

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210908001

火灾下爆炸冲击波在钢结构中的传播规律及破坏机理

史明方, 刘振宇, 田志昌, 袁佳琦

(内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 为了研究爆炸冲击波对结构的影响, 基于一维爆炸波轴向传播方程, 结合流固耦合的方法, 借助 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立三维单层单跨框架模型。考虑高温软化效应和应变率对屈服强度的影响, 分析连接方式为固定端时爆炸波的传播, 研究爆炸与火灾联合作用下爆炸波在钢结构构件中的传播规律及其破坏原因。研究结果表明: 垂直爆炸波方向的竖向构件内力的分布具有弱传递性, 沿爆炸波方向的杆件动力响应显著; 700 °C 爆炸冲击波在杆端往复传播导致在钢结构杆件中传播速度明显比常温下慢, 但截面轴向速度的峰值变大, 约为 200 °C 的 3 倍, 并且沿爆炸波方向杆件的轴向速度比垂直方向杆件的轴向速度大得多; 常温下, 垂直爆炸波的梁因受剪单元提前发生失效; 高温下, 构件损伤严重, 垂直爆炸波方向的梁最先发生弯剪破坏, 其次为柱剪切破坏, 最后沿爆炸波方向的梁产生受压破坏。

关键词: 爆炸波; 火灾爆炸作用; 传播特性; 内力分析; 破坏模式

中图分类号: TU328 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0283-11

Propagation Law of Explosion Shock Wave in Steel Structure

SHI Mingfang, LIU Zhenyu, TIAN Zhichang, YUAN Jiaqi

(Civil Engineering School, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: In order to study the impact of blast wave on the structure, a three-dimensional single-layer single-span frame model was established by ANSYS/LS-DYNA finite element software based on the axial propagation equation of one-dimensional blast wave and fluid-structure coupling method. Considering the effects of high temperature softening and strain rate on yield strength, the propagation of the explosion wave at fixed ends was analyzed, and the propagation law of explosion wave in steel structural members under the combined action of explosion and fire was studied. The results show that the internal force distribution of vertical members perpendicular to the explosion wave direction has weak transmissibility, and the dynamic response of the member along the direction of the explosion wave is significant. The reciprocating propagation of explosion shock wave at the end of the rod at 700 °C results in a obviously slower propagation velocity in the steel structure rod than that at normal temperature, and a larger peak value of the section axial velocity, which is about 3 times of that at 200 °C, and the axial velocity of the rod along the direction of the explosion wave is much

* 收稿日期: 2021-09-08; 修回日期: 2021-12-05

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2020BS01007)资助

作者简介: 史明方(1991—)男, 讲师, 博士。主要从事结构动力学相关研究。E-mail: shimingfang2014@163.com

通讯作者: 田志昌(1961—)男, 教授, 博士。主要从事结构减震、振动控制、耗能及抗震性能研究。E-mail: tianzhch@sina.com

larger than that in the vertical direction. At room temperature, the beam with vertical explosion wave fails in advance because of shear element. Under high temperature, the member is seriously damaged. The beam perpendicular to the explosion wave direction first shows bending shear failure, followed by column shear failure, and finally the beam along the explosion wave direction suffers compression failure.

Keywords: Blast wave; Fire explosion action; Propagation characteristics; Internal force analysis; Failure mode

引言

爆炸属于一种剧烈化学反应,爆炸荷载在极短时间内释放出大量热量,从而产生高温,放出大量气体,在介质周围形成高压并以极高的速度膨胀,产生的冲击波的传播速度极快,同时破坏性极强,造成了严重的经济损失和人员伤亡^[1-4]。在任意介质中形成的爆炸对周边的其他介质都会进行动力加载作用,在爆炸点附近迅速产生应力波并对周围物体产生影响,这些波在离开爆炸源后可以称之为爆炸波。例如,在空气中爆炸将产生向爆炸点周围传递的空气冲击波;在地面以下爆炸时会在土壤中产生一系列的波,其中有向岩土介质中传播的地震波和向大气中传播的冲击波。

Y. Cui等^[5]和D. K. Thai等^[6]对混凝土柱在不同爆炸加载条件下的损伤进行了评估,研究了不同比例距离下结构的破坏模式。M. Lak等^[7]采用耦合有限元差分-边界元法对井筒周围岩石爆炸引起的裂纹产生和扩展进行了数值模拟,用准静态边界元法模拟了气体膨胀引起的裂纹传播规律。张秀华等^[8]基于有限元软件对三层钢框架结构在爆炸荷载作用下的动力响应进行分析,研究爆炸气体在结构中的传播过程及结构上不同位置爆炸冲击波超压的特点。结果表明爆炸冲击荷载作用下结构的变形具有局部性和弱传递性。陆晓彤^[9]采用LS-DYNA软件,选取首层代表性节点,研究了室内爆炸下三层框架节点处的动力响应、框架变形特征及内力变化,模拟表明,冲击荷载对节点变形特征具有弱传递性。于文景等^[10]利用ANSYS有限元模拟与试验相结合的方法,考虑应变率效应引起的材料性能变化,对T型节点在爆炸冲击作用下的动力响应和抗火性能进行了分析,结果发现,火灾爆炸作用下节点域部分单元进入屈服,高速冲击加强了材料性能,680~690℃的高温下节点最终发生屈曲破

坏。杨亚东等^[11]通过建立钢筋混凝土结构内爆模型,分析了不同缩比系数下爆炸冲击波特征参量和结构损伤,得出不同炸药量作用下各缩比模型在特殊点的内爆炸超压峰值具有相似分布规律。以上学者针对爆炸波在结构中宏观上的传播进行了分析并给出构件的破坏状况,但爆炸波在介质中的复杂变化过程及传播规律尚未进行阐述,在爆炸作用下同时考虑温度对结构的影响目前研究的较少。

为了得到爆炸波在杆件体系中的分配及传递情况,本文通过建立单层单跨的钢框架分析爆炸冲击波作用在梁柱节点时,与之相连接的梁、柱构件内爆炸波的传递规律。研究讨论爆炸波在不同时刻钢构件的内力(轴力、剪力、弯矩)变化,并根据爆炸波的传递特性分析杆件的破坏机理。因此,探讨节点处爆炸波的分配情况为计算框架整体受力提供理论参考。

1 波传播分析

1.1 轴向波的传播方程

对于沿长度特性(包括轴向刚度和单位长度的质量)为常数的一根直杆,轴向自由振动运动方程为:

$$EA \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \bar{m} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中, EA 为轴向刚度; \bar{m} 为单位长度的质量; $u(x,t)$ 为轴向位移。

