

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0179

平面激波加载下砂墙结构的冲击响应特性*

王宏亮¹, 田 宙¹, 浦锡锋¹, 姚成宝^{1,3}, 寿列枫^{1,2}

(1. 西北核技术研究院, 陕西 西安 710024;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

3. 北京大学数学学院, 北京 100871)

摘要: 砂墙结构在爆炸安全防护领域具有广泛应用, 为了研究激波加载下砂墙结构的冲击响应特性, 基于水平激波管实验装置, 开展平面激波冲击砂墙结构系列实验, 采用高速纹影摄像系统捕捉流场中激波波系的演化过程和砂墙结构的运动过程。入射激波马赫数为 1.827~2.413, 相应入射激波载荷强度为 0.378~0.724 MPa。砂墙结构利用铁砂、矾土、石英砂 3 种实验用砂制备, 所制备砂墙结构孔隙度分别为 56.6%、69.3%、56.6%。高速纹影照片显示: 平面激波冲击砂墙结构发生反射和透射, 伴随入射激波和透射激波的传播, 在百微秒内, 砂墙未产生显著运动, 表现出显著类固体动力学响应特性。基于冲击理论, 确定了铁砂墙、矾土砂墙、石英砂墙的线性冲击关系, 冲击关系中线性常数 λ 值量级为 100, 根据凝聚介质实用状态方程推断: 较低强度载荷冲击作用下, 砂墙主要产生体积变形, 而由冲击引起的热能效应则可以忽略。

关键词: 平面激波; 砂墙; 冲击响应; 高速纹影

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

砂墙结构作为一类经济型爆炸防护结构, 在野战、突发爆炸恐怖袭击以及爆炸实验等场景中, 得到了广泛应用^[1-2]。根据 Smith^[1] 关于防爆挡墙抗爆机制的表述, 砂墙作为一类低强度爆炸防护结构, 防爆性能主要体现在两个方面: 一是直接屏蔽爆炸能量, 二是通过结构变形损伤吸收爆炸能量。因此, 在砂墙防爆性能研究中, 砂墙结构的冲击响应特性是需要研究的关键问题之一。

目前, 关于砂墙结构的冲击响应特性, 尚未见系统性的研究报道。文献 [3-12] 研究多以砂墙主体部分颗粒层为研究对象, 重点研究平面激波与颗粒层作用过程中激波的衰减效应和颗粒层的加速特性, 鲜有研究涉及颗粒层的冲击响应特性, 仅 Kellenberger 等^[12] 在实验研究中提出平面激波冲击下压缩颗粒层表现出了类固体响应特性, 但并未开展进一步研究。其他方面, 针对爆炸侵彻等研究需求, 学者们针对砂土介质的冲击响应特性开展了大量开创性的、系统性的研究^[13-17], 这些研究为砂墙结构防爆性能研究提供了实验数据, 但实验数据应用的可行性、正确性还未得到检验。

本文中, 基于水平激波管实验平台, 开展平面激波与砂墙结构作用系列实验, 利用高速纹影摄像技术, 对流场内波系的演化过程和砂墙结构的响应行为进行实时捕捉。并根据冲击理论, 获得平面激波加载下铁砂墙、矾土砂墙和石英砂墙结构的线性冲击关系, 形成对较低载荷冲击下砂墙结构冲击响应特性的初步认识。

1 基本理论

平面激波冲击颗粒层, 将在冲击界面处发生反射和透射^[3-12]。根据冲击波理论, 界面两侧介质冲击状态参数满足速度相等和压力相等条件, 冲击状态参数可由介质各自的冲击两贡组状态关系和瑞利关系确定^[18]。本文中拟基于该理论, 研究砂墙结构冲击响应关系。

* 收稿日期: 2018-05-25; 修回日期: 2018-07-23

第一作者: 王宏亮(1983—), 女, 博士研究生, 助理研究员, wanghl_2105@163.com。

1.1 一维冲击关系

一维情况下,冲击波基本关系式如下。

质量守恒方程:

$$\rho_1(D-u_1) = \rho_0(D-u_0) \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho_1(D-u_1)^2 + p_1 = \rho_0(D-u_0)^2 + p_0 \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$e_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{(D-u_1)^2}{2} = e_0 + \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{(D-u_0)^2}{2} \quad (3)$$

介质状态方程:

$$e = e(p, \rho) \quad (4)$$

式中:下标 0、1 分别代表冲击波波前、波后状态; D 为冲击波速度, p 、 u 、 ρ 、 e 分别为介质压力、速度、密度和质量内能。

由式 (1)~(2) 可以确定冲击波瑞利关系:

$$p_1 - p_0 = \rho_0(D-u_0)(u_1-u_0) \quad (5)$$

1.2 空气介质冲击关系

大气环境下,空气介质满足理想气体状态方程:

$$e = \frac{p}{\rho(\gamma-1)} \quad (6)$$

式中: γ 为绝热指数。

空气介质 p - u 形式的雨贡纽状态关系为:

$$(u_1-u_0)^2 = \frac{2(p_1-p_0)^2}{\rho_0[(\gamma+1)p_1+(\gamma-1)p_0]} \quad (7)$$

