

文章编号: 1001-1455(2007)04-0352-06

饱和土中爆炸波传播问题的数值模拟*

赵跃堂, 梁 晖, 范 斌

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 应用流体弹塑性力学的框架描述了爆炸荷载作用下饱和土介质的本构模型, 包括体积压缩关系和强度关系。应用 LS-dyna 软件分析了三相饱和土介质中的爆炸波传播及其与结构的相互作用问题, 并与先前完成的试验结果进行了对比, 两者吻合较好。饱和土中爆炸波传播的一些特殊现象被重现, 表明本构模型描述是可行的。

关键词: 爆炸力学; 本构关系; 数值模拟; 饱和土; 爆炸波

中图分类号: O382

国标学科代码: 130 · 3520

文献标志码: A

1 引言

目前工程中分析饱和土中爆炸波传播规律性主要使用经验方法^[1-2], 这些经验公式由于场地条件和装药条件的不同, 计算结果相差很大, 因此使用确实可行的数值方法来确定饱和土中应力波的传播问题显得非常重要。

爆炸波在饱和土中的传播与其他的岩土介质有着明显的不同, Г. М. ЛЯХОВ^[1]很早就注意到饱和土中爆炸波传播的特殊性, 并提出了饱和土介质的流体动力学模型, 该模型比较好地描述了高围压时饱和土的变形特征。M. A. Biot^[3]则描述了多孔弹性介质中波的传播规律性, 并提出了著名的 Biot 理论。VE. Dontsov 等^[4]等研究了一维应变条件下饱和多孔介质中气体含量对冲击波传播规律的影响。WANG Zhong-qi 等^[5]对饱和土中爆炸波传播规律进行了计算, 由于计算模型中涉及的计算参数很多, 因而很难推广到实际应用中, 另外计算结果也没有揭示出饱和土中爆炸波传播的一些特殊规律性。在国内, 俞儒一等^[6]、黄能法等^[7]和赵跃堂等^[8-9]等通过试验对上海地区的淤泥质饱和土、饱和砂土和南京地区的饱和亚粘土进行了爆炸波传播试验研究, 揭示了饱和土中自由场压力“倒衰减”现象和刚体上荷载反射系数大于 2.0 等饱和土的独特现象及发生原因。

现阶段许多大型的有限元软件被广泛应用, 其便捷的接口和强大的求解器被人称道, 因此在本文, 拟对饱和土爆炸荷载下的本构模型进行描述, 并通过数值模拟与试验的对比分析来验证描述的适用性。

2 爆炸荷载下三相饱和土介质的变形特点

饱和土中的爆炸波传播问题必须考虑到剪应力的影响, 因此必须引入有效应力的概念, 因为骨架中的有效应力是饱和土抗剪能力的唯一来源。同地震荷载和其它稳态荷载不同, 爆炸荷载作用下三相饱和土介质表现出一些独特的规律性, 这主要表现在以下几个方面:

第一, 荷载作用的瞬时性。爆炸荷载的作用时间一般为几毫秒到几百毫秒, 在这个时间间隔内, 水和空气来不及从饱和土的孔隙中排出, 土的组分没有变化。

* 收稿日期: 2006-03-20; 修回日期: 2006-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(50378090)

作者简介: 赵跃堂(1967—), 男, 博士, 教授。

第二、排水条件对介质的压缩性有很大的影响。研究饱和土的短时波动问题时,可以采用不排水边界条件,正如试验^[1,7]所表明的,短时波动过程中饱和土各组分之间的相对运动可以忽略不计。在卸载阶段,有效应力的卸载速度可能比孔隙水压力快,使得有效应力向孔隙水压力转移,从而出现爆炸液化现象。

第三、饱和土中孔隙被水和少量空气所填充,在动力荷载作用下固体颗粒构成的骨架也要对压缩产生反作用力。现场试验^[1]表明,空气和水混合物的压缩性与骨架的压缩性构成了爆炸波作用下饱和土的两压缩机制。小荷载时,骨架的压缩性比空气和水混合物的压缩性小,此时骨架的压缩性控制了饱和土的压缩性。当荷载增加时,饱和土的变形随之增加,由于骨架的压缩性变化不大,而空气和水混合物的压缩性随变形的增加急剧减小,空气和水混合物的压缩性控制了饱和土的压缩性,饱和土的变形规律表现为递增硬化特性。

