

SHPB 系统

实验技术研究

SHPB Experimental Technique

陶俊林 / 著



科学出版社

SHPB 系统实验技术研究

陶俊林 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以提高SHPB系统实验结果的精度和可比性为目的,研究了如何准确地获得一般金属材料在高应变率下的动态压缩力学行为,进而为材料本构模型的研究及其参数的获得提供科学的基础数据,并从拓展SHPB系统实验技术出发,研究了更高应变率实验技术及材料动态卸载响应实验技术;同时本书还就如何测试混凝土材料在高温高应变率条件下的力学性能的实验技术进行了系统研究,为混凝土类材料高温、高应变率下的力学特性研究提供了技术条件。

本书可供从事材料动态力学性能及其测试技术方面研究的工作者参考,也可供相关学科研究生和高年级本科生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

SHPB 系统实验技术研究 / 陶俊林著. —北京: 科学出版社, 2014.9

ISBN 978-7-03-041883-8

I. ①S… II. ①陶… III. ①材料力学-冲击动力学-实验
IV. ①TB301-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 211405 号

责任编辑: 杨 岭 华宗琪 / 责任校对: 贺江艳
责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年9月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2014年9月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 220千字

定价: 60.00元

序

20 世纪五、六十年代,在郭永怀院士的倡导下,相关研究人员分别在中国科学院和中国工程物理研究院开展了材料动态力学性能的研究。王礼立、段祝平、胡时胜等几位教授以实验技术科学为核心,在中国科学院力学所、中国科技大学、宁波大学进行了开创性的研究;经福谦、孙承纬、陈裕泽等几位教授以国防应用为核心,在中国工程物理研究院开展了高压状态方程和低压本构的研究。“两弹一星”的事业需求,牵引着材料动态力学性能研究的学科发展,材料动态力学性能研究的技术进步,推动着国防科技更加全面的应用,国内几代科技工作者所取得的丰硕的研究成果,已经受到国内外同行的极大关注。

1950 年, Kolsky 提出的 SHPB 实验技术,至今仍是研究材料本构关系及其破坏判据的有效工具,也是研究低压下材料动态力学性能的重要技术。

SHPB 实验技术的主要应用包括:①确立材料动态广义力和广义变形的关系;②研究本构关系以及破坏判据对相关参量的依赖性;③在高压卸载状态下,研究材料的流体弹塑性状态。

众所周知, SHPB 系统的精巧之处在于设备简单、操作方便,波导杆既是加载装置,又是测试装置,但是,加载过程与测试数据的关联性对结果的影响较大,一般工程人员难以掌握。SHPB 实验的两个基本假定,即波导杆的一维应力假定及试件的应力和应变均匀性假定,它们是理论基础,但是,实验技术的工程化因素影响实验结果的精度,随着多参数的存在、多角度观察材料特性及多学科综合运用等方面需求的增加,对实验结果精度的要求就显得越来越重要了。

该书利用理论、实验和数值模拟三种研究手段,主要针对一般金属材料,较全面地研究了各种工程因素对 SHPB 系统实验结果的影响,其研究方法可以扩展 SHPB 系统在非金属、非均匀材料领域的应用。该书对影响材料动态压缩力学性能测试的各工程因素进行系统研究的方法是学科基础性的方法,对于影响材料动态拉伸、扭转力学性能测试的各工程因素的考察也有触类旁通的作用。在进攻和防御应用中,特殊的应用背景可能不满足材料制备的状态环境,故而研究不同材料在不同环境下的特性及其破坏的阈值是永恒的课题。

陶俊林教授长期从事材料和结构在爆炸冲击载荷下力学行为及相关实验技术

的研究，且近年来致力于高校的教学和科研，该书是作者在材料动载力学性能实验技术研究方面的结晶，可为从事这方面研究的科研人员提供非常有益的参考。

陈裕泽

2014 年 7 月于绵阳科学城

前 言

物件的结构及其组成材料可能承受爆炸和撞击等动态载荷的作用,如工程爆破、车辆的撞击、高速加工成型、弹体对装甲的侵彻、核爆炸及其防护、微陨石和雨雪风沙对飞行器的高速撞击等,伴随上述情况的还有材料上裂纹的快速扩展,裂纹尖端附近的介质处于高应变率(可大于 10^4 s^{-1})状态下的这一类动力学问题。这些情况使得人们对于武器效应、安全防护等方面的深入研究有着迫切需要,也就使得人们对于材料在爆炸、撞击等动态载荷作用下的力学性能越来越关注。材料在爆炸、撞击等载荷作用下的变形速率(一般用应变率来表征)远大于普通承载情况,因此,高应变率时的材料力学性能是核心研究领域。另外,从材料科学基础性研究的角度来说,速率效应(或时间效应)是研究材料变形和破坏的微观机理的关键因素。研究者们不断地进入这一领域,国家也从国家自然科学基金、国防科研等各个渠道投入了大量的资金来资助这方面的研究。

