

# 爆炸成腔与爆炸衬砌对周围介质密度的影响

王海亮

(山东科技大学矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266510)

**摘要:** 针对爆炸成腔与爆炸衬砌对周围介质密度的影响进行了数值模拟和现场试验研究。应用 Dyna-2D 软件进行数值模拟研究的结果与近 20 多年以来相关的研究结论基本一致。数值模拟研究表明, 在爆炸形成的腔体或砌体内壁存在一个密度小于介质初始密度的低密度区。但是, 现场试验研究的结果并不支持这些结论。通过 10 次现场爆炸试验对爆后介质的密度进行了实测。研究结果表明: 无论是爆炸成腔还是爆炸衬砌, 腔壁附近介质的密度均大于介质的初始密度, 不存在所谓的低密度区。认为“腔壁近区密度不是最大”、“空腔壁上的介质层, 有一密度小于其初始密度的层”的观点是错误的。

**关键词:** 爆炸衬砌; 爆扩; 腔体; 土; 密度; 数值模拟

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)07-1110-07

**作者简介:** 王海亮(1963-), 男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 主要从事爆炸与安全技术、矿山工程方面的研究。E-mail: A405405@263.net。

## Influences of explosive enlargement and explosive lining on density of surrounding media

WANG Hai-liang

(Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266510, China)

**Abstract:** Aiming at the influences of explosive enlargement and explosive lining on the density of surrounding media, numerical simulations and field tests are carried out. The results of numerical simulations by Dyna-2D are consistent with the conclusions of related studies in recent 20 years. The numerical simulations show that there exists a low-density zone at the inwall of explosively formed cavity or lining, and the density in the zone is lower than its initial one. But the field tests results do not support the above conclusions. Ten field explosive tests are carried out to confirm the density of the media. The results indicate that the densities of the cavity's surrounding media, formed through either explosive enlargement or explosive lining, are all higher than their initial ones, and no so-called low-density zone exists. The following viewpoints are all mistaken that the density isn't the highest at the inwall near the cavity, and that there exists a medium zone whose density is lower than its initial one.

**Key words:** explosive lining; explosive enlargement; cavity; soil; density; numerical simulation

## 0 引言

应用爆炸衬砌技术<sup>[1]</sup>建造地下空间通常要经过土中爆炸成腔<sup>[2]</sup>和爆炸衬砌两个主要施工工序<sup>[3]</sup>。无论是爆炸成腔还是爆炸衬砌都会使爆炸中心周围的介质产生弹塑变形, 造成介质的密度较爆炸前发生很大的变化, 对介质的物理、力学性能产生较大的影响。探索爆炸成腔、爆炸衬砌对介质密度的影响规律, 对深入研究爆炸成腔<sup>[4-5]</sup>和爆炸衬砌<sup>[6-7]</sup>机理具有重要意义。

1985年, 许连坡等<sup>[8]</sup>应用解析分析和数值计算的方法对土中爆炸形成压密层的密度进行了理论研究。

他们认为, 压密层中的质点在运动过程中变松散了。对于空腔壁上的介质层, 其密度值下降迅速, 最后到土体初始密度  $\rho_0$  的 0.6 倍, 并有一密度小于  $\rho_0$  的层。1999年, 顾文彬等<sup>[9]</sup>运用完全非线性动力学基本理论和算法, 对球形装药在半无限土介质中的爆炸问题进行了数值模拟研究, 得到了爆炸空腔周围介质密度与比距离的关系曲线, 表明腔体壁面处的土体密度低于其初始密度。2001年, 王仲琦等<sup>[10]</sup>在多流体网格算法

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10672091)

收稿日期: 2009-10-20

修改稿返回日期: 2011-02-14

基础上,提出了两种以上介质处理算法,编制了SMMIC程序,对爆炸挤压黏土密度变化过程进行了数值模拟研究,同样认为“腔壁近区密度不是最大”。

本文针对爆炸成腔与爆炸衬砌对介质密度的影响进行了数值模拟和现场试验研究,提出了与上述学者不同的观点。

### 1 爆炸衬砌对介质密度影响的数值模拟

本文应用 DYNA-2D 程序,对爆炸衬砌过程中介质密度的变化规律进行了数值模拟研究。

#### 1.1 材料模型与状态方程

##### (1) 炸药的材料模型与状态方程

本文涉及的试验均使用#2 岩石铵梯炸药。为了模拟高能炸药的起爆和爆轰过程,采用高能炸药燃烧材料模型模拟#2 岩石铵梯炸药。炸药的 JWL 状态方程<sup>[11-12]</sup>为

