

中南工业大学出版社 博士丛书

BOSHI CONGSHU

岩石冲击动力学

ROCK IMPACT DYNAMICS



B
夕兵 古德生 著 中南工业大学出版社

封面设计:李星星

ISBN 7-81020-670-2



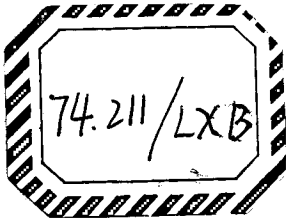
9 787810 206709 >

ISBN 7-81020-670-2/TD · 034

平装:12.00 元
定价: 精装:16.00 元

岩石冲击动力学

李夕兵 古德生 著



中南工业大学出版社

ROCK IMPACT DYNAMICS

by LI XIBING and GU DESHENG

Central South University of Technology Press

[湘]新登字 010 号

岩石冲击动力学

李夕兵 古德生 著

责任编辑:文 刀

*

中南工业大学出版社出版发行

长沙市东方印刷厂印装

湖南省新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:12 字数:284千字

1994年9月第1版 1994年9月第1次印刷

印数:0001—1000

*

ISBN7-81020-670-2/TD·034

定价:平装:12.00元

本书如有印装质量问题,请直接与生产厂家联系解决。

前 言

自1962年在奥地利成立“国际岩石力学学会”以来，作为一门新兴学科的岩石力学得到了很大的发展。在许多诸如矿岩破碎、油井致裂、岩土爆破、常规爆炸及核爆的防护等工程领域以及地震、滑坡、岩爆等灾害性自然现象中，岩土介质承受的是强烈的冲击与爆炸载荷，与之相应的有关岩石在冲击载荷作用下的本构特征（包括其量测设备与技术）和应力脉冲在岩体中的传输及边界效应等问题，已成为热门的研究课题；随着研究工作的深入和工程应用的发展，以此为主要内容的岩石冲击动力学也逐渐成为了岩石力学的一个重要分支。由于它与许多岩土工程及某些军工领域的发展密切相关，因此一直受到爆炸、破碎与冲击等方面的科学工作者的极大关注，它的发展也引起了现代采矿、土木、石油、水电、建筑及地球物理等专业人员的浓厚兴趣和注意。

为了促进我国岩石冲击动力学的研究与应用，作者在总结自己近几年所做研究工作的基础上，吸收了一些国外学者关于岩石冲击动力学方面的见解和成果，撰写了这本《岩石冲击动力学》，其中：书中的第九章为作者与长沙铁道学院李义兵教授合作完成，且研究工作得到了国家自然科学基金的资助。但由于岩体结构的复杂性和冲击、爆炸载荷过程的瞬时性，使许多问题的研究远未达到深层的程度，因此，在本著作中，某些内容、观点会有不很成熟的地方，一些问题还有待继续深入研究和探讨。加之作者水平所限，书中定有不妥之处，敬请读者不吝赐教。

作 者

1994年4月于长沙

目 录

第1章 绪论	(1)
第2章 岩石动态试验装置与试验技术	(2)
2.1 岩石准动态试验装置	(2)
2.2 岩石动态试验装置(SHPB)与试验技术	(10)
2.3 自行研制的气动高速冲击试验机	(14)
2.4 冲头撞击杆件产生的应力波形	(22)
2.5 几种不同类型的霍布金逊杆及变形装置	(31)
2.6 岩石超动态试验装置简述	(38)
第3章 岩石动态试验的合理加载形式	(44)
3.1 矩形波加载时的 P-C 振荡与动态应力-应变关系	(44)
3.2 不同加载波形下岩石的应力-应变-应变率关系	(46)
3.3 合理的加载波形	(48)
第4章 高应变率下的岩石本构特征	(51)
4.1 岩石的动力特性	(51)
4.2 岩石动态断裂破坏准则	(56)
4.3 加载波形和延续时间的影响	(64)
4.4 应力波在岩石中的衰减	(65)
第5章 岩石在应力波作用下的能量耗损	(69)
5.1 岩石冲击破碎时的能量分布	(69)
5.2 岩石在不同加载波下的能量耗散	(71)
5.3 不同应力波幅值和延续时间下的吸能效果	(80)
5.4 不同加载波形下岩石破碎的耗能规律	(87)
5.5 实现合理破岩的应力波体系	(92)
第6章 岩体不连续面对应力波传播的影响	(94)
6.1 一维纵波在杆性质突变处的反射与透射	(94)
6.2 完全粘结条件下纵横波的折反射关系	(96)
6.3 可滑移条件下的折反射关系与岩体动力滑移准则	(103)
第7章 应力波在层状岩体中的传播	(111)
7.1 等效波阻法	(111)