为方便计算,把运动方程(1)进行简化写成:

$$\ddot{u}(x,t) - V_p^2 u''(x,t) = 0 \quad (2)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{EA}{\bar{m}}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

式中, ρ 为质量密度, V_p 具有与速度相同的量纲。求出方程式(2)的解为:

$$u(x,t) = f_1(x - V_p t) + f_2(x + V_p t) \quad (4)$$

式中, f_1 和 f_2 分别是参数 $(x - V_p t)$ 和 $(x + V_p t)$ 的任意

函数关系。式(4)表示一对位移波沿杆轴线向正、负两个方向传播,传播方式如图1所示。图中表示任意时刻取 $t=0$ 时,给出的两个位移波表现为位置的特定函数。图示的两个特定波形函数 $f_1(x-V_p t)$ 和 $f_2(x+V_p t)$ 也可以是早期杆两端特定边界位置或力的条件引起的。

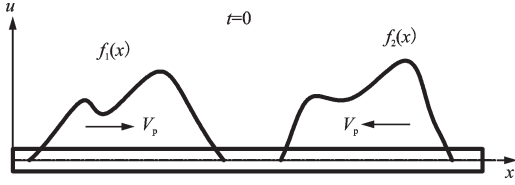


图1 沿杆传播的轴向位移波

Fig.1 Axial displacement waves propagation along the rod

为了更好地理解波的传播机理的本质,分别考虑在两个瞬时 $t=0$ 和 $t=\Delta t$ 沿杆方向向前传播的波,如图2所示。

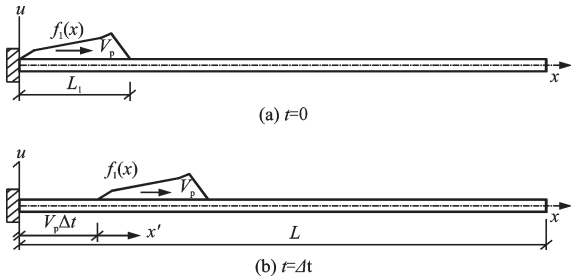


图2 Δt 时间内波的传播

Fig.2 Propagation of wave in Δt time

如果当波传递到一个新位置变量 $x'=x-V_p\Delta t$ 时,那么有 $f_1(x-V_p t)=f_1(x')$,并且图2(b)中以位置变量 x' 为基准的波形函数和图2(a)中以 x 为基准的波形函数相同。由此可得,在时间 Δt 中位移波只是向前前进了距离 $V_p\Delta t$,但是未改变波动形状,波的传播速度仍然为 V_p 。同理可得,在波形 f_2 下,波沿 x 的负方向传播 Δt 时, $f_2(x+V_p t)$ 与波形 f_1 沿 x 的正方向传播 Δt 所得出的结论相同。

等截面直杆对突加的轴向荷载的动力响应可以解释为应力波及其相关联的变形波沿杆长方向的传播。杆的动力行为不仅可以用位移分布表示还可以用应力分布来表示。应力波函数为:

$$\sigma(x,t) = E \frac{\partial u}{\partial x} = E \frac{\partial f_1(x-V_p t)}{\partial x} + E \frac{\partial f_2(x+V_p t)}{\partial x} \quad (5)$$

用 $h_1(x-V_p t)$ 和 $h_2(x+V_p t)$ 来表示应力波函数

$E \frac{\partial f_1(x-V_p t)}{\partial x}$ 和 $E \frac{\partial f_2(x+V_p t)}{\partial x}$,将式(5)改写成:

$$\sigma(x,t) = h_1(x-V_p t) + h_2(x+V_p t) \quad (6)$$

图3给出了在任意位移波形和其所对应的应力波的关系。不难发现,应力波仍然是以速度大小为 V_p 传播并且保持波形的形状不变。由于一维下爆炸波的传播规律较为清晰,但遇到交叉杆件时,波的传递规律极其复杂。基于此,利用一维爆炸波的传播形式、应力波的传播特征和传播过程中波速不变的理论,研究三维节点处爆炸波在各个方向沿杆件轴向传播规律。

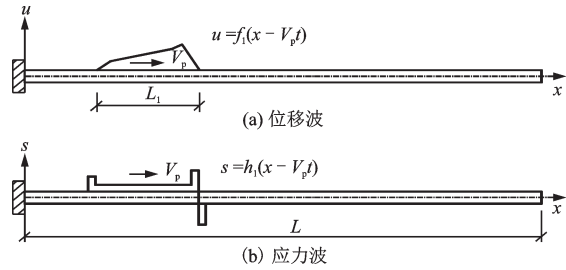


图3 位移波与其对应的应力波之间的关系

Fig.3 Relationship between displacement wave and its corresponding stress wave

1.2 边界处波的传播

杆端的边界条件影响着沿等截面杆传播的波形状函数,即杆在传播过程中的波形由边界处的平衡条件产生的。

本文讨论杆右端为固定端时的情况。假设杆长为 L ,在 $x=0$ 处引入位移过程 $u(0,t)=f_1(-V_p t)$,由前文推导可知,两种位移波在固定端处必须满足的边界条件为:

$$u_{x=L} = 0 = f_1(L-V_p t) + f_2(L+V_p t) \quad (7)$$

将式(7)改写成反射波用入射波来表示,其表达式为:

$$f_2(L+V_p t) = -f_1(L-V_p t) \quad (8)$$

当波的每一段经过杆端时,在杆右端是固定端的情况下,位移波的符号相反。同时,由图4(a)的位移波可以看出,向右传播的波的斜率 $\partial u/\partial x$ 与向左传播的波的斜率 $\partial u/\partial x$ 相等,换句话说,此时在固定端时两波的总应力相同,如图4(b)所示。

杆端外部一个向左传播的波能更清楚的看到边界条件的控制对波传播的影响,其实,当波沿 x 方向传播到杆端时在杆端产生了真实的波。也就是说,入射波在固定端发生了反射,产生了反射波,而反射

波和入射波有着相反的位移。由于传播方向相反,所以位移正负号相反,固定端的位移相互抵消,而总应力由于入射波和反射波的叠加增加了1倍。

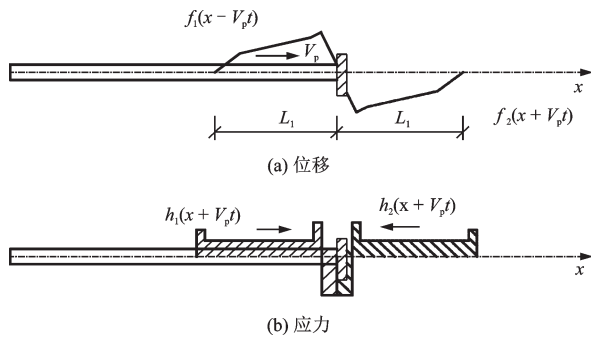


图4 位移波和应力波在固定端的反射
Fig.4 Reflection of displacement and stress waves at the fixed end

