

爆炸载荷作用下焊缝区附近埋地X70钢管的动力响应分析

李正鹏 曲艳东

Dynamic Response Analysis of Buried X70 Steel Pipe near Weld Zone under Blast Loads

LI Zhengpeng, QU Yandong

引用本文:

李正鹏, 曲艳东. 爆炸载荷作用下焊缝区附近埋地X70钢管的动力响应分析[J]. 高压物理学报, 2020, 34(3):034204. DOI: 10.11858/gywlxb.20190831

LI Zhengpeng, QU Yandong. Dynamic Response Analysis of Buried X70 Steel Pipe near Weld Zone under Blast Loads[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(3):034204. DOI: 10.11858/gywlxb.20190831

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190831

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地下管廊在燃气爆炸作用下的动力响应分析

Dynamic Response Analysis of Underground Pipe Gallery under Gas Explosion 高压物理学报. 2018, 32(6): 064104 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180544

聚脲涂覆钢板在爆炸载荷作用下的动态响应

Dynamic Response of Polyurea Coated Steel Plate under Blast Loading 高压物理学报. 2019, 33(2): 024103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180650

内部爆炸载荷下泡沫铝夹心柱壳动态响应仿真研究

Dynamic Response of Sandwich Cylinders Cored with Aluminum Foam under Internal Blast Loading 高压物理学报. 2018, 32(2): 024101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170596

钢纤维混凝土板在冲击与爆炸荷载下的K&C模型

K&C Model of Steel Fiber Reinforced Concrete Plate under Impact and Blast Load 高压物理学报. 2020, 34(3): 024201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190853

压剪载荷作用下TB6钛合金的动态力学性能

Dynamic Behavior of TB6 Titanium Alloy under Shear-Compression Loading 高压物理学报. 2019, 33(2): 024206 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190713

GFRP增强圆钢管在低速冲击荷载作用下的应变率效应

Strain Rate Effect of GFRP-Reinforced Circular Steel Tube under Low-Velocity Impact 高压物理学报. 2019, 33(4): 044203 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180653 DOI: 10.11858/gywlxb.20190831

爆炸载荷作用下焊缝区附近埋地 X70 钢管的动力响应分析

李正鹏1,曲艳东1,2

(1. 辽宁工业大学土木建筑工程学院,辽宁 锦州 121001;2. 大连民族大学土木工程学院,辽宁 大连 116650)

摘要:爆破地震效应对埋地管线的影响已成为工程爆破领域研究的热点。基于有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,以两种含Y型焊缝(坡口有2mm余高焊缝和坡口无余高焊缝)的埋地X70 钢管为例,数值模拟研究了TNT炸药量相同(4.473 kg)而炸高(60.0、85.0和110.0 cm)不 同时,焊缝区附近埋地X70钢管的动力响应规律。研究表明:当炸高为60.0 cm时,焊缝有余高 的管道受应力集中的影响较大,且先于焊缝无余高的管道进入屈服阶段;当炸高为60.0和85.0 cm 时,焊缝有余高的管道整体抵抗变形的能力明显弱于焊缝无余高的管道。管土间的相互作用对 X70管道背爆面有支撑作用,可有效地减小管道背爆面的位移。在相同条件下,焊缝有余高的X70 管道抵抗振动的性能弱于焊缝无余高的管道,且与焊缝形式相比,炸高对含焊缝区的X70管道 的最大振速起主要影响作用。

关键词:爆炸载荷; X70 钢管; 埋地管线; 动力响应中图分类号: O383.1; TE973文献标识码: A

作为液体和气体长距离运输的一种重要方式,管道运输在国家经济发展和国民生活中发挥着重要 作用。然而,随着城镇化进程的加速,城市管网系统密集分布,爆炸作用引起的管道安全问题受到国内 外广泛关注^[1-3]。都的箭等^[4]通过实验研究发现,正对爆心管段背面受到很大的轴向拉应力作用,且管 道受爆炸载荷的影响主要与爆心距有关。Ji等^[5]研究了X70钢管在局部爆炸载荷下的动力响应,发现 管道的挠度和损伤程度随炸药量和接触面积的增大而增大,且壁厚对管道损伤和失效后的运动有重要 作用。数值模拟是研究爆炸问题的一种重要方法,只要方法得当,模拟效果可与实际情况相吻合^[6-7]。 为此,梁政等^[8]利用数值模拟方法研究了管道埋深、药量和管道壁厚因素对爆炸载荷下的埋地管道动 力响应的影响。房冲^[9]通过模拟研究发现,在爆炸载荷下充水管道的变形量、位移和峰值压强都比内 空管道小。余洋等^[10]采用野外实验与数值计算相结合的方法研究了初始条件对钢质方管在侧向局部 爆炸载荷作用下损伤破坏效应的影响。

迄今为止,对爆炸载荷作用下焊缝区附近埋地钢管的动力响应的相关研究鲜有报道。基于此,以两种含Y型焊缝(坡口有2mm余高焊缝和坡口无余高焊缝)的埋地X70钢管为例,采用有限元软件ANSYS/LS-DYNA,数值模拟研究爆炸载荷作用下焊缝区附近埋地X70钢管的动力响应规律,以期为埋地管线附近的爆破施工设计和埋地管线的安全防护提供一定的理论参考。