7.2	应力波通过夹层后的透射应力波形.....	(113)
7.3	应力波遇夹层后的能量传递效果.....	(119)
第8章	岩体与炸药的合理耦合	(120)
8.1	传统的匹配观点.....	(120)
8.2	药卷爆轰与岩体的相互作用模型.....	(121)
8.3	岩石与炸药的合理耦合准则.....	(123)
8.4	常规炸药与不同岩体的合理匹配.....	(126)
第9章	应力波在含石英类压电岩体中的传播	(130)
9.1	声电耦合的基本模型.....	(130)
9.2	耦合理论.....	(131)
9.3	传输效应.....	(135)
第10章	应力波理论在岩土工程中的应用	(138)
10.1	应力波理论在冲击破岩中的应用.....	(138)
10.2	应力波理论在桩基工程中的应用.....	(158)
10.3	地下结构的抗爆设计.....	(166)
参考文献	(171)

CONTENTS

CHAPTER 1 INTRODUCTION

CHAPTER 2 ROCK DYNAMIC EXPERIMENTAL DEVICES AND TECHNIQUES

- 2.1 Rock Medium Strain-Rate Testing Machines
- 2.2 The Split-Hopkinson Pressure Bar
- 2.3 The Pneumatic Impacting Test Device
- 2.4 Stress Waveforms in Slender Rods due to Impact of Rams
- 2.5 Other SHB Configurations and Modified Devices
- 2.6 Hyper-Dynamic Experimental Instrumentation

CHAPTER 3 REASONABLE LOADING METHOD IN ROCK SHPB EXPERIMENTS

- 3.1 Pochhammer-Chree Oscillations in SHPB Subjected to Rectangular Wave Loading
- 3.2 Rock Dynamic Stress-Strain-Strain Rate Relations Obtained with Different Waveform Loading
- 3.3 Reasonable Loading Stress Waveform

CHAPTER 4 CONSTITUTIVE FEATURES OF ROCK AT HIGH STRAIN RATE

- 4.1 Dynamic Properties of Rock
- 4.2 Dynamic Fracture Models
- 4.3 Effects of both Waveform and Duration of Stress Pulses
- 4.4 Attenuation of Stress Waves in Rock

CHAPTER 5 ENERGY DISSIPATION OF STRESS WAVES IN ROCK

- 5.1 Energy Distribution of Rock Impacting Fragmentation
- 5.2 Energy Dissipation in Rock under Different Loading Waveforms
- 5.3 Effects of both Duration and Amplitude of Stress Waves on Energy Absorption of Rock
- 5.4 Rock Energy Absorption and Fragmentation Degree under Different Impulsive Loads
- 5.5 Reasonable Incident Stress Waveforms

CHAPTER 6 PROPAGATION OF STRESS WAVES THROUGH DISCONTINUITIES IN ROCK MASS

- 6.1 Reflection and Transmission of One-Dimensional Stress Waves in Bar with Discontinuous Cross Sections and Different Materials
- 6.2 Reflection and Refraction of Stress Waves at Perfectly Bonded Discontinuities
- 6.3 Reflection and Refraction Relations with Frictional Slip and the Criterion of Relative Slippage

CHAPTER 7 PROPAGATION OF STRESS WAVES THROUGH LAYERED ROCK MASS

- 7.1 Effective Acoustic Impedance Method
- 7.2 Transmitted Stress Waveform through Sandwiches
- 7.3 Energy Transmission Coefficients of Transient Pulses through Sandwiches

CHAPTER 8 REASONABLE MATCH BETWEEN ROCK AND EXPLOSIVE

- 8.1 Traditional View of Wave Impedance Match
- 8.2 Model of Impact of Detonation Wave to Rock Wall
- 8.3 New Matching Relation
- 8.4 Reasonable Match between Conventional Explosives and Rock Mass with Different Acoustic Impedances.

