

力学丛书

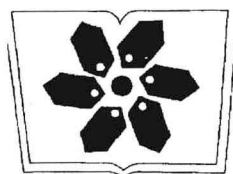
混凝土的动力本构关系 和破坏准则

(下册)

宋玉普 编著



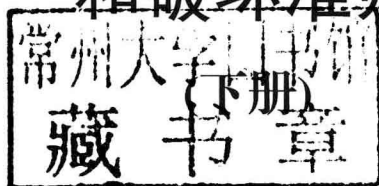
科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

力学丛书

混凝土的动力本构关系 和破坏准则



宋玉普 编著

本书由中国科学院科学出版基金和国家自然科学基金资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书下册介绍了单轴和多轴地震荷载下混凝土的力学性能,冲击、爆炸和射弹荷载下混凝土的力学性能,以及地震荷载下混凝土的本构关系和破坏准则,冲击、爆炸和射弹荷载下混凝土的本构关系和破坏准则。

本书可作为相关专业研究生教材,也可供从事混凝土动力性能研究的研究人员及从事设计工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土的动力本构关系和破坏准则. 下册/宋玉普编著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-035840-0

I. ①混… II. ①宋… III. ①混凝土结构-结构动力学 IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012) 第 249053 号

责任编辑: 刘信力 刘凤娟 / 责任校对: 包志虹

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计

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>

北京佳艺恒彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张: 29 1/4

字数: 573 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

到目前为止国内还没有一部系统介绍混凝土动力本构关系和破坏准则的书籍。动力设计都是采用经验和有限的试验数据及有限元分析进行,这远不能达到安全、可靠、经济、耐用的目标。为此,本书总结了国内外混凝土动力试验装置,动力性能。在此基础上,给出了混凝土的动力本构关系和破坏准则。

全书分上下册,共 11 章,其中上册有:第 1 章,绪论。主要介绍了研究混凝土在动力荷载作用下的本构关系和破坏准则对工程设计和分析的重要性。第 2 章,动力荷载。主要介绍了疲劳荷载中的吊车荷载、铁路公路的车辆荷载、风荷载、波浪荷载;地震作用;冲击、爆炸、射弹荷载。第 3 章,复杂应力状态下混凝土动力特性的试验装置系统。主要介绍了疲劳、地震、冲击、爆炸和射弹的试验装置系统。第 4 章,混凝土的单轴疲劳性能。主要介绍了混凝土和特种混凝土在单轴拉、压和拉-压下的等幅和变幅的疲劳特性及影响混凝土疲劳的因素。第 5 章,混凝土的多轴等幅疲劳性能。主要介绍了混凝土双轴拉、双轴压疲劳特性;混凝土单向定侧压下受压、受拉、受拉-压疲劳特性;混凝土两向定侧压下受拉、受压、受拉-压疲劳特性。第 6 章,混凝土定侧压下的变幅疲劳。主要介绍了混凝土单向定侧压下受压、受拉、受拉-压变幅疲劳特性;混凝土两向等定侧压下受拉、受压、受拉-压变幅疲劳特性。第 7 章,疲劳荷载下混凝土的本构关系和破坏准则。主要介绍了疲劳荷载下混凝土的破坏准则和本构关系及非线性疲劳的全过程分析方法。下册有:第 8 章,单轴和多轴地震荷载下混凝土的力学性能。主要介绍了单轴地震荷载下混凝土的受压、受拉性能;多轴地震荷载下混凝土的力学性能,包括两向应力、单向恒定压力下及两向恒定压力下混凝土的受压动力性能;介绍了由混凝土静力试验结果估计其动力强度和应用神经网络方法分析混凝土的动态特性。第 9 章,冲击、爆炸、射弹荷载下混凝土的力学性能。主要介绍了冲击、爆炸荷载下混凝土的受压和受拉力学性能、纤维混凝土的动力受压性能和湿混凝土与干混凝土的动力受拉性能比较;介绍了自由水对约束压混凝土的动力强度的影响和冲击、爆炸荷载下混凝土特性的神经网络预测;介绍了射弹冲击下混凝土的动力性能。第 10 章,地震荷载下混凝土的本构模型。主要介绍了混凝土动力非线性弹性、塑性、黏塑性、损伤及混合本构模型;介绍了混凝土动力细观层次的本构模型。第 11 章,爆炸、射弹荷载下混凝土的本构模型。主要介绍了混凝土动力黏塑性、损伤、混合本构模型;以及混凝土动力细观层次的本构模型。

