

分离式 霍普金森(考尔斯基)杆 设计、试验和应用

Split Hopkinson(Kolsky)Bar
Design, Testing and Applications

[美] 陈为农 (Weinong W. Chen) 著
[美] 宋博 (Bo Song)
姜锡权 卢玉斌 译
王礼立 审校

国防工业出版社
National Defense Industry Press

 Springer

分离式霍普金森(考尔斯基)杆 设计、试验和应用

Split Hopkinson (Kolsky) Bar Design, Testing and Applications

[美] 陈为农 (Weinong W. Chen) 著
[美] 宋 博 (Bo Song)
姜锡权 卢玉斌 译
王礼立 审校

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2015-054号

图书在版编目(CIP)数据

分离式霍普金森(考尔斯基)杆:设计、试验和应用/(美)陈为农,(美)宋博著;姜锡权,卢玉斌译.
—北京:国防工业出版社,2018.8

书名原文:Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design,
Testing and Applications

ISBN 978-7-118-11350-1

I. ①分… II. ①陈… ②宋… ③姜… ④卢… III.
①力学-研究 IV. ①O3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第175325号

Translation from English language edition:

Split Hopkinson (Kolsky) Bar

by Weinong W. Chen and Bo Song

Copyright © 2011 Springer US

Springer US is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市众誉天成印务有限公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 17½ 字数 314千字

2018年8月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 98.00元



(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

Preface for Chinese version of the book

In this occasion of the publication of the Chinese translation of the book, I would like to take this opportunity to express my sincere appreciation for the tremendous effort invested by Professor Xiquan Jiang to bring the Chinese version of the book to the Chinese - speaking researchers in this field. Perhaps I could do the Chinese translation by myself. However, Professor Jiang's outstanding technical Chinese writing skills make the Chinese version of this book far better in quality than I could ever dream to do. I would also like to thank Professor Lili Wang's effort to proofread the translation. Professor Wang is a highly - respected expert in this area. I feel honored that this book got this much of his attention.

Kolsky bar is a high - rate material characterization method that has not been standardized yet. To ensure that we obtain results for different materials under specific testing conditions, it is important to know the loading conditions on the specimen when designing the experiments and analyzing the data. This book serves as an introduction to the experiment design using a Kolsky bar. Through the research exchanges connected by this book, I look forward to the opportunities to learn further developments on Kolsky bar by the research community.

Weinong W. Chen

在本书中文版出版之际,我想借此机会向姜锡权教授致以真诚的谢意,感谢他付出巨大努力将本书带给本领域讲中文的研究者们!或许我也可自己将原著译成中文版,但是姜教授等译者的杰出的汉语表达能力使本书中文版的质量远远超过了我梦寐以求的境界。我还要特别感谢王礼立教授为本书中文版审校。王教授是本领域德高望重的专家。我为本书受到他如此高度重视感到荣耀!

霍普金森杆是在高应变率下表征材料力学行为的方法,但迄今还没有标准化。为确保得到在特定的试验条件下不同材料力学行为的试验结果,在进行试验设计、数据分析时了解试件的加载条件是非常重要的。写作本书的目的是为霍普金森杆的试验设计提供一个入门指导。以本书为学术交流平台,我期待从学术界同仁们对霍普金森杆的进一步研究中获得学习的机会。

陈为农 (Weinong W. Chen)

译者序

在各类工程技术、军事技术和科学研究等广泛领域的一系列实际问题中,甚至在日常生活中,人们都会遇到各种各样的爆炸/冲击载荷问题,并且可以观察到材料在爆炸/冲击载荷下的力学行为往往与静载荷下的力学行为有显著不同,即有应变率效应。材料在爆炸/冲击载荷下的力学行为是诸多结构和工程研究的基础,而目前这类响应的研究主要还是以试验研究为主。

