

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.025

近距离爆炸荷载作用下H型钢柱毁伤数值分析*

李鹏鹏¹,高振儒¹,陈叶青²,武双章¹,周兆鹏²

(1. 陆军工程大学 野战工程学院,南京 210007;2. 军事科学院 国防工程研究院,北京 100036)

摘要: 鉴于现代武器弹药的高命中精度,H型钢柱作为多数钢结构厂房的重要承重构件,研究其在近距离爆炸荷载作用下的毁伤具有重要意义。根据相似法则,对某典型钢结构厂房H型钢柱作缩尺变换,利用LS-DYNA有限元软件,采用流固耦合方法,对不同比例距离下9组装药近距离爆炸冲击H型钢柱相似模型作数值模拟。通过对比H型钢柱遭受到爆炸荷载作用前后承载能力,确定钢柱损伤指数。结果表明:(0.100 m·kg^{-1/3},0.400 m·kg^{-1/3})区间内,最大损伤指数0.533,最小损伤指数0.095,损伤指数随比例距离的增加总体呈逐渐减小趋势;比例距离0.100 m·kg^{-1/3}时,钢柱腹板剪切部分耗散能量明显增强,导致(0.100 m·kg^{-1/3},0.125 m·kg^{-1/3})区间内出现悖逆总体趋势现象,损伤指数随比例距离的增加而增大。

关键词: 爆炸荷载;H型钢柱;相似法则;有限元;比例距离;损伤指数

中图分类号: O383+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)02-0167-08

Numerical Analysis of Damage of H-shaped Steel Column under Close Explosion Load

LI Peng-peng¹,GAO Zhen-ru¹,CHEN Ye-qing²,WU Shuang-zhang¹,ZHOU Zhao-peng²

(1. College of Field Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210007, China;

2. Institute of Defense Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100036, China)

Abstract: In view of the high hit accuracy of modern weapons and ammunition, it is of great significance to study the damage of H-beam steel columns under close explosive loads, for H-shaped steel columns are important load-bearing components of most steel structure workshops. According to the similarity law, scale transformation was applied to a H-shaped steel column of a typical steel structure factory building. Using the LS-DYNA finite element software, the fluid-solid coupling method was used to simulate the impact of close explosion loads from 9 charges at different scaled distances on the similarity model of the H-shaped steel column. By comparing the bearing capacity of the H-shaped steel column before and after the explosion loading, a steel column damage index was determined. The results show that in the interval between 0.100 m·kg^{-1/3} and 0.400 m·kg^{-1/3}, the maximum and minimum damage index are 0.533 and 0.095, respectively. Besides, the damage index generally decreases with the increase of the scaled distance. When the scaled distance is 0.100 m·kg^{-1/3}, the energy dissipated in the shear part of the steel column web is significantly increased. This results in a general rebellion trend phenomenon in the interval between 0.100 m·kg^{-1/3} and 0.125 m·kg^{-1/3}, and the damage index increases as the scaled distance increases.

Key words: explosive load; H-shaped steel column; similarity law; finite element; scaled distance; damage index

收稿日期:2021-02-05

作者简介:李鹏鹏(1990-),男,山西省长治人,硕士,主要从事爆炸与毁伤作用机理及其应用方向研究,(E-mail)lplplysys@outlook.com。

通讯作者:陈叶青(1966-),男,湖北省荆州人,正高级工程师、博士,主要从事爆炸毁伤与防护方向研究,(E-mail)1051919303@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(51678567)

战争状态下,跟战争紧密相关的工业厂房是敌方重点打击目标。钢结构厂房具有抗震、抗风、耐久、环保等特点,逐渐取代传统的钢筋混凝土结构厂房,成为工业厂房的主要构筑形式。H型钢柱,因其

强度高,自重轻,被广泛用作钢结构厂房承重柱。航空爆破炸弹,因其强大的摧毁能力,非常适合作为攻击厂房,现代高技术战争中,对地面目标实施空中打击已成为战争的首选方案。航空爆破炸弹,壳体一般用普通钢材制成,装药通常为 TNT 炸药,弹体壁厚与半径之比小于 0.1,对厂房造成的破坏以装药爆炸冲击荷载为主。给航空爆破炸弹加装激光、电视、红外、毫米波等制导装置,能有效提升航空爆破炸弹的命中精度,对厂房实施接触爆炸毁伤或近距离爆炸毁伤。H 型钢柱作为多数钢结构厂房的重要承重及传力构件,一旦被爆炸袭击失去承载能力,很可能造成连锁反应,导致整个厂房失稳,甚至倒塌。因此,研究 H 型钢柱在爆炸荷载作用下的毁伤机理具有十分重要的现实需求和科学意义。

