



# 霍普金森杆实验技术

Hopkinson Bar Techniques

卢芳云 陈荣 林玉亮 著  
赵鹏铎 张舵



科学出版社

014010346

TB302.3

16

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 霍普金森杆实验技术

卢芳云 陈 荣 林玉亮 赵鹏铎 张 舵 著



TB302.3  
16

科学出版社

北京



北航

C1696836

## 内 容 简 介

本书从基本原理出发,系统介绍霍普金森杆实验技术及其应用与前沿发展,综合国内外学者在霍普金森杆实验领域的创造性贡献以及作者在这个领域工作的成果和经验,旨在尽可能系统、全面地介绍霍普金森杆所涉及的各种加载技术、测试手段以及相应的数据处理方法。全书共8章。第1章为霍普金森杆实验技术发展历史和现状简介;第2章介绍应力波基础理论与分离式霍普金森压杆基本原理;第3章和第4章分别从加载和测试技术两个方面介绍霍普金森杆的相关技术;第5~8章介绍基于霍普金森杆的拉伸、压剪、断裂和拓展加载技术。

本书可供从事材料动态力学研究及相关领域工作的科技工作者参考,可以使读者能够在较短的时间内全面了解相关研究和进展,正确使用分离式霍普金森杆实验技术,并获得可靠的实验数据。

### 图书在版编目(CIP)数据

霍普金森杆实验技术/卢芳云等著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-038434-8

I. ①霍… II. ①卢… III. ①工程材料-力学性能试验 IV. ①TB302.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第196888号

责任编辑:陈 婕 / 责任校对:刘亚琦

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年10月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年10月第一次印刷 印张:21

字数:402 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

谨以此书献给我们的家人  
和我们共同的事业！

## 前 言

研究材料在高应变率加载下的力学响应,对于结构设计和材料研究均具有重要意义。在结构设计中,结构各部分需要满足不同的应变率范围和温度范围的功能要求,需要知道材料的力学性能会随着加载应变率的增加如何变化。对于材料研究而言,不同加载应变率和温度下应力应变曲线的变化不仅反映了材料的宏观力学行为,而且反映了材料的微观特性,因此它可为研究材料微观结构与更深层次的物理问题提供参考。

研究材料高应变率下的力学响应,困难在于结构惯性效应(应力波效应)和材料应变率效应相互影响。一方面,在应力波传播的分析中,材料动态本构方程是建立整个问题基本控制方程组不可缺少的组成部分,也就是说,分析应力波的传播是以材料动态本构关系已知为前提的;另一方面,在进行材料高应变率动态本构关系的实验研究时,一般都需要通过冲击加载,而冲击加载必须考虑实验装置和试件中的应力波传播及相互作用,也就是说在材料动态响应研究中,要分析材料中的应力波传播。这样就构成了一种耦合关系。

解决上述问题最常用的方法有两类。第一类是把试件设计成易于分析应力波传播的简单结构,在给定的冲击载荷(初边值条件)下测量波传播信息(如波传播速度等)或波传播效应(如波后质点速度和波后压力等),由此来反推材料的动态本构关系。例如,利用飞片碰撞实验测试材料的状态方程。第二类方法的核心思想是,设法在试验中把应力波效应和应变率效应解耦。其中,最典型并应用得最广泛的就是分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bars, SHPB)实验。在分离式霍普金森压杆实验中,实验杆中传播的应力波同时承担加载和测试的功能,根据杆中应力波的传播来求解杆件与试样端面的应力-位移-时间关系;又通过设计加载波宽度远大于试样厚度,使试样受载过程处于一种局部动态平衡的状态,因此试样的变形分析无需考虑波传播效应,这样就可将应力波效应与应变率效应成功解耦,建立起材料在高应变率下的应力应变关系。

分离式霍普金森杆实验技术是研究中高应变率( $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ )下材料力学性能的最主要的实验方法,是爆炸与冲击动力学实验技术的重要组成部分。利用霍普金森杆不仅可以实现高应变率单轴拉伸、压缩、剪切加载,而且还发展了动态压-剪复合加载,主、被动围压等复杂加载,以及中应变率( $1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ )加载等实验技术。分离式霍普金森杆实验技术及其相关应用研究已经开展了很多年,但是该实