分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB),常简称霍普金森压杆(在美国常称为考尔斯基杆(Kolsky bar),以纪念为分离式霍普金森压杆发展作出划时代贡献的美国科学家考尔斯基(H. Kolsky))。术语“分离式霍普金森杆”(简称“霍普金森杆”)常被用作“分离式霍普金森压杆”“分离式霍普金森拉杆”“分离式霍普金森扭杆”的统称。分离式霍普金森(压)杆作为研究材料动态力学行为的几种主要试验设备和技术之一,已广泛用于一维应力状态下材料的动态力学行为特征试验研究,从而得到一簇以应变率为参数的应力-应变曲线,来刻画材料本构响应的应变率效应。与其他试验设备相比,霍普金森杆试验设备简单、加工成本低廉、操作简单高效、试验过程安全可靠。

本书的目的是向读者提供一套用霍普金森杆进行动态试验的应用知识。与研究准静态下材料本构响应的试验不同,目前依然没有公认的测量高应变率下(动态)材料本构响应的标准方法。因此,不同的实验室、不同的杆、不同的试验者所得的试验结果可能是不一致的。本书力图为设计和操作霍普金森杆试验提供一个实用的指导原则,从而提高试验结果的一致性。在一定程度上说,本书主要从细节上阐明霍普金森杆试验的设计、操作、评估和应用。

本书两位作者都是近年来国际上基于霍普金森杆研究材料动态力学行为方面的知名专家。他们长期从事相关领域的教学和试验研究工作。本书是他们教学和科研成果的结晶,是国际上第一本系统介绍霍普金森杆试验基本原理、试验设计、数据处理的专著。与一般专著不同,本书相当一部分内容是作者自己试验研究的结果和体会,内容具体,操作性强,对于相关领域的研究者来说就像一本高水平的实用教程。为了有助于我国相关研究领域的学者和研究生更好地开展相关研究,避免在英文版的一些细节理解上花费时间,特将此书翻译为中文出版。译者姜锡权曾经追随原著两位作者参加了一些霍普金森杆方面的工作,其中也包括本书点滴内容的外围工作。译者卢玉斌毕业于英国曼彻斯特大学,受

到过良好的英文教育,并且在材料动态行为研究领域有浓厚的研究兴趣和学术基础。因此,我们两人合作将本书译成中文。我们非常感谢作者和 Springer 出版社慷慨地授予我们版权;非常感谢国防工业出版社为本书中文版的出版所做的大量工作。

本人特别荣幸地邀请到我国爆炸/冲击动力学界著名学者、年逾八十的恩师王礼立先生为本书审校。书中多数“译校者注”为王先生所加。它加深了译者对原著的理解。译者认为这些注释进一步加深了本书中文版的学术研究色彩;同时在个别生僻、难于理解的细节问题上为读者做出了学术性的、通俗易懂的注解。相信许多读者也和译者一样,衷心感谢王先生虽年逾八十高龄,仍然从百忙学术活动中挤出时间为本书中文版审校,衷心感谢前辈对我们晚辈的培养和关怀,衷心感谢王先生在为师、敬业方面为我们做出了榜样。

由于译者中英文和学术水平限制,书中难免有疏漏、错别字及对原著理解和表达方面的错误,敬请读者指正,译者不胜感激!

姜锡权

2016年10月

邮箱:1748420793@qq.com

前 言

考尔斯基杆(Kolsky bar),也广泛称为分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)、霍普金森杆。霍普金森杆广泛用于高应变率下材料的力学行为特征试验研究,从而得到一族以应变率为参数的应力-应变曲线。本书的目的是向读者提供一套用霍普金森杆进行动态试验的应用知识。与研究准静态下材料本构响应的试验不同,目前依然没有测量高应变率下(动态)材料本构响应的标准方法。因此,不同的实验室、不同的杆、不同的试验者所得的试验结果可能是不一致的。本书就是想为设计和操作霍普金森杆试验提供一个实用的指导原则,从而提高试验结果的一致性。本书并不对霍普金森杆试验技术进行广泛的综述。读者可在参考文献中找到大量的综述文章。在一定程度上说,本书主要从细节上阐明霍普金森杆试验的设计、操作、评估和应用。

对于这样一个主题,作者首先从霍普金森杆的一般概念和基本原理的介绍开始,接着阐述各种类型霍普金森杆试验的设计指导原则。这些试验主要针对脆性材料、软材料、韧性材料的压缩试验,多轴(三轴)压缩和高、低温试验,动态拉伸和动态扭转试验以及中应变率试验,最后概略介绍霍普金森杆在动态结构试验方面的应用。对于每种类型的试验都介绍了设计原理,简述了关键性问题,并通过具体试验例子给出了具体的试验设计及结果。

