

爆炸载荷下埋地管线动力学分析数值模拟

高进东¹, 韦春艳², 周轶³

1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012
2. 中国石油吉林油田分公司扶余采油厂, 吉林松原 138000
3. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

摘要 埋地管线的设计规范通常仅考虑管内介质、管边地质条件、环境条件、埋设方式和深度, 而未考虑在土中爆炸的冲击载荷作用下埋地管线的安全性。本文利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA, 运用非线性动力学的基本理论和算法, 选取适当的材料以及本构关系, 对炸药在土中爆炸情形下埋地管线的动力学响应问题进行 3 维数值模拟。对比分析了不同装药量和爆心距对埋地管线损伤的不同作用, 并对正对爆心管界面各节点受力进行了分析。结果表明, 当炸药在浅土层中爆炸, 炸药用量对管线的影响更为突出; 同时也得出埋地管线在受到爆炸冲击载荷时, 正对爆心截面上受到较大的轴向拉应力作用, 且其作用可以看作瞬态受力过程。

关键词 埋地管线; 动力学响应; 爆炸冲击载荷; 数值模拟

中图分类号 X93

文献标志码 A

DOI 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.26.003

Dynamic Analysis of Buried Pipelines Under Blast Loads with Numerical Simulation Method

GAO Jindong¹, WEI Chunyan², ZHOU Yi³

1. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China
2. Fuyu Oil Production Company of Jilin Oilfield, PetroChina, Songyuan 138000, Jilin Province, China
3. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The medium inside the pipe, the buried way and depth, the geological and environmental conditions were always paid much attention in design codes of buried pipeline, with the influence of blast loads being ignored. Actually, more and more pipes containing combustible materials are buried under the ground, once one of them blows-up, the blast loads would certainly influence others. In this paper, dynamic response of buried pipeline under blast loads in shallow soil was stimulated by ANSYS/LS-DYNA FEM, a 3D numerical simulation software with the basic theory and algorithm of nonlinear dynamics. The influence of amount of explosive charge and distance to explosion center to buried pipe were comparatively studied with three groups of simulation. The radial stresses of different directions were also studied to find the weakest point. The results showed amount of explosive charge and distance to explosion center both influenced the dynamic response of buried pipe. The larger the amount of charge and closer to explosion center, the bigger the stress of buried pipe suffered. Comparatively, the amount of explosive charge played a more important role. Radial stresses analyses also implied that the biggest stress presented on the farthest point right under the explosion center and the broken of buried pipe reflected to tensile stress.

Keywords buried pipeline; dynamic response; explosive blast loads; numerical simulation

0 引言

随着人类社会的不断进步和发展, 人类生产活动的不断拓广, 大型埋地管线工程如西气东输工程、南水北调工程以

及重要的石油、天然气输送管道工程等越来越多。然而伴随着城镇化建设的推进, 管道间的埋设距离也越来越小, 管道所处的环境也越来越复杂, 所以管线受到第三方载荷作用的

收稿日期: 2013-06-15; 修回日期: 2013-08-12

作者简介: 高进东, 高级工程师, 研究方向为安全评价与重大事故预防控制技术, 电子信箱: gaofd@chinasafety.ac.cn

可能性也就越来越大,而相邻管线的爆炸对于管线安全性能的影响尤为突出。因此,对埋地管线进行抗暴性能研究,以提出相关防护措施变得越来越迫切。

研究土中爆炸冲击波的传播及其与埋地结构相互作用问题常用的有解析解法和数值模拟方法。Kouretzis 等^[1]在忽略土体与结构内部准静态载荷作用并认为埋地管线为3维薄壁弹性柱状壳体的前提下,曾用解析方法推导了弹性介质在地表爆炸载荷作用下管线中应力应变分布函数表达式。国外相关专家也做过一些实测^[2],结果与解析解吻合较好。国内在这些方面的研究尚处于起步阶段,都的箭、王飞^[3,4]等采用实验的方法研究了爆炸产生的冲击波对埋地管线的影响,得出炸药量与爆心距是管道损伤的关键因素。本文将在已有研究基础上,运用 ANSYS/LS-DYNA 软件,对于不同侵入深度和位置的情况进行3维数值模拟,以得到影响埋地管线抗爆性能的主要因素。