验技术在国内外都尚未标准化,技术发展和应用的空间还很大。本书尽可能系统、全面地介绍霍普金森杆所涉及的各种加载技术、测试手段以及相应的数据处理方法,融合了作者及所在团队在这个领域工作的成果和经验。本书从基本原理出发,系统介绍了霍普金森杆实验技术及其应用与前沿发展,旨在使读者能够在较短的时间内全面了解相关研究进展,同时为相关科研工作者和工程技术人员正确使用分离式霍普金森杆实验技术,以及获得可靠实验数据提供指导。

本书共 8 章,主要内容有:第 1 章霍普金森杆实验技术发展简史,简单介绍霍普金森杆实验的应用背景和该实验技术的发明及发展历程;第 2 章应力波基础理论与分离式霍普金森压杆基本原理,介绍霍普金森杆实验中涉及的弹性应力波控制方程与波传播、波形弥散等基础知识,并从基本原理、测试方法、实验数据处理、试样的设计原则、试样与实验杆端面的摩擦效应等方面阐述分离式霍普金森压杆实验技术的相关知识;第 3 章霍普金森杆实验中的加载控制技术,主要介绍入射波整形技术、单脉冲加载与试样变形控制技术、可控多脉冲加载技术、不同温度环境和围压作用下的霍普金森杆实验技术等;第 4 章霍普金森杆实验中的测试技术,重点介绍除传统应变片测试技术之外的其他测试技术及其在霍普金森杆实验中的应用,内容包括石英压电晶体压应力测试技术、剪应力测试技术,铌酸锂压电晶体及其剪应力测试应用,激光光通量位移计,同步高速摄影结合数字图像相关技术和温度测量技术;第 5 章霍普金森杆拉伸加载技术,阐述霍普金森杆直接拉伸加载实验、反射式霍普金森拉杆技术,以平台巴西实验实现拉伸加载和半圆盘三点弯实验实现拉伸加载的实验技术;第 6 章分离式霍普金森压剪杆实验技术,首先介绍实验装置、试样受力分析,然后从测试方法及有效性分析、测试的误差分析等角度对所涉及的测试手段进行详细说明,并给出实验试样的优化构型;第 7 章基于霍普金森杆的动态断裂实验,首先介绍断裂测试中的两个通用问题:应力强度因子的确定和起裂时间的确定,然后介绍基于霍普金森杆动态断裂实验的各种加载方式;第 8 章霍普金森杆实验技术的拓展应用,介绍用霍普金森杆实现中应变率加载实验、纯剪实验、动态摩擦实验以及其他拓展实验等。

在本书撰写过程中,作者参考了国内外大量的书籍和资料,其中有西北工业大学李玉龙教授、哈尔滨工程大学姜凤春教授和日本丰桥科技大学(Toyohashi University of Technology)Homma 教授提供的部分参考文献;同时,加拿大多伦多大学夏开文教授、中南大学李夕兵教授、湘潭大学周益春教授和国防科技大学汤文辉教授对本书的撰写提出了很多宝贵意见,在此,特别对上述专家以及所有参考资料的作者表示衷心的感谢。

本书自 2007 年开始撰写,历时六载,九易其稿,经过多次补充和完善,是团队智慧和辛勤劳动的成果。全书由卢芳云、陈荣统稿,部分章节由林玉亮、赵鹏铎和

张舵撰写,最终由卢芳云审核、定稿。本书内容涉及的主要研究成果包含了本团队赵习金、吴会民、王晓燕、崔云霄、李俊玲、王晓峰、覃金贵等人的研究工作;全书的撰写工作得到了本团队所在实验室师生的积极支持;蒋邦海副教授,李翔宇副教授,研究生文学军、张弘佳、卢潇等给予了帮助,在此一并对他们表示深深的感谢。