本书是在中国科学院科学出版基金、国家自然科学基金重点项目 (90815026)

和面上项目 (51079019) 及国家“八五”科技攻关项目的资助下完成的。多年来作者和指导的研究生在上述项目的资助下,进行了大量的混凝土静力和动力性能的试验研究,并且已出版了《多种混凝土材料的本构关系和破坏准则》一书,但该书大部分为静力的本构关系和破坏准则;而本书——《混凝土的动力本构关系和破坏准则》(上下册)包含了部分疲劳的破坏准则。

作者在总结自己的混凝土试验资料和大连理工大学有关老师和研究生的混凝土动力试验资料的基础上,收集了大量的国内和国际较新的混凝土动力荷载、动力试验装置、混凝土动力单轴和多轴拉压性能和本构关系及破坏准则方面的资料,编写了此书。在此对我的已毕业和在读的从事本书研究项目的研究生李朝阳博士、吕培印博士、赵东拂博士、杨健辉博士、朱劲松博士、曹伟博士、孟宪宏博士、董梁博士生、尚世明博士生、王彦红硕士,以及大连理工大学结构研究所的试验技术人员表示衷心的感谢。感谢肖诗云副教授为本书提供了他的博士论文和他指导的研究生的论文。同时还要感谢科学出版社和国家自然科学基金委员会对本书所给予的资助。

本书受到的资助项目有:

中国科学院科学出版基金;

国家自然科学基金重点项目 (90815026)“混凝土结构多维非线性地震灾变机理与过程模拟”;

国家自然科学基金面上项目 (51079019)“大骨料混凝土多轴动态强度试验和八面体空间动态破坏准则研究”;

国家自然科学基金面上项目“混凝土多轴疲劳破坏准则”;

国家“八五”攻关项目“混凝土动态强度和变形特性研究”。

限于作者水平,书中难免有缺点乃至错误,敬请读者批评指正。

宋玉普

2010 年 12 月 于大连理工大学

符 号 表

$p_{\max}$	荷载最大值
$p_{\min}$	荷载最小值
p_m	荷载平均值
p_a	荷载幅度
Δp	荷载幅值
$\bar{v}(z)$	高度 z 处平均风速
$\bar{v}(z, t)$	高度 z 处 t 时刻的风速
$\bar{v}(t)$	风速的湍流部分
$S_v(f)$	速度功率谱密度函数
$S_v(z, f)$	高度 z 处的速度功率谱密度函数
q	动压力
S_a	加速度反应谱
$a(t)$	t 时刻的加速度
T_p	地震动卓越周期
T_d	地震动持续时间
$P(t)$	等效动载
M	等效质量
u	位移
t	时间
$S_{\max}$	最大应力与静力强度的比值
$S_{\min}$	最小应力与静力强度的比值
N_f	疲劳破坏时的循环数
N_r	同时考虑时间和循环有关的损伤时, 到破坏的循环数
R	最小应力与最大应力的比
$\sigma_{\min}$	最小应力
$\sigma_{\max}$	最大应力
$\varepsilon_{\max}$	最大应变
$\varepsilon_{\min}$	最小应变
$\dot{\varepsilon}$	应变速率
$\dot{\varepsilon}^d$	动态应变速率
$\dot{\varepsilon}^s$	准静态应变速率
f^d	动态强度
f^s	准静态强度