根据以上分析,由于爆炸波传至固定端时产生了反射波,一旦发生反射将导致波在不同时间下的叠加效应。因此,本文研究两端固定时爆炸波在钢结构构件中沿杆方向只发生入射,通过式(3)和杆件长度控制爆炸波的传播时间,在规定时间内分析不发生反射的情况。

2 建立有限元模型

表1给出钢结构材料参数取值^[12, 13],根据相关数据并通过式(3)计算可得出炸药的传播速度。

表1 钢材相关参数取值

Table 1 Values of steel related parameters

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
7850	210	0.3	235

由于爆炸发生的时间极短,速度极快,基于Q235B钢的本构关系和动荷载引起的应变率效应^[14, 15],为分析爆炸作用下爆炸波在钢结构构件内的传播规律,建立了柱高 $H=3.6\text{ m}$,长宽为 $6\text{ m}\times 6\text{ m}$ 的单层单跨钢框架,其中梁、柱矩形截面尺寸分别为 $200\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 和 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。为了满足炸药冲击波集中于梁柱节点处,且保证炸药波垂直推进,在炸药一侧的钢框架中间加墙结构,并使炸药的与梁的中心重合。为使炸药波快速传入钢构件,减少在空气中传播的时间,经计算,炸药的距离与柱顶距离为 0.5 m 。柱端、梁端截面内力图和模型计算简图分别如图5和图6所示。

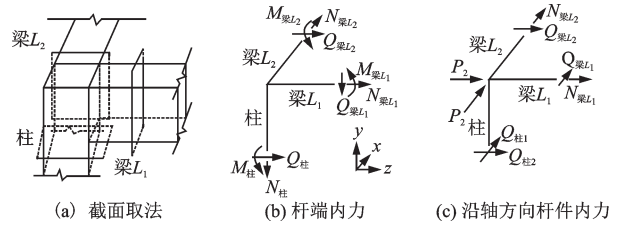


图5 杆端截面内力
Fig.5 Internal force diagram of rod end section

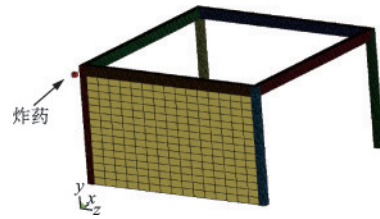


图6 模型计算简图
Fig.6 Model calculation diagram

基于ANSYS/LS-DYNA有限元软件操作平台,在有限元建模过程中,钢柱采用SOLID 164单元,材料采用*MAT_003_Plastic-Kinematics各向同性非线性硬化塑性材料模型^[13]。炸药与空气通过布尔运算进行切分,实现共用节点的连接方式,梁柱节点处通过设置接触定义为固定约束,统一用 $\text{kg}_\text{m}_\text{s}$ 单位制建模,为了避免爆炸波在固定端不发生反射现象,因此,计算终止时间设定为 0.001 s 。网格划分时,所有结构均采用映射网格,钢构件三种不同精度网格分别为 0.025 、 0.04 和 0.055 m ,数值模拟下柱顶位移时程曲线如图7所示。

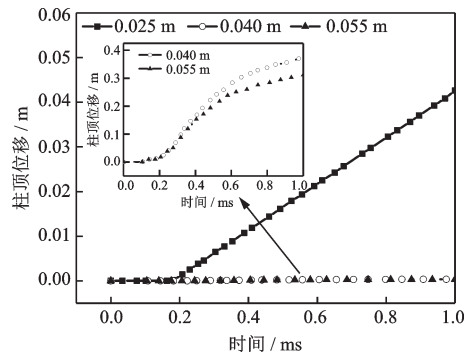


图7 不同网格精度下柱顶位移时程曲线
Fig.7 Time-history curves of column top displacement with different mesh precision

经分析发现,网格大小对计算精度^[16-19]和输出文件所占内存有很大影响, 0.025 m 下柱顶位移呈线性变化偏差较大,随网格增大柱顶位移逐渐减

小,且计算精度较为粗略,因此,本文中钢构件网格大小为0.040,炸药为0.50,空气为0.13 m^[20]。

3 爆炸作用下爆炸波在钢构件中的传播分析

考虑比例距离 $z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$ (R 为爆心距, W 为炸药当量)是结构损伤的重要影响因素下^[21-23],通过多组数据的模拟,本节取比例距离=0.29 m/kg^{1/3},即炸药当量为2.96 kg,爆心距为0.5 m。借助有限元分析软件对单层单跨框架进行数值模拟,在爆炸作用下研究爆炸波对结构构件的影响,分析截面内力的变化规律。

为了量化阐述爆炸冲击波在节点处的传递作用,引入结构力学中分配系数 μ 表示梁柱端节点内力的变化,其表达式为:

$$\mu_i = \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (9)$$

式中, i 为钢构件的节点编号; Q 为内力变量,包括轴力、剪力、弯矩; μ_i 为第 i 个节点分配系数。

3.1 爆炸作用下钢构件的内力(轴力、剪力和弯矩)分配规律

在爆炸作用下,分别提取爆炸波引起的柱、梁 L_1 (即垂直爆炸波方向的梁)和梁 L_2 (即沿爆炸波方向的梁)的杆端轴力,由于爆炸波传来的冲击力随时间变化而变化,将杆端轴力进行叠加^[24, 25],叠加后的节点轴力根据式(9)分别分配给三根构件,轴力时程曲线及杆件轴力分配系数规律如图8、图9所示。

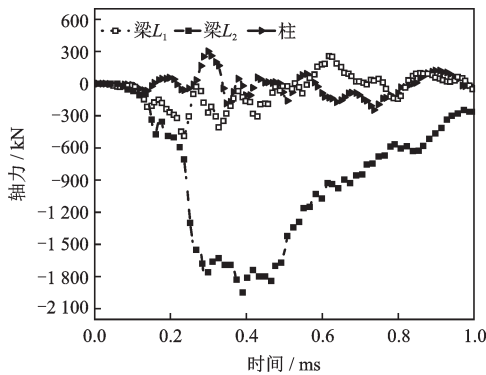


图8 轴力时程曲线

Fig.8 Axial force time-history curve

爆炸作用下内力变化是研究爆炸波在构件中传播规律的有效指标。根据图8可知,由于空气的超压分布并对称性的作用在梁柱表面,爆炸冲击波沿 x 方向水平推进,因此,柱和梁 L_1 的轴力较小,且在0附近徘徊。随着时间的变化,梁 L_2 在一段时间后轴力达到峰值,由于钢构件为弹塑性材料,轴力震荡片刻便逐渐减小,梁内轴力变化周期约为1 ms。