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (1)$$

式中,  $A, B, R_1, R_2, \omega$  为输入参数。#2 岩石铵梯炸药的密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$ 、爆速  $0.36 \text{ cm}/\mu\text{s}$ , 其 JWL 状态方程参数为  $A = 47.6 \text{ GPa}, B = 0.529 \text{ GPa}, R_1 = 3.5, R_2 = 0.9, \omega = 1.3$ , 初始内能  $E_0 = 4.5 \text{ GPa}$ , 初始体积  $V_0 = 1.0 \text{ cm}^3$ 。

##### (2) 流态砂浆与土壤的材料模型与状态方程

对于流态砂浆和土体,本文采用流体动力弹塑性模型进行描述<sup>[11-12]</sup>。流态砂浆和土壤介质均采用 Gruneisen 状态方程。材料冲击压缩时的状态方程为

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E; \quad (2)$$

材料膨胀时的状态方程为

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (3)$$

式中  $C$  为  $u_s - u_p$  曲线的截距;  $\gamma_0$  为 Gruneisen 系数;  $S_1, S_2, S_3$  为  $u_s - u_p$  曲线斜率系数;  $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ ;  $\rho_0$  为材料的初始密度;  $E$  为材料内能;  $\alpha$  为对  $\gamma_0$  的一阶体积修正。流态砂浆与土壤材料模型、状态方程的主要输入参数如表 1 所示。表 1 中流态砂浆和土壤的密度来自现场实测结果。砂浆和土壤的其余参数根据 DYNA 程序使用手册的有关规定确定。

表 1 流态砂浆与土壤的主要输入参数

Table 1 Key input parameters of mortar and soil

名称	密度 $\rho_0$ /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	沙漏黏性	剪切模量 /100 GPa	屈服应力 /100 GPa	$C$	$\gamma_0$
流态砂浆	2.098	0.100	$1.4 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-4}$	0.080	0.300
土壤	1.598	1.000	$4.0 \times 10^{-4}$	$4.8 \times 10^{-4}$	0.025	0.400

#### 1.2 计算模型

假定地表为水平面。炸药为球形装药。流态砂浆和料仓都是以炸药中心为中心的球对称体。以过炸药中心并垂直于地面的直线为对称轴,将爆炸衬砌简化为轴对称问题。炸药装药量  $150 \text{ g}$ , 装药半径  $3.3 \text{ cm}$ 。流态砂浆内半径与装药半径相等,外半径为  $22.5 \text{ cm}$ ,与料仓半径相等。炸药球心与土壤径向透射边界、土壤下部透射边界及地表的距离如图 1<sup>[1, 11]</sup>所示。

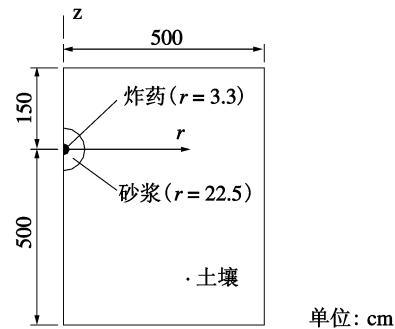


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Sketch of calculation model

采用拉格朗日四边形网格,分别对炸药、流态砂浆和土壤进行网格划分,共划分 7620 个四结点单元,7889 个节点。炸药与流态砂浆、流态砂浆与土壤间的接触设定为仅滑动。为便于了解流态砂浆和土体各部位在爆炸作用过程中密度的变化情况,在  $r$  轴、 $z$  轴的正方向上分别选取一些重要的单元进行分析。表 2 列出了这些单元的初始坐标。

表 2 流态砂浆与土体特征点坐标

Table 2 Coordinates of characteristic points of fluid mortar and soil

位置	单元序号	$r/\text{cm}$	$z/\text{cm}$
砂浆	505	0.000	3.300
$z$ 轴	507	0.000	8.100
正向	509	0.000	12.90
	512	0.000	22.50
土壤	897	22.50	0.000
$r$ 轴	1025	57.18	0.000
正向	4290	219.95	0.000
	4320	489.33	0.000