V_m	基体的体积百分率
V_f	纤维的体积百分率
l_f	纤维长度
d_f	纤维的直径
P_c	荷载的临界值
P_u	荷载的极限值
D_{t1}	徐变损伤
$D(n)$	线性累积损伤
T	周期
σ^d	动态应力
σ^s	准静态应力
$\dot{\sigma}^s$	准静态应力速率
$\dot{\sigma}^d$	动态应力速率
E_c^d	动态弹性模量
E_c^s	准静态弹性模量
ν^d	动态泊松比
ν^s	准静态泊松比
t^d	动态加载时间
t^s	准静态加载时间
K_I	应力强度因子
K_{IC}	断裂韧度
a	裂缝长度
σ_{eff}	有效应力
σ_1	第一主应力
σ_2	第二主应力
σ_3	第三主应力
σ_n	法向应力
τ_n	切向应力
w_{max}	最大裂缝宽度
I_1	主应力第一不变量
J_2	偏应力第二不变量
J_3	偏应力第三不变量
σ_{oct}	八面体正应力
τ_{oct}	八面体剪应力
γ_{oct}	八面体剪应变
σ_{ij}	应力张量
s_{ij}	偏应力张量
e_{ij}	偏应变张量

K_t	切线模量
G_0	剪切模量
f	加载面
$\bar{c}$	弹性柔度张量
$\psi(\sigma)$	Helmholtz 自由能
Φ	比 (单位) 内能
η	比 (单位) 熵
$\phi(\varepsilon, D)$	自由能函数
$\bar{\varepsilon}$	等效应变
$\dot{D}$	损伤率
D	损伤张量
ξ	应力的静水部分
ρ	应力的偏应力部分
θ	应力在偏平面的方向角 (罗德角)
c_e	弹性波速
ω	波的径向频率
ε_i	输入应变波
ε_r	反射应变波
ε_t	输出应变波
F	损伤函数
k	弹簧刚度
c	阻尼
U	总能量
V	体积

目 录

前言
符号表

下册

第 8 章	单轴和多轴地震荷载下混凝土的力学性能	1
8.1	概述	1
8.2	单轴地震荷载下混凝土的受压性能	1
8.2.1	试验设计	1
8.2.2	单轴地震荷载下混凝土的受压破坏形态和破坏机理	6
8.2.3	单轴地震荷载下混凝土的抗压强度特性	8
8.2.4	单轴地震荷载下混凝土的受压变形特性	22
8.3	单轴地震荷载下混凝土的受拉性能	37
8.3.1	概述	37
8.3.2	试验设计	38
8.3.3	单轴地震荷载下混凝土的受拉破坏形态和破坏机理	45
8.3.4	单轴地震荷载下混凝土的受拉强度特性	47
8.3.5	单轴地震荷载下混凝土的受拉变形特性	74
8.4	由混凝土静力试验结果估计其动力强度	98
8.4.1	方法的物理基础	98
8.4.2	计算结果与试验结果的比较	101
8.5	应用神经网络方法分析混凝土动态特性	107
8.5.1	神经网络原理	107
8.5.2	BP 神经网络的算法	108
8.5.3	人工神经网络数据分析的思路	110
8.5.4	人工神经网络方法进行数据分析实例	111
8.6	多轴地震荷载下混凝土的力学性能	112
8.6.1	概述	112
8.6.2	两向应力状态下混凝土的受压动力性能	113
8.6.3	单向恒定压力下混凝土的受压动力性能	118
8.6.4	单向恒定压力下混凝土的受拉动力性能	128