第四、在动荷载作用下,应变率对介质的强度有一定的影响,许多的文献对此进行过专门的讨论^[10]。试验研究表明^[1]应变率对饱和土的影响较非饱和土小得多。饱和土存在界限压力^[1,7],而界限压力只与饱和土的初始气体含量有关,也说明了应变率的影响很小。

岩土介质与金属材料在本构关系描述上存在许多差别:第一,岩土介质的压缩性比较大;第二,岩土介质的塑性条件与静水压力有关;第三,岩土介质的抗拉强度远小于其抗压强度。对于饱和土,还必须考虑水和气体的影响。

3 饱和土介质压缩特性描述

在密实介质的动力学问题中,忽略压缩性的影响会产生很大的误差,特别是当介质以能与声速相比拟的高速度运动时,压缩性的影响更严重,此时介质的密度已经不是一个常数,而是一个待求解的函数了。试验研究表明^[1,4,6-9],在不大的荷载变化范围内,饱和土中的波传播速度会发生很大的变化。比如对于气体含量为4%的饱和土,荷载从0增加到约5 MPa时,压缩波传播速度能从40 m/s增加到1500 m/s。另外,从试验中观察到气体含量是影响饱和土中波传播最重要的因素,因为气体的压缩性比其他两相大得多。

饱和土中的介质压缩性由2部分构成,一部分是饱和土中各单相的压缩性,包括气体、水和固体颗粒的压缩性,第二部分是骨架部分的压缩性。文献^[11]描述了完全耦合条件下饱和土的压缩性表达式

$$K_f = K_m + K_s - \frac{K_m K_s}{K_g} + K_m K_s \left(\frac{K_m + K_s - \frac{K_m K_s}{K_g} - K_g}{K_g^2 - K_m K_s} \right) \quad (1)$$

式中: $K_m = \left[\sum_{i=1}^3 \frac{\alpha_i}{\rho_{i0} c_{i0}^2} \left(\frac{\gamma_i (p_i - p_0)}{\rho_{i0} c_{i0}^2} + 1 \right)^{-\frac{\gamma_i+1}{\gamma_i}} \right]^{-1}$ 代表在孔隙水压力 p_i 作用下固体颗粒、水和气体的变形模量; $i=1, 2, 3$ 分别代表气体、水和固体颗粒; $K_g \approx \rho_{30} c_{30}^2$ 为固体颗粒的体积模量; K_s 为土骨架的体积模量,它与骨架有效应力的球应力分量有关。

A. A. Stephen^[12]通过对大量的砂土试验研究指出,饱和砂土中骨架的体积应力应变关系可以分3阶段进行描述:分别为弹性阶段、孔隙闭合阶段和完全密实阶段。按照 D. E. Burton^[13]的建议,岩土介质的体积压缩曲线总可以由4条曲线构成,见图1,分别是弹性压缩曲线 L_e 、初始压缩曲线 L_v (对应于雨贡纽曲线)、极限卸载曲线 L_c (又称高压卸载曲线,其对应于卸载曲线的最外层包络线)以及极限拉伸曲线。对于砂、土介质,其抗拉强度可取0,因此极限拉伸曲线就是图1的横坐标轴。

弹性压缩曲线 L_e 可以按照虎克定律进行描述。初始压缩曲线 L_v 可以通过静水压缩试验或者3轴加载试验获得。极限卸载曲线 L_c 是材料中孔隙完全闭合以后的压缩和卸载曲线,它需要在压力很高的加载设备中试验获得。在饱和土中,它对应于气体完全被压缩或者溶解时的压缩曲线, A. A. Bobk^[14]根据试验给出了曲线 L_v 和 L_c 的交汇点处相对应的体积应变表达式