Mohammad Ali Hadianfard 等使用可靠性理论并考虑到爆炸荷载和材料特性的不确定性^[1,2],改进了一种确定爆炸荷载作用下钢柱损伤概率的方法。Nassr 等基于 SDOF 近似值模型^[3],研究了爆炸荷载作用下梁柱的强度和稳定性。周龙云等研究了 H 型钢柱在爆炸荷载作用下的剩余承载力系数 K 与相对挠度 ω_R 的关系^[4],提出了钢柱受损的判定依据并划分了受损钢柱的损伤等级。周游等将薄壁方管置于单次和重复爆炸场中进行冲击实验,获得了爆炸次数对方管动力响应的影响规律^[5]。张亚东等通过有限元程序 ABAQUS 对完好钢柱的动力响应进行数值模拟,研究了试件垮塌前后所产生的塑性铰的变化与移动规律^[6]。高金明等应用新型 CONWEP 爆炸加载方式,分析不同爆炸距离下变截面 H 型钢的动态响应过程^[7],得到了构件变形的响应规律。张新鑫等采用 LS-DYNA 软件对不同比例距离爆炸荷载作用下 H 型钢梁的动态响应进行了数值分析^[8],发现随着比例距离的减小,梁由弹性变形阶段转变为塑性变形阶段。

从国内外相关资料来看,目前爆炸荷载作用下钢柱毁伤的研究,大多是都是针对中远距离爆炸荷载作用下的研究,而对近距离爆炸荷载的关注较少。基于显式有限元方法软件 LS-DYNA,区分不同比例距离,研究了近距离爆炸荷载作用前后钢柱的轴向承载能力的变化,计算了损伤指数。H 型钢柱的毁伤分析,对于钢结构厂房的设计与防护,武器弹药的效能评估等具有重要的意义。

1 爆源与 H 型钢承重柱

1.1 爆源

爆源为航空爆破炸弹,圆径一般在 100 kg 级以

上,最大可达 20 000 kg 级,其中以 250 ~ 500 kg 级使用最为广泛。高阻外形的航空炸弹长细比较小,低阻外形的航空炸弹长细比较大^[9]。本研究选取某型高阻外形航空爆破炸弹作为模型,炸弹圆径 250 kg,装填系数 0.4,装药 TNT 当量 $C_1 = 100$ kg,装药形状为圆柱形,装药长细比为 1.0,忽略弹壁厚度,装药直径 $d_1 = 427$ mm,装药高度 $h_1 = 427$ mm。

爆炸产生的主要效应是冲击波,爆炸冲击波是爆炸瞬间形成的高温且能量巨大的火球不断向外膨胀,压缩周围空气而形成的高压力的气流。这时如果 H 型钢柱正好处在爆炸引起的冲击波范围内,H 型钢柱就要被传来的冲击波所包围,从而承受相应的爆炸荷载。典型的爆炸冲击波压力时程曲线如图 1 所示。近距离爆炸时,空气冲击波的破坏作用应按照冲量计算,但装药爆炸产生的产物喷射和空气冲击波的 3 维分布不均衡,受装药形状、起爆点位置、装药钢柱相对位置的影响较大,给理论分析和试验研究带来较大困难。近距离爆炸^[10],比例距离参考值 $\bar{r} < 0.400 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 。

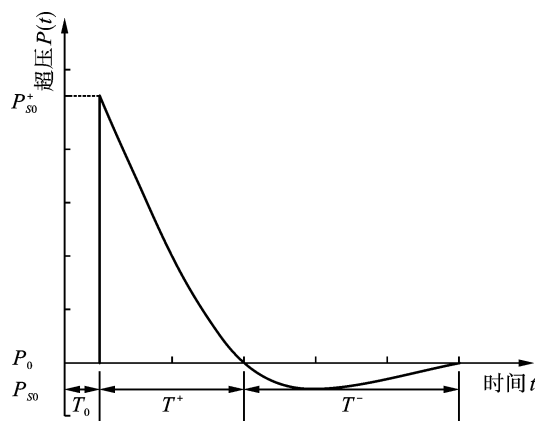


图 1 典型爆炸冲击波压力时程曲线

Fig. 1 Typical explosion shock wave pressure time history curve

$$\bar{r} = r / \sqrt[3]{C} \quad (1)$$

式中: \bar{r} 为比例距离; r 为测点距装药中心的距离; C 为 TNT 当量。

球形装药情形中爆炸产物所占据体积的极限半径大约是其初始半径的 10 ~ 12 倍,圆柱形装药时则约为 30 ~ 40 倍。本文所采用的爆源虽为圆柱形装药,但由于其装药直径等于装药高度,故其爆炸产物所占据的极限半径应介于球形装药和圆柱形装药之间。所以近距离爆炸时,爆炸产物的作用不容忽视。