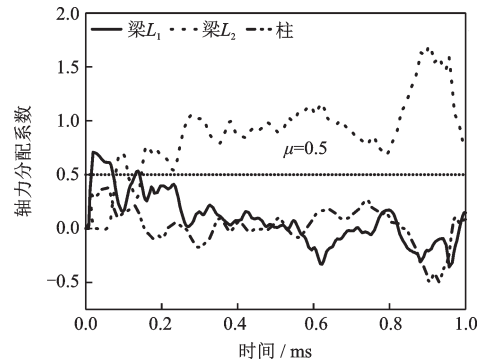


图9 轴力分配系数时程曲线

Fig.9 Time-history curve of axial force distribution coefficient

如图9所示,将节点轴力进行分配发现,在爆炸前期,柱的分配系数几乎为0,整个过程中梁 L_1 和梁 L_2 的分配系数基本关于 $\mu=0.5$ 对称。由此可见,爆炸冲击波产生的轴力主要由梁承担,对柱的轴力不产生影响,而对梁 L_2 的轴力影响最大。

如图10、图11分别给出了杆件剪力时程曲线和剪力分配系数。

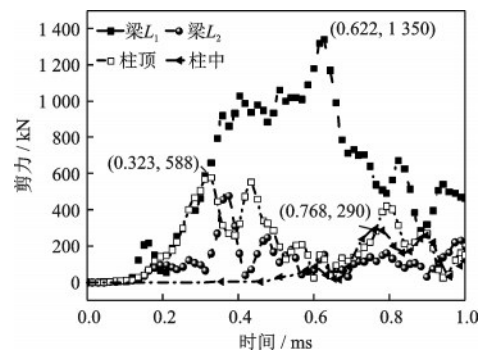


图10 剪力时程曲线

Fig.10 Shear time-history curve

根据图10可知,0.622 ms时梁 L_1 的最大剪力值为1350 kN。在水平爆炸波下,柱和梁 L_1 同时受剪,0.323 ms时柱端剪力达到最大值,其值为588 kN。对于柱的跨中剪力来说,0.768 ms时爆炸波传递了3.97 m,入射波传至柱底的固定端形成的

反射波还未传递到柱的跨中位置,此时柱中的最大剪力为 290 kN。说明在爆炸波水平作用构件下,柱端的剪力最大,柱中剪力较小,剪力沿水平方向在竖向构件内的分布具有弱传递性。

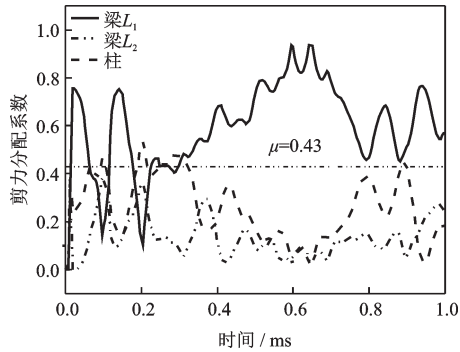


图 11 剪力分配系数时程曲线

Fig.11 Shear distribution coefficient

如图 11 所示,柱和梁 L_1 的分配系数基本关于 $\mu=0.43$ 对称,梁 L_2 的剪力分配系数趋于平稳。需要指出的是,虽然柱和梁 L_1 同时受剪力作用,但是梁 L_1 的分配系数要比柱的大。说明节点剪力主要由梁 L_1 承担,少部分作用于梁 L_2 和柱。

分别取梁端、柱端三根杆件的合力与合力矩,并对梁柱节点求和,得出节点处合力与合力矩。如图 12 所示。

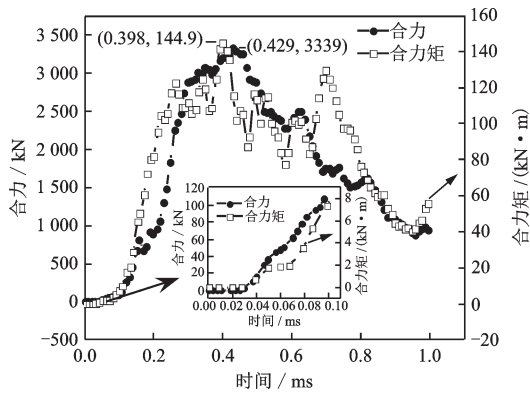


图 12 节点合力、合力矩时程曲线

Fig.12 Time-history curves of joint resultant force and resultant moment

根据图 12 节点合力与合力矩时程曲线可知,合力与合力矩随时间的增加到达峰值后缓慢衰减,并伴随波动现象。爆炸作用下节点的合力与合力矩随时间变化均不为零。

钢结构构件的杆端弯矩对节点取矩总不为零,由图 13 柱、梁 L_1 和梁 L_2 弯矩分配系数可见,相比梁

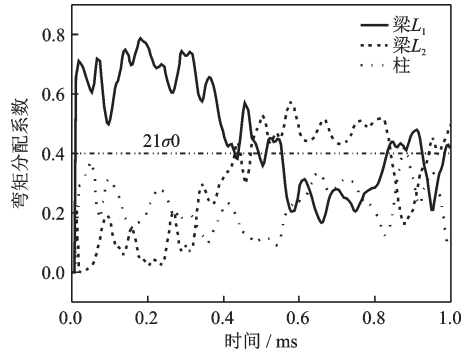


图 13 弯矩分配系数时程曲线

Fig.13 Moment distribution coefficient

剪力的分布,梁端弯矩提前出现峰值。当梁端弯矩达到峰值逐渐衰减后,剪力缓慢到达峰值。梁 L_1 和梁 L_2 的分配系数基本关于 $\mu=0.4$ 对称,说明框架节点处的弯矩主要沿梁进行传递,与梁端弯矩相比,柱构件杆端弯矩的弱传递性更明显。

3.2 爆炸作用下爆炸波在钢构件中不同方向的内力分析

爆炸作用下杆件的破坏会带来结构的整体破坏,为了研究杆件在爆炸作用下的破坏情况,爆炸作用下将爆炸冲击波简化为沿梁 L_1 作用与垂直梁 L_2 作用的两个力,分析 P_1 、 P_2 分别作用在梁柱节点时杆件沿 x 、 z 方向的内力值的变化。计算简图如图 5(c) 所示。通过数值计算, P_1 、 P_2 分别作用下的柱、梁 L_1 和梁 L_2 沿 x 、 z 方向的内力值如图 14 所示。