1 物理模型和有限元网格划分

1.1 力学模型

考虑到炸药主要作用对象为管道和计算时间的因素,在模拟过程中采用对称性建模,且省略空气域。模型均由炸药、管道和土壤组成,采用3维六面体8节点单元。炸药设置在管道的正上方,尺寸分别为10cm×10cm×10cm、15cm×10cm×10cm;土壤为沙土,尺寸分别为200cm×100cm×200cm、200cm×100cm×300cm,文中选用1/4模型,故而土壤尺寸为100cm×50cm×200cm、100cm×50cm×300cm;管线外径尺寸为15cm,内径为12cm,管道中心距药包中心分别为160和260cm。所采用的边界条件为:前后左右及模型下面均采用非反射边界,上面采用自由边界。具体物理模型(为了更好地显示装药,在厚度上取1/2模型)如图1所示。

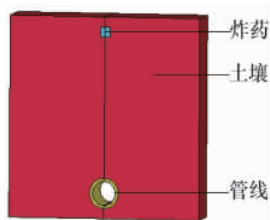


图1 力学模型

Fig. 1 Physical model for mechanics

1.2 有限元网格划分模型

如图1所示 x 方向为水平方向, y 方向为垂直方向,与纸面垂直向外方向为 z 方向(即与管道轴向方向一致)。如上述,在进行数值模拟时将采用1/4模型,选择 LS-DYNA 中自带 SOLID164 六面体单元,分别对炸药、土壤和管道进行划分网格。为了更好的得到映射网格,本文采用切分划分的方式。划分网格之时炸药和土壤采用欧拉单元,管道采用拉格朗日单元。部分网格如图2所示。



图2 有限元模型网格

Fig. 2 Meshing of finite element model

2 材料模型和计算参数

2.1 炸药爆轰产物状态方程

炸药爆炸是一个相对比较复杂的过程,爆轰过程与炸药的化学成分、热力学性能和初始物理参数等密切相关,当炸药引爆后,将在微秒量级范围内放出巨大能量,对目标的作用也有很多形式,例如以冲击波的形式在介质中传播、驱动破片、形成射流等对目标造成毁伤,如何能够准确地描述爆轰过程,在数值计算过程中是必要的。基于实验和理论研究,在分析远场空爆问题中提出了 Hopkinson 立方根相似率公式,为了准确地描述爆轰产物状态方程曾提出 Gruneisen 状态方程和 BKW 方程。目前,在各种爆炸问题中较为常用的是 JWL 状态方程,其中的参数很容易通过实验校准,并已广泛应用于商业计算程序。其公式为

$$P=A \left(1-\frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V}+B \left(1-\frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V}+\frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中, P 为爆炸产生的压力, V 为相对体积, E_0 为单位体积炸药内能, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 分别为实验确定参数。计算中装药密度为 $1.60\text{g}/\text{cm}^3$ TNT 炸药,相关参数^[5]见表1。表中, ρ 为密度, D 为爆速, P_{CJ} 为 CJ 面上的冲击波超压。

表1 JWL 状态方程参数

Table 1 Parameters of JWL equation

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	V
1.600	0.700	0.255	5.4094	0.093726	4.500	1.100	0.350	0.080	1.000

2.2 土壤材料模型

土壤模型为 DYNA 中的 14 号材料 MAT-SOIL-AND-FOAM^[6],其介质应力屈服函数为

$$f=\frac{S_{ij}\delta_{ij}}{2-(a_0 p+a_1 p+a_2 p^2)} \quad (2)$$

式中, S_{ij} 为偏应力张量, δ_{ij} 为 Kronecker 符号, a_0 为土体摩擦角的影响, a_1 为土体黏聚力的影响, a_2 为土体爆炸动载荷效应的影响, p 为压力。具体参数^[7]见表2。表中, r_0 为密度; g 为杨化模量; $bulk$ 为 $vrc=0$ 时的体积模量; $a_0\sim a_2$ 为弹性屈服函数系数; pc 为材料拉伸断裂后的压降; vcr 为冲击条件下材料是否