1.3 砂墙冲击关系的确定方法

根据冲击实验结果^[14-17],假设冲击加载下砂墙结构满足线性冲击关系式:

$$D = \lambda u + c_0 \quad (8)$$

式中: c_0 为介质中体积声速,由颗粒层孔隙度、饱和度、颗粒材料参数、颗粒表面属性等参数决定; λ 为线性常数,同介质绝热指数相关。

将式 (8) 代入式 (5) 可确定砂墙结构的冲击瑞利关系:

$$p_1 - p_0 = \rho_0 D u_1 \quad (9)$$

冲击瞬间物质界面处冲击状态由反射激波和透射激波波后状态共同决定。本文中,通过开展平面激波冲击砂墙结构实验,可以测试得到砂墙结构前入射激波、反射激波及砂墙结构内透射激波的传播速度,进一步采用作图法,就可以得到在 p - u 空间中冲击界面处的冲击状态参数点 (p, u) 。理论上通过两发针对相同砂墙结构所开展的不同载荷强度冲击实验,可获得两组不同冲击状态数据点,最后即可求解得到砂墙结构的 D - u 关系。

2 实验方法

2.1 实验装置

基于水平激波管实验装置,开展不同载荷强度平面激波冲击砂墙结构的系列实验。

图 1 为水平激波管实验测试系统,该系统由水平激波管、砂墙装配结构、高速纹影摄影系统、同步

压力测试系统以及数据采集系统组成^[9]。图 2 为水平激波管示意图, 驱动段和被驱动段之间选用硬铝合金膜片隔开, 膜片厚度 2 mm。驱动段由高压氮气瓶、撞击气室、返回气室、驱动气室、撞杆等组成, 驱动气室设计最高充气压力为 5 MPa。被驱动段由 4 节圆角方管组成, 长度依次为 1 000、250、250、500 mm, 小节之间通过法兰盘连接, 第 2 节和第 3 节在直边上开设 40 mm×150 mm 窗口, 安装有有机玻璃, 高速纹影测试系统通过该窗口捕捉瞬时流场图像。高速纹影摄像系统最大观测区域面积为 40 mm×130 mm, 拍摄速率为 10^5 s^{-1} 。理想情况下, 根据高速纹影照片可确定入射激波、反射激波、透射激波的传播速度。

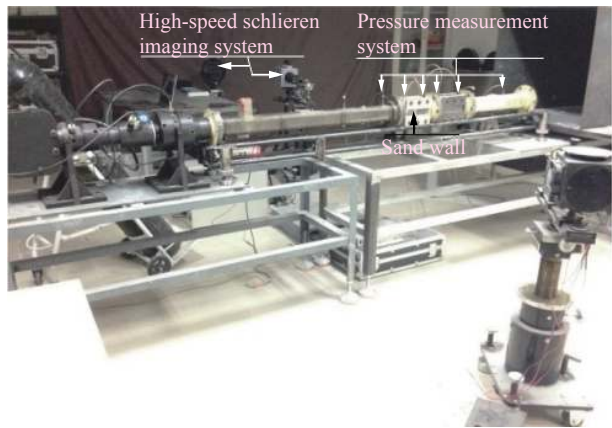


图 1 水平激波管实验测试系统照片^[9]

Fig. 1 A photo of horizontal shock tube test system^[9]

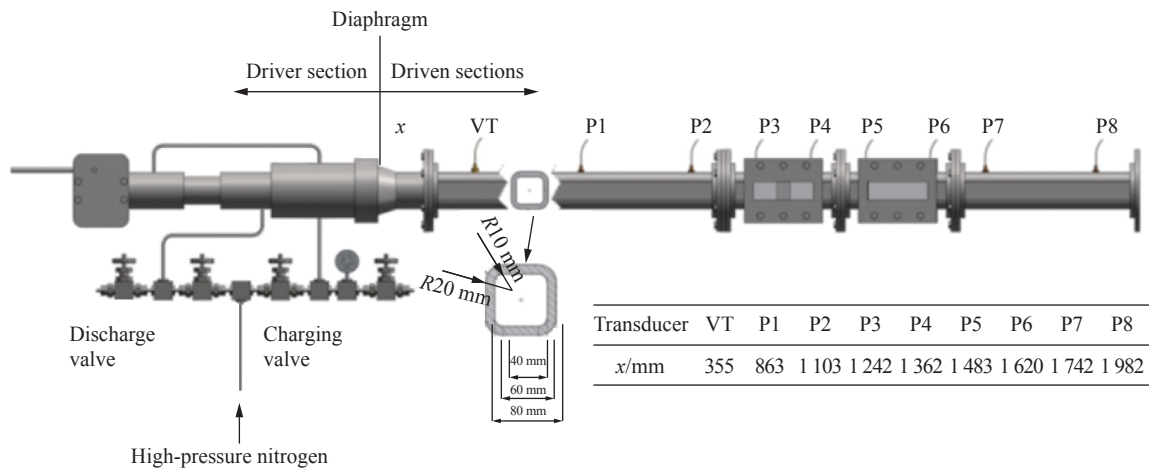


图 2 水平激波管示意图^[9]

Fig. 2 Schematic diagram of horizontal shock tube^[9]

2.2 砂墙结构制备

制备完成的砂墙结构及其装配情况如图 3 所示, 砂墙结构采用方形铁皮筒固定, 轮廓尺寸与被驱动段截面尺寸一致, 将一侧使用打印纸密封, 装入实验用砂, 保持自然密实堆积状态, 最后再使用打印纸密封另一侧, 实验时, 将薄壁铁皮筒插入被驱动段, 并通过法兰盘固定。本文中分别采用铁砂、矾土、石英砂 3 种实验用砂制备砂墙结构, 砂墙结构参数见表 1, 实验用砂粒径均一。