#### 1.3 砂浆密度的数值模拟结果及分析

在  $z$  轴正方向上选取 505 (砂浆内壁上的单元)、507、509、512 (砂浆外壁上的单元) 4 个有代表性的单元。起爆后,这 4 个单元的密度  $\rho$  与时间  $t$  的关系如图 2 所示。

通过对图 2 的分析,对砂浆密度随时间的变化规律及砂浆砌体的密度分布有了以下认识。

(1) 药包起爆后,砂浆内各单元的密度依次急剧变化到各自的最大值或最小值。其中最大值出现在砂

浆外表面上的 512 单元, 为  $2.251 \text{ g/cm}^3$ ; 最小值出现在砂浆内表面的 505 单元, 为  $1.931 \text{ g/cm}^3$ 。随后 505、507、509、512 号单元的密度在振荡过程中逐步趋于稳定。在  $t=4000 \mu\text{s}$  左右所有单元结束振荡, 进入密度稳定阶段。

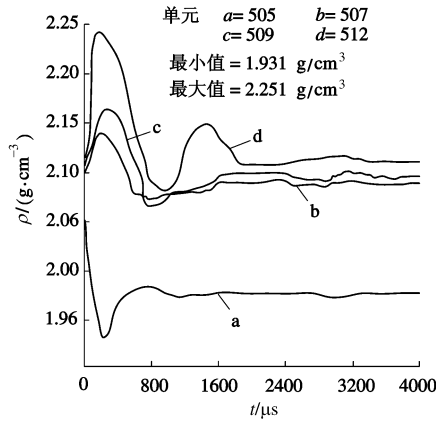


图 2 z 轴方向上砂浆密度  $\rho$  与时间  $t$  的关系

Fig. 2 Relationship between mortar density  $\rho$  and time  $t$  along axis  $z$

(2) 在密度稳定阶段, 砂浆的密度分布具有以下特点。从内壁至外壁沿砌体径向砂浆密度呈逐步增大的趋势。砂浆密度主要沿砌体径向发生变化, 沿环向基本无变化。密度的最大值出现在砌体的外壁面, 为  $2.09 \text{ g/cm}^3$ , 是砂浆的初始密度值。密度的最小值出现在砌体的内壁面, 为  $2.00 \text{ g/cm}^3$ , 较砂浆的初始密度下降 4.3%。低密度区主要集中在砌体内壁面附近, 约占砌体厚度的 10%, 这个区域的密度变化梯度较大。在其余 90% 的范围内, 砂浆密度变化梯度很小, 最小的密度值也已达砂浆初始密度值的 99%。

### 1.4 土壤密度的数值模拟结果及分析

在土壤中沿  $r$  轴正方向选取 4 个有代表性的单元。这些单元的编号、单元上特征结点的初始坐标值分别在表 2 和图 3 中列出。图 3 给出了这些单元密度随时间的变化关系。图 4 则给出了  $t=20000 \mu\text{s}$  时, 土壤的密度分布情况。

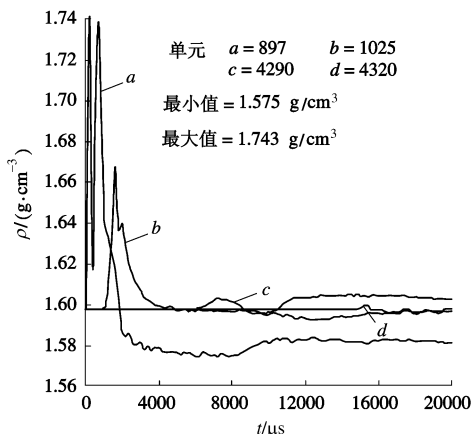


图 3  $r$  轴正方向上土壤密度  $\rho$  与时间  $t$  的关系

Fig. 3 Relationship between soil density  $\rho$  and time  $t$  along axis  $r$  (positive)

炸药爆轰结束且砂浆、土壤中各单元的应力、密度、位移趋于稳定时的状态为爆炸终结状态。本文选择起爆后  $20000 \mu\text{s}$  时的状态为爆炸终结状态。

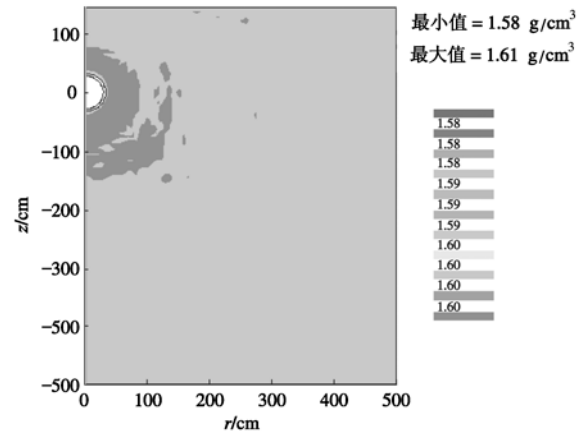


图 4 土壤密度分布 ( $t=20000 \mu\text{s}$ )