爆炸作用下杆件的受力情况与爆炸波的传播方向有关,由图 14 可以看出,在 P_1 作用 0.62 ms 时梁 L_1 沿 x 方向受剪,剪力达到最大,其剪力值为 1350 kN, 0.39 ms 时梁 L_2 沿 x 方向的内力值为 -1950 kN,此时梁 L_2 受压轴力达到最大;在 P_2 作用下,梁 L_1 的最大压力和最大拉力分别为 -486 kN 和 258 kN,而梁 L_2 一直处于受拉状态,且与柱的拉力大小基本相同。由此可见,在爆炸冲击力的作用下,垂直爆炸波方向的水平杆件为拉杆,沿爆炸波方向的杆件为压杆且动力响应较为显著。

通过材料失效准则可以发现,有效应力能反映出单元的失效情况和杆件的承载能力,由图 15 构件的有效应力时程曲线可知,在 0.243 ms 时梁 L_1 的屈服应力达到峰值,其值为 233.91 MPa,随之立即降为零,此时梁端的单元发生失效,根据以上分析,梁 L_1 的端部主要受剪力影响而发生剪切破坏。相比于梁 L_1 的应力峰值柱的应力明显小得多,0.338 ms 柱的最大屈服应力为 136.14 MPa,与梁 L_2 的屈服应

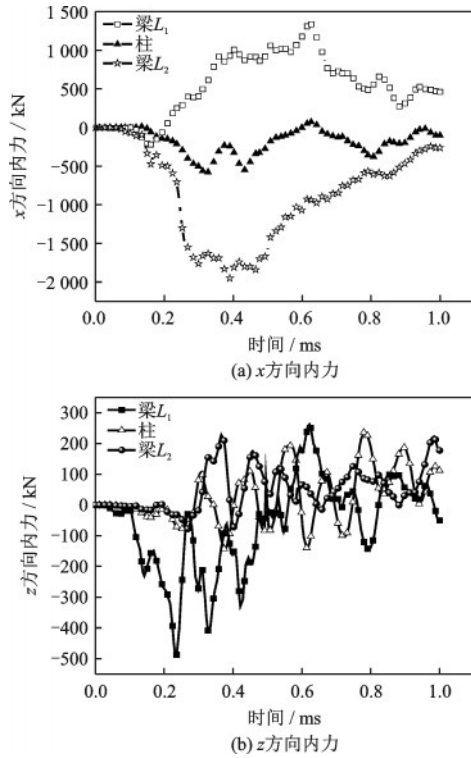


图14 沿轴方向的杆件内力

Fig.14 Internal forces of the rod along the axis

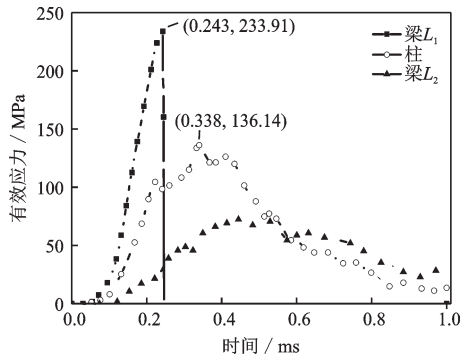


图15 有效应力时程曲线

Fig.15 Effective stress time-history curve

力到达峰值后共同缓慢衰减。由此可见,梁 L_1 因梁端剪切最先发生破坏,其次为柱的破坏,最后梁 L_2 因水平力过大而发生受压破坏。

4 火灾爆炸作用下爆炸波在钢构件中的传播分析

基于屈服强度因应变率效应而增加下^[26, 27],本节研究先发生火灾,待构件受火温度均匀后,炸药起爆引起爆炸,分析温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时,火灾爆炸联合作

用下爆炸波在钢结构构件中的传播特性。高温下钢材的屈服强度及弹性模量数值见表2。

表2 钢材高温下的屈服强度与弹性模量

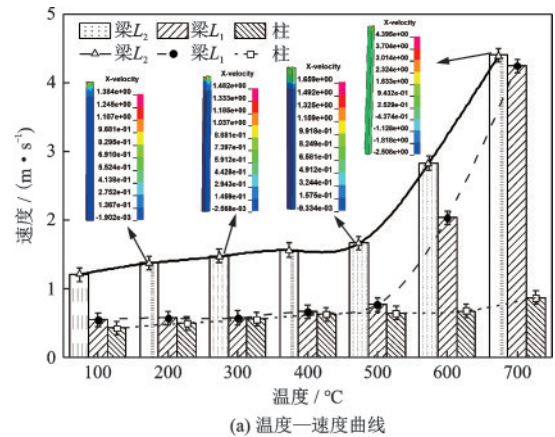
Table 2 Yield strength and elastic modulus of steel at high temperature

温度/ $^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700
屈服强度/MPa	235	389	306	241	194	156	131
弹性模量/GPa	210	189	168	147	126	65	27

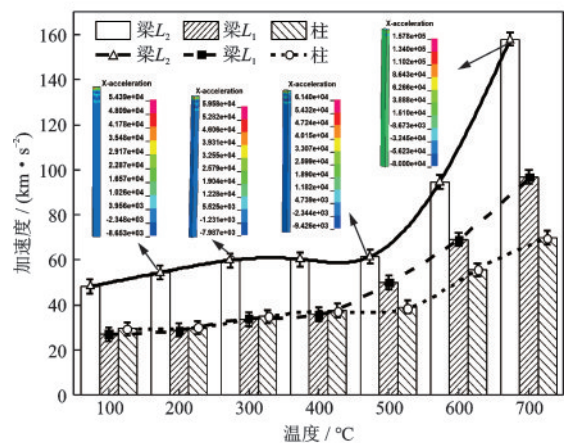
4.1 火灾爆炸作用下爆炸波在钢构件中传播速度分析

温度致使钢结构的材料力学性能下降,为了方便研究火灾爆炸联合作用下爆炸波在钢结构中传播速度的变化规律,取梁端、柱端沿杆长方向在计算时间内各杆件所对应数据的峰值。梁端、柱端的温度—速度与温度—加速度曲线如图16所示。