本书的主要成果来自作者的国家自然科学基金资助项目(10172092、10276038、10672177、10872215、11132012(重点)、11172328、11202232)、国防预研基金项目(51478030201KG0103)、国防科技大学基础研究项目(JC07-02-06、JC11-2-17)等;本书的出版得到了国家科学技术部学术著作出版基金和国防科技大学出版基金的资助,在此谨表示由衷的感谢。

限于作者的学术水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2013年5月1日

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 霍普金森杆实验技术发展简史</b> .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 Hopkinson 父子开创性的工作 .....	2
1.3 Davies 在压力波传播及波形检测方面的工作 .....	4
1.4 Kolsky 奠基性的工作 .....	8
1.5 霍普金森杆技术的研究与进展.....	11
1.6 霍普金森杆技术的发展展望.....	15
参考文献 .....	16
<b>第 2 章 应力波基础理论与分离式霍普金森压杆基本原理</b> .....	23
2.1 弹性应力波控制方程与波传播.....	23
2.1.1 弹性波控制方程 .....	23
2.1.2 两弹性杆的共轴撞击 .....	25
2.1.3 弹性波在物质界面的反射和透射 .....	27
2.2 横向惯性引起的弥散效应.....	29
2.3 分离式霍普金森压杆实验技术.....	30
2.3.1 分离式霍普金森压杆实验技术的基本原理.....	30
2.3.2 杆中应变测试 .....	32
2.3.3 实验数据处理 .....	36
2.3.4 试样的设计原则 .....	37
2.4 试样与实验杆端面的摩擦效应.....	38
2.4.1 端面摩擦效应 .....	38
2.4.2 端面摩擦效应理论分析 .....	39
2.5 小结.....	43
参考文献 .....	44
<b>第 3 章 霍普金森杆实验中的加载控制技术</b> .....	46
3.1 入射波整形技术.....	46



3.1.1	问题的提出	46
3.1.2	整形器技术的实验研究	47
3.1.3	入射波形的理论预估	52
3.1.4	异形子弹整形技术	58
3.2	单脉冲加载与试样变形控制技术	61
3.2.1	单脉冲加载技术	61
3.2.2	应变冻结技术	64
3.3	可控多脉冲加载技术	65
3.3.1	实验原理	65
3.3.2	延时时间间隔确定	67
3.3.3	加载-卸载-再加载实验	68
3.4	不同温度环境下的霍普金森杆实验技术	70
3.4.1	高温加载	70
3.4.2	低温加载	74
3.4.3	温度加载实验中的接触热传导	76
3.5	围压作用下的霍普金森杆实验技术	79
3.5.1	套筒围压加载	79
3.5.2	液压油加载	83
3.6	小结	89
	参考文献	89
<b>第4章</b>	<b>霍普金森杆实验中的测试技术</b>	<b>94</b>
4.1	石英晶体压应力测试技术	94
4.1.1	晶体的压电效应	94
4.1.2	石英的压电效应	95
4.1.3	石英压电晶体在分离式霍普金森压杆中的应用	97
4.2	石英压电晶体剪应力测试技术	103
4.2.1	Y切石英晶体的纯模方向分析	104
4.2.2	Y切石英晶体最优切型分析	107
4.2.3	Y切石英晶体动态系数标定	109
4.3	铌酸锂压电晶体及其剪应力测试应用	111
4.3.1	铌酸锂晶体特性概述	111
4.3.2	铌酸锂工作原理及剪应力计设计分析	112