CHAPTER 9 PROPAGATION OF STRESS WAVES THROUGH ROCK MASS WITH PIEZOELECTRICITY

- 9.1 Coupling Mode between Acoustic Waves and Electromagnetic Waves
- 9.2 Coupling Theory
- 9.3 Coupling Effects

CHAPTER 10 APPLICATIONS OF STRESS WAVE THEORY ON ROCK ENGINEERING

- 10.1 Rock Percussive Drilling
- 10.2 Pile Driving
- 10.3 Shockproof Design of Underground Structures

REFERENCES

第1章 绪论

矿岩破碎、油井致裂、高速冲击、打桩、弹丸撞靶、常规爆炸及核爆下的防护等工程领域和一些诸如地震、滑坡、岩爆等灾害性自然现象，几乎都与应力脉冲或冲击载荷作用下的岩石破裂和应力波在岩石中的传播有关^[1~10]。正是受这些工程实践与预测和防护自然灾害等实际需要的刺激，加之实验手段、测试方法和计算工具的现代化，使得以应力波在岩石中的传播和岩石动态力学性能为主体的岩石动力学及其一些与之有关的新兴边缘学科得以迅猛发展，并已成为岩土力学与工程界的热门前沿课题。许多国家对这些基础性的研究投入了巨大的人力、物力和经费，几乎每年都有与这类课题有关的国际会议召开^[11]，各种期刊和会议录中，有关岩石动力学的文献更是浩如烟海，国内情况也如此。例如，在国家自然科学基金资助的有关岩土力学课题中，岩石动力学方面的研究所占比例甚大^[12]；近年来与这一领域有关的国际、国内会议相继召开，更加快了我国岩石动力学的发展；在中国力学学会主办的《爆炸与冲击》学报中，几乎每期都有岩石动力学方面的论文刊出。

作为固体力学的一个新兴分支的冲击动力学，由于有其广阔的工程背景，近年来发展很快，并出版了多本冲击动力学方面的著作^[13~16]。但至今，还未见到这方面专门针对岩石的专著，这方面的大量研究成果大都分散在各种相关文献杂志中，为此，我们撰写了这本《岩石冲击动力学》，其内容在顾及国内外岩石冲击动力学方面的研究成果、现状与发展的同时，重点总结了近年来我们在这方面所作的一些理论与试验研究成果。

第 2 章 岩石动态试验装置与试验技术

对于动静态加载的含义至今尚无统一和严格的规定，但根据一般的倾向性看法，可以按加载时的应变率大小分为表 2.1 所示的几种荷载状态^[17~20]。本章将结合我们自己所做的一些研究工作，对国内外进行岩石动态试验所研制和使用的一些动态试验设备及试验技术进行详细介绍。

表 2.1 按应变率分级的荷载状态

应变率 $\dot{\epsilon}$ (s^{-1})	$< 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^1$	$10^1 \sim 10^3$	$> 10^4$
荷载状态	蠕变	静态	准动态	动态	超动态
试验方式	蠕变试验机	普通液压和刚性伺服试验机	气动快速加载机	霍布金逊压杆及其变形装置	轻气炮平面波发生器
动静明显区别	惯性力可忽略		惯性力不可忽略		

2.1 岩石准动态试验装置

由于一般液压机不能快速地加载到足以使岩石的变形速率在 $10^{-1} \sim 10^1 s^{-1}$ 范围内，而常规的动试验法又不能慢速加载到足以产生此范围的应变速率，所以这方面的研究资料相对较少，然而研究应力波在岩石中的传播规律及影响，却十分需要此范围的资料，60年代中期，国外即开始通过气动快速加载试验机来进行岩石的这类准动态试验，其应变率可达 $10 \sim 20 s^{-1}$ ^[21~23]；在国内，武汉岩土所于 80 年代初研制了这种用于岩石快速加载的试验机，并进行过中等加载率下的岩石准动态试验^[24~26]。

2.1.1 快速加载试验机原理

快速加载机的原理是采用液、气压或气压联动系统，即利用储能器，使初始时液压（气压）和气压平衡，然后快速打开速启阀，让储能器一边的压力释放，另一边的压力通过固体传递，对试件快速加载。由于采用的结构不同，可把快速加载机分为速泄和速进两大类。