发生大变形,0为是,1为否;ref为对压力初始化时是否采用参考几何状态,0为否,1为是;eps₂~eps₁₀为体积应变变量,至少

包含2个,最多10个,必须能够完整反映模拟状态;p₂~p₁₀为不同体积应变变量所对应的压力。

表2 土壤模型参数

Table 2 Model parameter values of soil

$r_0/(kg \cdot m^{-3})$	g/MPa	$bulk$	a_0	a_1	a_2	pc/MPa	vcr	ref
1.880	5.14×10^{-4}	2.40×10^{-1}	6.20×10^{-3}	1.67×10^{-7}	0.1126	6.90×10^{-8}	0	0
eps_2	eps_3	eps_4	eps_5	eps_6	eps_7	eps_8	eps_9	eps_{10}
-0.03	-0.06	-0.09	-0.12	-0.15	-0.18	-0.21	-0.3	-0.4
p_2/MPa	p_3/MPa	p_4/MPa	p_5/MPa	p_6/MPa	p_7/MPa	p_8/MPa	p_9/MPa	p_{10}/MPa
7.20×10^{-5}	4.07×10^{-4}	1.12×10^{-3}	2.30×10^{-3}	4.03×10^{-3}	6.35×10^{-3}	9.33×10^{-3}	2.28×10^{-2}	4.27×10^{-2}

2.3 管道材料模型

管道材料模型选用中国管道工程常用钢——X70钢^[8,9]的参数,它具备良好的延展性、无明显的屈服平台,属于弹性均匀型材料,试验温度对动态试验屈服载荷、最大载荷及静态最大载荷影响较小。埋地管线材料本构方程采用随动硬化双线性弹塑模型,遵循 von Mises 屈服准则,表达式为

$$\begin{cases} \sigma = E_s \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_e \\ \sigma = \sigma_y + E_t (\varepsilon - \varepsilon_e) & \varepsilon \geq \varepsilon_e \end{cases} \quad (3)$$

式中, σ 为应力,MPa; σ_y 为屈服应力,MPa; E_s 为弹性模量,GPa; E_t 为切线模量,GPa, $0 < E_t < E_s$; ε 为应变; ε_e 为弹性极限应变。本文所取参数^[10]为:密度 $\rho = 7800 kg/m^3$;泊松比 $\mu = 0.3$;弹性模量 $E_s = 1.0 \times 10^{11} Pa$;屈服应力 $\sigma_y = 3.0 \times 10^8 Pa$;切线模量 $E_t = 5.0 \times 10^8 Pa$ 。

3 数值模拟结果和应力分析

LS-DYNA 程序提供的流固耦合方式有两种:一种是惩罚函数的方式;另一种是约束加速度或者速度的方式。对于惩罚函数耦合方式,程序首先在结构积分耦合点找到相应的流体材料点,并继续跟踪它们的相对位移,然后根据相对位移

量分别给其他结构和流体施加节点力。本文在模拟土中爆炸对埋地管道动力学响应分析的过程中采用惩罚函数的流固耦合方式,并选择在所有的方向上进行耦合。

3.1 数值模拟结果分析

当埋地管线附近出现爆炸时,影响管道受力的因素很多,诸如炸药的 TNT 当量、爆心距、土壤的物理参数、炸药引爆方式等物理因素,完全考虑这些因素确定爆炸冲击波对管道的影响是非常困难的,所以本文主要围绕 TNT 当量和爆心距为研究重点,分别做了以下模拟。

表3 工况列表(单位:cm)

Table 3 List files of design conditions (unit: cm)

工况	装药尺寸	土壤尺寸	爆心距
1	10×10×10	100×50×200	160
2	10×10×10	100×50×200	260
3	15×10×10	100×50×200	260