Fig. 4 Distribution of soil density ( $t=20000 \mu\text{s}$ )

通过对图 3, 4 的分析, 对土壤密度随时间的变化规律、土壤的密度分布有了以下认识。

(1) 药包起爆后, 所选各单元的密度值首先急剧上升到各自的一个极大值。然后在出现一次振荡变化后, 迅速下降到土壤的初始密度值。这个过程大约经历  $2000 \mu\text{s}$ 。单元与药包中心的距离越大, 振荡趋于稳定的时间越滞后。

(2) 最大的峰值密度并不发生在料仓壁面(即土体与砂浆的接触面)上, 而是发生在土壤内部靠近料仓壁面的一些单元上。例如 912 号单元(初始形心坐标为  $r=19.461$ 、 $z=-17.744$ )的最大峰值密度为  $1.794 \text{ g/cm}^3$ 。

(3) 单元密度由最大峰值下降到初始密度值后, 即进入峰值较小的波动阶段。该阶段土壤的密度值与  $t=20000 \mu\text{s}$  时的密度十分接近。

(4) 爆炸终结状态下土壤的各种参数已基本稳定, 可以和实测数据进行比较研究。

根据数值模拟研究的结果, 爆炸终结状态下的土壤从料仓壁面沿径向可以依次分为低密度区, 压实区和振动疏松区 3 区域。这 3 个区域内土壤的密度分布具有以下特点。

低密度区是指经数值模拟计算得到的、位于料仓壁面附近的、密度值小于土壤初始密度值的区域。低密度区的内边界为料仓壁面, 外边界为密度值等于初始密度的 1 个封闭等值线。低密度区内部的土壤密度小于初始密度。料仓壁面处的密度最低, 为  $1.573$

$\text{g}/\text{cm}^3$ , 较土壤的初始密度下降 1.6%。土壤的密度沿径向逐步恢复到初始密度。低密度区的厚度约为 1.6~5.1 cm。

压实区是指低密度区外侧土壤密度大于初始密度的区域。压实区内土壤的密度沿径向又可分为密度上升、密度下降 2 个阶段。在密度上升阶段内, 土壤由初始密度值连续上升到压实区内的密度极大值, 然后转入密度下降阶段。在密度下降阶段内, 土壤由密度极大值连续下降到初始密度值, 随即进入振动疏松区。 $r$  轴方向上, 在爆后压实区内的密度极大值发生在 977 号单元, 为  $1.606 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 比初始密度大 0.5%。977 号单元的初始坐标为 42.39 cm; 爆后坐标为 46.45, 距爆后的料仓壁面 14.45 cm。

振动疏松区是指压实区外侧远离爆源的区域。由于远离爆源, 从爆源传到该区域的爆炸压应力波强度已低于从自由面传来的反射拉应力波的强度, 出现拉应力区。在拉应力和爆炸振动效应的共同作用下, 该区域土壤的密度值小于初始密度值。由于土的抗拉强度很低, 实际上该区的土壤在爆炸后处于疏松状态。

## 2 爆炸成腔与爆炸衬砌的现场试验

爆炸成腔与爆炸衬砌的现场试验场地选择在未扰动过的黏土和粉质黏土地。要求地面平整, 土质均匀, 土层厚度大于炸药埋深的 2 倍。

### 2.1 试验条件及试验数据

本课题组共完成了 24 次爆炸成腔和 20 次爆炸衬砌现场试验。爆炸成腔的起爆药量在  $225 \sim 51000 \text{ g}$ <sup>[2]</sup>, 爆炸衬砌的起爆药量在  $150 \sim 900 \text{ g}$ <sup>[1]</sup>。分别对其中 5 个爆炸成腔腔体和 5 个爆炸衬砌砌体所在最大水平剖面<sup>[3]</sup>上的土样进行了土工实验分析。试验场地的主要特征参数及爆炸成腔与爆炸衬砌的实测数据如表 3 所示。