1) 速泄方案

速泄方案的特点是排出压力液体，而达到快速加载目的。其原理如图 2.1 所示。在未开始试验时，储能器的活塞（在该方案中此活塞也就是工作活塞）两边，一边充满压力气体，另一边充满液体，让

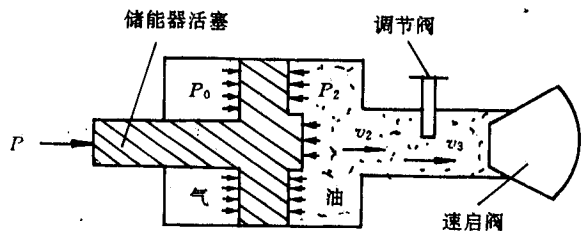


图 2.1 速泄方案快速加载机原理图

$P_2F_2 = P_0F_0$ ，其中 P_0 为气压， F_0 为承受气压的活塞面积； P_2 为液压， F_2 为承受液压的活塞面积，此时储能器活塞处于静平衡状态，试件不受力。打开速启阀，压力液体通过调节阀迅速排出，储能器活塞快速运动而对试件加载。在整个加载过程中，活塞的运动速度受到多种因素的影响，假定压力流体通过调节阀排出口时，流体为恒定流动，这可视为薄壁淹没孔口的出流问题，考虑到视液体为不可压缩，根据流体动力学的贝努利方程，可以推得机器的加载特性为^[27]：

$$P = \frac{F_0 P_0}{F} \frac{t}{t + \frac{L}{2MP_2^{1/2}}} \quad (2.1)$$

式中： P 、 F 分别为储能器输出活塞的单位作用力和面积； L 为气缸承压部分的初始长度； M 为与多个因素有关的系数。

当 $t = \infty$ 时，公式 (2.1) 有上限值：

$$FP = P_0 F_0 = P_2 F_2 \quad (2.2)$$

即达到预计的总吨位。实际上，当 $t = t_0$ 时，压力液体便已排完。为了阻止活塞的惯性冲程，在设计上采用制动措施，限制活塞的行程。此时，必须使活塞走完全部行程所需的时间大于 t_0 。从公式 (2.1) 可以看出：机器的加载特性是由预计总吨位、调节阀大小和液体的性质等因素来决定的，调节它们便可获得不同的加载速率。

实测和按公式 (2.1) 计算的 $P-t$ 曲线如图 2.2 所示。由于储能器的输出活塞具有加速度，所以实测曲线第一个峰值大于理论值。随后由于反射作用而出现了拉伸波，总力开始下降。这类似一个振荡波的作用。经过几次振荡和衰减而趋于静态平衡值，这个平衡值便是理论计算的渐近直线 P_2F_2/F 。

2) 速进方案

速进方案的特点是迅速排出压缩气体，其原理如图 2.3 所示。在未开始试验时，储能器的后缸和中缸充满压力气体，让储能器的活塞处于平衡状态。主体部分加载活塞刚好接触试件，试件处于不受力的状态。开始试验时，打开速启阀，储能器的活塞向前运动，压缩储能器的前缸液体，驱动