当炸药爆炸时,迎爆面将是承受冲击波压力最大的位置,下边将围绕迎爆面上正对炸药的单元上的受力进行讨论,受力过程如图3所示。由图3可知,当装药量不变时,随着爆心距的增大,埋地管线的等效应力及各方向的主应力迅

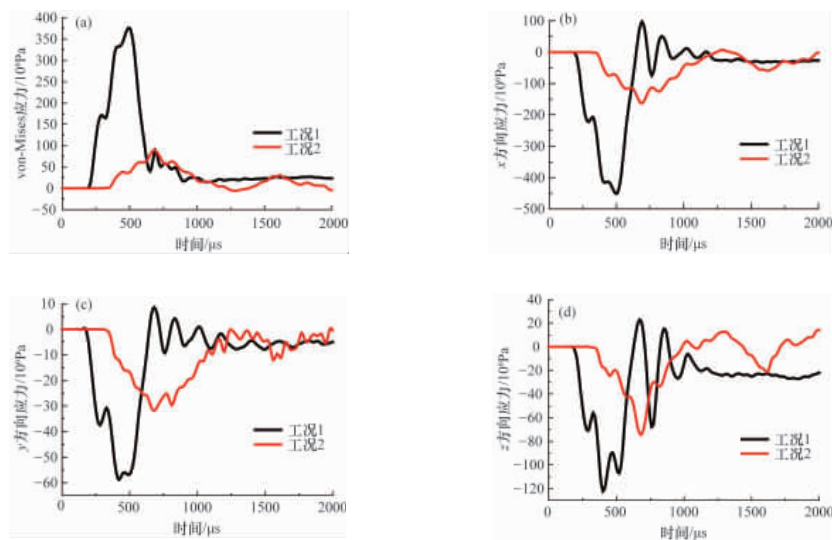


图3 工况1、2受力对比分析((a)为等效应力,(b)~(d)分别为x、y、z方向应力)

Fig. 3 Comparative analysis of conditions 1 and 2 ((a) is effective stress, (b)~(d) are stress in x, y, z axis respectively)

速减小,其中 x 方向受到的主应力较其他两个方向更为敏感。由以上分析可知,当埋地管线附近发生爆炸时,距离爆源较远点的受力可以忽略不计,正对爆心位置即距离爆源最近

点才是承受应力的极大值点。

对比工况 2、3 可知,爆心距相同,工况 3 装药为工况 2 的 1.5 倍。迎爆面上距离爆源最近点的受力过程如图 4 所示。

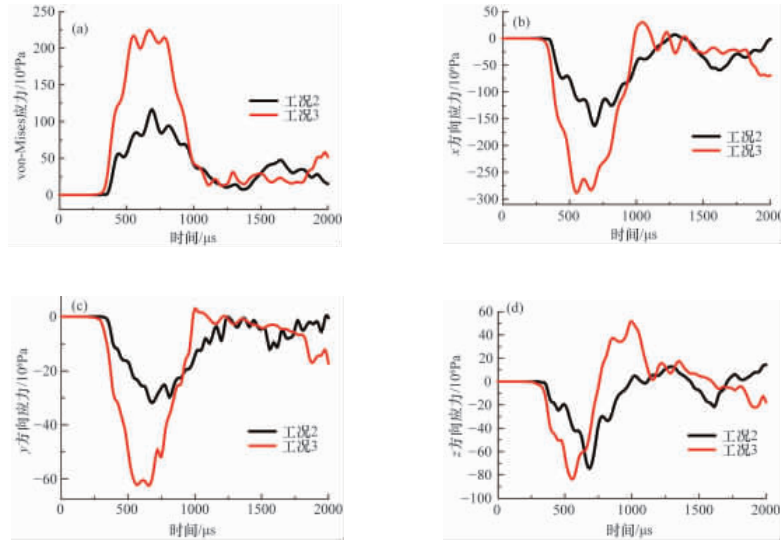


图 4 工况 2、3 受力分析对比 (a) 为等效应力, (b)~(d) 分别为 x 、 y 、 z 方向应力

Fig. 4 Comparative analysis of conditions 2 and 3 ((a) is effective stress, (b)~(d) are stress in x , y , z axis respectively)