本书由作者在亚利桑那大学、普渡大学为高年级本科生和研究生讲授《材料的动态力学行为》讲稿以及2009年试验力学年会上关于霍普金森杆的一个短期讲习班和“试验与应用力学博览会”上的讲稿改编而成。由于书中所涉及的材料复杂性,书中所选的例子主要来自于作者自己的研究试验。但是我们在一般意义上给出了各种类型霍普金森杆试验的设计指导原则、试验准备事项,以使读者能利用本书和他们自己的特殊需要设计自己的试验。

作者为能有机会长时间地将精力集中于这个特殊的研究领域感到非常荣幸。如果没有我们老师、顾问的指导,没有基金机构的长期支持,没有同事、学生的支持和帮助,要做到这一点是不可能的。我们真诚感谢过去20多年中与我们一起工作的许多人。

陈为农特别感谢将其带入本书所涉及领域和提供连续支持与合作的两位学者:G. Ravichandran 教授(现任加州理工学院工程与应用科学系主任)和 Michael J. Forrestal 博士(他已作为桑地亚(Sandia)国家实验室的杰出技术专家退休),非常感谢3位聪明的普渡大学研究生 Hwun Park, Oscar Guzman 和 Xu Nie 在本书图表工作方面的帮助,还要感谢担任本书部分原稿校对工作的 Danny Frew 博士和 John Foster 博士。

目 录

第 1 章 传统(常规)的霍普金森压杆	1
1.1 背景	1
1.2 霍普金森压杆简史	3
1.3 霍普金森压杆概述	6
1.4 霍普金森压杆的设计	12
1.5 大、小直径的霍普金森压杆	16
1.6 霍普金森压杆试验的标定和数据处理	18
第 2 章 霍普金森压杆试验的试验条件	25
2.1 一维平面弹性应力波的传播	25
2.2 界面摩擦	30
2.3 试件中的惯性效应	31
2.4 恒应变率变形	33
2.5 脉冲整形技术	34
2.6 单次加载和卸载控制	41
2.7 恒应变率上限	46
第 3 章 脆性材料的霍普金森压杆试验	50
3.1 霍普金森压杆的脆性材料试件	50
3.2 减小应力集中的垫块	53
3.3 万向节	55
3.4 脉冲整形	56
3.5 脆性材料的试验设计	57
3.5.1 玻璃陶瓷和石灰石	57
3.5.2 对陶瓷的加载-再加载	62
3.5.3 S-2 玻璃/SC15 复合物	70
3.5.4 玻璃在压缩/剪切下的失效	75

第 4 章 软材料的霍普金森压杆试验	78
4.1 表征软材料动态力学性能时所面临的挑战	78
4.2 试件设计	82
4.3 脉冲整形	86
4.4 力传感器的选择与应用	88
4.5 试验设计	92
4.5.1 有机玻璃(PMMA)	93
4.5.2 橡胶	95
4.5.3 泡沫材料	103
4.5.4 生物组织	111
第 5 章 韧性材料的霍普金森压杆试验	118
5.1 韧性材料霍普金森压杆试验中的问题	118
5.2 波形整形	120
5.3 韧性材料试验设计	122
5.3.1 金属	123
5.3.2 形状记忆合金	131
5.3.3 氧化铝填充环氧树脂	134
5.3.4 无铅焊锡	137
第 6 章 动态三轴霍普金森压杆试验	139
6.1 用于动态三轴试验的改进型霍普金森压杆	139
6.2 试件设计和安装	142
6.3 局部(当地)压力和变形测量	142
6.4 波形整形	145
6.5 砂在动态多轴应力下的响应	146
6.6 印第安纳石灰石在动态多轴应力下的响应	149
6.7 软材料的动态侧限试验	151
第 7 章 高低温条件下的霍普金森压杆试验	155
7.1 试件的加热和冷却	155
7.2 精确时控的自动化系统	158
7.3 不锈钢的高温试验	161
7.4 形状记忆合金的温度效应	166
7.5 环氧复合泡沫塑料的温度效应	167
7.6 硬质聚氨酯泡沫(PMDI)泡沫材料的温度效应	171