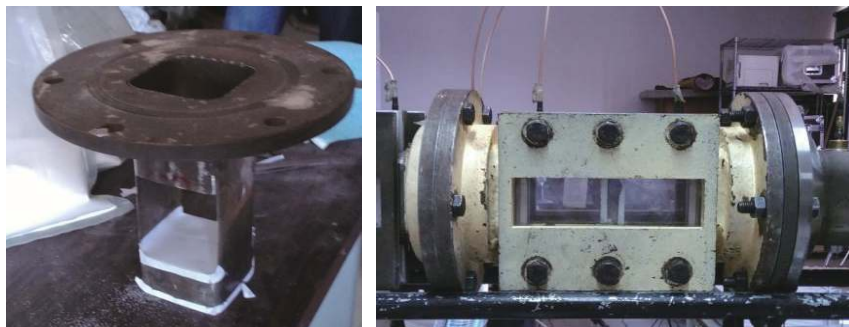


图 3 制备完成的砂墙结构及其装配完成照片^[9]

Fig. 3 Photos for the prepared sand structure and its assembly^[9]

表 1 砂墙结构参数

Table 1 Characteristic parameters of sand walls in seven experimental cases

工况	充气压力/MPa	厚度/mm	颗粒直径/ μm	孔隙度/%	初始表观密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	材料
1	2	20	250	56.6	3 060	铁砂
2	4	20	250	56.6	3 060	铁砂
3	2	20	10	69.3	1 196	矾土
4	4	20	10	69.3	1 196	矾土
5	5	30	250	56.6	1 146	石英砂
6	5	30	250	56.6	1 146	石英砂
7	4	20	250	56.6	1 146	石英砂

针对相同材料砂墙结构,设计开展不同载荷强度平面激波冲击实验,平面激波强度由驱动气室充气压力决定,用于产生不同冲击状态参数点 (p,u) 。激波管被驱动段为大气环境,压力、密度、温度分别为 0.101 MPa、1.185 kg/m^3 、298 K。

3 实验结果分析

3.1 激波冲击砂墙结构流场波系演化过程和砂墙结构的冲击响应过程

图 4~9 分别为表 1 所列工况条件下,流场瞬时高速纹影照片。照片可清晰显示砂墙结构附近流场内波系的演化发展过程,以及冲击下砂墙结构的响应运动过程。

图 4~9 显示:入射激波冲击砂墙结构,冲击瞬间,自冲击界面产生反射激波向上游传播,同时在反射激波与冲击界面之间形成高压区域;30~50 μs 后,砂层背部观察到透射激波向下游传播,透射激波穿越砂层过程中,砂墙结构未产生显著运动;伴随透射激波向下游传播,约百微妙时间,在砂墙结构顶部区域形成射流结构,原因是砂层顶部在重力作用下易形成狭隙,强度较弱,受冲击界面前端高压驱动将率

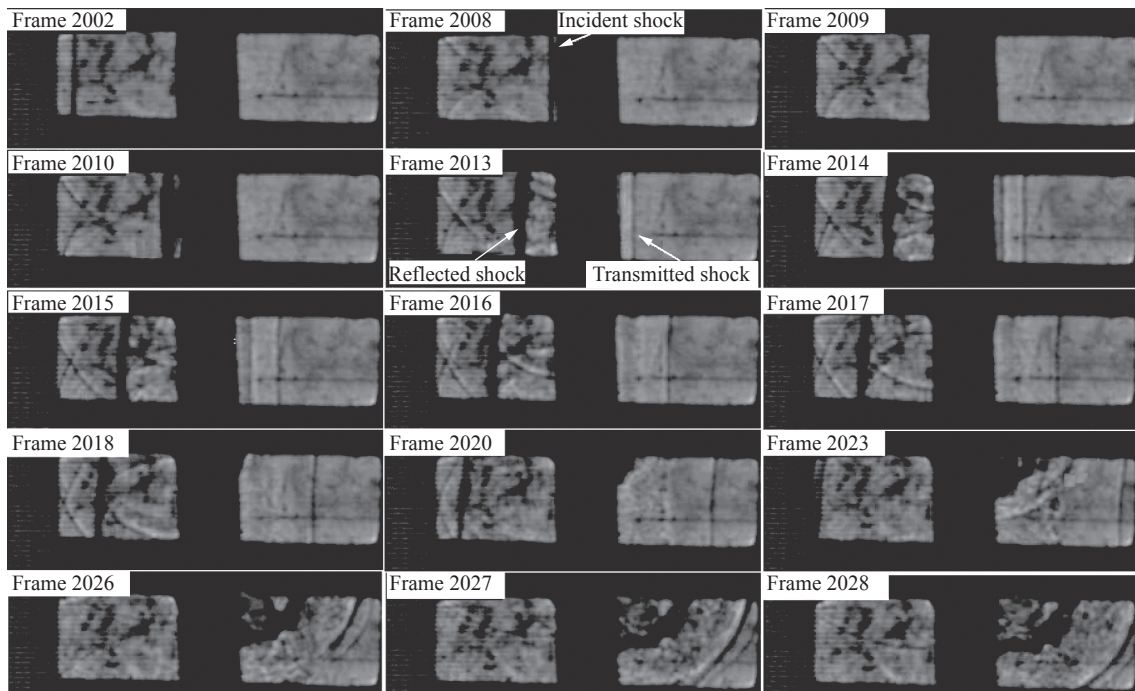


图 4 工况 1 的流场瞬时高速纹影照片

Fig. 4 High-speed schlieren photos of flow field at different times in the case 1