9L 钻孔使用的衬砌材料的质量配比为水: 水泥: 砂子=1:2:4。20L 钻孔为水: 水泥: 砂子=1:1.92:4.5。39L、42L 钻孔为水: 水泥: 砂子=1:2:7.4。28L 钻孔使用的是水泥灰渣。水泥灰渣的灰渣比为水泥: 过筛炉渣=1:11.11。

### 2.2 爆后土体的干密度

由于爆炸成腔和爆炸衬砌都会对周围土体含水率产生一定的影响<sup>[3]</sup>, 本文选择爆后土体的干密度为研究指标。图 5, 6 分别是爆后腔体和砌体最大水平剖面上土体实测干密度  $\rho_d$  与土样距腔壁距离  $L$  之间的关系。

从图 5 可以看出, 爆炸成腔后土体的干密度  $\rho_d$  随土样距腔壁距离  $L$  的增大而减小。以 29C、35C

腔体为例, 土层的原状土干密度均为  $1.53 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。爆炸成腔后土体的最大干密度分别为  $1.81 \text{ g}/\text{cm}^3$  和  $1.71 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 都出现在距腔壁 0~5 cm 范围内。干密度分别提高 18.3% 和 11.76%。可见爆炸作用对土体的挤密效果还是很明显的。图 5 表明, 对于爆炸成腔, 腔壁附近土体的密度均明显大于原状土体的初始密度, 不存在所谓的低密度区。

从图 6 可以看出, 爆炸衬砌后土体的干密度  $\rho_d$  随土样距腔壁距离  $L$  的增大而减小。以 20L、39L 腔体为例, 土层的原状土干密度分别为  $1.40 \text{ g}/\text{cm}^3$  和  $1.47 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。爆炸衬砌后土体的最大干密度分别为  $1.64 \text{ g}/\text{cm}^3$  和  $1.67 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 都出现在距腔壁 0~5 cm 范围内。干密度分别提高 17.1% 和 13.6%。可见爆炸衬砌对土体的挤密效果也是很明显的。图 6 表明, 对于爆炸衬砌, 腔壁附近土体的密度均明显大于原状土体的初始密度, 也不存在所谓的低密度区。

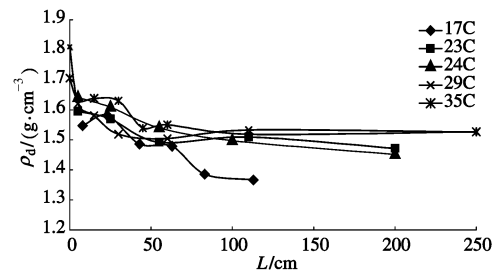


图 5 爆后腔体周围土体干密度  $\rho_d$  与水平距离  $L$  的关系  
Fig. 5 Relationship between dry density  $\rho_d$  and horizontal distance  $L$  of surrounding soil of explosively formed cavity

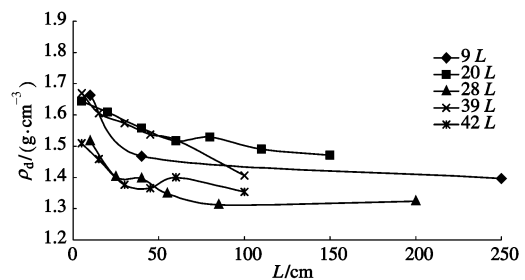


图 6 爆后砌体周围土体干密度  $\rho_d$  与水平距离  $L$  的关系  
Fig. 6 Relationship between dry density  $\rho_d$  and horizontal distance  $L$  of surrounding soil of explosively formed lining

实验数据表明, 在距腔壁或砌体 110~150 cm 之外土体的干密度已趋于稳定。说明当起爆药量在  $150 \sim 1200 \text{ g}$  时, 爆炸作用对土体的影响范围在  $R/r = 4 \sim 6$  的范围内。其中,  $R$  为土样距爆炸中心的距离,  $r$  为爆炸成腔的半径。因此, 本文把距腔壁或砌体 150 cm 之外的土体视为原土体, 作为对比分析的依据。