SHPB 系统实验技术是分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar)实验技术的简称,该实验技术由 Kolsky 于 1949 年提出,也被称为 Kolsky 杆实验技术,该技术已被广泛应用于材料高应变率下动态压缩力学性能的测试中。

在这半个多世纪的时间里,作为测试材料动态力学性能的实验方法之一,SHPB 实验技术得到了大的发展,已由最初的压缩实验系统发展到拉伸和扭转实验系统,甚至是压扭、拉扭复合系统,其测试材料的种类已由金属发展到非金属,由韧性材料发展到脆性材料,由密实材料发展到多孔材料,由一般的弹塑性材料发展到黏弹性、超弹性、黏塑性材料,由无机材料发展到有机材料;从常温实验发展到高、低温实验;从较低应变率实验发展到较高应变率实验。SHPB 系统在测试材料动态力学性能方面具有不可替代的作用,其发展前景非常广阔。

SHPB 实验的主要目的是获得材料的动态压缩应力-应变曲线,进而获得材料的动态本构关系,以用于结构的设计和分析。随着材料动态实验技术的发展及结构设计的精密化需求,人们已经不满足于材料动态本构关系及其参数的初步获取,而希望获得更加准确的本构关系参数,这首先要求提高实验结果的精度。SHPB 系统实验技术目前研究的重点和难点之一就是进一步提高实验结果精度。

随着研究需求和国家投入的增加,国内拥有 SHPB 系统的单位从最早的中国

科学院力学研究所、中国科学技术大学和中国工程物理研究院等寥寥几家发展到现在的几十家，这对于材料动载压缩力学性能的研究有着非常积极的意义。但是，在利用 SHPB 系统进行材料动载压缩力学性能测试中，仍有些重要问题没有得到很好的解决，如对于同一种材料，不同的研究单位测得的数据和曲线可能相差较大等。国外也存在类似情况。

随着对材料本构参数准确性要求的提高，需要进一步提高动态实验测试参数及曲线的准确度。这就需要对影响动态实验数据准确性的相关因素进行更加深入、细致的研究，这些因素包括系统设计、实验过程、数据处理等各个方面。为此，作者认为尚需对以下一些具体问题做进一步研究：

(1) SHPB 试件设计的进一步分析。人们虽然通过对 SHPB 试件的惯性效应分析得到了减小惯性效应的试件最佳尺寸比，然而人们所得到的最佳尺寸比是试件瞬时长度和直径的比值(以下简称长径比)，而试件在加载过程中，其瞬时长径比是随时间变化的，即最佳尺寸比只在某一瞬时成立而不能在加载过程中一直成立。那么，如何根据所得的最佳瞬时长径比来设计试件的原始尺寸比还有待进一步研究。另外，对试件惯性效应的分析仅仅获得了试件尺寸比，还不能获得试件长度或直径的具体值，这些具体值与什么因素相关，应当如何确定这些值均需要进一步研究。

(2) 试件与波导杆阻抗匹配关系研究。许多文献都谈及试件与波导杆阻抗匹配问题，并认为试件和波导杆的阻抗匹配对实验结果有影响，但一直没有提及试件与波导杆阻抗匹配量化要求的分析报道，试件与波导杆的阻抗究竟应当满足什么条件才有利于提高实验的精度还需进一步研究。

(3) SHPB 系统对加工精度和装配精度要求的分析。SHPB 实验是通过应变片测得波导杆的变形信息，根据一维应力波理论推出波导杆与试件接触面的相关信息，进而获得试件的应力、应变信息。在 SHPB 实验中，应变片测得的信息不仅包含试件的变形信息，也包含试件与波导杆界面的接触信息，试件与波导杆的接触情况会影响实验结果的精度。SHPB 系统的加工精度和装配精度不仅影响着试件与波导杆的接触情况，同时其精度要求是组建 SHPB 系统的基本要求，这也正是 SHPB 系统实验技术急需进一步研究的课题之一。