根据图16可知,在低温阶段,速度与加速度变化程度较为缓慢,随温度的升高,爆炸波沿杆长方



(a) 温度—速度曲线



(b) 温度—加速度曲线

图16 温度—速度与温度—加速度曲线

Fig.16 Temperature-velocity and temperature-acceleration curves

向在构件端部传播的速度与加速度均随之变大,说明高温不仅降低材料的力学性能,而且高温使得截面的冲击力增强,加速了截面破坏。在温度低于500℃时柱的加速度比梁 L_1 的大,当温度超过500℃时,速度与加速度变化较为明显,且梁 L_1 和梁 L_2 的速度和加速度变化速率比柱要快,说明爆炸冲击作用在高温下水平方向的速度与冲击速率比垂直方向的大。

当钢结构构件温度为200℃、700℃时,图17给出了柱顶、柱中速度时程曲线和梁 L_2 端部、跨中速度时程曲线。

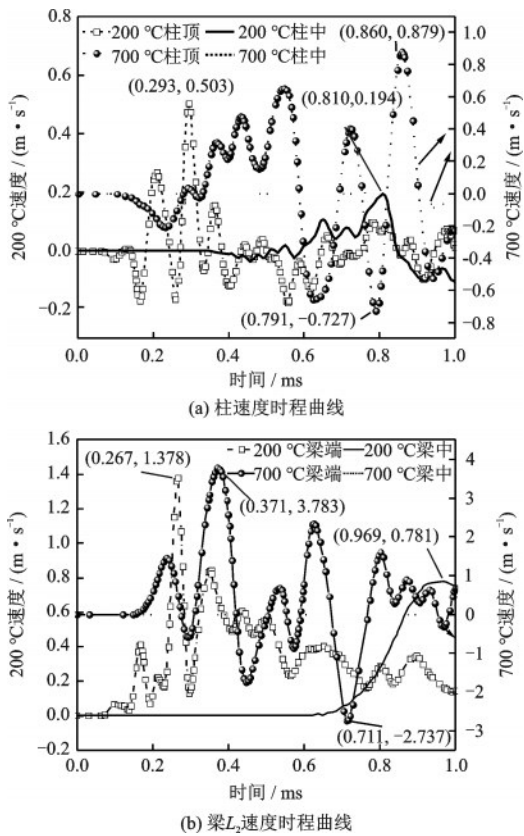


图17 200℃和700℃时构件速度时程曲线
Fig.17 Time-history curves of component velocity at 200℃ and 700℃

图17(a)中显示,200℃下,在0.293 ms时柱顶速度最大值为0.503 m/s,随后柱顶速度在零附近徘徊;0.810 ms柱中轴向速度到达峰值,其值为0.194 m/s,且0.4 ms前的柱中速度为零,说明爆炸冲击波还未传播至柱中,用传递效率来反映波向前传播的快慢,经计算,柱中轴向速度传递效率约为59%。700℃时柱顶在0.860 ms速度最值为0.879 m/s,同时,0.791 ms时速度达到最小值,且在计算

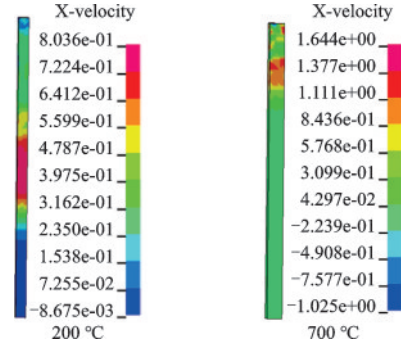


图18 爆炸波在1 ms时梁 L_2 的轴向速度云图
Fig.18 Axial velocity cloud with explosion wave at 1 ms

时间内柱中速度未出现大幅度波动,说明700℃下爆炸冲击波在柱顶上下传播,而未向柱中进行传递。

由图17(b)并结合图18爆炸波在不同温度下梁 L_2 中轴向速度传播云图易见,计算时间内,200℃下梁 L_2 在0.267 ms速度到达最大值,随时间增加梁端速度出现波动性衰减,同时经过0.7 ms后梁中速度到最大值0.781 m/s,爆炸波200℃时在梁 L_2 中轴向速度的传递效率在85%左右。相比之下,700℃时梁的最大轴向速度约为200℃的3倍,但是由于爆炸波沿梁方向传播的杆长较长在1 ms内爆炸波并未传波到梁中。由此可见,高温下截面速度的峰值变大,但使得爆炸冲击波只局限于在杆端往复进行传递,而在钢结构杆件中传播速度明显变慢,并且沿爆炸波方向杆件的速度比垂直方向的速度和传递效率大得多,相比之下,低温时的爆炸波一经炸药引爆快速向杆中传递,计算时间内可见轴向速度峰值。

4.2 火灾爆炸作用下爆炸波在钢构件中的内力分析

内力的变化规律能更好的反应爆炸波在杆件中传播的特点,为研究火灾爆炸作用下钢结构的破坏情况和高温对爆炸波在杆件中内力传播的影响,本节以柱、梁 L_1 和梁 L_2 为研究对象,通过数值计算得出各温度下杆件的动力响应。

选择杆端单元,提取计算时间内沿杆长方向各杆件的最大应力值,不同温度下的杆件应力如图19所示。

由图19可知,梁 L_2 在计算时间内应力始终为负值且随温度的增加压应力值逐渐减小,说明沿爆炸波方向的杆件为压杆,高温导致其应力衰减。对比发现,梁 L_1 最大压应力变化趋于稳定,而最大拉应力只发生在200℃~400℃,且呈现递减趋势,其它