土工实验结果证明, 无论是爆炸成腔还是爆炸

衬砌, 腔壁或砌体附近土体的密度均明显大于原状土体的初始密度, 不存在所谓的低密度区。

表3 爆炸成腔与爆炸衬砌试验数据

Table 3 Practical parameters of enlarging cavity and explosive lining

钻孔编号	土壤分类	天然密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含水率 /%	孔隙比	孔深 /m	成腔药量 /g	腔体最大 水平直径 /cm	衬砌药量 /g
9L	粉土偏砂	1.598~1.68	14.48	0.859	2.45	225	40	900
17C	粉土	1.62~1.67	17.42	0.917	2.25	300	50	—
20L	粉质黏土	1.75~1.82	19.12	0.780	2.00	450	64	200
23C	粉质黏土	1.75~1.86	20.65	0.829	2.24	300	53	—
24C	粉质黏土	1.75~1.86	20.65	0.829	2.10	450	67	—
28L	黏土	1.48~1.73	18.35	0.850	1.80	600	69	450
29C	黏土	1.48~1.73	18.35	0.850	1.80	600	75	—
35C	粉质黏土	1.48~1.73	18.35	0.850	3.00	1200	95	—
39L	粉质黏土	1.48~1.73	18.35	0.850	3.10	1200	110	600
42L	黏土	1.48~1.73	18.35	0.850	1.75	600	80	150

注: 表中钻孔编号带字母“C”的腔体用做爆炸成腔试验, 带字母“L”的腔体用做爆炸衬砌试验。

实验数据表明, 无论是爆炸成腔还是爆炸衬砌, 土体的天然密度与水平距离的关系与干密度具有相同的变化趋势。

### 3 爆后介质密度分布情况的讨论

本文使用的 DYNA 程序, 以及文献[8~10]使用的程序或计算方法均无法对附着在土壤和流态砂浆中的水分、气体在爆炸过程中的迁移情况进行模拟计算。因此, 本文及文献[8~10], 通过数值模拟得到的关于砂浆和土壤在爆炸终结状态下的密度分布与现场试验结果存在着一些不一致的地方, 有些结果是错误的。通过数值模拟得到这些错误结果的原因, 可能还与模型的边界条件及材料模型有关, 严谨的论证还需更加深入的研究来完成。本文仅就爆后介质密度分布情况做以下初步讨论。

#### 3.1 爆炸终结状态下的砂浆密度大于流态砂浆的初始密度

根据本文数值模拟对砂浆密度的计算结果, 在绝大部分区域, 爆炸终结状态下的砂浆密度小于流态砂浆的初始密度, 仅在成型后的砌体外壁处等于流态砂浆的初始密度, 并且在砌体内壁附近存在一个厚度约占砌体厚度 10% 的低密度区。虽然这一结果与许连坡等<sup>[8]</sup>的理论研究结果基本吻合, 但笔者认为, 爆炸终结状态下的砂浆密度大于流态砂浆的初始密度。具体分析如下。

本文所述的流态砂浆特指由水泥、砂子和水组成的具有一定流动特性的均匀混合物。由于水的均匀混

入, 原来水泥、砂子中被气体占据的空隙被水分占据, 气体被排到流态砂浆之外; 因此流态砂浆中的气体含量可以忽略。水的密度低于水泥和砂子的密度, 因此水灰比越大, 流态砂浆的密度越小。

在爆炸衬砌过程中, 爆炸冲击波首先作用于流态砂浆。砂浆中的水分一部分浸出砂浆, 以蒸汽形式进入腔体 (在开挖后的砌体内壁面可以观察到凝结的水珠存在); 但绝大部分水分浸入与砂浆毗邻的、压力较低、孔隙率较高的土体中。原来由水分占据的空隙被密度大于水分的水泥和砂子颗粒占据, 砂浆爆炸终结状态下的密度值必然大于其初始密度。事实上, 由于排出了大量的水分, 爆炸终结状态下的砂浆已不具有流态性质, 而成为形态确定的固体。这就解释了“为什么流态砂浆能够在爆炸瞬间形成稳定的衬砌形态?” 这样一个问题。

虽然在爆炸过程中砂浆中出现了振荡应力极性交替的现象, 但是由于应力的性质、应力的具有明显的异步性, 加上砂浆并不是理想流体, 振荡拉应力不可能均匀作用于砂浆而使其密度产生均匀连续的变化。也就是说图 2 给出的爆炸终结状态的砂浆密度分布只能是一种理想状态。