第 8 章 动态拉伸及扭转的霍普金森杆试验	174
8.1 对试样进行动态拉伸的方法	174
8.2 动态拉伸试件设计	180
8.3 动态拉伸试验中的波形整形	183
8.4 动态扭转的方法	183
8.5 动态扭转试件设计	185
8.6 动态拉压与扭转组合加载	186
8.7 动态拉伸试验举例	186
8.7.1 环氧树脂和有机玻璃	186
8.7.2 牛腱	189
8.7.3 橡胶	191
第 9 章 中应变率下的霍普金森压杆试验	193
9.1 中应变率范围试验数据的缺乏	193
9.2 中应变率下的材料试验方法	194
9.3 中应变率下聚合物泡沫的特征	200
第 10 章 用于动态结构试验的霍普金森压杆	208
10.1 动态断裂	208
10.2 动态等双轴弯曲试验	218
10.3 微机械结构的动态响应	221
10.4 低速侵彻	228
附录	231
参考文献	256

第1章 传统(常规)的霍普金森压杆

考尔斯基杆,也常称为分离式霍普金森压杆(SHPB),是一种表征在高应变率下($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$)变形的材料的力学响应的设备。本章简述其历史,并以压杆为例介绍霍普金森杆的一般工作原理、设计中的注意事项以及数据处理过程等。

1.1 背景

通常而言,列在设计手册和说明书上的材料力学性能参数,如屈服应力和极限强度等,是在准静态加载条件下,按照标准的试验程序,利用常规的试验测试装置获得的。为了保证在冲击条件下(如个人电子产品的跌落、汽车碰撞、运动撞击等)产品的质量和可靠性,必须准确表征在这类冲击载荷条件下的材料力学响应。然而,冲击加载条件所要求的高应变率超出了常规材料试验机所能达到的应变率范围。

此处举一例说明,一个10mm长的试件的一端在 $1 \sim 100 \text{ m/s}$ 的速度下变形,试件中的名义应变率为 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。这种应变率范围在与冲击相关的加载条件下是常常遇到的。然而,对于大多数的试验机而言,要想在精确控制方式下达到此应变率范围是困难的。另一方面,由于在冲击条件下(落锤撞击)所产生的应变率范围与工程中常常遇到的动态事件相对应,诸如球杆与高尔夫球的碰撞、头盔与硬表面的碰撞、鸟对飞机发动机部件的撞击等。因此,有必要研究材料在冲击(落锤撞击)条件下的动态力学性能。

传统落锤试验可使试件在冲击条件下从变形到破坏,但如果此类落锤撞击试验的目的是研究材料的动态力学性能,则可能存在两个主要问题:第一个问题是试验中能够记录到的应力应变的细节信息很少;第二个问题是对试件加载条件很难准确控制^①。1949年考尔斯基(Kolsky)以一种很巧妙的方法解决了上述问题,获得了精确控制条件下材料的动态响应。这个方法不再对试件进行直接撞击,取而代之的是将试件放置于两根弹性杆之间,然后由炸药爆炸给其中一根

^① 译校者注:与准静态试验相区别,高应变率冲击试验以计及应力波效应和材料应变率效应为特征。常规落锤试验的致命缺点在于无法满意地定量计及并区分这两种相耦合的效应。下述的霍普金森压杆的巧妙之处在于能对这两种效应解耦并进行定量分析。

杆加载一个应力脉冲。这种概念示于图 1.1, 外加载荷和试件之间的弹性杆称为入射杆, 而试件另一侧的弹性杆则称为透射杆。也有许多研究者将它们分别称为输入杆和输出杆。依这种布局, 当入射杆在外加冲击(如爆炸或撞击)的作用下, 在加载端便产生一个压缩应力波, 进而向试件方向传播。当波阵面扫过杆中一个一个横截面时, 推动杆横截面上的材料(质点)向试件方向运动。此运动依次传递在杆中形成应力波。当应力波到达入射杆和试件的接触端面时, 部分波反射返回入射杆并传向撞击(加载)端, 而另一部分则沿着试件传播进入透射杆。试验测试设备可记录入射杆中向试件传播的应力波、从试件反射回来的应力波及透射杆中的应力波。在这种试验布局下, 冲击事件(试验)是可控和可量化的。冲击速度和试件尺寸可变以实现不同的应变率。对在冲击事件中所记录的波的进一步分析可获得特定加载条件下试件中的受力及变形状态的信息。由于此装置是首次由考尔斯基于 1949 年提出的, 这种系统便称为考尔斯基杆, 或如随后所介绍的, 称为分离式霍普金森压杆(SHPB)^①。