---

4.3.3 铌酸锂剪应力计的测试分析 .....	117
4.4 激光光通量位移计 .....	122
4.4.1 基本原理及装置 .....	123
4.4.2 系统标定 .....	123
4.4.3 系统应用 .....	124
4.5 同步高速摄影结合数字图像相关技术 .....	127
4.5.1 数字相关计算 .....	128
4.5.2 实验方法 .....	132
4.5.3 典型实验结果 .....	136
4.6 温度测量技术 .....	136
4.6.1 热电偶测温 .....	136
4.6.2 热电阻测温 .....	137
4.6.3 红外测温 .....	139
4.7 小结 .....	146
参考文献 .....	146
<b>第5章 霍普金森杆拉伸加载技术</b> .....	<b>151</b>
5.1 霍普金森杆直接拉伸加载实验 .....	151
5.1.1 实验原理 .....	151
5.1.2 韧性材料的直接拉伸 .....	153
5.1.3 脆性材料的直接拉伸 .....	157
5.2 反射式霍普金森拉杆技术 .....	159
5.2.1 实验原理 .....	159
5.2.2 反射式拉伸实验数据处理 .....	160
5.3 平台巴西实验实现拉伸加载 .....	164
5.3.1 巴西实验技术 .....	164
5.3.2 平台巴西实验技术 .....	166
5.3.3 加载过程中 FBD 试样表面的应变分布 .....	168
5.3.4 激光光通量位移计测试应变 .....	172
5.3.5 应力-应变曲线 .....	175
5.4 半圆盘三点弯实验实现拉伸加载 .....	177
5.4.1 半圆盘三点弯实验技术 .....	177
5.4.2 SCB 拉伸试样表面的应变分布 .....	178

5.4.3 应力历史曲线 .....	181
5.5 小结 .....	182
参考文献 .....	182
<b>第6章 分离式霍普金森压剪杆 .....</b>	<b>185</b>
6.1 实验装置 .....	185
6.2 试样受载分析 .....	186
6.3 实验装置的应力分析 .....	188
6.3.1 入射杆应力状态 .....	188
6.3.2 试样应力状态 .....	191
6.3.3 透射杆应力状态 .....	194
6.3.4 小结 .....	197
6.4 压缩应力测试 .....	197
6.4.1 压缩应力测试方法 .....	197
6.4.2 压缩应力测试方法的有效性分析 .....	198
6.4.3 压缩应力测试的误差分析 .....	199
6.5 压缩应变测试 .....	201
6.5.1 压缩应变测试方法 .....	201
6.5.2 压缩应变测试方法的有效性分析 .....	202
6.5.3 压缩应变测试的误差分析 .....	205
6.6 剪切应力测试 .....	206
6.6.1 剪切应力测试方法 .....	206
6.6.2 剪切应力测试方法的有效性分析 .....	207
6.6.3 剪切应力测试的误差分析 .....	211
6.7 剪切应变测试 .....	213
6.7.1 剪切应变测试方法 .....	213
6.7.2 剪切应变测试方法的有效性分析 .....	215
6.7.3 剪切应变测试的误差分析 .....	217
6.8 压剪加载实验试样的构型优化 .....	218
6.8.1 类平面应力构型 .....	218
6.8.2 类平面应力构型合理性验证 .....	220
6.8.3 装置非对称性讨论 .....	225
6.9 小结 .....	226

---

参考文献	226
<b>第7章 基于霍普金森杆的动态断裂实验</b>	<b>227</b>
7.1 应力强度因子的确定	228
7.1.1 应变片法	228
7.1.2 光学测试方法	230
7.1.3 分析法	234
7.1.4 实验-数值法(动态有限元法)	238
7.2 起裂时间的确定	239
7.2.1 应变片监测起裂时间	240
7.2.2 断裂计监测起裂时间	241
7.2.3 高速摄影监测起裂时间	242
7.2.4 分析法确定起裂时间	243
7.3 基于压缩加载的动态断裂实验	247
7.3.1 单点弯实验	247
7.3.2 三(四)点弯实验	251
7.3.3 楔形加载紧凑拉伸实验	257
7.3.4 紧凑压缩实验	258
7.3.5 巴西圆盘类实验	260
7.4 基于拉伸加载的动态断裂实验	265
7.4.1 直接拉伸加载断裂实验	265
7.4.2 反射式拉伸加载断裂实验	269
7.5 小结	270
参考文献	270
<b>第8章 霍普金森杆实验技术拓展应用</b>	<b>277</b>
8.1 用霍普金森杆实现中应变率加载实验	277
8.1.1 实验系统	279
8.1.2 实验误差分析	281
8.1.3 实验结果	283
8.2 基于霍普金森杆的纯剪实验	284
8.2.1 改变试样构型实现剪切加载	284
8.2.2 改进霍普金森杆的杆系结构实现剪切加载	285
8.2.3 霍普金森扭杆技术	287