(4) 试件与波导杆应力、应变均匀性分析。试件在弹性和塑性阶段的应力和应变的均匀情况对实验结果的有效性有重要影响，而目前对试件应力均匀性的分析还基本上局限于利用一维应力波理论分析试件弹性阶段的应力平衡过程，未对塑性阶段的应力均匀性进行分析。在 SHPB 系统实验中，接触界面存在几何间断和物理间断，应力波在间断面的传播将不满足一维应力波传播规律，界面的应力状态不满足一维假定，其实际上处于三维应力状态。应变片测得的信息究竟能在

何种程度上反映界面上的应力和应变状态？接触界面存在的几何间断和物理间断对试件的应力和应变的均匀性有无影响？这些问题关系到 SHPB 实验结果的有效性和可靠性，是值得深入研究的问题。

(5)对平均应变率值参量的进一步分析。在材料动态力学性能测试中，通常使用试件在加载过程中的各个时刻应变率的算术平均值(平均应变率)来表征实验所得应力—应变曲线。而同一个平均应变率值可以对应不同的应变率随时间变化的规律。应变率随时间变化的规律对材料的动态力学性能是否有影响，这不仅关系到实验结果的精度，还关系着对材料变形机制的认识，是值得深入研究的问题。

(6)对材料在准静态和准动态条件下的卸载响应研究。人们将材料分为弹性材料、弹塑性材料、黏弹性材料以及黏塑性材料，要确定某种材料属于哪一类材料，需要根据材料在加载和卸载条件下的响应特性来判断。人们利用材料试验机对材料在准静态条件下的卸载响应，做了比较充分的研究；而对材料在动态载荷下的卸载响应的研究，则主要集中在高压强间断脉冲作用下材料的层裂破坏，但对低压较低强度应力脉冲作用下的材料卸载响应则研究得很少。关于后者的研究，对于确定材料在动载下的分类，以及进一步了解材料在静态和动态载荷下差别及其原因的分析有着重要的作用。

上述问题对于提高 SHPB 实验的精度、数据的可比性与可靠性，以及进一步提高人们对材料动态力学性能的认识，加深对材料塑性流动机制的了解都有着重要的意义。

本书一是从理想情况出发，分析了满足 SHPB 系统波导杆一维假设所需的子弹和波导杆的长径比要求(第 1 章)，以及试件的尺寸设计要求(第 2、3、5 章)，建立起理想的 SHPB 系统；二是从实际出发，分析了 SHPB 系统中子弹、波导杆和试件的加工精度及装配精度要求(第 4 章)；三是从满足 SHPB 系统应力均匀假设出发，分析了试件与波导杆应力、应变均匀性(第 5 章)；四是从提高 SHPB 系统实验结果的精度和可比性出发，特别强调在材料动载力学性能测试时实现恒应变率的必要性和重要性，并提出了两种行之有效的实验方法(第 6 章)；五是从具体实验技术出发，对实验中应变片的粘贴、实验数据的处理方法等所涉及的关键问题给出了有效的解决途径(第 4、5、6 章)；六是从拓展 SHPB 系统实验技术出发，研究了更高应变率实验技术和材料动态卸载响应的实验技术(第 7 章)；前面 6 个方面的研究主要针对的研究对象是一般金属材料，其基本思路和要求对于测试其他类型材料的动态压缩力学性能也是适用的，可以借鉴分析。本书还对混凝土材料高温高应变率共同作用下的力学性能测试技术进行了研究和简要的介绍(第 8 章)。

本书各个章节的主要内容如下:

第1章, SHPB系统实验简介。主要从 SHPB 实验原理、子弹和波导杆长径比要求、SHPB 实验过程及注意事项等几个方面对 SHPB 实验系统进行一个简要而全面的介绍。

第2章, 试件惯性效应与界面摩擦效应的综合分析。通过综合分析在 SHPB 系统圆柱形试件的惯性效应、试件与波导杆端面摩擦效应对实验结果的影响, 给出一个新的理论分析模型, 用以修正 Gorham(1989)所得的惯性效应分析公式。在此基础上, 归纳出为提高 SHPB 实验结果精度, SHPB 实验应遵循的几个要求, 并对 SHPB 试件设计中(特别是大应变情况)试件尺寸比例的设计作了进一步的分析, 获得了试件设计时应满足的尺寸比要求。