1.2 H 型钢承重柱

参考某钢结构厂房,结构横向尺寸为 48 m,两跨跨度均为 24 m,每跨承载 40 t 吊车,参考

图2(a);结构纵向尺寸为96 m,采用等柱距,柱距为8 m,参考图2(b)。

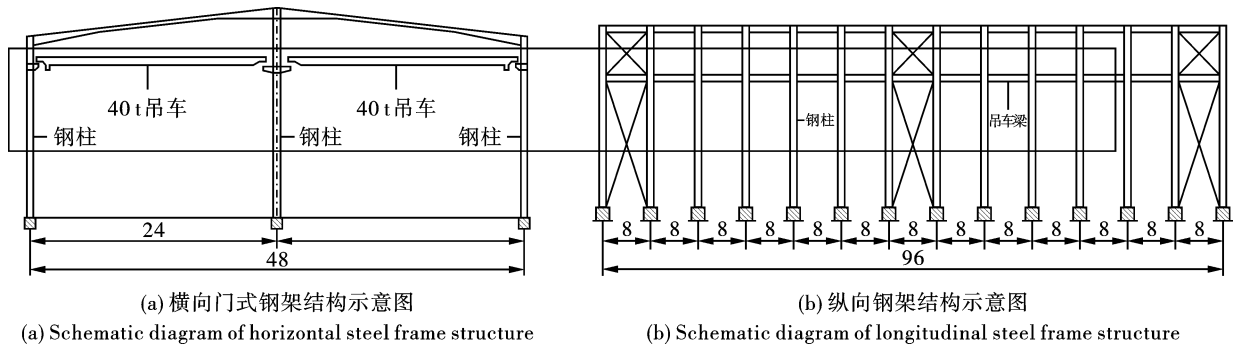


图2 某钢结构厂房示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of a steel structure workshop(unit:m)

钢柱为等截面 Q355B 热轧 H 型钢柱,钢柱高 $H_1 = 1250 \text{ cm}$,截面(mm) ($H 750 \times 375 \times 25 \times 35$),屈服强度 $\sigma = 355 \text{ MPa}$,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。 x 方向的截面惯性矩 $I_{x_1} = 4.013 \times 10^5 \text{ cm}^4$, y 方向的截面惯性矩 $I_{y_1} = 3.085 \times 10^4 \text{ cm}^4$;

x 方向的截面抵抗矩和净截面抵抗矩 $W_{x_1} = W_{nx_1} = 1.070 \times 10^4 \text{ cm}^3$, y 方向的截面抵抗矩和净截面抵抗矩 $W_{y_1} = W_{ny_1} = 1.645 \times 10^3 \text{ cm}^3$, x 方向的回转半径 $i_{x_1} = 30.450 \text{ cm}$, y 方向的回转半径 $i_{y_1} = 8.440 \text{ cm}$;横截面积 $S_1 = 432.500 \text{ cm}^2$,如图3所示。

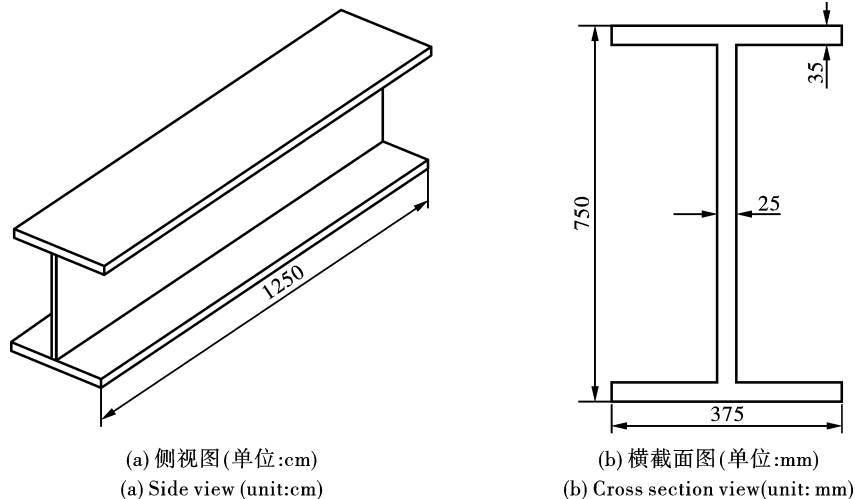


图3 H型钢柱示意图

Fig. 3 Schematic diagram of H-shaped steel column

2 建立爆炸毁伤有限元模型

2.1 近距离无限空中爆炸判别条件

炸弹装药中心与 H 型钢柱翼缘中心处于同一水平位置,装药轴对称中心线与 H 型钢柱高度方向平行,装药中心距离地面的高度 $H = 6.250 \text{ m}$,装药的比例高度

$$H/\sqrt[3]{C_1} = 1.35 \geq 0.35 (\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}) \quad (2)$$

符合装药无限空中爆炸时装药的比例高度,可以认为炸弹是在无限空中爆炸。

2.2 相似转换

根据相似法则对实际模型作相似转换,相似倍

数取 0.2,即相似转换后的炸弹尺寸、H 型钢柱尺寸及相互间的几何关系等较原型尺寸均缩小 0.2 倍。近距离爆炸时,对目标的破坏作用取决于冲击波的冲量,两组模型 $i_1/r_1 = i_2/r_2$ 。