---

8.3 基于霍普金森杆的动态摩擦实验 .....	289
8.3.1 基于霍普金森扭杆的动态摩擦实验 .....	289
8.3.2 基于霍普金森压剪杆的动态摩擦实验 .....	297
8.4 其他拓展实验 .....	301
8.4.1 高 $g$ 值加速度传感器的校准 .....	301
8.4.2 火工品过载评价 .....	304
8.4.3 炸药安全性研究 .....	307
8.4.4 基于霍普金森杆的动态挤压 .....	310
8.4.5 基于霍普金森杆的动态切削 .....	311
8.5 小结 .....	314
参考文献 .....	315

# 第 1 章 霍普金森杆实验技术发展简史

## 1.1 研究背景

实验是研究材料力学行为的重要手段。传统液压伺服系统上准静态实验的应变率通常在  $1\text{s}^{-1}$  以下。使用传统的加载方式,即使作特殊设计,应变率也只能达到  $100\text{s}^{-1}$ 。对于更高的应变率,需要采用其他手段。同时,高应变率实验和准静态实验的根本不同点在于,随着应变率的增加,惯性效应即应力波效应明显增强。通常不可能将惯性效应与研究对象的物理性能(应变率效应)分离开来。表 1.1 为各种加载方式所能满足的加载应变率范围以及对应力波的影响。

表 1.1 各种加载方式所能满足的加载应变率范围

实验类型	加载应变率/ $\text{s}^{-1}$	测试技术	应力波效应
压缩实验	$<0.1$	传统静态实验机	不重要
	$0.1\sim 100$	特殊设计的伺服液压控制试验机	影响加载的测量
	$0.1\sim 500$	凸轮式塑性机和落重	影响加载的测量
	$200\sim 10^4$	霍普金森压杆	影响达到应力平衡
	$10^3\sim 10^5$	泰勒冲击实验	需对结果进行修正
拉伸实验	$<0.1$	传统静态实验机	不重要
	$0.1\sim 100$	特殊设计的伺服液压控制试验机	影响加载的测量
	$100\sim 10^3$	霍普金森拉杆	影响达到应力平衡
	$10^4$	膨胀环	决定性影响
	$>10^5$	飞片碰撞	决定性影响
剪切和 多轴加载	$<0.1$	传统静态实验机	不重要
	$0.1\sim 100$	特殊设计的伺服液压控制试验机	影响加载的测量
	$10\sim 10^3$	扭转冲击	影响达到应力平衡
	$100\sim 10^4$	霍普金森扭杆	影响达到应力平衡
	$10^3\sim 10^4$	双凹形剪切和冲塞实验	影响达到应力平衡
	$10^4\sim 10^7$	压剪炮	决定性影响

分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bars, SHPB)实验技术是研究材料在中高应变率( $10^2\sim 10^4\text{s}^{-1}$ )下力学性能的主要实验方法。其核心思想是

实验杆中传播的应力波同时承担加载和测试的功能,根据杆中应力波传播的信息来求解杆件与试样端面的应力-位移-时间关系,从而得到试样的应力-应变关系;通过设计加载波宽度远大于试样厚度,使试样受载过程处于一种局部动态平衡的状态,从而使试样的变形分析无需考虑波传播效应,将应力波效应与应变率效应成功解耦。

1914年,Hopkinson J<sup>[1]</sup>利用长弹性杆中应力波的传播来测量动态过程中的压力脉冲;通过不同长度的吸能飞片来研究应力波在长杆中传播的形状与演化过程。正是由于他的研究工作具有开创性,人们将利用弹性应力波在长杆中的传播来测量材料动态应力应变响应的装置称为霍普金森(Hopkinson)杆。

1948年,Davies<sup>[2]</sup>对该技术做了总结,研究了压力波形在杆中传播的规律,提出了一种采用电学测试的改进方案,克服了早期实验的许多不足。

1949年,Kolsky<sup>[3]</sup>将试样放在两根杆中间,来测量材料的应力-应变曲线,这样就发展成了今天的分离式霍普金森压杆。因此,分离式霍普金森压杆又称为Kolsky杆或Davies杆。