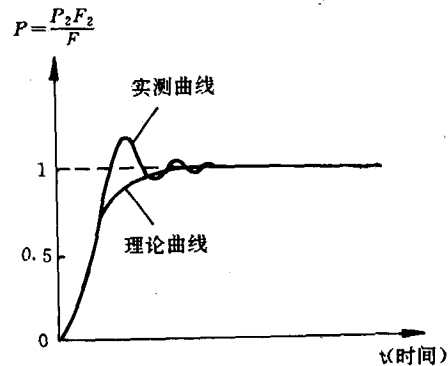


图 2.2 速泄加载机的 $P-t$ 关系曲线

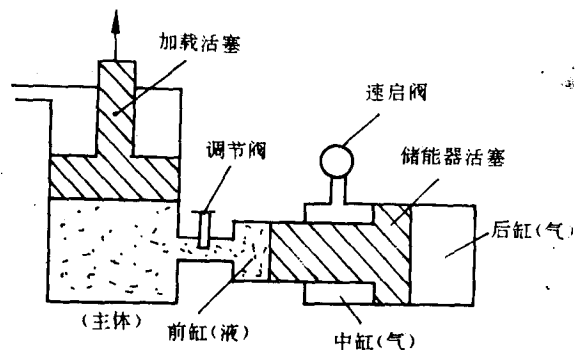


图 2.3 速进方案快速加载机的原理图

前缸的受压液体通过节流阀，所以节流阀两边液体在一段时间内液压不同，随之逐渐趋于相等，而达到加载的预计总吨位。在整个过程中，受压液体推动主体加载活塞向上运动，使试件获得快速加载。由于气体的可压缩性和受压液体的阻尼作用，无疑使得加载速度不如速泄方案快。同时，由于速进方案较为复杂，且用液体作传压介质，这样，液体的阻尼特性对加载特性有较大的影响，使得 $P-t$ 曲线的上升斜率比速泄方案小，且出现的振荡波比速泄方案大，衰减也较慢。但它的优点是利用液体的“不可压缩性”，使得主体部分的加载活塞获得放大作用，即能提高机器的总吨位。所以，大吨位的快速加载机都采用速进方案，而小吨位的快速加载机却采用结构简单的速泄方案。

2.1.2 国内外研制的几种快速加载试验机

1) 单轴动力试验机

图 2.4 为 S.J.Green 等人在 60 年代研制的单轴中等应变速率加载试验机^[21,22]，试验机通过压气驱动一重量较轻的可动活塞，实现对试样的快速加载。气体可以是空气、氦或氮气，它们以等压进入活塞上、下方的两蓄气室，发射时，通过速启阀使上蓄气室里的气体经节流阀以超声速排出，这样，活塞就向上运动，快速压缩试样。加载速率由活塞运动速度所决定，而活塞运动速度则与节流口尺寸大小、气压及所试验的试样类型有关，对任意试样，通过合适地选取气压和排气口大小，可以获得所需的恒加载率。这种装置上限加载率（应变速率）可达 $10 \sim 20 \text{s}^{-1}$ 。

使用这种试验机进行试验时，施加在试件上的载荷可通过粘贴在直接与试样接触的弹性载荷杆上的应变片进行量测。活塞的位移可通过粘贴在活塞杆端部锥体上的三个悬壁上的应变片获得。由于在无围压条件下岩石的脆性很大，试验机刚度小，因此，进行岩石单轴快速加载试验时，不宜用活塞的位移来表征岩石的应变，岩石试样的应变可通过直接在试样上粘贴应变片或通过使用光学变形测定器观察位于试样上的标记等办法来量测。由于该试验机使用了等径的双杆活塞，可以允许相同压力的气体进入上、下两蓄气室，因而可以很方便地在发射前正确地确定活塞的位置，也可以消除超前加载的可能性。活塞到试样的定位可通过与活塞底部气室相联的低压管路来实现。在设计这种快速加载试验机时，可动活塞的重量宜轻，主要是为了避免加速活塞到所需速率时的较大延迟时间和较为复杂的加速方式。

2) 三轴动力试验机

J.M.Logan 和 J.Handin 等人在单轴动力试验机的基础上研制了加围压的三轴动力试验机，如图 2.5 所示^[28]。这种 100t 的气体驱动力的三轴快速加载试验机实质上与 Green 等人的单轴快速试验机很类似，它由机架、加载活塞、阻尼器及速启阀等组成。速启阀控制着活塞的快速加载，如图 2.6 所示，这个阀通过 5cm 的孔与试验机加载柱的下室相连，并在管路上安有一通用节流板以控制气体的排泄速度，这种阀阀内有一双向作用活塞，并与一锥形杆相连。低压空气作用在上室时，可双向运动的活塞紧紧压在锥形阀座上，阀门关闭。当电磁阀打开时，高压气体突然进入下室，推动活塞上行，阀座处的阀门打开，高压气体通过节流板迅速排出，既而实现对试样的快速加载。他们声称，对直径 2cm，长 4cm 的试样，轴向应变速率可达 10^2s^{-1} ，围压可达 800MPa，温度可达 400℃，并首次对 Westerly 花岗岩和 Solenhofen 石灰岩进行了三轴快速加载试验，Westerly 花岗岩实际应变速率为 1s^{-1} ，而 Solenhofen 石灰岩的轴向应变速率为 10s^{-1} 。T.L.Blanton 使用这种试验机对三种岩石进行了应变速率从 10^{-2} 到 10s^{-1} 的三轴动载试验^[23]。在 $1 \sim 10^2 \text{s}^{-1}$ 应变速率范围内，他们选用氦作为