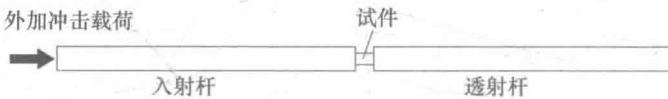


图 1.1 霍普金森压杆设计示意图

霍普金森压杆与常规的材料试验机相比有两个显著特点: 第一个是直径相对较小的霍普金森压杆的刚度与试件的相比不是特别高, 这与典型的液压或螺杆传动试验机中加载轴具有巨大的刚度不同; 另一个是霍普金森压杆不具备用于实时监控和调整对试件加载条件的闭环反馈控制系统。霍普金森压杆和试件之间的低刚度比表明在试验设计中试件的响应不可忽略。例如, 在相同加载波的作用下, 橡胶试件的响应与岩石试件的响应显著不同。在没有反馈控制系统的情况下, 霍普金森压杆试验最多也仅能以迭代方式达到所需的试验条件的开环方式进行。这些特征使得霍普金森压杆试验设计复杂化。为了实现试件上一系列所期望的试验条件, 必须根据试件的响应来设计霍普金森压杆试验中的加载条件, 而试件的响应原本是未知的。因此, 恰当设计霍普金森压杆试验对于获得有效结果起着关键性作用。

霍普金森压杆试验的最初形式只是用于动态压缩试验。在过去的几十年中霍普金森压杆技术已得到广泛的研究和发展。基于相同的原则和类似的机理, 其他应力状态下的相应试验装置(如拉伸、扭转、三轴压缩及轴向拉压/剪切组合)也得到相应的研究和发 展。这些试验方法之间的区别仅仅是加载及试件夹持方法的不同。在本章后续部分将更具体地介绍霍普金森压杆以说明此试验方

^① 译者注: 在中国学界通常称为分离式霍普金森压杆。

法的主要特征。

1.2 霍普金森压杆简史

考尔斯基压杆最早是由 Herbert (Harry) Kolsky (1917—1992) 于 1949 年发明的。考尔斯基压杆也常称为分离式霍普金森压杆 (SHPB) 以纪念 John Hopkinson (1849—1898) 和他的儿子 Bertram Hopkinson (1874—1918) 所做出的奠基性工作。在 1872 年, John Hopkinson 开展了由落重冲击致使铁丝断裂的试验, 图 1.2 是此试验的示意图。试验发现, 铁丝可能断于冲击端或断于固定端, 取决于冲击速度, 而与落重的质量无关。此试验最早揭示了铁丝中的应力波传播问题, 然而在 19 世纪测量应力波的传播还具相当的挑战性。Bertram Hopkinson 在 1914 年发明了长杆与短杆相组合的压杆用于测量由高能炸药或者子弹的高速冲击产生的压力脉冲形状及时长(图 1.3)。如图 1.3 所示, Bertram Hopkinson