8.6.5 双向恒定压力下混凝土的受压动力性能	132
参考文献	139
第 9 章 冲击、爆炸、射弹荷载下混凝土的力学性能	145
9.1 概述	145
9.2 冲击、爆炸荷载下混凝土的受压力学性能	145
9.2.1 普通混凝土的动力受压性能	145
9.2.2 纤维混凝土的动力受压性能	148
9.2.3 影响动力抗压强度的因素	155
9.2.4 考虑围压的混凝土动力受压性能	163
9.2.5 自由水对约束压混凝土的动力强度的影响	173
9.2.6 加载率对混凝土损伤的影响	184
9.3 冲击、爆炸荷载下混凝土的受拉力学性能	193
9.3.1 试验概况	193
9.3.2 动力拉的破坏过程和破坏形态	204
9.3.3 动力拉的强度	206
9.3.4 湿混凝土和干混凝土的动力受拉性能比较	209
9.3.5 断裂能的确定	212
9.4 冲击、爆炸荷载下混凝土特性的神经网络预测	215
9.4.1 BP 神经网络预测模型	216
9.4.2 混凝土动力特性的预测	216
9.4.3 混凝土的峰值应力及相应应变与应变速率的关系	218
9.5 射弹冲击下混凝土的动力性能	220
9.5.1 射弹冲击下纤维混合材料的动力性能	220
9.5.2 射弹冲击下混凝土的动力性能	227
参考文献	237
第 10 章 地震荷载下混凝土的本构模型	240
10.1 混凝土动力非线性弹性本构模型	240
10.1.1 率无关的混凝土本构模型	240
10.1.2 率相关的混凝土本构模型	242
10.1.3 ADINA 程序的应用	242
10.2 混凝土动力塑性本构模型	245
10.2.1 一般假定	246
10.2.2 率应力-应变关系	247
10.2.3 加载准则和损伤参数	252
10.2.4 塑性模量函数	254

10.2.5	边界面和后续临界状态	258
10.2.6	例题	264
10.3	混凝土动力黏塑性本构模型	265
10.3.1	改进的 Hsieh-Ting-Chen 动力本构模型	265
10.3.2	考虑拉伸刚化的黏塑性动力本构模型	269
10.4	混凝土动力损伤本构模型	274
10.4.1	基于损伤累积的动力损伤本构模型	275
10.4.2	由静力损伤本构模型转为动力损伤本构模型	277
10.4.3	动力矢量损伤本构模型	282
10.4.4	动力统计损伤本构模型	288
10.5	混凝土动力混合本构模型	296
10.5.1	混凝土动力塑性损伤本构模型	296
10.5.2	混凝土动力弹塑性损伤本构模型	302
10.5.3	适于大体积混凝土的动力黏塑性损伤本构模型	307
10.5.4	混凝土动力黏塑性损伤模型	323
10.6	混凝土动力细观层次的本构模型	329
10.6.1	概述	329
10.6.2	离散单元模型	330
10.6.3	率相关的应力-应变边界	332
10.6.4	证明模型的可靠性	334
10.6.5	非约束压试验的率影响	334
10.7	混凝土本构关系和破坏准则的应用	335
	参考文献	339
第 11 章	爆炸、射弹荷载下混凝土的本构模型	347
11.1	混凝土动力黏塑性本构模型	347
11.1.1	混凝土模型	347
11.1.2	局部化问题	350
11.1.3	动力加载下混凝土的模型	353
11.2	混凝土动力损伤本构模型	355
11.2.1	混凝土动力连续损伤本构模型	355
11.2.2	混凝土动力流变损伤模型	361
11.2.3	混凝土动力矢量损伤本构模型	365
11.2.4	混凝土动力矢量梯度连续损伤本构模型	371
11.2.5	混凝土由静力损伤转为动力损伤的本构模型	383
11.2.6	混凝土动力应变历史相关的损伤本构模型	386

11.2.7	混凝土动力损伤与失效本构模型	396
11.3	混凝土动力混合本构模型	404
11.3.1	混凝土动力黏塑性损伤本构模型	404
11.3.2	混凝土动力损伤和断裂本构模型	409
11.4	混凝土动力细观本构模型	417
11.4.1	混凝土动力惯性细观本构模型	417
11.4.2	混凝土动力离散单元本构模型	422
11.4.3	混凝土动力拉离散单元模型	434
11.4.4	混凝土两相细观层次模型	438
参考文献		447