式中: i_1 为实际模型爆炸冲击波冲量; i_2 为相似模型爆炸冲击波冲量; r_1 为实际模型 H 型钢柱翼缘厚度; r_2 为相似模型 H 型钢柱翼缘厚度。

作相似变换后,装药直径 $d_2 = 8.54 \text{ cm}$,高度 $h_2 = 8.54 \text{ cm}$,TNT 当量 $C_2 = 800.00 \text{ g}$;钢柱高 $H_2 = 250.00 \text{ cm}$,截面(mm) ($H 150 \times 75 \times 5 \times 7$), x 方向的截面惯性矩为 $I_{x_2} = 642.02 \text{ cm}^4$, y 方向的截面惯性矩为 $I_{y_2} = 49.36 \text{ cm}^4$; x 方向的截面抵抗矩和净截

面抵抗矩 $W_{x_2} = W_{nx_2} = 85.60 \text{ cm}^3$, y 方向的截面抵抗矩和净截面抵抗矩 $W_{y_2} = W_{ny_2} = 13.16 \text{ cm}^3$; x 方向的回转半径 $i_{x_2} = 6.09 \text{ cm}$, y 方向回转半径 $i_{y_2} = 1.68 \text{ cm}$; 横截面面积 $S_2 = 17.30 \text{ cm}^2$ 。

2.3 有限元模型

整体模型由空气、装药、H 型钢柱、上下刚性面板 5 部分组成, 假设空气为理想气体, 采用 NULL 材料模型, 状态方程用 LINEAR_POLYNOMIAL 表示; 装药采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型, 状态方程用 JWL 表示; H 型钢柱采用 PLASTIC_KINEMATIC 模型, 该材料模型适合于模拟各向同性和运动硬化塑性, 并且可以选择包括速率效应^[11]。

有限元模型采用流固耦合方式模拟空气、装药与 H 型钢柱之间的相互作用, 装药与空气之间采用多物质耦合, 无反射边界来模拟无限空气域, 腹板、翼缘连接处采用共节点的方式模拟热轧, H 型钢柱与上下刚性面板共节点连接, 下刚性面板无平动与转动自由度, 上刚性面板只有沿面板法向法向的自由度, 如图 4 所示。

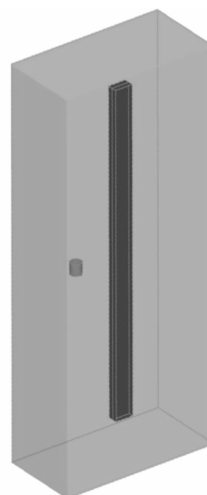


图 4 有限元模型
Fig. 4 Finite element

2.4 材料本构模型及状态方程

(1) 空气材料模型及状态方程

采用 LS-DYNA 材料库中的 9 号 * MAT_NULL 模型来模拟空气域, 空气材料模型具体参数的取值如表 1 所示^[12]。

表 1 空气 MAT_NULL 模型
Table 1 Air MAT_NULL model

MID	RO/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	PC	MU	TEROD	CEROD	YM	PR
1	1.2929	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

空气材料 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程如表 2 所示。

表 2 空气 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程
Table 2 Air EOS_LINEAR_POLYNOMIAL state equation

EOSID	C_0/Pa	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E_0/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	V_0
1	-1.00E+05	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	2.500E+05	1.0

(2) 装药材料模型及状态方程

采用 LS-DYNA 材料库中的 8 号 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型来模拟装药在空气中的爆

轰反应^[12]。装药材料模型具体参数的取值如表 3 所示。

装药材料 * EOS_JWL 状态方程如表 4 所示。

表 3 装药 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型
Table 3 Explosive MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN model

MID	RO/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	P_{CJ}/GPa	BETA	K	G	SIGY
2	1630	6930	27.0	0.00	0.00	0.00	0.00

表 4 装药 EOS_JWL 状态方程
Table 4 Explosive EOS_JWL state equation

EOSID	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	OMEG	$E_0/(\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3})$	V_0
2	371.0	7.43	4.15	0.950	0.300	7.0	1.00

(3) 钢材本构模型

NEMATIC 模型^[13,14],具体参数的取值如表 5 所示。

选用 LS-DYNA 材料库中的 MAT_PLASTIC_KI-

表 5 钢材本构模型

Table 5 Steel constitutive model

MID	RO/(kg · m ⁻³)	E/MPa	PR	SIGY/MPa	ETAN	BETA	SRC	SRP	FS	VP
3	7850	2.06 × 10 ⁵	0.28	355	1.03 × 10 ³	0.0	1230	4.5	0.20	

3 数值模拟及分析

3.1 未施加爆炸荷载作用下钢柱轴向承载能力数值模拟

钢柱轴向极限承载能力 $F_{N,max1}$ 的理论计算值

$$F_{N,max1} = S_2 \cdot \sigma = 614.15 \text{ kN} \quad (3)$$

极限受压状态下钢柱轴向收缩量 Δl

$$\Delta l = F_{N,max1} H_2 / ES_2 = 0.43 \text{ cm} \quad (4)$$

钢柱应变 ε

$$\varepsilon = \Delta l / H_2 = 1.72 \times 10^{-3} \quad (5)$$

研究表明,应变速率 $10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,金属的力学性能未发生明显变化,可按静荷载处理。