第3章, 波导杆与试件阻抗匹配关系研究。通过将试件看作一个刚度系数变化的弹簧, 建立了一个理论模型, 并进行了相应的分析工作。为 SHPB 系统波导杆和试件的材料及尺寸应当如何选择才满足阻抗匹配适度的要求提供依据。提出了可反映波导杆与试件阻抗匹配关系的无量纲参数 α 和 β , 并给出了波导杆与试件阻抗适度匹配所要求的 α 和 β 的取值范围。

第4章, SHPB 系统端面平行度加工及装配同轴度要求分析。通过数值计算, 分析了 SHPB 系统端面不同平行度及装配不同轴度对测试结果的影响, 进而获得了实际加工过程中对系统端面不同平行度和装配不同轴度的量化要求。另外, 根据计算结果, 还可对实验中的测试方法的选择, 以及实验中异常波形的分析提供有益的指导。

第5章, 试件与波导杆应力、应变均匀性分析。通过三维数值模拟, 在理想接触状态下, 分别对 SHPB 系统中试件为弹性和弹塑性材料情况时, 试件与波导杆的应力、应变均匀性问题进行了分析, 重点分析了试件为弹塑性材料时的情况。通过改变试件直径与波导杆直径之比、试件材料的弹性模量、屈服强度和硬化模量, 研究了试件与波导杆横截面积及材料性能不一致对试件与波导杆的应力、应变均匀性的影响, 获得了满足试件应力和应变均匀性要求的试件直径与波导杆直径的比值, 并简单分析了 SHPB 实验数据处理方法计算所得的结果与试件单元输出结果之间的关系。

第6章, 恒应变率实验技术研究。提出了两套可实现试件恒应变率加载的实验方法, 并通过实验和数值模拟手段进行了相应的验证和分析工作, 揭示了应变率时间历程对材料应力应变曲线的影响, 指出了只使用平均应变率来表征材料动态应力-应变曲线的不足, 在材料动态实验及相应的本构关系的研究中应当重视应变率历史效应。在实现恒应变率加载的条件下, 会使实验结果具有更好的可比性及一致性。

第7章, 更高应变率实验技术和动态卸载实验技术探索。对小直径(直径小于或等于5 mm)SHPB实验方法和直接撞击霍普金森杆(DIHPB)实验方法进行了研究, 获得了几种材料应变率达到 10^4 s^{-1} 的动态压缩应力-应变曲线, 指出了需进一步研究的问题。另外, 通过利用柱锥形子弹代替圆柱形子弹, 有效地延长了入射脉冲卸载段的长度, 初步探索了一种利用 SHPB 系统来研究材料动态卸载响应的实验方法。

第8章, 混凝土高温动态压缩实验技术研究。针对混凝土材料的热惰性、加热均匀性较差等特点, 采用微波对混凝土材料进行加热, 对混凝土试件的加热、防爆方法和加热后温度场均匀性等进行了研究, 实现了对混凝土的快速均匀加热。同时, 探讨了混凝土材料高温 SHPB 的相关实验技术, 如试件的保温和装配、试件与波导杆接触后的热传导、SHPB 实验系统的调试、入射波的控制、实验数据的处理等, 并且利用 ANSYS 有限元软件进一步分析了混凝土试件与波导杆接触后的热传导及其温度场的分布情况。

第9章, 总结和展望。

陶俊林

2014年7月

目 录

第 1 章 SHPB 系统实验简介	1
1.1 引言	1
1.2 SHPB 系统实验原理简介	2
1.3 子弹和波导杆长径比要求	3
1.4 子弹长径比对入射波形影响的实验研究	5
1.5 小结	6
第 2 章 试件惯性效应与界面摩擦效应的综合分析	7
2.1 引言	7
2.2 试件惯性与界面摩擦综合效应的理论分析	7
2.3 SHPB 试件尺寸比的设计分析	11
2.4 试件径向惯性效应分析	14
2.5 小结	17
第 3 章 波导杆与试件阻抗匹配关系研究	19
3.1 引言	19
3.2 SHPB 系统波导杆与试件阻抗匹配分析理论模型	19
3.3 无量纲参数取值范围的初步确定	27
3.4 实验波形与理论波形的比较	29
3.5 小结	29
第 4 章 SHPB 系统端面平行度加工及装配同轴度要求分析	30
4.1 引言	30
4.2 SHPB 系统端面平行度加工要求分析	31
4.3 SHPB 系统装配同轴度要求分析	44
4.4 小结	55
第 5 章 试件与波导杆应力、应变均匀性分析	57
5.1 引言	57
5.2 试件为弹塑性材料时的分析	58
5.3 试件为线弹性材料时的情况	72