$$\epsilon_v = \frac{\alpha_1}{1 - \alpha_1} + 0.37\alpha_2 \quad (2)$$

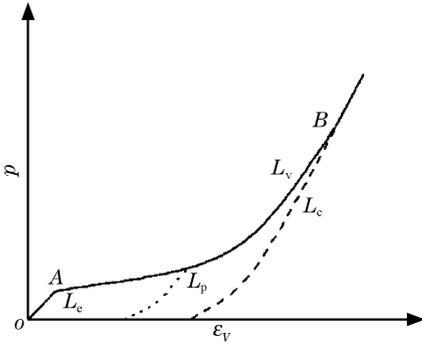


图 1 压力-体积应变关系曲线示意图

Fig. 1 Relation of pressure and volumetric strain

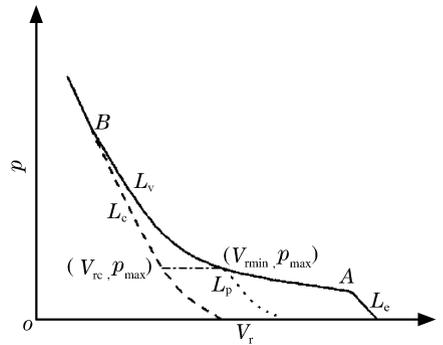


图 2 压力-相对体积关系曲线示意图

Fig. 2 Relation of pressure and relative volume

从上式可以看出,交汇点的体积应变与介质中的气体含量和液体含量密切相关。

现在来讨论图 1 中卸载曲线 L_p 。卸载曲线 L_p 是中间压力段 AB 的卸载和重新加载曲线,现在还没有一种非常理想化的方法来描述,文献^[13]中基于 $p\alpha$ 模型给出了一种描述方法,在 LS-dyna [15]中又对此进行了改进,使之更加合理宜用,其具体的描述如下:

将图 1 的压力-体积应变关系变换到图 2 所示的压力-相对体积关系,图中 $V_r = (1 + \epsilon_v)^{-1}$ 为相对体积。从曲线 L_v 上任意一点 (V_{rmin}, p_{max}) 开始的卸载曲线即为曲线 L_p 。假设对于给定的 (V_{rmin}, p_{max}) , 对应唯一一条曲线 L_p ,它由曲线 L_v 和 L_c 共同确定,并满足如下的关系

$$p_p(V_r) = p_c(V_{rc}V_r/V_{rmin}) \tag{3}$$

式(3)表明曲线 L_p 和曲线 L_c 有相同的表达式,只是自变量之间存在一个数值为 V_{rc}/V_{rmin} 的比例换算关系,对于给定的 (V_{rmin}, p_{max}) , V_{rc}/V_{rmin} 是可以预先确定的常数,而且 $V_{rc}/V_{rmin} \leq 1.0$ 。

式(3)满足曲线 L_p 恒在曲线 L_c 和 L_v 之间,且避免了卸载曲线 L_p 为直线的缺陷。

4 饱和土介质强度特性描述

饱和土中水和气体不能承受剪力,饱和土的强度完全来自于骨架。土骨架属于典型的“摩阻型”材料,它的强度与压力有密切关系。

3 轴试验中,对于密砂和超固结土,初始屈服以后,随着轴向应变 ϵ_a 的增加,剪应力逐渐增加到峰值强度,然后随着轴向应变的进一步增加,强度逐渐降低,最后达到残余强度,即所谓的应变软化现象,见图 3。取不同的围压进行试验就可以描绘出初始屈服强度 $F_i(p)$ 、峰值强度 $F_m(p)$ 和残余强度 $F_r(p)$ 包络线,见图 4。在通常情况下,这些包络线都是曲线,并可以表示成压力 p 的函数

$$\sigma_1 - \sigma_3 = F_j(p) \quad j = i, m, r \tag{4}$$

图 3 中点 I 到点 U 的应变硬化段(相对于图 4 中曲线 $F_i(p)$ 到曲线 $F_m(p)$)塑性应变逐渐累积,且解是唯一的。从图 3 中点 U 到点 R 的应变软化段