实验研究表明: 对于同一配比的水泥砂浆, 爆炸衬砌结束后 28 d 的衬砌砌体试件的密度大于标准养护条件形成的砂浆试件的密度。

#### 3.2 土壤中不存在低密度区

根据本文数值模拟计算对土壤密度的分析结果, 在料仓壁面附近存在一个土壤密度小于初始密度的低

密度区。这与许连坡等的研究成果是一致的。但现场试验结果表明,土壤中并不存在这样一个低密度区。具体分析如下。

(1)爆炸作用在土壤上的压力与土壤距药包中心的距离成反比。越靠近药包中心,土壤受到的爆炸压力越大。药包近区的土壤由于受到比远区更大的压力,土壤被挤密压实,土壤中的孔隙率减小,孔隙中的气体向远离药包中心的方向迁移。药包近区的土壤失去了其中密度最小的气体成分,因而密度值提高;远区的土壤则因被挤入气体成分或受爆炸振动影响,导致密度下降。

(2)流态砂浆中的水分在爆炸冲击作用下侵入土体,占据了土壤中的剩余孔隙<sup>[3]</sup>。越是靠近药包中心位置上的土体,浸入的水分越多。水的密度大于它所占据孔隙中原有气体的密度,因此越是靠近药包中心位置上的土体,其密度越大。

综上所述,在靠近砂浆砌体的土壤中只存在一个密度大于初始密度的压实区。压实区的土壤与砂浆砌体紧密结合形成复合衬砌结构。压实区内土壤的密度与土壤距药包中心的距离成反比关系。因此判断,在靠近砂浆砌体的土壤中不仅不存在低密度区,也不存在压实区中的密度上升阶段。

### 3.3 爆炸成腔形成的腔体壁面裂纹对土壤密度的影响

土中爆炸成腔试验完成后,对腔体进行开挖观察,会发现腔体壁面存在一定数量的裂纹<sup>[1, 10]</sup>。裂纹的数量、深度与炸药用量、土壤性质等因素有关。有些学者认为:“对爆炸空腔周围的土体密度进行测试,其密度的变化规律与数值模拟结果相似,空腔壁面由于爆炸作用出现众多密集小裂纹,此腔壁近区密度不是最大,随距离增加,土体中裂缝消失,密度逐渐达到最大,然后密度变化减小,直到原始状态<sup>[10]</sup>。”对此,笔者有以下不同的观点。

(1)目前的数值模拟研究均把土壤视为理想弹塑性材料或流体(动力)弹塑性材料,计算程序尚不能考虑爆炸过程中土壤中出现的裂纹。因此,用试验中出现的裂纹解释数值模拟得到的低密度区是不合理的。

(2)空腔壁面出现的裂纹主要是土壤在爆生气体的气楔作用下形成的,而气楔作用是滞后于炸药爆炸冲击波的作用的。也即,在数值模拟得到低密度区的时间(2000 μs)内气楔作用尚未发生。

(3)实测结果表明,空腔壁面实体土壤的密度均大于壁面以外其它部位土壤的密度。因此,认为“腔壁近区密度不是最大”<sup>[10]</sup>、“腔体壁面处的土体密度低于其初始密度”<sup>[9]</sup>、或“对于空腔壁上的介质层,其密度值下降迅速,最后到土体初始密度 $\rho_0$ 的0.6倍。

并有一密度小于 $\rho_0$ 的层”<sup>[8]</sup>的观点是错误的。

## 4 结 论

针对本文数值模拟和现场试验给出的研究条件,可以得出以下研究结论:

(1)对于爆炸衬砌,爆炸终结状态下的砂浆密度大于流态砂浆的初始密度。

(2)对于爆炸衬砌,在靠近砂浆砌体的土壤中存在一个密度大于初始密度的压实区,压实区的土壤与砂浆砌体紧密结合形成复合衬砌结构。压实区内土壤的密度与土壤距药包中心的距离成反比关系。在靠近砂浆砌体的土壤中不仅不存在低密度区,也不存在压实区中的密度上升阶段。

(3)对于爆炸成腔,腔壁附近土体的密度均明显大于原状土体的初始密度,不存在所谓的低密度区。认为“腔壁近区密度不是最大”<sup>[10]</sup>、“腔体壁面处的土体密度低于其初始密度”<sup>[9]</sup>、或“对于空腔壁上的介质层,其密度值下降迅速,最后到土体初始密度 $\rho_0$ 的0.6倍。并有一密度小于 $\rho_0$ 的层”<sup>[8]</sup>存在的观点是错误的。