5.4 小结	76
第6章 恒应变率实验技术研究	77
6.1 引言	77
6.2 Ellwood 等改进方法和脉冲整形技术简介	78
6.3 恒应变率实验设计	80
6.4 恒应变率加载方法实验研究	81
6.5 恒应变率加载方法数值模拟研究	83
6.6 应变率-时间曲线对应力-应变曲线影响的初步探讨	86
6.7 应变率恒定程度度量方法	90
6.8 对材料动态实验与本构关系中应变率参量的进一步思考	91
6.9 小结	97
第7章 更高应变率实验技术和动态卸载实验技术探索	98
7.1 引言	98
7.2 小直径 SHPB 实验方法	98
7.3 DIHPB 实验方法	101
7.4 研究材料动态卸载的一种实验方法	106
7.5 小结	112
第8章 混凝土高温动态压缩实验技术研究	114
8.1 引言	114
8.2 快速均匀加热混凝土的微波加热装置	115
8.3 试件的加温与防爆措施	116
8.4 加热后试件温度均匀性的评估	117
8.5 实验时试件与波导杆温度变化的测试分析	118
8.6 试件与波导杆接触热传导的数值模拟	120
8.7 SHPB 实验系统的调试及入射波的控制	124
8.8 实验数据处理方法	125
8.9 小结	127
第9章 总结和展望	128
9.1 主要结论	128
9.2 创新点	130
9.3 展望	131
参考文献	132
后记	135
彩色图版	

第 1 章 SHPB 系统实验简介

1.1 引言

SHPB 实验技术是分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar)实验技术的简称,该实验技术由 Kolsky 于 1949 年提出^[1],也被称为 Kolsky 杆实验技术,已被广泛应用于材料在高应变率下动态压缩力学性能的测试。

材料在高应变率下的动态力学性能已越来越受到人们的重视。首先,大量实际问题的解决有赖于人们对材料动态力学性能的了解。这包括爆炸和撞击等动载荷下材料和结构的动力学问题,如地震、工程爆破、高速加工成型、弹体对装甲的侵彻、核爆炸及其防护、微陨石和雨雪风沙对飞行器的高速撞击,以及表面陨星坑的形成等方面的研究;也包括裂纹的快速扩展,裂纹尖端附近的介质实际处于高应变率(可大于 10^4 s^{-1})状态下的这一类动力学问题。其次,从材料科学基础性研究的角度来说,速率效应(或时间效应)是研究材料变形和破坏的微观机理的关键因素^[2]。

对材料的动态力学性能可从三个方面进行研究^[3]:理论分析、数值模拟和实验研究,其中实验研究占有重要地位。这不仅因为它可为我们提供第一手资料,可用来证实理论分析和数值模拟的结果,还因为材料动力学所涉及的冲击过程都是完成于一瞬间,是人们的感官所不能分辨的,观察它们必须借助科学实验。而且自然界中的一些撞击现象大多又具有突发性,详细观察这些现象也必须依赖实验。

在半个多世纪的时间里,作为测试材料动态力学性能的实验方法之一,SHPB 实验技术得到了大力的发展,已从最初的压缩实验系统发展到拉伸和扭转实验系统甚至压扭、拉扭复合系统,其测试材料的种类已从金属发展到非金属,从韧性材料发展到脆性材料;从常温实验发展到高、低温实验;从较低应变率实验发展到较高应变率实验。在这些发展过程中,人们对许多与实验技术相关的问题进行了研究,如波导杆与试件在实验过程中质点的横向惯性运动(波导杆的弥散效应、试件的惯性效应等)、波导杆与试件的摩擦效应及横截面积匹配、试件中应力波传播效应、更高应变率实验技术(应变率在 10^4 s^{-1} 左右),以及波形整形技术等。