取应变速率

$$\varepsilon / t_1 = 7.4910^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

加载时间

$$t_1 = 230.00 \text{ ms} \quad (7)$$

荷载增加速率

$$v_1 = F_{N,max1} / t_1 = 2.67 \text{ kN/ms} \quad (8)$$

数值模拟中,以 2.67 kN/ms 荷载增加速率加载, $t_2 = 231.00 \text{ ms}$, 即轴向荷载 $F_{N,max2} = 616.00 \text{ kN}$ 时,钢柱轴向承载能力失效。钢柱轴向极限承载能力,理论计算值 $F_{N,max1}$ 和数值模拟值 $F_{N,max2}$ 差值为 0.30%,模型选取合理。轴向荷载与轴向位移同加载时间关系如图 5 所示。

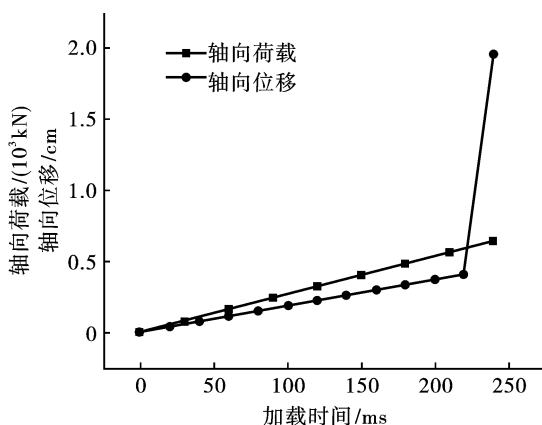


图 5 轴向荷载与位移同加载时间关系
Fig. 5 The relationship between axial load and displacement with loading time

3.2 爆炸荷载作用下钢柱轴向承载能力数值模拟

第一步,使用时间的斜坡函数,将轴向荷载以 2.67 kN/ms 均匀增加的压力施加到安装在钢柱顶部的刚性板上,46 ms 时刻加载轴向极限承载力的 20%,即 122.83 kN。

第二步将朝向翼缘中心位置的横向爆炸荷载施加到钢柱上。TNT 装药在无限空中爆炸,比例距离 $\bar{r} = 0.40 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 位置处正压作用时间

$$t_+ = 1.35 \bar{r}^{1/2} \cdot \sqrt[3]{C_2} = 0.79 \text{ ms} \quad (9)$$

因

$$W_{y2} / W_{x2} = W_{ny2} / W_{nx2} = 0.15 \quad (10)$$

爆炸荷载冲击后的 H 型钢柱,在轴向逐渐增加的荷载作用下,最终将沿腹板法向方向发生弯曲变形。爆炸荷载对钢柱造成了翼缘面法向方向的振动,腹板法向方向只发生轻微振动,综合爆炸荷载正压时间和腹板的振动情况,46 ~ 60 ms,轴向荷载不变。

第三步继续以 2.67 kN/ms 的荷载增加速率施加轴向荷载,直至钢柱失效,在此阶段施加到钢柱的最大荷载可认为爆炸荷载作用后钢柱的残余承载力。轴向加载如图 6 所示。

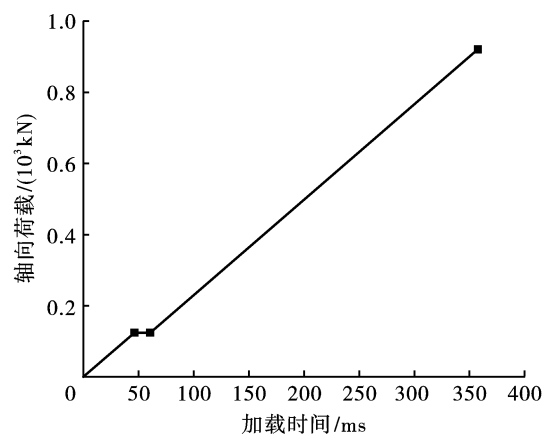


图 6 轴向加载
Fig. 6 Axial loading

3.3 损伤指数

比例距离分别取:0.100,0.125,0.150,0.175,0.200,0.250,0.300,0.350,0.400($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$),共 9 种情况,不同比例距离爆炸荷载作用下钢柱轴向承