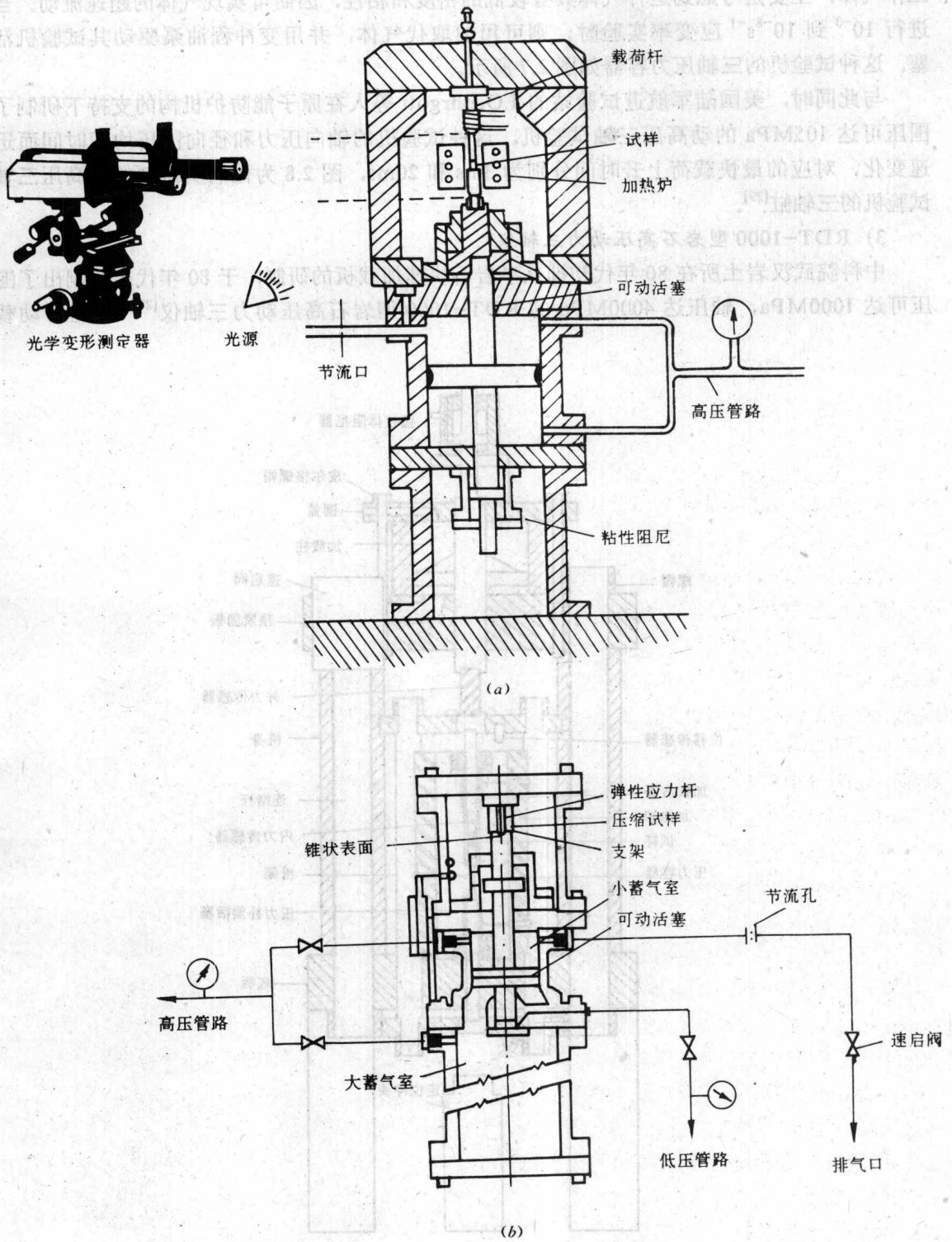


图 2.4 中等应变率试验机结构线路示意图

工作气体，主要是考虑到这种气体具有较低的密度和粘性，因而可实现气体的超速流动。当进行 10^{-3} 到 10^{-8}s^{-1} 应变率实验时，则可用油取代气体，并用变冲程油泵驱动其试验机活塞。这种试验机的三轴压力容器如图 2.7 所示。