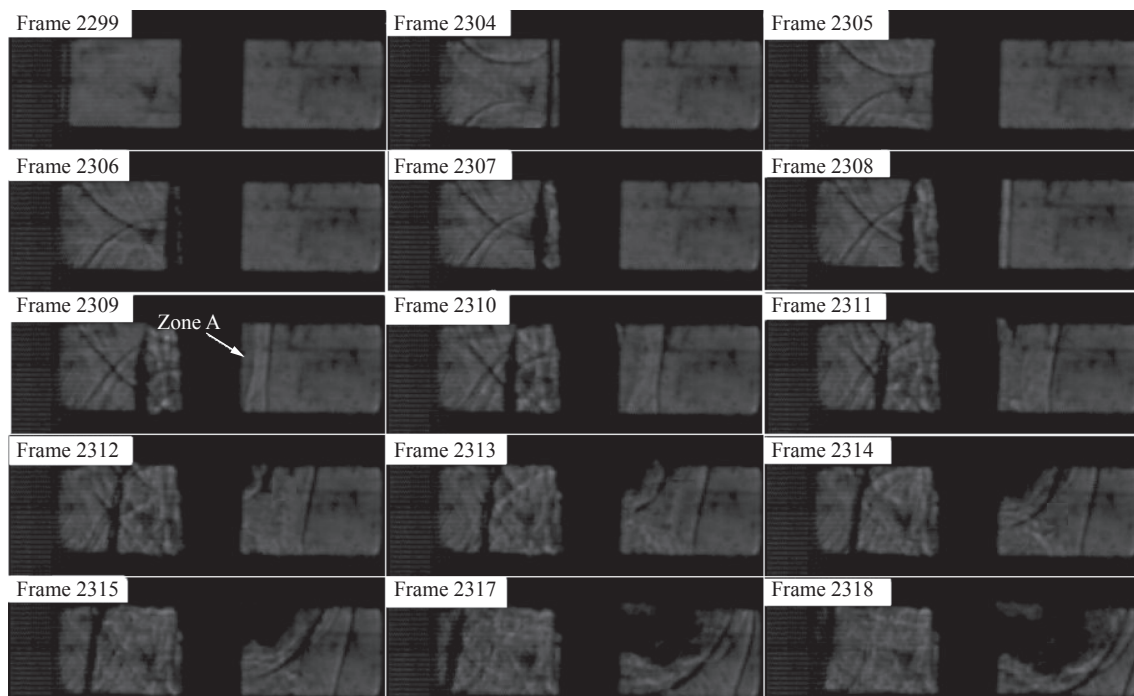


图 5 工况 2 的流场瞬时高速纹影照片

Fig. 5 High-speed schlieren photos of flow field at different times in the case 2

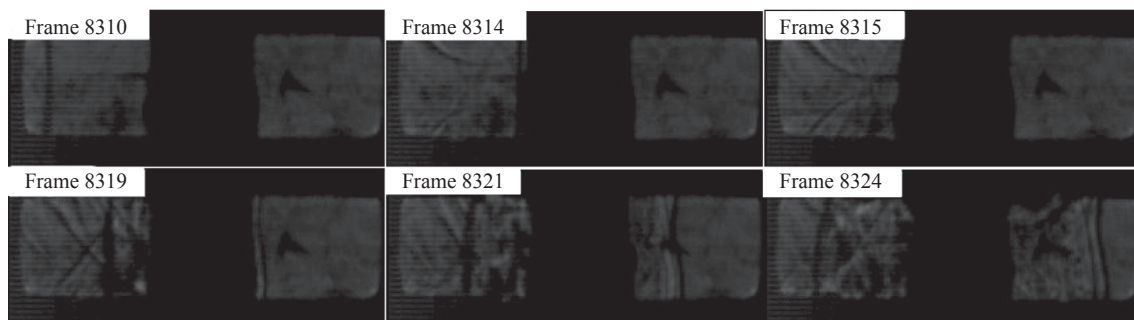


图 6 工况 3 的流场瞬时高速纹影照片

Fig. 6 High-speed schlieren photos of flow field at different times in the case 3

先产生损伤运动。对比图 4 与图 5 两种实验工况条件下砂墙结构冲击响应特征, 随充气压力提高, 入射激波载荷强度增强, 砂墙前端界面处反射效应随之增强, 高压驱动砂墙, 在砂墙顶部区域形成更为显著的两相射流结构。

另外, 如图 4~9 所示: 透射波穿越砂墙后, 在透射波与砂层背部区域之间, 可观察到明显的密度阴影区及其消退现象。关于该物理现象, 可能的解释为: 砂墙内部颗粒层在入射激波冲击压缩、反射波后高压气体持续驱动和沿砂层空隙传播透射波波后高速气流曳力综合作用下, 将逐层运动产生压缩, 进而在砂层内部可能诱导形成压实应力波, 应力波通过砂层接触点向砂层内部传播, 最终在砂层背部卸载, 同时对砂层背部空气介质造成压缩作用, 由于砂墙结构前端打印纸的阻气效应, 砂墙前端高压区膨胀受阻, 导致砂墙背部透射激波和卸载压缩波在稀疏波作用下将迅速产生衰减。

3.2 砂墙结构的冲击响应关系

如图 9 所示: 由照片 Frame 25128 和 Frame 25133, 可确定视窗内入射激波的传播速度; 由照片 Frame 25135 和 Frame 25143, 可确定视窗内反射激波的传播速度; 由照片 Frame 25134 和 Frame 25138, 可确定透射激波通过砂层的传播速度。采用这种方法, 可以确定所有工况中冲击波的传播速度, 见表 2, 各实验工