以上这些科学家开创性的工作以及高精度应变片、高速信号采集和数字示波器等现代测试技术的发展为分离式霍普金森压杆技术的发展提供了有力支撑。

## 1.2 Hopkinson父子开创性的工作

1872年,Hopkinson J<sup>[4,5]</sup>在*Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*发表了两篇关于铁丝拉伸断裂的论文。论文介绍了波在铁丝中的传播理论,其中铁丝一端固定,另一端通过质量块施加一个拉应力脉冲,由此研究铁丝在不同加载条件下的强度。通过改变质量块的质量和速度来实现不同的加载条件,并观测铁丝是由入射波在加载端直接拉断,还是由反射波在固定端拉断。结果表明,反射拉断所需要的质量块速度仅为直接拉断时的一半。

三十三年后,Hopkinson B<sup>[6]</sup>继承了他父亲的实验。他加长了铁丝的长度,给出了波在其中传播的解析表达式。进而,他设计了一个实验,通过一个接触块A和电流表来测量铁丝中的瞬间伸长量,如图1.1所示。在实验中,滑块下落撞击铁丝端头的法兰,形成冲击加载。通过螺旋测微丝杆调节接触块A的预置位置,铁丝被加载后A向下运动,通过电流表是否有电流通过来确定A、B是否接触。他通过多次实验准确确定了铁丝的伸长量。这是首次采用定量的方法测量动态伸长量。

1914年,Hopkinson B<sup>[1]</sup>设计了一个能够测量炸药爆炸或子弹射击杆端时所产生的压力-时间关系的装置,这就是后来的霍普金森压杆装置的雏形。他在发表

的论文中这样写道：“如果用来复枪(rifle)发射一枚子弹撞击一圆柱形钢杆的端部，则在撞击期间，有一确定的压力作用在杆的端部，形成一个压力脉冲。这个撞击引起的压力脉冲沿着杆传播，在自由端发生反射产生一个拉伸脉冲。”如图 1.2 所示，药柱 A 用一个短木夹板固定在 B 杆的端面，钢杆直径为 1.25in(31.75mm)、长 15~30in(381~762mm)。整个装置悬挂起来，成为一个弹道摆。在 B 杆的另一端粘贴一个小圆柱体 C。小圆柱体 C 有 0.5~6in(12.7~152.4mm)长，用磁铁支撑，与接触面滑配。圆柱体的材料和直径与钢杆相同，将钢杆和小圆柱体的端面磨平，用油脂将小圆柱粘在钢杆上。