第8章 单轴和多轴地震荷载下混凝土的力学性能

8.1 概 述

自 1917 年 Abrams 对混凝土进行压缩试验时发现混凝土抗压强度存在速率敏感性后^[1], 一些学者开始对混凝土材料进行各种力学性质的动载试验研究. 混凝土材料的受压试验较容易进行, 因此人们所进行的混凝土动态受压试验较多^[2-7], 对动态拉伸特性的研究相对较少^[8-10]. 由于加载设备、数据量测设备以及试验技术的限制, 在有限的研究工作中许多研究者只侧重研究混凝土强度^[11,12]; 还有一些研究者仅对破坏前的变形特性进行了探索^[13]. 少数研究者对混凝土动态单轴压缩的应力-应变全曲线进行了研究, 而极少数研究者对混凝土动态拉伸条件下的应力-应变全曲线进行了研究^[10]; 此外, 混凝土本身的离散性使得试验结果很不稳定, 不同研究者所得的结论相差较大, 甚至互相矛盾. 到目前为止, 在地震作用所关注的应变速率下混凝土的应力-应变全曲线方程尚没有形成成熟的结论, 仅给出强度的增长百分率, 如我国现行《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073—2000)^[14] 规定: 混凝土动态强度和动态弹性模量的标准值可较其静态标准值提高 30%; 混凝土动态抗拉强度的标准值可取为动态抗压强度标准值的 10%. 应当认为, 这种对混凝土动态特性的考虑是十分初步的, 因为随应变速率的不同, 混凝土强度的增长百分率也不同. 另外, 干湿条件不同, 所得到的动力强度也不同.

本章主要介绍混凝土材料在单轴和多轴地震荷载作用下的力学性能. 系统介绍混凝土在单轴动态荷载下的强度和变形特性, 从而建立混凝土拉伸强度、弹性模量、峰值应力处应变与应变速率间较为精确的数学模型; 详细分析应变速率与泊松比、吸能能力之间的关系和影响混凝土动力性能的因素; 介绍混凝土在双轴和三轴地震作用下的力学性能. 这对工程实践将有重要的实际意义.

8.2 单轴地震荷载下混凝土的受压性能

8.2.1 试验设计

1. 试验材料

文献 [15] 中两批试件的设计强度分别为 10MPa 和 20MPa, 水泥采用大连水泥厂同炉出产的海鸥牌 32.5R 型普通硅酸盐水泥 (即原 425#), 粗骨料为连续粒径的

碎石, 石子的最大骨料粒径为 10mm; 砂子为天然河砂, 颗粒级配属于级配 II 区, 经测量砂子的细度模数为 2.66, 为中砂; 所用的拌和水为自来水. 试块用钢模人工振捣后在振动台上成型. 24h 后脱模, 在水中养护 2 天, 然后放置到上覆石棉瓦的养护棚中覆草袋浇水养护至 28 天, 其后在自然条件下养护. 其配比见表 8-1, 其 28 天抗压强度及劈裂强度见表 8-2. 在对该批混凝土养护过程中跟踪测量的 37 组轴压和劈裂试验中, 没有一组试件出现 3 个测量值中的最大值或最小值与中间值的差值超过中间值的 15% 的情况, 说明所制作的试件离散性较小, 能够确保试验数据的可靠性.

表 8-1 混凝土的配合比 (按重量)

混凝土种类	水泥	水	石子	砂子
C10	1.00	1.02	5.35	4.38
C20	1.00	0.69	3.93	2.63

表 8-2 混凝土的 28 天抗压强度、劈裂强度/MPa

混凝土类型	抗压强度	劈裂强度
C10	10.7	0.83
C20	21.2	2.33

文献 [10] 采用的配合比如表 8-3. 文献 [16] 采用的混凝土配合比和抗压强度如表 8-4.

表 8-3 文献 [10] 的混凝土配合比/(kg/m³)

水泥	水	石子	砂子
370	185	1192	642

表 8-4 文献 [16] 的混凝土配合比和物理力学性能

平均骨料尺寸/mm	水灰比	细骨料与总骨料的体积比/%	28 天抗压强度/MPa	配合比/(kg/m ³)			
				水	水泥	砂	石子
14	0.7	35	18	215	305	806	1500

文献 [17] 采用的混凝土配合比和抗压强度如表 8-5.