(1914) 使用带有纸和铅笔的弹道摆以记录杆(圆柱形弹性杆)的运动。据此记录, 可以计算出火药棉(A)起爆对长杆 B 冲击形成的杆 B 中的动量及与杆 B 的另一端借磁力(或涂以少许油脂)相衔接(这种衔接使得压力脉冲通过接触面时不受什么影响, 但几乎不能承受拉力)的短杆 C 中的动量, 这是对起爆所产生的压力脉冲的一种测量。当杆 C 的长度小于压力脉冲长度(压力脉冲持续时间与压力脉冲在该介质中传播速度的乘积)的 1/2 时, 杆 C 和杆 B 都将飞离。逐渐增加杆 C 的长度直到发现杆 B 在加载后能处于静止, 而仅有杆 C 飞离, 从而求得杆 C 自身飞离而能保持杆 B 静止时的最小长度。加载波的持续时间就是波在杆 C 中往返一次所需的时间。如上所述, 弹道摆记录了冲击所产生的总的动量, 根据所获得的杆 C 的最小脉冲长度可计算压力脉冲的持续时间。因此, 便可获得由火药棉起爆(或子弹冲击)所产生的压力脉冲的压力-时间曲线。然而, 由于当时测量技术非常有限, 从本质上说, 所得测量结果只是对压力-时间曲线的一种近似。1923 年, Landon 和 Quinney (1923) 对这种技术进行了进一步讨论。1948 年, Davis 对这种技术开展了一个关键性研究。他使用平行板电容器和圆柱形电容器测量爆炸加载杆的轴向和径向运动, 如图 1.4 所示。这些电测方法比 Hopkinson 弹道摆的方法更为准确。Davis (1948) 还讨论了波在长杆中传播时的弥散问题。

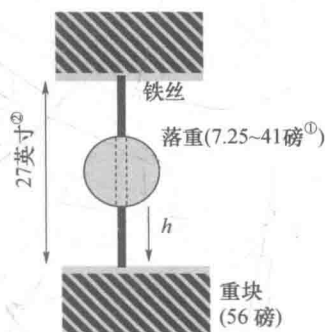


图 1.2 John Hopkinson 试验

发现杆 B 在加载后能处于静止, 而仅有杆 C 飞离, 从而求得杆 C 自身飞离而能保持杆 B 静止时的最小长度。加载波的持续时间就是波在杆 C 中往返一次所需的时间。如上所述, 弹道摆记录了冲击所产生的总的动量, 根据所获得的杆 C 的最小脉冲长度可计算压力脉冲的持续时间。因此, 便可获得由火药棉起爆(或子弹冲击)所产生的压力脉冲的压力-时间曲线。然而, 由于当时测量技术非常有限, 从本质上说, 所得测量结果只是对压力-时间曲线的一种近似。1923 年, Landon 和 Quinney (1923) 对这种技术进行了进一步讨论。1948 年, Davis 对这种技术开展了一个关键性研究。他使用平行板电容器和圆柱形电容器测量爆炸加载杆的轴向和径向运动, 如图 1.4 所示。这些电测方法比 Hopkinson 弹道摆的方法更为准确。Davis (1948) 还讨论了波在长杆中传播时的弥散问题。

① 1 磅 = 0.453 kg。

② 1 英寸 = 2.54 cm。

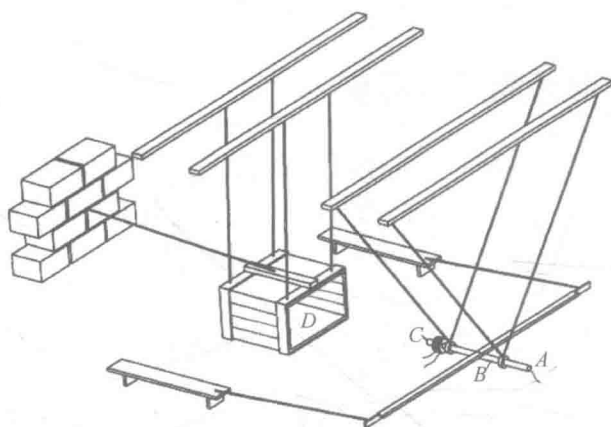


图 1.3 Bertram Hopkinson 试验(获准转载自 Hopkinson(1914))

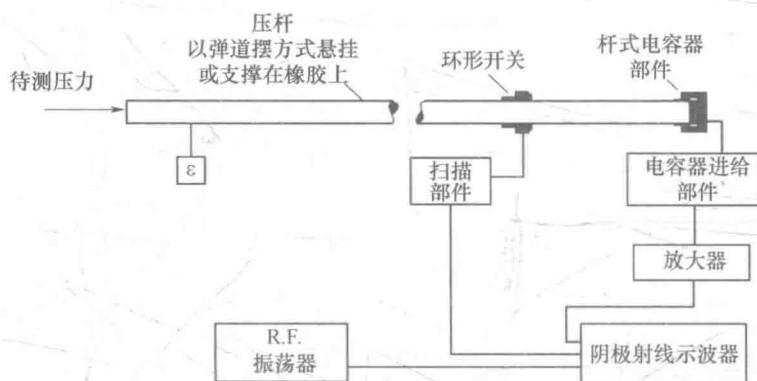


图 1.4 Davis 杆(获准转载自 Davis(1948))