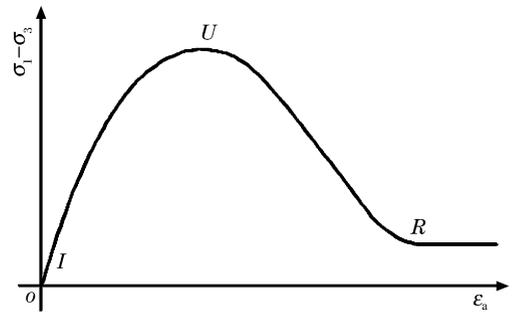


图 3 密砂和超固结土的 3 轴试验结果

Fig. 3 Triaxial compression tests for dense sand and overconsolidated soil

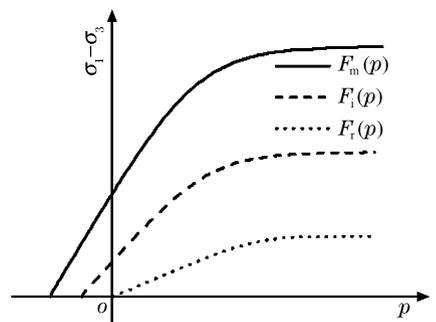


图 4 屈服面示意图

Fig. 4 Three failure surfaces

(相对于图 4 中曲线 $F_m(p)$ 到曲线 $F_r(p)$), 随着轴向应变的增加, 抗剪强度逐渐降低, 用连续力学的有限元模型求解时, 解可能不唯一, 在 LS-dyna 软件中, 有专门的应变软化处理功能, 详细说明参看 LS-dyna 软件的理论文本。

图 3 中从点 I 到点 U 再到点 R , 塑性应变是逐渐增加的, 因此可以参照一般损伤力学的描述方法, 以塑性应变的大小作为损伤因子来控制强度曲线之间的过渡。

5 算例分析

应用 LS-dyna 软件分析三相饱和土中的波传播及其与刚性底板的相互作用问题, 并与先前完成的试验进行了对比。土样为高度 4.74 m 的饱和土柱, 不同深度 h 的物理指标见表 1。在地表输入由导爆索产生的空气冲击波超压, 详细的试验描述在文献[8-9]中。由于试验过程中没有饱和土完整的全应力应变曲线, 因此计算过程中没有考虑饱和土强度的应变硬化和应变软化特征。计算中取饱和土的内摩擦角和粘聚力分别为 12° 和 4.5 kPa。

表 1 不同深度处饱和土三组分含量

Table 1 Content of three phases at various depths

h/m	气体	固体	液体	h/m	气体	固体	液体
4.26~4.74	0.020	0.570	0.410	1.80~2.30	0.035	0.570	0.395
3.79~4.26	0.023	0.570	0.407	1.30~1.80	0.038	0.570	0.392
3.29~3.79	0.026	0.570	0.404	0.80~1.30	0.041	0.570	0.389
2.80~3.29	0.029	0.570	0.401	0.20~0.80	0.044	0.570	0.386
2.30~2.80	0.032	0.570	0.398	0.00~0.20	0.150	0.667	0.183