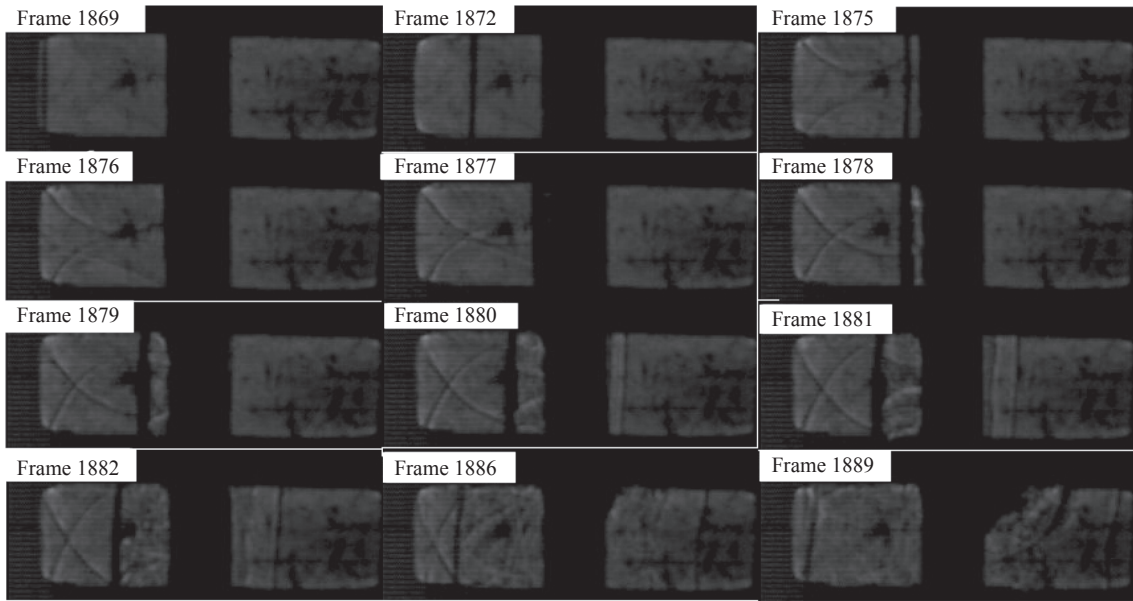


图 7 工况 4 的流场瞬时高速纹影照片

Fig. 7 High-speed schlieren photos of flow field at different times in the case 4

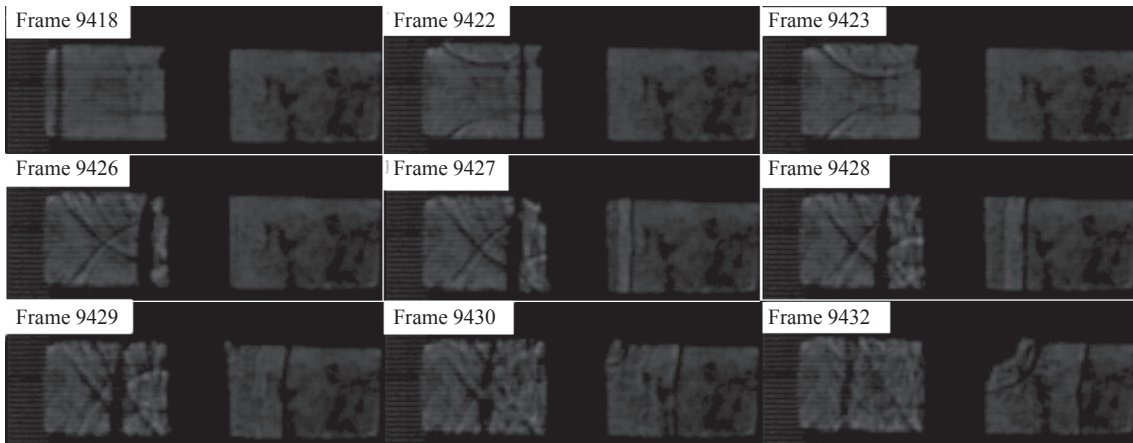


图 8 工况 5 的流场瞬时高速纹影照片

Fig. 8 High-speed schlieren photos of flow field at different times in the case 5

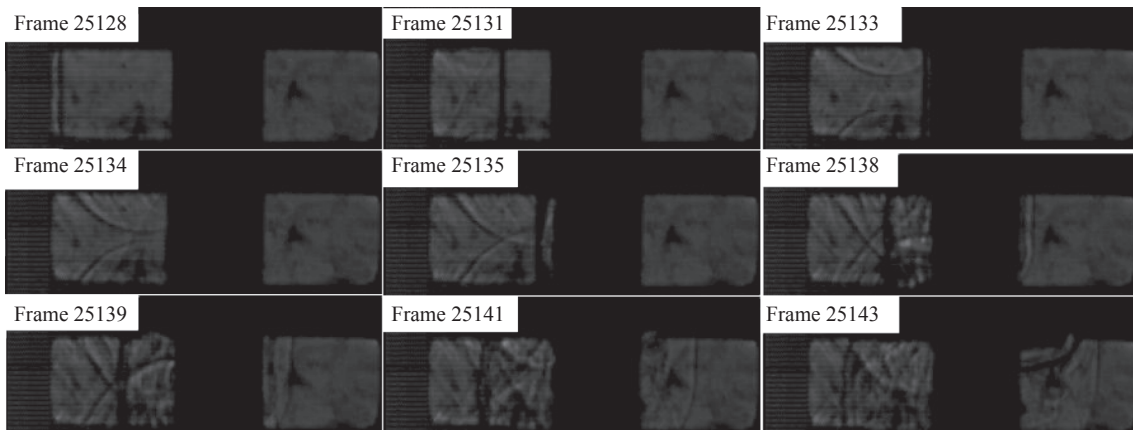


图 9 工况 6 的流场瞬时高速纹影照片

Fig. 9 High-speed schlieren photos of flow field at different times in the case 6