Hopkinson、Davis 等研究工作的目的都是测量爆炸或子弹冲击所产生的压力 - 时间曲线, 尚未涉及材料动态力学性能的研究。

考尔斯基是将 Hopkinson 杆技术扩展用于测量冲击加载条件下材料的应力 - 应变响应的第一人^①。考尔斯基(1949)提出的压杆技术和 Davis(1948)的压杆技术类似, 区别只是考尔斯基使用两杆, 并将试件夹在两杆之间, 如图 1.5 所示。基于这种独特的技术, 考尔斯基(1949)获得了包括聚乙烯、天然橡胶和合成橡胶、有机玻璃(PMMA)、铜和铅等几种材料的动态应力 - 应变响应。

在他的文章中, 考尔斯基(1949)介绍了使用电容器(图 1.5)测得的信号计算应力 - 应变曲线的细节。他指出霍普金森压杆试验中的试件需要足

^① 译校者注: Taylor, G. I. (1946) 和 Volterra, E. (1948) 更早把试件夹入分离的霍普金森杆来研究材料动态力学行为, 称为分离式霍普金森压杆。可参看文献: 胡时胜, 王礼立, 等, 爆炸与冲击, 2014, 34(6), 641 - 657。

够薄以忽略试件中的轴向惯性。此外,试件和杆之间的端面摩擦及试件中的横向惯性可能会对被测材料实测的应力-应变响应带来一定的不确定性。研究发现由于试件和杆之间的摩擦存在,为了达到某一特定的应变需要比预期更大的加载应力。因此,考尔斯基(1949)推荐使用润滑剂以减小端面摩擦。考尔斯基(1949)还从能量观点出发定量分析了在高速变形下试件中的径向惯性问题,发现仅当应变率急剧变化时径向惯性的影响才是重要的,而且径向惯性与试件的半径平方成正比,进而指出应当使用半径较小的试件以减小径向惯性的影响。有关通过试件的长径比的设计来消除惯性效应的技术将在后文提出。

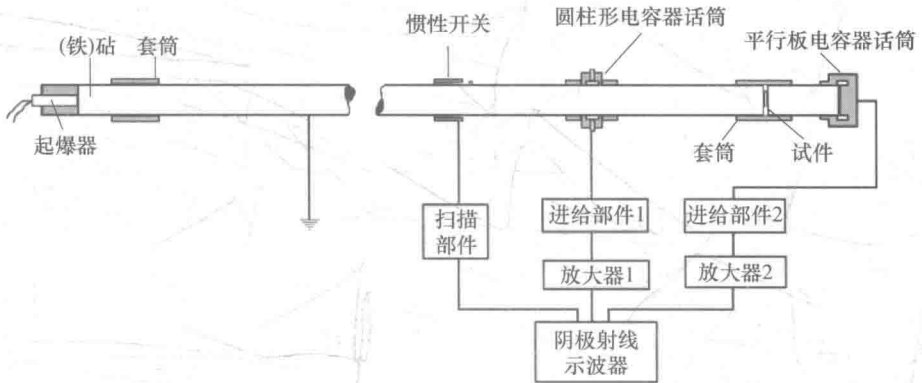


图 1.5 原始霍普金森压杆(获准转载自考尔斯基(1949))