SHPB 实验的主要目的是获得材料的动态压缩应力-应变曲线,进而获得材料的动态本构关系,以用于结构的设计和分析。随着材料动态实验技术的发展,以及结构设计的精密化需求的提高,人们已经不满足于材料动态本构关系及其参数的初步获取,而希望获得更加准确的本构关系参数,首先就要求提高实验结果

的精度。SHPB 实验技术目前研究的重点之一就是进一步提高实验结果精度。另外，由于目前 SHPB 实验还没有具体可行的规范，可能导致同一个人利用不同的 SHPB 系统测试同一种材料的动态压缩力学性能得到的结果有较大差别，也可能导致不同人利用相同的 SHPB 系统测试同一种材料的动态压缩力学性能得到的结果有较大差别。

本书将对 SHPB 系统实验技术若干重点和难点问题开展进一步的研究，试图为解决这些问题提供有益的帮助。

1.2 SHPB 系统实验原理简介

SHPB 系统简图及应力波波图如图 1.1 所示。其实验过程是：子弹以某一速度撞击输入杆时，在输入杆内产生一个入射脉冲 ϵ_i ，当应力脉冲到达试件时，试件在该应力脉冲作用下发生变形，并在输入杆中产生一个往回的反射脉冲 ϵ_r ，在输出杆中产生一个向前的透射脉冲 ϵ_t 。

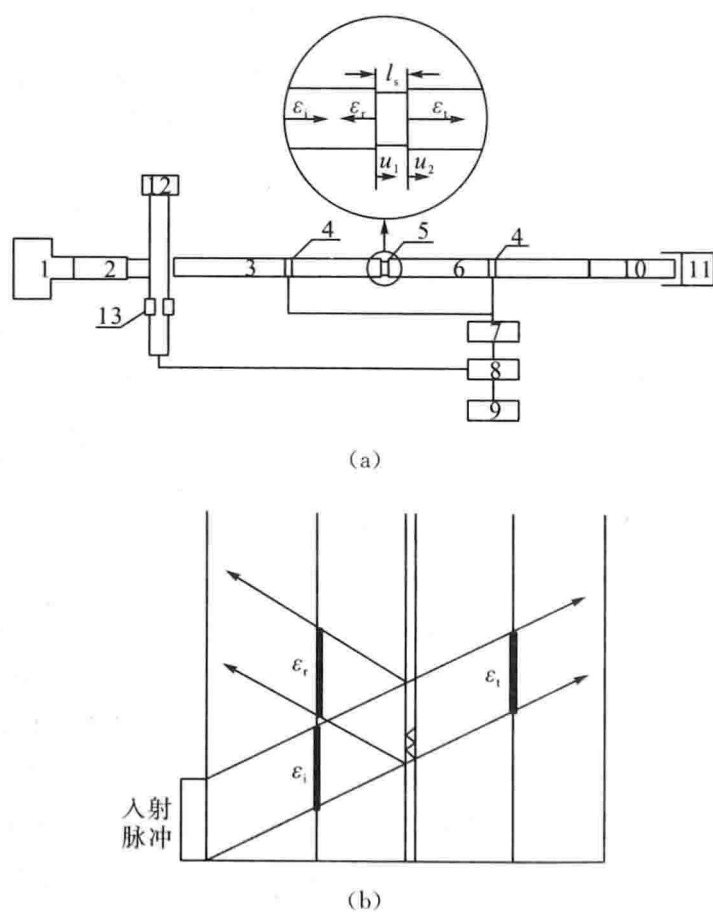


图 1.1 SHPB 系统简图及应力波波图

- 1—子弹发射装置；2—子弹；3—输入杆；4—应变片；5—试件；6—输出杆；
7—超动态应变仪；8—波形存储器；9—计算机；10—吸收杆；
11—回收装置；12—平行光源；13—光电二极管

SHPB实验系统在进行材料动态力学性能实验时,要求波导杆(包括输入杆与输出杆)在实验过程中始终保持弹性,系统的主要假设是一维应力假定,即试件与波导杆中应力是一维的,只存在轴向应力,这使应力波在波导杆中的传播满足一维弹性应力波理论。由一维应力假定可得^[4]

$$u_1 = C_0 \int_0^{t_0} \epsilon_i dt + (-C_0) \int_0^{t_0} \epsilon_r dt = C_0 \int_0^{t_0} (\epsilon_i - \epsilon_r) dt, \quad P_1 = EA(\epsilon_i + \epsilon_r) \quad (1-1)$$

$$u_2 = C_0 \int_0^{t_0} \epsilon_t dt, \quad P_2 = EA\epsilon_t \quad (1-2)$$

式中, u_1 、 u_2 分别为输入杆、输出杆与试件相接触的端面的位移; C_0 为波导杆的弹性纵波波速; P_1 、 P_2 分别为作用在试件两端的力; E 为波导杆的弹性模量; A 为波导杆的横截面积。