表 2 所有工况中冲击波的传播速度

Table 2 Propagation velocities of shock waves in all cases

工况	入射激波马赫数	入射激波速度/(m·s ⁻¹)	透射激波速度/(m·s ⁻¹)	反射激波速度/(m·s ⁻¹)
1	1.827	632	767	331
2	2.402	831	993	391
3	2.000	692	767	331
4	2.413	835	858	361
5	2.402	831	948	361
6	2.503	866	993	391
7	2.402	831	933	

表 3 砂墙冲击关系确定所涉及的过程状态数据

Table 3 Process state data for determining impact relation of sand wall

工况	入射激波波后流体 速度/(m·s ⁻¹)	入射激波波阵面 压力/MPa	入射激波波后流体 密度/(kg·m ⁻³)	反射激波运动 速度/(m·s ⁻¹)	冲击界面运动 速度/(m·s ⁻¹)	砂墙冲击关系
1	369	0.378	2.846	331	0.43	$D=513.7u+546.1$
2	572	0.665	3.809	383	0.87	
3	433	0.456	3.160	344	1.54	$D=87.6u+632.1$
4	576	0.652	3.826	369	2.58	
5	572	0.665	3.809	372	2.41	$D=209.7u+443.5$
6	606	0.724	3.954	382	2.62	

况入射激波马赫数为 1.827~2.413。显然, 同等砂墙设置条件下, 随入射激波马赫数增大, 透射激波、反射激波传播速度均随之增快; 而同等载荷强度平面激波冲击作用下, 工况 2、工况 4 和工况 5 中, 虽然砂墙厚度相同, 但是由于实验用砂的材料密度、颗粒粒径、颗粒孔隙度、颗粒表面属性不同, 激波的反射与透射行为具有显著差异; 工况 5 和工况 7 中, 石英砂墙厚度不同, 同等载荷强度平面激波冲击作用下, 激波的透射行为产生明显变化, 且随厚度增加, 激波衰减效应增强。

需要说明的是, 工况 5 和工况 6 虽然充气压力相同, 但所产生入射激波强度不同, 由于砂墙结构设置条件相同, 因此, 可以用于确定石英砂墙冲击关系。

针对相同砂墙结构, 利用两种实验工况下入射激波、反射激波、透射激波传播速度测试数据, 通过作图法, 可以确定砂墙结构线性冲击关系。

图 10 给出由工况 1 和工况 2 实验测试数据, 确定铁砂砂墙的冲击关系的作图过程:

(1) 平面激波入射阶段, 波前流场质点速度、压力、密度分别为: $u_0=0$, $p_0=0.101$ MPa, $\rho_0=1.185$ kg/m³, 将 p 、 u 值代入式 (7), 得到空气介质雨贡纽状态线, 图中采用黑色实线表示; 将入射激波速度 D 及波前状态参数 u_0 、 p_0 、 ρ_0 代入式 (5), 得到空气介质瑞利直线, 图中红色、蓝色虚线分别表示工况 1 和工况 2 的空气介质瑞利直线, 红色、蓝色虚线与黑色实线的交点, 分别记为: A_1 、 A_2 , 交点参数值代表反射激波波前流场状态。 A_1 、 A_2 参数值与正激波冲击关系理论值一致。

(2) 以 A_1 、 A_2 作为初始状态点, 将各状态点 p 、 u 值代入式 (7) 可得到反射阶段空气介质雨贡纽状态线, 图中分别以红色、蓝色实线表示。

(3) 透射过程中, 砂墙结构的冲击瑞利线与空气介质的反射雨贡纽曲线交点, 为冲击界面上的冲击状态点。将透射激波传播速度与砂墙结构的初始压力、密度、速度值代入式 (9), 得到砂墙结构瑞利直线, 图中分别利用紫色、绿色实线代表工况 1 和工况 2 的砂墙结构瑞利直线。砂墙结构瑞利直线与空气介质雨贡纽状态线交点记为 B_1 、 B_2 , 交点即为冲击界面处的瞬时冲击状态。

(4) 利用两种工况的冲击状态点参数值, 最终可确定砂墙结构线性关系, 见表 3。另外, 根据 c_0 值可

计算的整体砂墙结构弹性体积模量 $K(=\rho_0 c_0^2)$, 表 3 所示铁砂墙、矾土砂墙、石英砂墙结构的体积声速分别为 546.1、632.1、443.5 m/s, 其弹性体积模量分别为 0.913、0.478、0.225 GPa。

将 A_1 、 A_2 点和 B_1 、 B_2 点相关参数值代入式 (5), 根据式 (5) 可得到两种工况的反射激波传播速度, 见表 3, 对比表 2 中纹影照片实测结果, 作图法结果与实测结果基本符合。