载能力持续时间如图7所示。

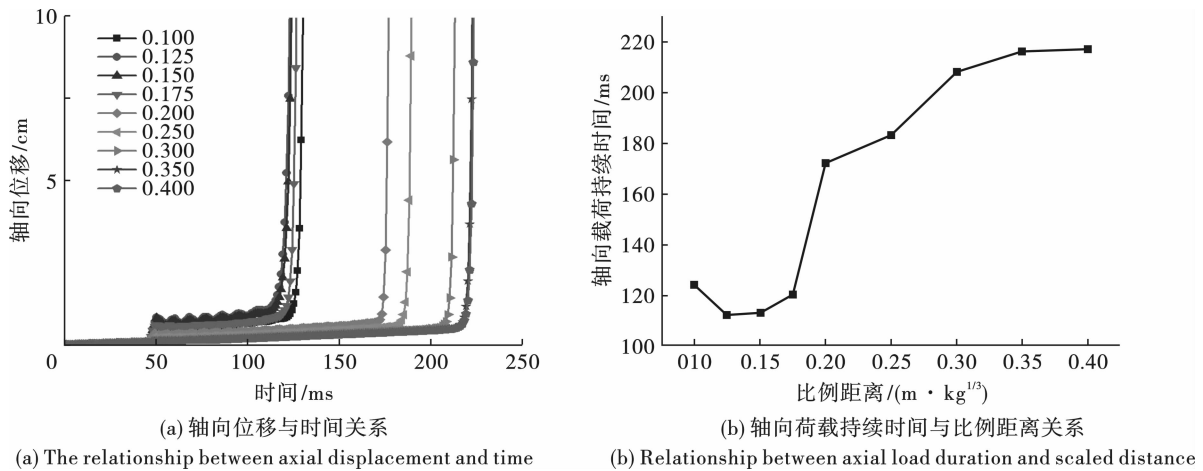


图7 不同比例距离爆炸荷载作用下钢柱轴向承载能力持续时间

Fig. 7 Duration of axial bearing capacity of steel column under blast load with different scaled distances

基于钢柱残余轴向承载能力,确定钢柱在爆炸荷载作用下的损伤指数(D),可以定义如下

$$D = 1 - P_{Residual}/P_{Initial} \quad (11)$$

式中: $P_{Residual}$ 为遭受爆炸冲击荷载后钢柱的残余轴向承载力; $P_{Initial}$ 为钢柱初始极限轴向承载力。

近距离爆炸荷载作用下钢柱轴向承载能力损伤指数如图8所示,($0.100 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, $0.400 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)区间内,损伤指数随比例距离的增加总体呈逐渐减小趋势,最大损伤指数0.533,最小损伤指数0.095;($0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, $0.175 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)区间内,损伤指数减小速率较小;($0.175 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, $0.300 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)区间内,损伤指数减小速率较大;在($0.300 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, $0.350 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)区间内,损伤指数减小速率逐渐变小; $0.350 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 以后损伤指数减小速率趋于平缓。

根据爆炸常识和实验测定单位面积冲量公式

$$i_+ = BC/r^2 \quad (12)$$

式中: i_+ 为单位面积冲量; $B=250$ 。

随着比例距离的增大,对构件造成毁伤的主要因素爆轰产物比能量和空气冲击波比冲量都会下降,所以损伤指数会逐渐减小;比例距离大于 $0.350 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$,相比于钢柱的抗冲击能力,爆轰产物比能量和空气冲击波比冲量较小,所以损伤指数较小。通过分析,比例距离 $0.175 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 是损伤指数超过0.50的临界值上限;比例距离 $0.350 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 是损伤指数低于0.10的临界值下限。但在($0.100 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, $0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)区间内,损伤指数的变化悖逆于总体趋势。见图8。

3.4 悖逆趋势分析

比例距离 $0.100 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$,爆炸荷载造成靠近

装药一侧的翼缘剪切破坏,腹板30%左右剪切破坏,大部分轻微弯曲,远离装药一侧的翼缘未有明显变形,如图9(a)所示;比例距离 $0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$,爆炸荷载造成靠近装药一侧的翼缘剪切破坏,腹板20%左右剪切破坏,大部分严重弯曲破坏,远离装药一侧的翼缘未有明显变形,如图9(b)所示。

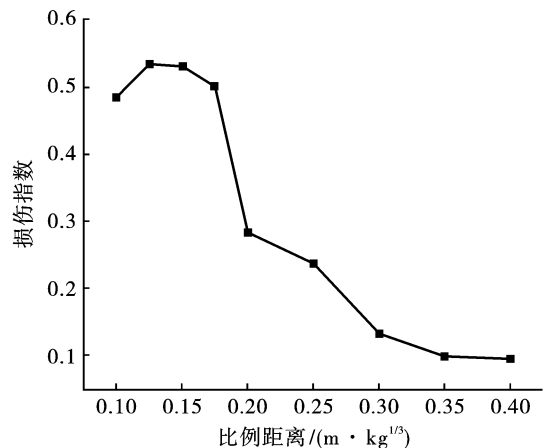


图8 近爆作用下钢柱轴向承载能力损伤指数

Fig. 8 Damage index of axial bearing capacity of steel column under close explosion

比例距离 $0.100 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, $0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, 2种工况分别在远离装药一侧的翼缘中心位置选取1个监测点,查看所选取监测点沿翼缘法向方向位移和振幅。