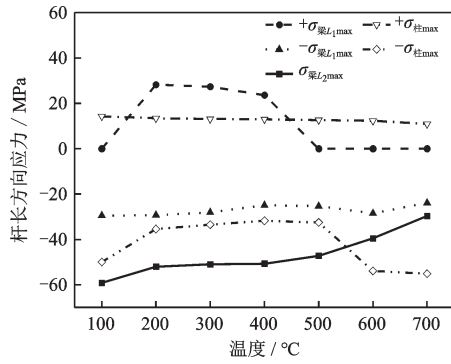


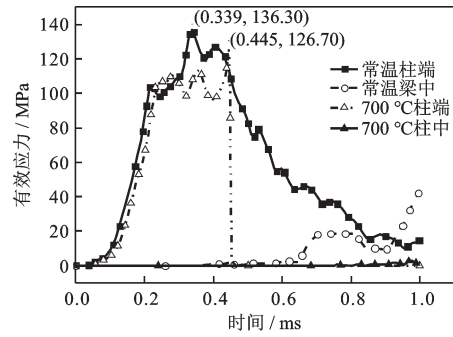
图19 沿杆长方向杆端温度—应力曲线

Fig.19 Temperature-stress curve of rod end along rod length
注: +表示拉应力, -表示压应力

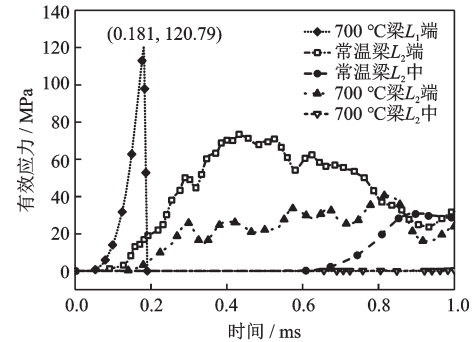
温度的应力为零,这是因为高应变率的影响下钢结构的屈服强度增大,随温度的升高400 °C的钢材屈服强度与100 °C时接近,而钢材的弹塑性失效准则用屈服有效应力来定义,所以在100 °C、500 °C、600 °C和700 °C时单元还没来得及受拉材料就出现了失效。柱最大拉应力随温度升高而缓慢降低,同时,最大压应力在温度高于500 °C时变化较为明显,并发生压应力增加的趋势,说明高温下钢材料力学性能下降表现出爆炸波使得柱更能偏向于产生受压破坏。

为了分析火灾爆炸作用下杆件的破坏情况和爆炸波随温度变化的传播规律,图20给出了柱端、柱中和梁端、梁跨中在不同温度下应力时程曲线。

结果发现,700 °C下柱在0.445 ms时最大有效应力为126.70 MPa,而在0.181 ms时梁L₁的有效应力到达峰值,杆端应力随时间增大到最大值后立即降为零,说明此时构件的单元发生失效,梁端被剪断。相比之下,梁L₂的应力较小单元未出现失效现象。高温下梁L₁的破坏先于柱的破坏,且柱的最大失效应力稍比梁L₁的大,说明柱承受的爆炸冲击能力较强,实现了“强柱弱梁”的设计理念。对比图15发现,700 °C时梁L₁破坏的最大有效应力为120.79 MPa与常温(20 °C)杆件破坏的有效应力最大值相比大约减小了2倍,并提前出现单元失效,高温时的梁柱均发生了破坏。由此可见,高温下构件的损伤程度较为严重,梁L₁首先破坏,其次柱发生破坏,梁L₂最后退出工作。常温下柱端、梁端应力到达峰值后,应力逐渐衰减的同时柱中、梁中出现应力。相比之下,700 °C时柱端、梁端应力出现波动现象,柱中、梁中的应力几乎为零,且常温下杆件的



(a) 柱有效应力时程曲线



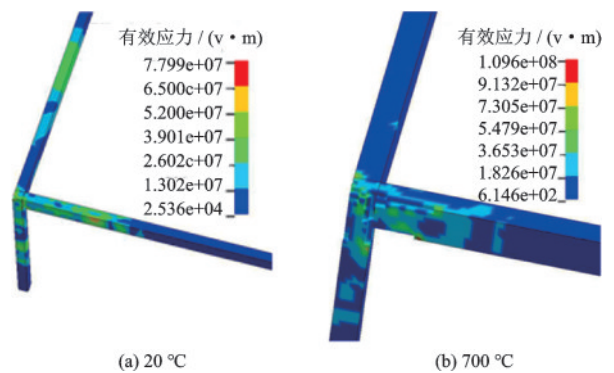
(b) 梁有效应力时程曲线

图20 常温和700 °C下构件的应力时程曲线

Fig.20 Stress time-history curves of components at room temperature and 700 °C

最大应力要比高温时的大,说明高温不仅使爆炸波在钢构件中的应力最大值变小,而且导致应力传递变慢。

如图21所示,常温下的应力基本布满整根杆件,受力均匀而未发生严重破坏现象,高温下的应力只局限与梁柱节点处,杆件单元发生破坏。因此,高温下爆炸波向前的传递的效率变低导致产生剧烈的冲击力使得杆件出现严重损伤。换句话说,高温下爆炸波的轴向传播速度变慢,导致节点提前失效致使构件破坏。



(a) 20 °C

(b) 700 °C

图21 不同温度下杆件的应力云图

Fig.21 Stress cloud of rod at different temperatures(Pa)

5 结 论

利用一维波的轴向传播方程,并讨论在杆端为固接时爆炸波传播的边界条件,研究爆炸波在三维模型下的传播特性。借助波速的传播公式确定框架的平面尺寸,利用数值模拟方法,并选择合适的比例距离,建立有限元模型。采用“分配系数”的概念,分析结构在爆炸作用下爆炸波的传递规律,根据节点处轴向波、剪切波和弯曲波的变化规律,指导室内爆炸下计算框架整体内力分布,结合温度对爆炸波的影响,得出以下结论:

(1)在爆炸作用下,内力(轴力、剪力、弯矩)主要由沿爆炸波方向的杆件承担,垂直方向的杆件的内力分布具有弱传递性。

(2)当爆炸发生在常温下,爆炸波在构件两端为固定端下快速传至跨中,垂直爆炸波方向的水平构件因受剪而最先发生破坏,但竖直构件未破坏。

(3)爆炸波在高温下只停留在节点处往复传播,且水平方向的速度与冲击速率比竖直方向的大,结构整体的速度与传递效率明显变低。高温下,爆炸波沿杆件方向未传至跨中,即构件跨中应力为零,破坏较为显著,垂直爆炸波方向的水平杆件因剪力过大最先发生破坏,其次竖直构件破坏,沿爆炸波方向的杆件因轴力过大最后发生受压破坏,因此,高温下构件破坏的现象及顺序与常温基本相同。

目前对室内爆炸下结构的破坏及倒塌研究较多,但有关爆炸波的传递及分配规律的研究报道还不充分,因此,根据杆系结构节点处爆炸波在矩形截面钢构件中的内力分配规律及构件破坏机理,当不用模拟计算便可以推算框架整体内力。

参考文献:

- [1] Yin Z, Wang Z, Zhen Y, et al. Propagation characteristics of gas explosion in linked vessels based on DDT criteria[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021,73: 104598.
- [2] 叶俊. 框架一剪力墙结构的爆炸动力响应研究[D]. 兰州理工大学, 2014.
- Ye J. The dynamic response of frame-shear wall structure under explosion action[D]. Lanzhou University of Technology, 2014.(in Chinese)
- [3] 尹华伟, 张料, 段金曦, 等. 平面爆炸波加载装置技术研究[J]. 爆破, 2021: 1-9.