由式(1-1)和式(1-2)可以推出试件上的应变 ϵ_s 、应变率 $\dot{\epsilon}_s$ 和应力 σ_s 为

$$\epsilon_s = \frac{u_1 - u_2}{l_s} = \frac{C_0}{l_s} \int_0^{t_0} (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt \quad (1-3)$$

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{d\epsilon_s}{dt} = \frac{C_0}{l_s} (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) \quad (1-4)$$

$$\sigma_s = \frac{P_1 + P_2}{2A_s} = \frac{EA}{2A_s} (\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \quad (1-5)$$

式中, l_s 为试件的长度; A_s 为试件的横截面积。

如果假设试件两端应力相等(通常称为均匀性假定),可得^[4]

$$\epsilon_i + \epsilon_r = \epsilon_t \quad (1-6)$$

将式(1-6)代入式(1-3)~式(1-5),可得

$$\epsilon_s = \frac{2C_0}{l_s} \int_0^{t_0} (\epsilon_i - \epsilon_t) dt = -\frac{2C_0}{l_s} \int_0^{t_0} \epsilon_r dt \quad (1-7)$$

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{2C_0}{l_s} (\epsilon_i - \epsilon_t) = -\frac{2C_0}{l_s} \epsilon_r \quad (1-8)$$

$$\sigma_s = \frac{EA}{A_s} (\epsilon_i + \epsilon_r) = \frac{EA}{A_s} \epsilon_t \quad (1-9)$$

根据波导杆上测得的应变信号,利用式(1-3)~式(1-5)或式(1-7)~式(1-9)就可得到试件上的应变 ϵ_s 、应变率 $\dot{\epsilon}_s$ 和应力 σ_s 。一般式(1-3)~式(1-5)称为三波处理公式,式(1-7)~式(1-9)称为两波处理公式。

1.3 子弹和波导杆长径比要求

为了保证 SHPB 系统的一维应力假定成立,就要求 SHPB 系统中的波导杆和子弹能够从几何上保证一维特征,而具有理想一维几何特征的波导杆和子弹是不存在的。对于有限长的波导杆和子弹,为了更接近一维特征,就要求其是长径

比尽可能大的细长杆。但是,一方面,高精度要求的细长杆的加工非常困难,另一方面,过大的长径比会引起杆件的轴向压缩失稳,因此,在实际应用中,对波导杆和子弹的长径比不应该取得过大,当然也不能取得过小,过小则不能够保证 SHPB 系统的一维应力假定成立。下面将分析要较好地满足一维应力假定,波导杆和子弹的长径比应满足的最低要求。

SHPB 系统内波导杆中的弹性应力波可以借频谱分析方法分解成一系列的谐波,各个谐波的频率和波长各不相同,而各个谐波均按自己的、相互不同的相速度传播,这样,应力波波形在波导杆中传播时将不会保持原形而会发散开来,即发生所谓的波的弥散现象,这会造成波形逐渐拉宽与变平^[5]。在 SHPB 系统实验中,一般由波导杆中部测试的信号来代替试件与波导杆接触界面的信息,而由于应力波的弥散特性,波在传播过程中的弥散效应将影响实验结果的精度。

文献 [5] 与 [6] 在不考虑材料黏性的条件下,给出了波在圆柱形弹性杆中传播的近似解:

$$C_p \approx C_0 \left[1 - \pi^2 \nu^2 \left(\frac{r}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (1-10)$$

式中, ν 和 r 分别为弹性杆的泊松比和半径; λ 为组成应力脉冲某个谐波的波长; C_p 为该谐波的传播速度(相速); C_0 为不考虑泊松效应时的一维应力波速。