### 参考文献:

- [1] 王海亮,冯长根,王丽琼,等.爆炸衬砌试验研究[J].爆炸与冲击,2001,21(4):291-296.(WANG Hai-liang, FENG Chang-gen, WANG Li-qiong, et al. The experimental investigation on explosive lining[J]. Explosion and Shock, 2001, 21(4): 291 - 296. (in Chinese))
- [2] 王海亮,冯长根,王丽琼.土中爆炸成腔的现场试验[J].火炸药学报,2001,24(2):12-15.(WANG Hai-liang, FENG Chang-gen, WANG Li-qiong. Study on on-site experiment of explosion cavity in soil[J]. The Journal of Explosives and Propellants, 2001, 24(2): 12 - 15. (in Chinese))
- [3] 王海亮,马敏,叶朝良,等.爆炸成腔与爆炸衬砌对土体含水率的影响[J].岩土工程学报,2008,30(3):425-428.(WANG Hai-liang, MA Min, YE Chao-liang, et al. Influence of explosive enlargement and explosive lining on moisture content of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 425 - 428. (in Chinese))
- [4] 黄承贤.土中爆扩及其挤密效应的研究[J].爆炸与冲击,1996,16(4):354-360.(HUANG Cheng-xian. Study of blast-enlargement and compaction in soil[J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(4): 354 - 360. (in Chinese))
- [5] 党进谦,严宝文,李靖,等.爆破成腔技术在旱作农业中的应用[J].水利学报,2002(10):103-104.(DANG Jin-qian, YAN Bao-wen, LI Jing, et al. Application of cavity-making

- by explosion in arid-agriculture[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(10): 103 - 104. (in Chinese))
- [6] 邵 鹏, 程玉生, 史天生. 同步爆扩成型地下仓及混凝土仓壁的爆扩过程[J]. 中国矿业学院学报, 1998, **27**(2): 145 - 148. (SHAO Peng, CHENG Yu-sheng, SHI Tian-sheng. Research on blast-enlargement process of synchronous forming underground warehouse and concrete wall in soil[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, **27**(2): 145 - 148. (in Chinese))
- [7] 王东权, 史天生, 李方元, 等. 同步爆扩地下空间及混凝土壁模型试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1999, **28**(3): 217 - 220. (WANG Dong-quan, SHI Tian-sheng, LI Fang-yuan, et al. Experimental research on synchronous forming of underground space and concrete support with blast-enlargement method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, **28**(3): 217 - 220. (in Chinese))
- [8] 许连坡, 章培德. 土中爆炸初始阶段的空腔和压密层[M]// 土岩爆破文集(第二辑). 北京: 冶金工业出版社, 1985: 1 - 16. (XU Lian-bo, ZHANG Pei-de. Cavity and dense zone at initial explosive stage in soil[M]// Proceeding of Blasting Engineering in Rock and Soil (Vol II). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 1 - 16. (in Chinese))
- [9] 顾文彬, 叶序双, 詹发民, 等. 球形装药半无限体土介质中爆炸动力学分析[J]. 工程爆破, 1999, **5**(1): 5 - 10. (GU Wen-bin, YE Xu-shuang, ZHAN Fa-min, et al. Dynamic analysis on spherical charges exploding in semi-infinite soil medium[J]. Engineering Blasting, 1999, **5**(1): 5 - 10. (in Chinese))
- [10] 王仲琦, 张 奇, 白春华. 爆炸挤压黏土密度变化过程的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(3): 350 - 353. (WANG Zhong-qi, ZHANG Qi, BAI Chun-hua. Numerical simulation on variation of density of the soil compacted by explosion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(3): 350 - 353. (in Chinese))
- [11] 冯长根, 王海亮, 金 龙, 等. 爆炸衬砌过程中介质位移的数值模拟研究[J]. 火炸药学报, 2002, **25**(4): 1 - 4. (FENG Chang-gen, WANG Hai-liang, JIN Long, et al. Numerical simulation of displacements of the media during explosive lining in soil[J]. The Journal of Explosives and Propellants, 2002, **25**(4): 1 - 4. (in Chinese))
- [12] 王海亮, 李新明, 丁慧哲, 等. 爆炸衬砌过程中流态砂浆内应力变化规律的数值模拟[J]. 科技导报, 2007, **25**(23): 38 - 41. (WANG Hai-liang, LI Xin-ming, DING Hui-zhe, et al. Numerical simulation for time history of stress distributions in the mortar during explosive lining[J]. Science & Technology Review, 2007, **25**(23): 38 - 41. (in Chinese))