- Yin H W, Zhang L, Duan J X, et al. Research on technology of plane explosion wave loading device [J]. Blasting, 2021:1-9.(in Chinese)
- [4] 陈大鹏, 陈力, 还毅, 等. 盐城响水化工园区“3·21”危化品爆炸事故爆炸威力分析及灾害后果评估[J]. 防灾减灾工程学报, 2020,40(2): 196-203.
- Chen D P, Chen L, Huan Y, et al. Analysis on the power and disaster consequence of "3·21" explosion accident in the Chemical Industry Park of Xiangshui, Yancheng [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020,40(2): 196-203.(in Chinese)
- [5] Cui Y, Song M, Qu Z, et al. Research on damage assessment of concrete-filled steel tubular column subjected to near-field blast loading[J]. Shock and Vibration, 2020(11): 1-19.
- [6] Thai D K, Pham T H, Nguyen D L. Damage assessment of reinforced concrete columns retrofitted by steel jacket under blast loading[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2019,29(1): 1-15.
- [7] Lak M, Marji M F, Bafghi A Y, et al. A coupled finite difference-boundary element method for modeling the propagation of explosion-induced radial cracks around a wellbore[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019,64: 41-51.
- [8] 张秀华, 吴燕燕, 李玉顺. 室内燃气爆炸作用下钢框架结构动力响应分析[J]. 工程力学, 2013,30(增1): 358-362.
- Zhang X H, Wu Y Y, Li Y S. Numerical analysis of dynamic responses of steel frame structure subjected to internal gas explosion [J]. Engineering Mechanics, 2013,30(Sup1): 358-362.(in Chinese)
- [9] 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]. 上海交通大学, 2019.
- Lu X T. Research on dynamic response of steel frame and beam-column connection under internal explosion [D]. Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)
- [10] 于文静, 赵金城, 龚景海, 等. T型相贯节点在爆炸冲击和火灾作用下力学性能的有限元分析[J]. 上海交通大学学报, 2012,46(2): 335-340.
- Yu W J, Zhao J C, Gong J H, et al. Numerical analysis of steel tubular T-joint mechanical performance under blast and fire [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012,46(2): 335-340.(in Chinese)
- [11] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣, 等. 钢筋混凝土结构内爆炸相似模型试验研究[J]. 南京理工大学学报, 2016,40(2): 135-141.
- Yang Y D, Li X D, Wang X M, et al. Experimental study on similarity model of reinforced concrete structures under internal explosion [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2016,40(2): 135-141.(in Chinese)

- [12] 李忠献, 何振锋, 师燕超, 等. 爆炸荷载下钢筋混凝土柱动态响应分析的宏观模型[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 76-83.
Li Z X, He Z F, Shi Y C, et al. Macro model for dynamic analysis of reinforced concrete columns under blast loading[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 76-83.(in Chinese)
- [13] 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.
Zhou L Y, Shi L, Xu L Y, et al. Method for classifying level of steel column under impact of explosion [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(5): 851-857.(in Chinese)
- [14] 段立平, 赵金城. 火灾及爆炸共同作用下平面约束钢梁的非线性分析理论[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3): 268-276.
Duan L P, Zhao J C. Study on response of restricted steel beam under load combinations of fire and blast using nonlinear timoshenko beams [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(3): 268-276.(in Chinese)
- [15] 徐文晶, 段立平, 赵金城. 约束钢梁在高温与爆炸共同作用下的响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(3): 342-347.
Xu W J, Duan L P, Zhao J C. Research on response of restricted steel beam under elevated temperature and blast loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(3): 342-347. (in Chinese)
- [16] Castillo D, Al-qadi I L. Mechanical modelling of asphalt concrete using grid division[J]. The International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(8): 1012-1023.
- [17] 潘城, 赵光明, 孟祥瑞. 网格划分对爆破损伤有限元分析的影响[J]. 爆破, 2015, 32(4): 21-25.
Pan C, Zhao G M, Meng X R. Influence of meshing in FEA analysis of blasting damage [J]. Blasting, 2015, 32(4): 21-25.(in Chinese)
- [18] 赵明华, 张锐. 有限元上限分析网格自适应方法及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 537-545.
Zhao M H, Zhang R. Adaptive mesh refinement of upper bound finite element method and its applications in geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 537-545.(in Chinese)
- [19] 李康, 李守先, 刘娜. 强爆炸火球辐射流体自适应网格高精度数值模拟[J]. 计算物理, 2021, 38(2): 146-152.
Li K, Li S X, Liu N. High-precision numerical simulation of strong explosive fireball with adaptive Mesh [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2021, 38(2): 146-152.(in Chinese)
- [20] 张秀华, 李玉顺, 张宇, 等. 爆炸荷载作用下钢柱的动力响应与影响因素分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(1): 73-77, 84.
Zhang X H, Li Y S, Zhang Y, et al. Dynamic response and influence factor analysis of steel column under blast loading [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(1): 73-77, 84.(in Chinese)
- [21] Daniel C, Imad A L. Mathematical modeling of propagation of explosion waves and their effect on various objects [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(8): 433-443.(in Chinese)
- [22] 阎石, 毕加亮, 齐宝欣. 考虑典型密集建筑群影响的爆炸超压空间分布规律分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 203-208.
Yan S, Bi J L, Qi B X. Regularity analysis on explosion overpressure spatial distribution considering impacts of typical dense architectural complex factors [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(2): 203-208.(in Chinese)
- [23] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣. 爆炸冲击波空中传播特征参量的优化拟合[J]. 爆破器材, 2014, 43(1): 13-18.
Yang Y D, Li X D, Wang X M. Optimum fitting for characteristic parameters of blast shockwaves traveling in air [J]. Explosive Materials, 2014, 43(1): 13-18.(in Chinese)
- [24] 周天华, 李艳春, 吴函恒, 等. 冷弯薄壁型钢拼合箱形截面短柱承载力叠加法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(11): 46-55.
Zhou T H, Li Y C, Wu H H, et al. Superposition method for bearing capacity of cold-formed thin-walled steel built-up box section short columns [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2020, 47(11): 46-55.(in Chinese)
- [25] 谢烽, 韩亮, 刘殿书, 等. 基于叠加原理的隧道爆破近区振动规律研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 182-188.
Xie F, Han L, Liu D S, et al. Vibration law analysis for a tunnel's field near blasting based on waveform superposition theory [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 182-188.(in Chinese)
- [26] 胡昌明, 贺红亮, 胡时胜. 45号钢的动态力学性能研究[J]. 爆炸与冲击, 2003(2): 188-192.
Hu C M, He H L, Hu S S. A study on dynamic mechanical behaviors of 45 Steel [J]. Explosion and Shock Waves, 2003(2): 188-192.(in Chinese)
- [27] Daryan A S, Ziaei M, Sadrejad S A. The behavior of top and seat bolted angle connections under blast loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(10): 1463-1474.

(本文责编:周小潭)