图 5 为不同深度处的压力波形, 其中(a)对应于地表输入荷载, (f)对应于刚性底板处的压力波形, 实线为计算结果, 虚线为试验结果。

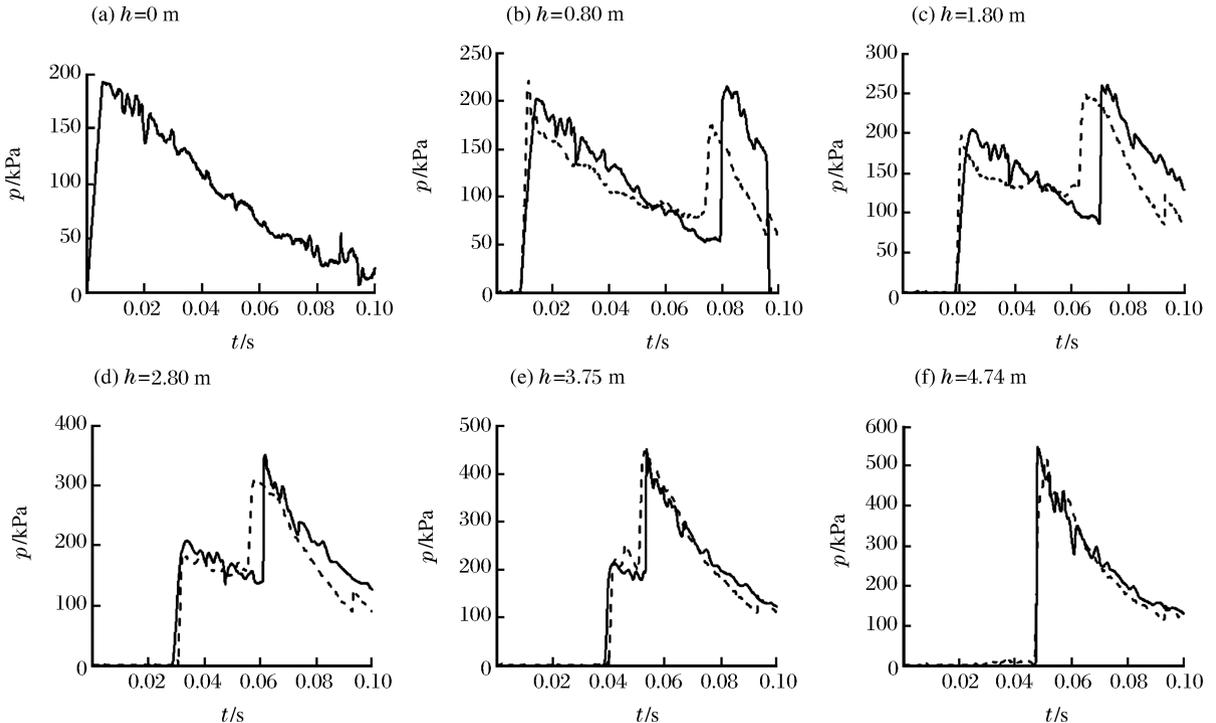


图 5 不同深度处的压力波形

Fig. 5 Pressure waveforms at various depths

从图 5 中可以看出, 理论计算结果与试验测量结果在峰值和曲线形状上符合较好, “倒衰减”现象和

“内生激波”都比较明显,对比图 5(e)和 5(f)可以求出,饱和土的刚壁反射系数最大,约 2.5,明显大于 2.0。

6 结 论

通过前面的理论描述和数值分析可以得出以下几点结论:

- (1) 使用 LS-dyna 软件可以比较好地模拟饱和土中的波传播问题,一些特殊的试验现象,比如“倒衰减”现象、“内生激波”现象和刚性障碍物上反射系数大于 2.0 等也可以很好地再现。
- (2) 对饱和土的体积压缩关系和强度关系的描述是可行的,完全可以应用于实际工程问题分析。
- (3) 本构关系的描述同样适用于一般的非饱和土和岩石等地质材料。

参考文献:

- [1] Ляхов Г М. Основы Динамики Взрывных Воли В Грунтах И Горных Породах[M]. Москва: Недра, 1974.
- [2] Drake J L, Little C D. Ground shock from penetrating conventional weapons[R]. ADP001706, 1983.
- [3] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid[J]. Journal of Acoust, 1956, 28(2): 168-191.
- [4] Dontsov V E, Nakoryakov V E. Enhancement of shock waves in a porous medium saturated with a liquid containing soluble-gas bubbles[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(11): 2 023-2 041.
- [5] WANG Zhong-qi, HAO Hong , LU Yong. A three-phase soil model for simulating stress wave propagation due to blast loading[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28(1): 33-56.
- [6] 俞儒一,赵洪顺. 压缩波在饱和土中的传播试验[J]. 爆炸与冲击,1982,2(4):43-49.
YU Ru-yi, ZHAO Hong-shun. Experiment on the compressional wave propagation in saturated soil[J]. Explosion and Shock Waves, 1982, 2(4): 43-49.
- [7] 黄能法,王作民. 饱和土力学性质试验研究总报告[R]. 洛阳:总参工程兵科研三所,1993.
- [8] 赵跃堂,郑守军,郑大亮. 爆炸波在饱和土介质中传播时压力变化规律的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2004, 24(1):60-65.
ZHAO Yue-tang, ZHENG Shou-jun, ZHENG Da-liang. Experimental investigation on pressure variation during explosion wave propagation in saturated soils[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(1): 60-65.
- [9] 赵跃堂,郑大亮,罗昆升. 饱和土介质中爆炸波传播的时间特征试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2004,24(2):162-167.
ZHAO Yue-tang, ZHENG Da-liang, LUO Kun-sheng. Experimental investigation on time characteristics of explosive wave propagation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(2): 162-167.
- [10] Prapaharan S, Chameau J L, Holtz R D. Effect of strain rate on undrained strength derived from pressuremeter tests[J]. Geotechnique, 1989, 39(4): 615-624.
- [11] Blouin S E, Kwang J K. Undrained compressibility of saturated soil[R]. AD-A188400, 1984.
- [12] Stephen A A. Two-dimensional finite element analysis of porous geomaterials at multikilobar stress levels[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute, 2001.
- [13] Burton D E. Physics and numerics of the TENSOR code[R]. UCID-19428, 1982.
- [14] Вовк А А. Грунтав Под ДеистВием Импульсных Нагрузов[M]. Киев: Наукова Думка, 1984.
- [15] Livermore Software Technology Corporation. LS-dyna Keyword User's Manual[M]. Version 970. Livermore Software Technology Corporation, 2003.