当装药量发生变化时,可以看出工况 3 的主应力和 3 个方向的主应力均高出 2~3 倍而非成线性增长,所以可以得到当装药量发生细微变化时,埋地管线所受到的应力将大幅增加的结果,其中 y 和 z 方向的主应力相对 x 方向的主应力来说,对装药量的变化更为敏感。

爆心较近; H314296、H314312 和 H314336 单元为管道非正对侧壁单元。其应力分布如图 6 所示。

3.2 径向应力分析

由以上分析可知,当埋地管线附近发生爆炸时,迎爆面将是受力集中的部分,因此正对爆心的截面将是最危险的截面,故而本文在管道正对爆心的截面上选取 5 个单元,模拟计算其应力变化过程,单元位置如图 5 所示。其中, H314032 单元和 H314016 单元为正对爆心单元,且 H314032 单元距离

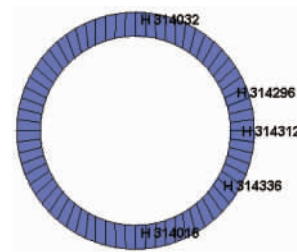


图 5 单元位置和编号

Fig. 5 Elements position and number

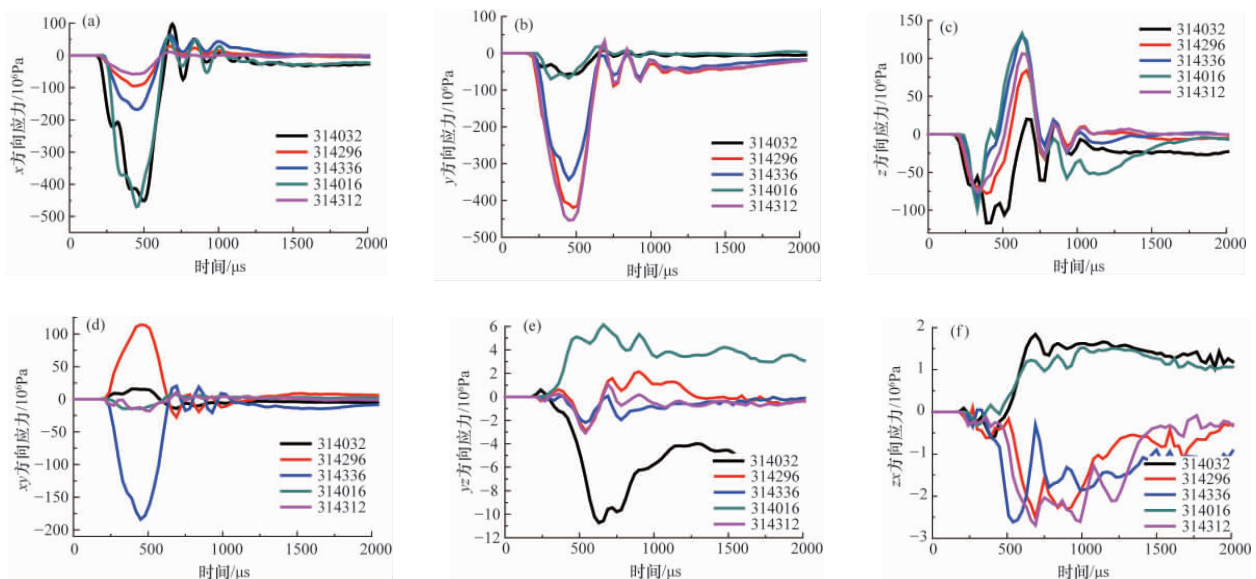


图 6 径向受力分析

Fig. 6 Radial stress analysis

从以上各单元各方向上的应力变化历程可以看出,当爆炸冲击应力波传播至埋地管线时,管线上各方向所受应力很快达到峰值且迅速回落,此后保持在较小的范围内变化,所以埋地管线在受到爆炸载荷作用时可以看做是一个瞬态受力过程。通过比较以上各节点应力值可以看出,在正对爆心的截面上, x 、 y 、 z 和 xy 方向上的应力值较大,而 yz 和 zx 上的应力值则小得多。 σ_x 出现极值的位置在爆心的正下方, σ_y 出现极值的位置在正对爆心位置的管道两侧,并且都呈现压应力形式;而 σ_z 在作用时间内大部分时刻呈现拉应力形式,且其极值位置出现正对爆心的管线截面上最远点。埋地管线抗拉能力一般相对抗压能力较弱,管线受到拉应力破坏是管线破坏的主要原因,所以在管线受到爆炸载荷作用时最危险的位置应该为正对爆心管线截面上的最远点。