表 8-5 文献 [17] 的混凝土配合比 (重量比) 和立方体抗压强度

水泥	砂	石子	水灰比	立方体抗压强度/MPa
1	2	3	0.5	47.75

2. 试件制作

文献 [15] 的试件为边长 100mm 的立方体, 用来测量静、动态抗压强度. 试验

时混凝土的龄期为 600 ± 10 天. 由于 600 天龄期时混凝土的强度发展已经趋于稳定, 可以忽略试验过程中龄期不同对抗压强度的影响, 能够确保试验数据的可靠性.

文献 [10] 的试件尺寸如图 8-1. 中间等直段尺寸为 $70\text{mm}\times 70\text{mm}$, 两端逐渐过渡到 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$.

文献 [16] 共试验了 20 个试件, 试件尺寸为直径 55mm, 长 115mm 的圆柱体, 根据美国材料试验标准 (ASTM), 在试件的 2 个末端分别做一个帽, 使得试件的末端是平的, 并保证垂直于试件, 如图 8-2. 试件 28 天的特征抗压强度为 18MPa. 试件分干试件和湿试件, 所有干试件都在恒温箱中养护, 以防止它们与大气中的湿气交换. 然后混凝土试件被编号, 例如 Ds1 代表干试件, Ws1, Ws2 和 Ws3 分别代表湿试件, 含水量为饱和试件含水量的 10%, 20% 和 100%.

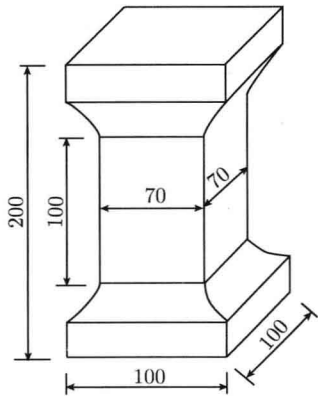


图 8-1 试件尺寸 (单位: mm)

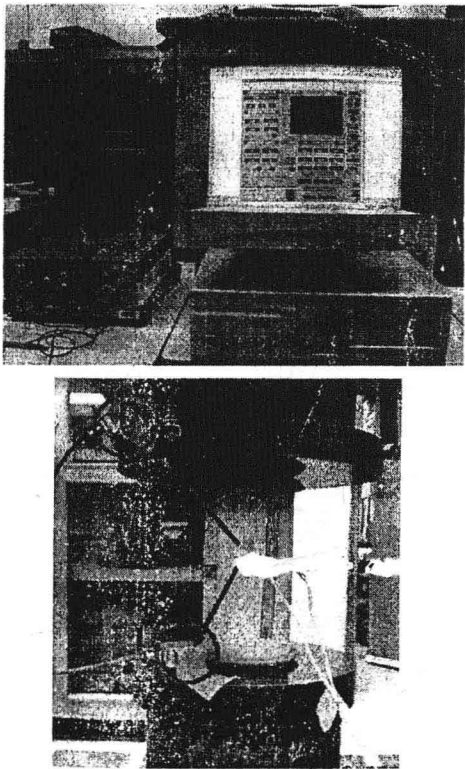


图 8-2 试件、试验系统和压电传感器

文献 [17] 的试件尺寸为直径 75mm, 长 150mm 的圆柱体. 试件在有机玻璃试模中浇筑成型, 然后在养护室养护 14 天, 养护室条件为室温 21°C, 相对湿度 100%. 在开始试验前 7 天, 试件保持在温度 21°C, 相对湿度 50% 的环境中.

3. 试验装置

文献 [10], [15], [17] 采用大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室引进的 MTS 公司的电液伺服试验系统, 如图 8-3, 及自行研制的大型静、动态电液伺服试验系统, 如图 8-4. 该系统由电液伺服阀、电子控制系统和三向分别独立的加力架、加载板、液压缸、荷载传感器和位移传感器 LVDT 组成. 3 个轴向的最大静态出力皆达到 2500kN, 且可以进行三轴之间的静、动态任意组合试验. 该装置现已改进为 6 缸作动器, 使受力更合理, 如图 8-5.