Numerical simulation of explosion wave propagation in the saturated soil

ZHAO Yue-tang^{*}, LIANG Hui, FAN Bin

(Engineering Institute of PLAUST, Jiangsu, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: The constitutive model was described based on the theory formwork of elastic-plastic hydrodynamics for saturated soil under the explosive loading, including the relation of pressure and volumetric strain and the relation of pressure and failure surface. The explosion wave propagation and the interaction between media and structure were simulated numerically by using LS-dyna software, the results of numerical simulation is in close agreement with that of foregone experimental investigation. The reappearance of some special phenomena for saturated soil makes clear that the constitutive model is usable.

Key words: mechanics of explosion; constitutive relation; numerical simulation; saturated soil; explosion wave

X 光机

X 射线具有穿透物质不被折射和反射,不受电场、磁场的影响,而按直线传输和按一定规律衰减的特性,已广泛地应用在医疗卫生、工业生产、科学研究、武器研制、国防建设、航天工程等各领域无损探伤、诊断,以达到质量控制的目的;对具有瞬变特性的高速运动现象进行观测和研究。

作为我院爆轰物理研究的需要,我们先后研制成功 X-I 型、X-II 型、X-III 型脉冲 X 光机和 X-V 型软管 X 光机。

X-III 型机采用同轴结构方式,选用低感电容元件储能,Max 发生器直接产生 ns 高压脉冲加到二极管上产生 ns 宽度 X 射线,具有闪光时间短、焦点小、性能稳定、操作简单,主机体积小、重量轻、移动方便及触发控制记录仪器柜式化。在爆轰物理研究中观测不透明介质的内部结构、探伤等方面获得理想的效果,是国内同类型机种的先进设备,已在国内总参工程兵研究所等重要的科研单位得到推广应用,1997 年《1.5 Mev/40 ns 脉冲 X 射线实验装置研究和应用》荣获国防科工委科技进步三等奖。

X-III 型脉冲 X 光机主要性能指标 标称电压:1.5 MV;标称储能:0.5 KJ;脉冲宽度: <40 ns;焦点直径:3、5、6 mm 任选;1 m 处剂量: 2.32×10^{-5} c/kg;2.5 m 处穿透钢能力:30~40 mm;时间抖动: $<0.2 \mu s$ 。

X-V 型软管 X 光机 为系列闪光 X 射线机的一种,在与其技术性能相适应的范围内完成有关的实验研究工作和开拓新的应用领域。

X 光管与 Max 发生器通过高压电缆连接,可方便移动位置。X 光管电压:300 kV;脉宽:40 ns;焦斑: $\varnothing 4$ mm;剂量(38 cm 处):48 mR/pulse;穿透(2.5 m 处):穿透 38 mm 铝。

在武器研制中,闪光 X 射线测试技术与光学测试技术、电子学测试技术成为相辅相成测试手段。

脉冲 X 光照像技术是对各种爆炸过程和其他快速过程进行 X 光瞬间照像的技术。即可拍摄爆炸过程中的高速变化现象和不透明物体内部的变化过程,可应用于弹道过程聚能射流侵彻、炸药爆轰、破甲与防护、高速碰撞等爆炸力学的研究。

X-V 型 X 光机和 X 光管样品见 363 页;X-III 型机控制台和 X-III 型机样品见 363 页。

(转 363,379 页)

(中国工程物理研究院流体物理研究所提供)

* Corresponding author: ZHAO Yue-tang
E-mail address: yuetangzh@163.com
Telephone: 86-25-80821045