图 11 为铁砂墙、石英砂墙和矾土砂墙结构的冲击状态线, 三种不同材料砂墙结构的冲击关系具有显著差异。根据文献 [13], 影响干砂介质高应变率应力-应变响应特性的因素较为复杂, 包括加载应力水平、颗粒初始孔隙度、颗粒大小、颗粒形状、颗粒级配、颗粒表面物理属性及其矿物组成等, 这些因素将共同影响颗粒层内部颗粒的滑移运动机制、颗粒的破碎机制以及颗粒层内部接触点间力链的形成机制等。

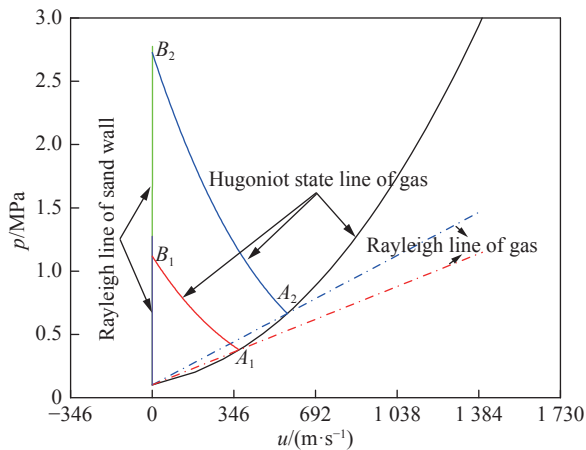


图 10 砂墙冲击状态关系图

Fig. 10 Diagram illustrating the determination of Hugoniot particle velocity and stress state of sand wall

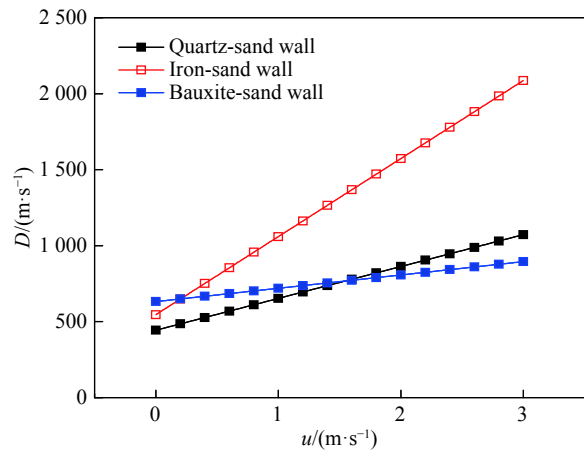


图 11 不同材料砂墙冲击状态关系对比

Fig. 11 Comparison of $D-u$ relations of different sand walls made with quartz, iron and bauxite particles

表 4 中汇总了文献所给出的干砂介质平板冲击实验结果, 由于不同实验中应力加载水平、实验用砂及试件制备技术不同, 石英砂墙体积声速存在显著差异。对比表 4 数据, 本文所获得砂墙结构冲击线性关系, 线性常数 λ 值为 209.7, 显然高于文献值, 根据凝聚介质实用状态方程, 形式如下^[18]:

$$p = \rho_0 c_0^2 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) + (\gamma - 1) \rho e \tag{10}$$

$$\gamma = 2\lambda - 1 + \sqrt{(2\lambda - 1)^2 - 1} \tag{11}$$

式 (10) 右边第一项代表“冷压”, 由冲击条件下凝聚介质体积变形机制引起; 第二项代表“热压”, 表示冲击引起介质内能的变化, 可以推断: 当 γ 值很高时, 较低冲击载荷条件下并不会引起砂墙结构内能的显著变化, 在较低载荷冲击下, “热压”项可以忽略。然而, 较高冲击载荷作用下, 冲击引起凝聚介质体积变形有限, 较低载荷冲击条件, 冲击将引起砂墙结构内能更为显著的变化。

表 4 干砂冲击状态关系文献发表实验结果

Table 4 Hugoniot relations of dry sand reported in other literatures

序号	应力/GPa	砂样条件		冲击绝热线		参考文献
		初始粒径/ μm	初始密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	体积声速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	斜率 λ	
1	1~6	70~140	1 490	504	1.6	Dianov, et al ^[14]
2	0.5~3.0	< 850	1 380~1 450	560	1.69	Perry, et al ^[17]
3	0.53~5.76	230	1 430 \pm 50	530	1.64	Chapman, et al ^[15]
4	0.3~1.8	~200	1 570	243	2.348	Brown, et al ^[16]

4 结 论

平面激波冲击加载下,砂墙结构表现出类固体的冲击响应特性,而且,低载荷强度激波冲击加载下,铁砂墙、矾土砂墙、石英砂墙的冲击响应关系显著不同,关键影响因素为砂墙表观密度,其他影响因素还包括砂墙颗粒粒径、颗粒形状及颗粒表面属性等。另外,本文中,3种材料砂墙的线性冲击关系中 λ 值的量级为100,显著高于高应力加载下的研究成果^[14-17],据此推断,低载荷强度冲击作用下,主要引起砂墙结构产生有限体积变形,冲击引起的加热效应可以忽略。砂墙结构的冲击响应特性与冲击载荷强度具有较强相关性。

本文所开展实验有限,关于冲击加载下砂墙结构的冲击响应特性尚需进一步研究。

感谢北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室王仲琦副教授、吕华博士在论文实验开展过程中给予的帮助!