初始最大位移如图10(a)所示。

$$S_{0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}} > S_{0.100 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}} \quad (13)$$

初始振幅如图10(b)所示。

$$A_{0.100 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}} = 0.511 \text{ cm} \quad (14)$$

$$A_{0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}} = 0.605 \text{ cm} \quad (15)$$

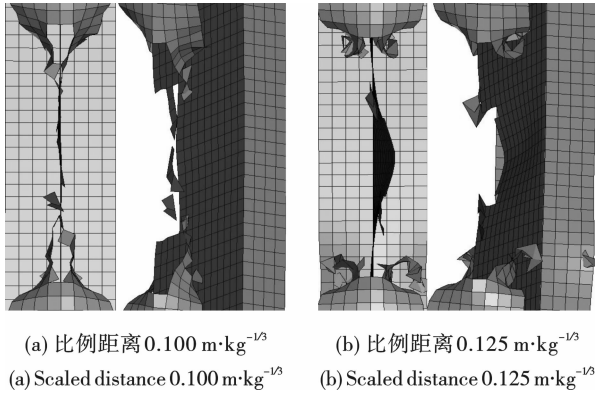


图 9 爆炸荷载对钢柱的破坏

Fig. 9 Destruction of steel column by explosion load

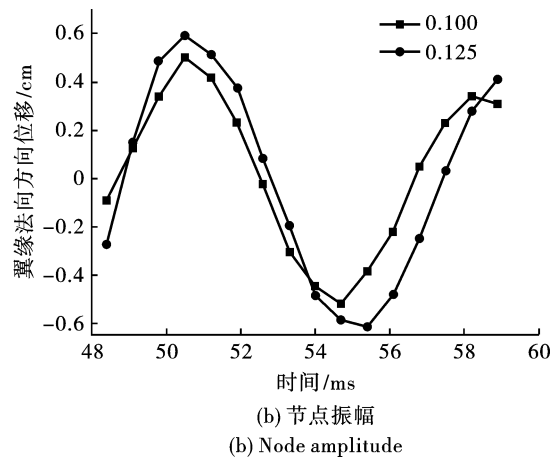
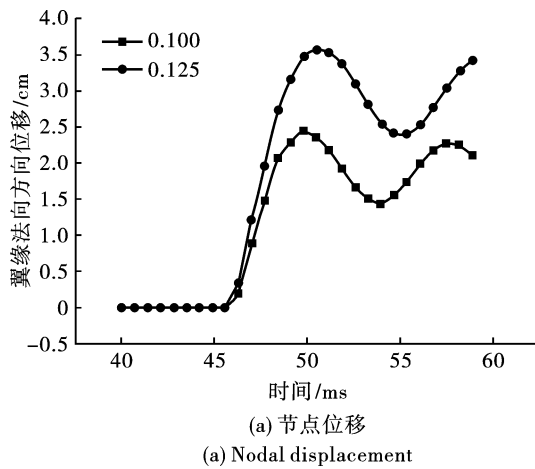


图 10 爆炸荷载作用下远离炸药一侧的翼缘中心节点位移

Fig. 10 Displacement of the center node of the flange on the side away from the explosive under explosive load

对于一定的爆炸量,即当给出总爆炸能量时,每个组件吸收能量的增加将相应减少结构中其他组件吸收的能量^[15]。比例距离 $0.100 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 与 $0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 情况下,因为 H 型钢柱距装药中心的尺寸变化不大,可以认为两种情况下炸药爆炸传给 H 型钢柱的能量 E 是一致的。由于比例距离为 $0.100 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,H 型钢柱的剪切破坏范围大于比例距离为 $0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,所以对 H 型钢柱腹板的弯曲破坏就应小于后者。因为剪切破坏耗散的能量要远大于弯曲破坏,故两种比例距离下剪切破坏的范围差值为 10%,而弯曲破坏的范围差值要大很多,且赋予后者更多的初始振动能量。这正是 $(0.100 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}, 0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$ 区间内,损伤指数的变化悖逆于总体趋势的原因所在。

4 结论

通过分析,得出以下结论:

(1) 近距离爆炸荷载作用下,随着弹目距离增大,钢柱损伤指数总体呈逐渐减小趋势。

钢柱的自振周期 $T = 10 \text{ ms}$,爆炸冲击波正压作用时间 $t_+ = 0.79 \text{ ms}$,则

$$t_+ = T \leq 0.25 \quad (16)$$

按照奥里所夫和萨道夫斯基研究论证,该情况下爆炸冲击波应当按照冲量计算。作为相似转换的补充,再次说明了近距离爆炸荷载作用下冲击波的破坏作用按冲量计算是可取的。

型钢的初始振动理想化为简谐振动,2 种情况下钢柱被炸毁剩余部分获得的初始振动能量比

$$\frac{E_{0.100 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}}}{E_{0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}}} = \frac{A_{0.100 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}}^2}{A_{0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}}^2} = 0.713 \quad (17)$$