与此同时，美国陆军航道试验站的 J.Q.Ehrgott 等人在原子能防护机构的支持下研制了围压可达 105MPa 的动高压三轴试验机，这种试验机的轴向压力和径向围压均随时间而迅速变化，对应的最快载荷上升时间分别为 3ms 和 20ms，图 2.8 为他们所研制的动高压三轴试验机的三轴缸^[29]。

3) RDT-1000 型岩石高压动力三轴仪*

中科院武汉岩土所在 80 年代初即从事岩石快速加载机的研制，于 80 年代末研制出了围压可达 1000MPa，轴压达 4000MPa 的 RDT-1000 型岩石高压动力三轴仪^[24,25]。这种动载

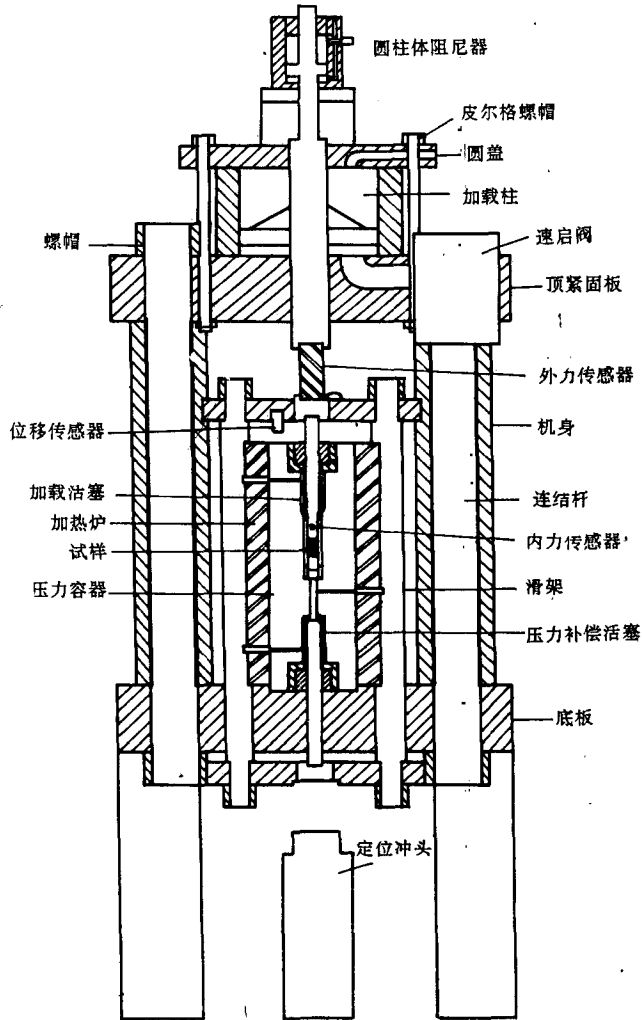


图 2.5 三轴快速加载试验机。

仪由动载机、三轴室、控制台和测量系统等四部分组成，其核心部分动载机如图 2.9 所示，包括机架和上下动力源，上下动力源分别提供动轴压和动围压。图 2.10 为上动力源示意图，包括储能器、速启阀。储能器内储存高压气体，其压力值事先调节到一定值（根据轴向载荷所需的大小）。它隔着活塞 *a* 与液体相邻。当活塞 *a* 下面的高压气体快速泄出时，活塞受上面储能器内高压气体作用而向下移动，通过油液推动上加杆，并由上加杆推动三轴室内的上柱塞，向试件施加轴向动荷载。事先调整调节