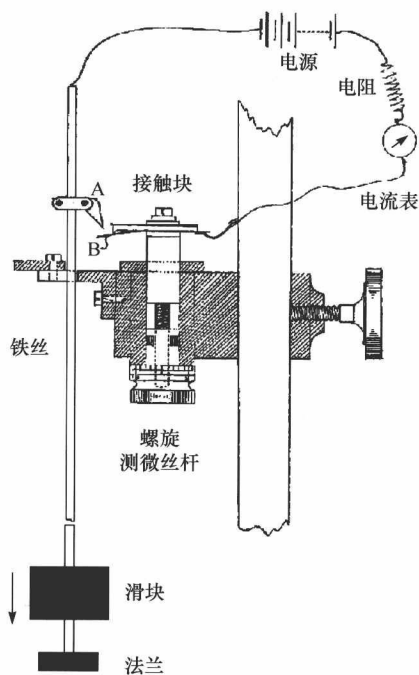


图 1.1 测量铁丝伸长量的装置<sup>[6]</sup>

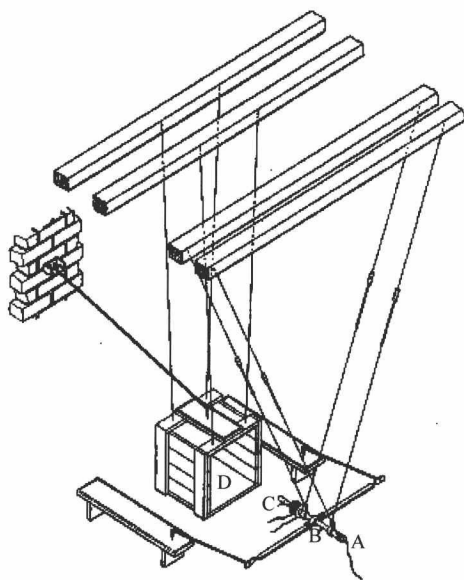


图 1.2 撞击杆中应力波传播示意图<sup>[1]</sup>

此方法的原理是，压力脉冲通过杆 B 与小圆柱体 C 间油脂的截面作用于 C，当到达小圆柱体 C 的另一个端面时，自由面反射拉伸波；而油脂的黏结力不足以承受拉应力，一旦拉伸波通过界面，小圆柱体 C 就会飞出，进入弹道摆 D。小圆柱体 C 的动量由弹道摆 D 测得，留在 B 杆内的动量则可由杆的摆动振幅来确定。小圆柱体 C 带走了压力脉冲中时间在 0 到  $T$  之间的动量， $T$  为小圆柱体 C 的长度的两倍除以声速。如果采用不同长度的小圆柱体 C 重复实验，就可以得到用方波脉冲近似组合而成的压力时间关系。图 1.3 中实线是 Hopkinson B 得到的原始结果，



实验中采用 1 盎司(1ounce=31.10g)的雷管爆炸作为压力脉冲源,测量距离爆点  $3/4\text{in}$  (19.05mm)位置处的压力历史曲线。图中长方形 1 的面积对应着  $1\text{in}$  (25.4mm)长的小圆柱体得到的冲量,相应的时间长度为  $10\mu\text{s}$ ,长方形 1 的高度对应着  $10\mu\text{s}$  [ $2 \times 25.4(\text{mm})/5100(\text{m/s}) \approx 10\mu\text{s}$ ]内的平均压力。以此类推,不同长度小圆柱体实验得到不同高度的方形脉冲,以冲量等效的原则,折合得到压力脉冲曲线,如图 1.3 中虚线所示。

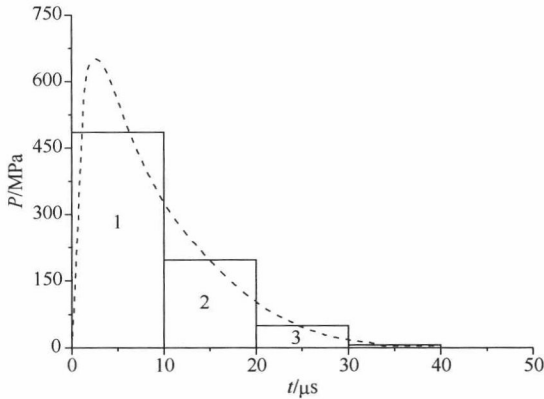


图 1.3 Hopkinson B 得到的实验结果<sup>[1]</sup>

虽然 Hopkinson B 的原始方案简单有效,并被成功应用于测量各种炸药的爆轰性能,但仍有一些不足之处。首先,该方案只能给出脉冲中各段压力时间曲线的积分,而在此过程中压力峰值以及压力时间曲线的演化过程均被忽略,得不到真正的压力时间曲线。其次,在实验中使油脂黏结段分开所需的压力不可测,从而引入了一个不确定因素,这导致该方案不能用来测量小脉冲波形。最后,虽然 Hopkinson B 已经注意到三维应力波在杆中传播的问题,并假设脉冲波形在杆中传播时不会变形,而这一点仅仅在脉宽远大于杆径且波形没有突变的条件下才能成立。

### 1.3 Davies 在压力波传播及波形检测方面的工作

1948 年,Davies 发表了题为“A critical study of the Hopkinson pressure bar”的论文<sup>[2]</sup>,使霍普金森杆实验技术取得了关键性的进步。

Davies 指出了霍普金森压杆在实验和理论上的局限。在实验和测量方面,Hopkinson B 的方案的局限性在于:一方面,在实验中使油脂黏结段分开所需的压力不可测;另一方面,不能直接得到压力时间曲线。在理论上,该方案的局限性表