4 结论

本文通过 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟计算了爆炸载荷对埋地管线的动力响应,分析了装药量和爆心距对管线所受应力的影响,得到主要结论如下:

(1) 通过对比工况 1 和工况 2 可知,当装药量相同,随着爆心距的增大,埋地管线上等效应力以及 3 个方向上的主应力迅速减小,其中 x 方向的主应力对于爆心距的变化最为敏感;通过对比工况 2 和工况 3 可知,当爆心距相同,随着装药量的增大,埋地管线上等效应力以及 3 个方向上的主应力迅速增大,其中 y 方向的主应力和 z 方向的主应力对于装药量的变化相对 x 方向更为敏感。根据埋地管线受拉破坏原则可知,当装药量和爆心距都发生细微变化时,装药量对于管道破坏效应要更为显著。

(2) 由径向应力分析可知管线在正对爆心截面上受到的轴向拉应力作用,比其他各侧面在各个方向上受到的压应力作用以及与 2 个侧面上在 xy 方向上受到的剪应力作用都要大很多,且由于管线的抗拉强度和抗剪强度远远低于管线的抗压强度,因此综合分析可知,土中爆炸冲击作用下的埋地管线首先受轴向拉力,使正对爆心管线截面的最远点破坏。

参考文献 (References)

- [1] Kouretzis G P, Bouchovalas G D, Gantes C J. Analytical calculation of blast-induced strains to buried pipelines [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(10): 1683-1704.
- [2] Siskind D E, Stagg M S, Wiegand J E, et al. Surface mine blasting near pressurized transmission pipelines [R]. Report of Investigations 9523, Washington, DC: Bureau of Mines, US Department of the Interior, 1994.
- [3] 都的箭, 马书广, 杨惊东. 埋地管道爆炸地冲击作用的试验研究[J]. 工程爆破, 2006, 12(2): 19-23.
Du Dijian, Ma Shuguang, Yang Jingdong. Engineering Blasting, 2006, 12(2): 19-23.
- [4] 王飞, 王连来, 刘广初. 爆炸荷载对天然气管道(空管)的破坏作用研究[J]. 爆破, 2006, 23(4): 20-24.
Wang Fei, Wang Lianlai, Liu Guangchu. Blasting, 2006, 23(4): 20-24.
- [5] 王跃先, 陈军, 阮雪榆. ALE 有限元方法中的网格运动算法[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(10): 1539-1542.
Wang Yuxian, Chen Jun, Ruan Xueyu. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(10): 1539-1542.
- [6] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyboard manual user's [R]. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [7] 时党勇, 李裕春, 张胜民, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Shi Dangyong, Li Yuchun, Zhang Shengmin, et al. Dictionary dynamic analysis based on ANSYS/LS-DYNA 8.1[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [8] 杨政, 郭万林, 董惠茹, 等. X70 管线钢静态和动态韧性试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(5): 488-491.
Yang Zhen, Guo Wanlin, Dong Huiru, et al. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(5): 488-491.
- [9] 贾普荣, 李年, 朱维斗. 反向加载时 X70 钢的力学性能 [J]. 机械强度, 2005, 27(1): 82-84.
Jia Purong, Li Nian, Zhu Weidou. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(1): 82-84.
- [10] 王万鹏. 混凝土加固钢壳结构内爆响应的数值模拟研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
Wang Wanpeng. Numerical simulation of dynamic response of resisting explosive load in steel concrete encapsulation [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.

(责任编辑 朱宇)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。