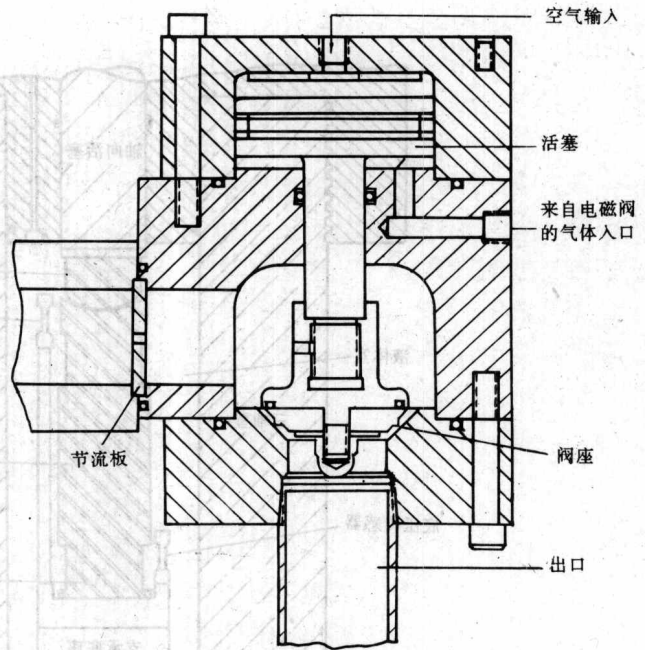


图 2.6 速启阀结构原理图

阀，控制高压液体的流通速度，可以达到控制轴压上升时间的目的。根据实际试验结果，最快的快速加载上升时间为 4~9ms。储能器内储气的最高压力为 5.2MPa，根据换算，在静态情况下，扣除两级活塞的摩擦力和三轴室内上柱塞密封的摩擦力之和（约 20%），可以获得对试件施加总荷载为 220t 的轴向力。实际上，在做动载实验时获得的是一个带冲击振荡过程的轴向动荷载（在加载率极高的情况下），其峰值 $P_{max} = 310t$ ，最终荷载为 216t，实测荷载曲线见图 2.11。随着加载速率的降低，荷载的振荡过程消失，获得的是平滑的，但线性段范围逐渐缩小的荷载曲线（见图 2.12）。

下动力源主要是为增大三轴室内油液（试件周围）压力而设，如图 2.13 所示。与上动压力源的原理相同，活塞 *b* 的上面和下面都充满高压气体时活塞维持平衡不动，一旦速启阀打开，活塞 *b* 上面的气体快速排泄，活塞 *b* 失去平衡，受活塞下面高压气体的压力作用而向上推进，推动连接杆及销，并通过它们推动高压三轴室内的下柱塞向

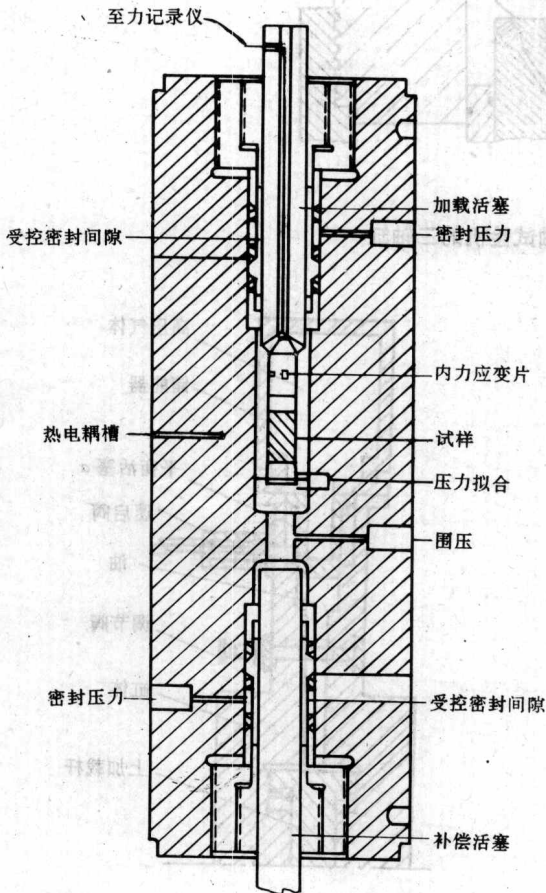


图 2.7 三轴压力容器