在霍普金森压杆刚提出的头几年中,杆中的应力波是由电容器测量的。1954年 Krafft 等(1954)将应变片技术应用于测量霍普金森压杆中的应力波。后来应变片技术便成为霍普金森压杆试验中的标准测量技术。关于产生冲击应力脉冲的方法,考尔斯基最初提出用炸药起爆,然而使用这种方法要获得重复试验结果是很困难的。Krafft 等(1954)改用炮/枪发射一个弹体(常称为撞击杆)撞击入射杆。撞击杆的撞击形成一个梯形脉冲。Hauser 等(1961)使用 Hyge 速度发生器成功获得具有恒定幅值的应力波。在霍普金森压杆试验中通常认为梯形入射波是理想波形。1964年, Lindholm 结合前人的大多数改进,进一步完善了霍普金森压杆装置。Lindholm 的设计自此成为世界范围内试验室中霍普金森压杆的一种流行模版,当然此技术仍在不断改进以获得不同材料的更准确的高应变率数据。关于霍普金森杆技术的近期综述可见 Follansbee(1995)、Gray(2000)、Nemat-Nasser(2000)、Subhash 和 Ravichandran(2000)、Field 等(2004)和 Gama 等(2004)的工作。基于非常类似的机理但不同的加载和试件夹持方法,霍普金森压杆技术已被扩展到动态拉伸和扭转试验领域形成相应的试验技术。

1.3 霍普金森压杆概述

常见的霍普金森压杆装置由3个主要部分构成,即加载装置、杆组件以及数据获取与记录系统,如图1.6所示(Song等(2009b))。

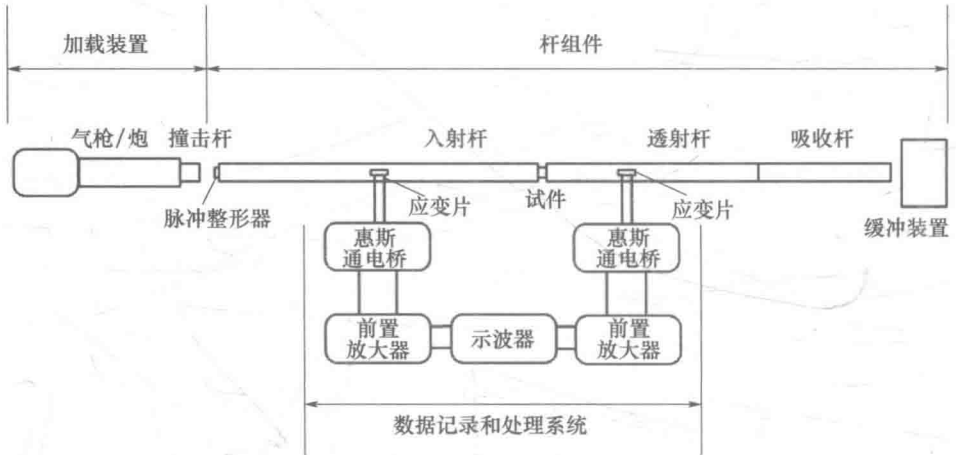


图 1.6 常见的霍普金森压杆装置(获准转载自 Song 等(2009b))

(1) 加载装置。在霍普金森压杆试验中,加载应可控、稳定且可重复。通常来说,加载方法可以是静态或动态类型。静态类型的霍普金森压杆如图1.7所示。入射杆上远离试件的一端与夹具之间部分承受静态压缩载荷。当突然松开夹具时,由于这种预压而储存的弹性变形能突然被释放并传入入射杆初始无应力部分,这就产生一个压缩波沿入射杆向试件的传播。现在这种静态加载类型的加载已很少用于霍普金森压杆,相反,目前常用的是动态加载类型。

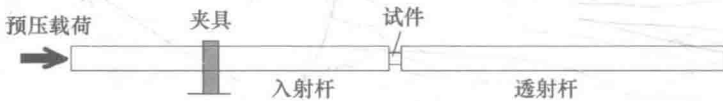


图 1.7 霍普金森压杆的静态加载类型

考尔斯基(1949)使用的爆炸方法是一种动态加载方式。然而,现在最常用的动态加载方式是发射撞击杆撞击入射杆。对于霍普金森压杆而言,现已发现气炮(枪)是一种有效的、可控的和安全的加载方式。通过突然释放在压力储存容器中的压缩空气(氮气)或轻气(氢、氦等)发射(突然推动)撞击杆,并使之在一个长的炮(枪)管里得到加速,直到其撞击入射杆端。在接近出口处(至炮口距离)的炮管开有泄气孔,从而使撞击杆以恒定速度碰撞入射杆(撞击时撞击杆后方没有气压作用)。在刚要碰撞之前通过光学或磁学方法测量撞击速度。这