要保证 SHPB 实验的一维应力假定,就应当使每个谐波的相速度 $C_p = C_0$, 即要求

$$\pi^2 \nu^2 \left(\frac{r}{\lambda} \right)^2 \ll 1 \quad (1-11)$$

而一般钢材的泊松比为 0.24~0.3, 其 $\pi\nu < 1$; 铝的泊松比一般是 0.33, 其 $\pi\nu = 1.036 \approx 1$ 。因此可得,只要 $(r/\lambda)^2 \ll 1$, 式(1-11)就成立,则 SHPB 系统的一维应力假定就可以成立。式中 λ 为某个谐波的波长, λ 越大,式(1-11)越容易满足。在此,不妨设最短波长为 λ_s , 其与弹性杆的半径 r 之间的关系可写为 $\lambda_s = n_s r$ 。如果用 δ 表示容许的 C_p 与 C_0 的相对误差,则可得

$$\delta = \frac{C_0 - C_p}{C_0} \approx \left(\frac{r}{\lambda} \right)^2 \quad (1-12)$$

考虑最短谐波波长 λ_s , 则可得

$$\left(\frac{1}{n_s} \right)^2 = \delta \quad (1-13)$$

按照工程惯例可取 $\delta = 0.05$, 则 $n_s = 4.47$, 即最短谐波波长必须大于或等于波导杆半径的 4.47 倍,才能保证 C_p 与 C_0 的相对误差在 5% 以内。

通常在 SHPB 实验中,输入脉冲为矩形波。文献 [7] 给出了考虑波导杆横向泊松效应的 Love 波动方程:

$$\rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\nu r^2}{2} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} \right) = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1-14)$$

按三角级数展开求解位移和应变，其计算结果是当选的项数大于 4，也就是其奇数次谐波频率大于 9 倍基频(即高频项波长小于矩形波宽的 1/9)时，其级数和才能反映出矩形脉冲的特征。在此，不妨选最高频谐波波长为矩形波宽的 1/10 来进行分析。假设矩形脉冲的波宽为 λ_0 ，则 λ_0 应当不小于最高频谐波波长的 10 倍，而由谐波频率与波长的反比关系可知， $\lambda_0 \geq 10\lambda_s$ 。

由 SHPB 系统实验原理可知，在一般的 SHPB 实验中，波导杆中的应力波由相同材料和直径的圆柱形子弹撞击产生，而根据一维应力波理论可知，所产生的理想应力波为一矩形波，其波宽是弹丸长度 L_0 的 2 倍，即 $\lambda = 2L_0$ ，可得 $2L_0 \geq 10\lambda_s$ ，而 $\lambda_s = n_s r$ ， $n_s = 4.47$ 。则有

$$\frac{L_0}{2r} \geq 2.5n_s = 11.18$$

(1-15)

为了方便，不妨取 $L_0/2r \geq 12$ 。即为了保证 SHPB 系统实验的一维应力假定，对于通常的钢制或铝制 SHPB 系统，其子弹长度与直径之比应不小于 12。

为了在输入杆上能用一个应变片测试完整的人射波和反射波，要求输入杆的长度至少是子弹长度的 2 倍，考虑到消除输入杆端部效应的影响，可取输入杆的长度为子弹长度的 2.5~3 倍，而其直径与子弹相同，所以，输入杆的长度与直径之比应不小于 30。由于输出杆只测试一个透射波形，其长度可比照输入杆的长度或稍短，一般情况下，为了输入杆和输出杆能够互换使用，两者的尺寸均取相同。

1.4 子弹长径比对入射波形影响的实验研究

为了验证 1.3 节的理论分析的正确性，研究人员做了一组不同长度但直径相同的子弹以基本相同的速度撞击同一根波导杆的实验，子弹和波导杆都是钢材制作的，表 1.1 是子弹长径比对入射波形影响实验的基本参数。

表 1.1 子弹长径比对入射波形影响实验基本参数

序号	子弹和波导杆直径 /mm	子弹长度 /mm	子弹长径比	子弹速度 /(m/s)	波导杆长度 /mm
1	25	300	12	31.9	1200
2	25	200	8	31.2	1200
3	25	96	3.84	32.4	1200

图 1.2 是不同长径比的子弹撞击波导杆时，波导杆中部应变片采集到的波形。由图 1.2 可以看出，随着子弹长度的变短，波的振幅值和形状产生了比较明显的变化，波的振幅值越大，波的形状偏离理想的矩形波形越远。也就是说，波宽随着子弹长度变短，产生的应力波中各谐波的相速度相差较大，波导杆中的应力状态将逐渐偏离一维状态。从图 1.2 中还可以看出，长径比为 12 的子弹所对