，在给定环境温度下，应变率和应变是影响这一过



图9 TB2试件中裂纹尖端前方的空洞

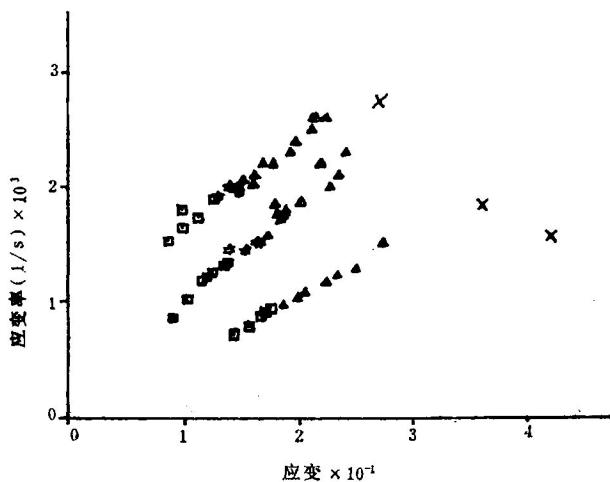


图10 绝热剪切带的发生和发展同时依赖于应变和应变率  
□无剪切带 ☆形变带 △转变带或混合带 ×有裂纹的剪切带

程的两个同等重要的因素。或者如图11所示<sup>[14]</sup>，在给定的足