(2) 比例距离 $0.350 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 是损伤指数低于 10% 的临界值下限,比例距离超过临界值下限仅对钢柱造成轻微毁伤。

(3) 比例距离 $0.175 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 是损伤指数超过 50% 的临界值上限,但未对钢柱造成严重毁伤。缩小比例距离,损伤指数提升有限,这种情况下 H 型钢柱仍能起到一定的轴向支撑作用。如进一步提升损伤指数,只能采取增加装药量、制作聚能槽、使用高级炸药等方法。

(4) 比例距离小于 $0.125 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,损伤指数在小范围内悖逆总体趋势,合理利用该现象能有效提升钢结构的抗毁伤能力,同时也对武器弹药的毁伤评估提出了新要求。

参考文献 (References)

[1] MOMENI M, HADIANFARD M A, BEDON C, et al. Damage evaluation of H-section steel columns under impulsive blast loads via gene expression programming [J]. Engineering Structures, 2020, 219(9): 1-19.

- [2] HADIANFARD M A, MALEKPOUR S, MOMENI M. Reliability analysis of H-section steel columns under blast loading[J]. *Structural Safety*, 2018, 75:45-56.
- [3] A A A N, A A G R, A M J T, et al. Strength and stability of steel beam columns under blast load[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 55(5):34-48.
- [4] 周龙云, 石磊, 徐令宇, 等. 爆炸冲击作用下 H 型钢柱损伤等级快速评估[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(5):851-857.
- [4] ZHOU Long-yun, SHI Lei, XU Ling-yu, et al. Method for classifying damage level of steel column under impact of explosion[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(5):851-857. (in Chinese)
- [5] 周游, 纪冲, 王雷元, 等. 重复爆炸载荷作用下薄壁方管动力响应研究[J]. *兵工学报*, 2019, 40(9):1871-1880.
- [5] ZHOU You, JI Chong, WANG Lei-yuan, et al. Research on the dynamic response of thin-walled square tube under repeated blast loads[J]. *ACTA ARMAMENTARII*, 2019, 40(9):1871-1880. (in Chinese)
- [6] 张亚东, 张再路, 袁廷威. 基于 ABAQUS 的冲击荷载作用下钢柱瞬态响应的有限元数值模拟[J]. *湖南城市学院学报(自然科学版)*, 2019, 28(4):6-10.
- [6] ZHANG Ya-dong, ZHANG Zai-lu, YUAN Ting-wei. Finite element numerical simulation of transient response of steel columns under impact load based on ABAQUS[J]. *Journal of Hunan City University (Natural Science)*, 2019, 28(4):6-10. (in Chinese)
- [7] 高金明, 杨军, 何成龙, 等. 爆炸冲击下变截面 H 型钢动态响应模拟研究[J]. *爆破*, 2018, 35(2):131-136.
- [7] GAO Jin-ming, YANG Jun, HE Cheng-long, et al. Numerical simulation on dynamic response of variable cross-section H-type steel under explosion loading[J]. *Blasting*, 2018, 35(2):131-136. (in Chinese)
- [8] 张新鑫, 张海波, 周清. 爆炸荷载下不同比例距 H 型钢梁的动态响应[J]. *吉林建筑大学学报*, 2019, 36(1):10-14.
- [8] ZHANG Xin-xin, ZHANG Hai-bo, ZHOU Qing. Dynamic response of H-section steel beam with different proportional distances under blast load[J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2019, 36(1):10-14. (in Chinese)
- [9] 尹建平, 王志军. 弹药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2012.
- [10] 李臻, 刘彦, 黄风雷, 等. 接触爆炸和近距离爆炸比冲量数值仿真研究[J]. *北京理工大学学报*, 2020, 40(2):143-149.
- [10] LI Zhen, LIU Yan, HUANG Feng-lei, et al. Investigation of specific impulse under contact explosion and close-in explosion conditions using numerical method[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2020, 40(2):143-149. (in Chinese)
- [11] HALLQUIST JO. LS-DYNA theory manual[M]. Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [12] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [13] 陆晓彤. 室内爆炸作用下钢框架及其梁柱连接的动力响应分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [13] LU Xiao-tong. Research on dynamic response of steel frame and beam-column connection under internal explosion[D]. Shanghai: Shanghai Jiao tong University, 2019. (in Chinese)
- [14] 朱昱. 基于 Johnson-Cook 模型的 Q355B 钢动态本构关系研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [14] ZHU Yu. Research on dynamic constitutive relationship of Q 355B steel based on Johnson-Cook Model[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [15] LE L, GAO X, WANG W. Study on explosion effects of a spherical reticulated shell under internal explosions[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, 16:1713-1724.

英文编辑: 陈东方

科技论文网络首发小知识

网络首发(Online First Publish), 就是被录用论文在纸质刊物出版前, 先以网络出版形式刊发出来, 读者可以在文章所在网页阅览、下载和打印。网络首发与纸质版具有同等效力, 可减少出版时滞, 使作者的首发权得到及时确认, 以促进科研成果快速传播。