文献 [10] 的试验过程为: 首先进行 3 个试件的静态压缩试验, 测得其峰值应变为 $2380\mu\epsilon$, $2530\mu\epsilon$ 和 $2850\mu\epsilon$, 取其平均值为 $2600\mu\epsilon$. 这样, 用作动头位移控制加载, 使其达到抗压强度时的时间分别为 4 分 20 秒、13 秒、1.3 秒和 0.13 秒, 则所对应的加载速率约分别为: $1 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$, $2 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$, $2 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 和 $2 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$. 由于混凝土试件的抗压强度远大于抗拉强度, 加上作动头上具有一个万向铰, 因此加载前的对中没有受拉时那样严格. 要求试件相对 2 个面上的应变差不到 $15\mu\epsilon$, 并预加 1kN 的压力以免试件和设备有间隙. 对中完成后, 将 4 个面上的应变片进行串、并联, 一方面可以直接获得试件 4 个面上的平均应变, 另一方面为了尽量减

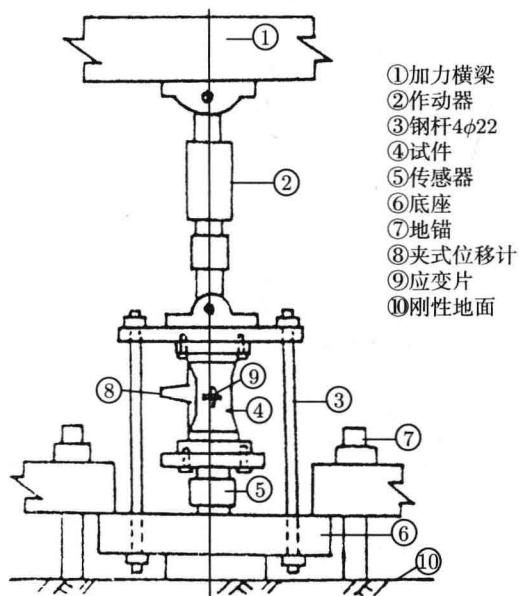


图 8-3 MTS 公司的电液伺服试验装置

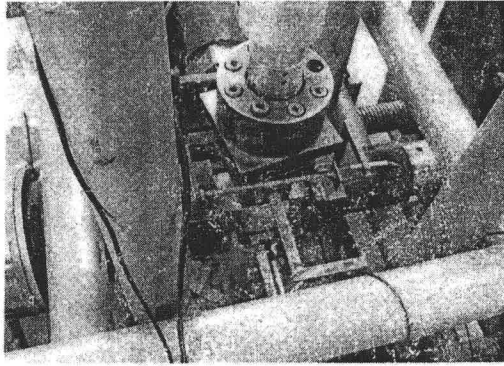
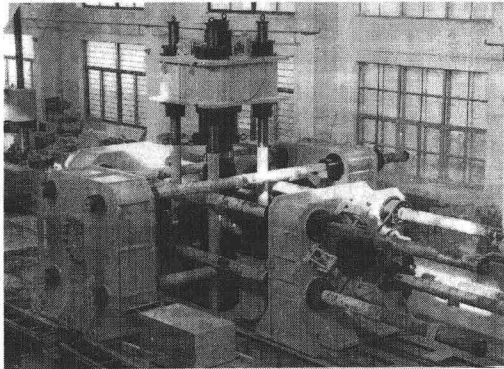
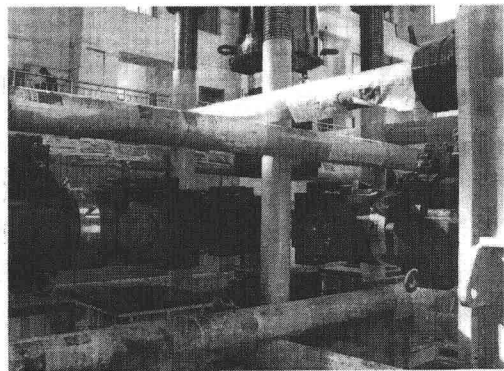


图 8-4 自行研制的大型静、动态电液伺服试验系统



(a)



(b)

图 8-5 6 缸大型静、动态电液伺服试验系统
(a) 机架; (b) 作动器

少通道, 以采到更多的点, 避免漏采峰值点附近的数值. 通过后面的试验证明, 在进