参考文献:

- [1] SMITH P D. Blast walls for structural protection against high explosive treats: a review [J]. *International Journal of Protective Structure*, 2010, 1(1): 67–84. DOI: 10.1260/2041-4196.1.1.67.
- [2] 王等旺,张德志,李焰,等.沙墙吸能作用对爆炸冲击波影响的实验研究[J].*实验力学*, 2011, 26(1): 37–42. DOI: 1001-4888(2011)01-0037-06.
WANG Dengwang, ZHAND Dezhi, LI Yan, et al. Experimental study of sand wall energy absorption effect on blastwave [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(1): 37–42. DOI: 1001-4888(2011)01-0037-06.
- [3] ZHANG F, FROST DL, THIBAUT PA, et al. Explosive dispersal of solid particles [J]. *Shock Waves*, 2001, 10(6): 431–443. DOI: 10.1007/PL00004050.
- [4] WAGNER J L, BERESH S J, KEARNEY S P, et al. Interaction of a planar shock with a dense field of particles [C] // KONTIS K. 28th International Symposium on Shock Waves. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012: 115–120. DOI: 10.1063/1.3686604.
- [5] WAGNER JL, BERESH SJ, KEARNEY SP, et al. A multiphase shock tube for shock wave interactions with dense particle fields [J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 52(6): 1507–1517. DOI: 10.1007/s00348-012-1272-x.
- [6] EDWARD P D, WAGNER J L, DECHANT L J, et al. Measures of the initial transient of a dense particle curtain following shock wave impingement [C] // 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Grapevine, Texas: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017: 1466.
- [7] LING Y, WAGNER J L, BERESH S J, et al. Interaction of a planar shock wave with a dense particle curtain: modeling and experiments [J]. *Physics of Fluids*, 2012, 24(11): 113301. DOI: 10.1063/1.4768815.
- [8] ROGUE X, RODRIGUEZ G, HAAS J F, et al. Experimental and numerical investigation of the shock-induced fluidization of a particles bed [J]. *Shock Waves*, 1998, 8(1): 29–45.
- [9] LV Hua, WANG Zhongqi, LI Jianping. Experimental study of planar shock wave interactions with dense packed sand wall [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 89: 255–265. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.07.019.
- [10] THEOFANOUS T G, MITKIN V, CHANG C H. The dynamics of dense particle clouds subjected to shock waves: Part 1: experiments and scaling laws [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 792: 658–681. DOI: 10.1017/jfm.2016.97.
- [11] ZHANG Lite, SHI Honghui, WANG Chao, et al. Aerodynamic characteristics of solid particles' acceleration by shock waves [J]. *Shock Waves*, 2011, 21: 243–252. DOI: 10.1007/s00193-011-0317-z.
- [12] KELLENBERGER M, JOHANSEN C, CICCARELLI G, et al. Dense particle cloud dispersion by a shock wave [J]. *Shock Waves*, 2013, 23(5): 415–430. DOI: 10.1007/s00193-013-0432-0.
- [13] OMIDVAR M, ISKANDER M, BLESS S. Stress-strain behavior of sand at high strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 49: 192–213. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.03.004.
- [14] DIANOV M, ZLATIN N, MOCHALOV S, et al. Shock compressibility of dry and water-saturated sand [J]. *Soviet Technical Physics Letters*, 1976, 2: 207–208.

- [15] CHAPMAN D J, TSEMBELIS K, PROUD W G. The behaviour of water saturated sand under shock-loading [C] // Proceedings of the 2006 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and applied Mechanics. 2006, 2: 834–840.
- [16] BROWN J L, VOGLER T J, GRADY D E, et al. Dynamic compaction of sand [C] // AIP Conference Proceedings, 2007, 955(1): 1363–1366. DOI: [10.1063/1.2832977](https://doi.org/10.1063/1.2832977).
- [17] PERRY J I, BRAITHWAITE C H, TAYLOR N E, et al. Behaviour of moist and saturated sand during shock and release [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(17): 174102.
- [18] 李维新. 一维不定常流与冲击波 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2004: 204–294.

Dynamic responses of sand wall under planar shock loading

WANG Hongliang¹, TIAN Zhou¹, PU Xifeng¹,
YAO Chengbao^{1,3}, SHOU liefeng^{1,2}

(1. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China;*

2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,*

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. *School of Mathematical Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)*

Abstract: In order to study the dynamic response behavior of a sand wall in the process of the shock-sand wall interaction, experiments are carried out in a horizontal shock tube. A high-speed schlieren imaging system is used to capture the instantaneous structures of shock wave and moving process of the sand wall in the flow field. The incident shock Mach number ranges from 1.827 to 2.413, and the incident shock strength ranges from 0.378 MPa to 0.724 MPa. Three different kinds of sand walls are constructed using well-size-distributed iron sand, bauxite sand and quartz sand, the corresponding porosities of these sand walls are 56.6%, 69.3% and 56.6%, respectively. High-speed schlieren photographs show that regular reflection occurs when the incident shock wave impacts the sand wall. Moreover, the sand wall does not move significantly until the hundreds of microseconds after the onset of the interaction, indicating that the dynamic response behavior of the sand wall is similar to that of a rigid body. Basing on the shock wave theory, the Hugoniot relations for sand walls made from three different materials are established. The bulk elastic moduli of iron-, bauxite- and quartz-sand walls are 0.913, 0.478, and 0.225 GPa, respectively. The constant λ in the Hugoniot relations is on the order of 100. It is concluded that the relatively low shock impacting majorly leads to the volume deformation of the sand wall, and the heat effect of the sand wall caused by shock loading may be unimportant.

Keywords: planar shock wave; sand wall; dynamic response; high-speed schlieren

(责任编辑 张凌云)