^{*} 收稿日期: 2019-09-04;修回日期: 2019-10-19

基金项目:国家自然科学基金(11302094);辽宁省高等学校优秀人才项目(LJQ2014063);辽宁省自然科学基金(20170540441)

作者简介:李正鹏(1993-),男,硕士研究生,主要从事爆炸力学与爆炸安全研究. E-mail: 17839988929@163.com

通信作者:曲艳东(1978-),男,博士,教授,主要从事爆炸力学与爆炸安全研究. E-mail:plxfeng2009@sohu.com

第3期

1 有限元模型

1.1 计算模型

采用 cm-g-µs 单位制, 建立由 TNT 炸药、黄土 和焊接管道组成的计算模型, 如图 1 所示。模型 纵向长 38.4 cm, 管道中心到模型侧面的宽度为 130.0 cm, 模型整体高 271.6 cm, 其中: TNT 炸药为 边长 14.0 cm 的正方体, 采用中心起爆方式; 焊接 管道为外径 1 016.0 mm、壁厚 14.6 mm的 X70 钢 管。焊缝选取两种尺寸^[11], 分别为 Y 型坡口有余 高 (*H* = 2.0 mm) 焊缝和 Y 型坡口无余高 (*H* = 0) 焊 缝, 如图 2 所示。为了提高计算收敛速度, 将焊缝 尺寸设计图进行适当的简化, 简化模型如图 3 所 示。两种焊缝均不考虑分层焊接工艺的影响, 焊 缝与管道采用共节点方式连接。

考虑到计算模型的对称性,取 1/2 模型建模。炸药、黄土、管道及焊缝选用 SOLID164 六面体实体单元,用扫掠方式划分网格,并对焊缝位置



进行网格细化处理。炸药和黄土采用欧拉网格,焊接管道和焊缝采用拉格朗日网格,运用任意拉格朗 日-欧拉算法及管土间流固耦合算法模拟爆炸载荷作用下埋地焊接管道的动力响应。在土体外侧和底 面设置透射边界条件,模型对称面施加对称约束。



1.2 计算工况

为了初步揭示爆炸载荷作用下两种焊缝形式的埋地焊接管道的动力响应规律,选取药包尺寸为 14.0 cm×14.0 cm×14.0 cm的TNT炸药,对埋深为1.5 m的焊缝有余高(*H*=2.0 mm)管道(管道 A)和焊 缝无余高(*H*=0)管道(管道 B),在炸高分别为60.0、85.0 和110.0 cm的3种条件下的6种工况进行模 拟计算,如表1所示,其中,*h*_B为炸高。

夜1 月昇工元 Table 1 Calculation conditions				
Weld type	Buried depth of pipeline/m	Size of TNT/(cm \times cm \times cm)	$h_{\rm B}/{ m cm}$	
No weld reinforcement $(H=0)$	1.5	$14.0\times14.0\times14.0$	60.0, 85.0, 110.0	
Weld reinforcement ($H = 2.0 \text{ mm}$)	1.5	$14.0\times14.0\times14.0$	60.0, 85.0, 110.0	

1.3 材料参数

TNT 炸药选用高能炸药模型(Mat_High_Explosive_Burn)和 JWL 状态方程定义。JWL 状态方程表达式为

$$p_{z} = A\left(1 - \frac{\omega}{R_{1}\nu}\right)e^{-R_{1}\nu} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_{2}\nu}\right)e^{-R_{2}\nu} + \frac{\omega E}{\nu}$$
(1)

式中: p_z 为爆炸产物的压力,A、B、 R_1 、 R_2 、 ω 为 TNT 材料常数,v为爆炸产物的相对比容,E为炸药初始内能。炸药密度 ρ_x 、爆速D以及 JWL 状态方程参数见表 $2^{[12]}$ 。

表 2 炸药材料参数^[12] Table 2 Material parameters of explosive^[12]

$ ho_{\rm z}/({ m g}\cdot{ m cm}^{-3})$	$D/(\mathbf{m}\cdot\mathbf{s}^{-1})$	p/GPa	A/GPa	<i>B</i> /GPa	R_1	R_2	ω	$E/(J \cdot cm^{-3})$
1.58	6 930	21	373.77	3.75	4.15	0.90	0.35	6 000

黄土选用泡沫模型(Mat_Soil_and_Foam)描述。该材料模型的应力屈服常数f为

$$f = S_{ij}\delta_{ij}/2 - (a_0 + a_1p_t + a_2p_t^2)$$
(2)

式中: S_{ij} 为土体材料的 Cauchy 偏应力张量, δ_{ij} 为土体材料的 Kronecker 系数, a_0 、 a_1 、 a_2 分别为土体摩擦 角、土体黏聚力和土体爆炸动载效应的影响系数, p_t 为土体压力。 a_0 、 a_1 、 a_2 由土工实验测得的内摩擦 角和土壤黏聚力参数确定, 土体密度 ρ_i 、剪切模量 G、体积模量 K等参数见表 $3^{[13-14]}$ 。

表 3 土体材料参数^[13-14] Table 3 Material parameters of soil^[13-14]

$ ho_{t}/(g\cdot cm^{-3})$	G/MPa	K/MPa	a_0/Pa^2	a_1 /Pa	a_2
1.8	41.14	87.87	2.12×10^8	5.23×10^3	$3.22 imes 10^{-2}$

X70 钢管道和焊缝均采用双线性随动材料模型(Mat_Plastic_Kinematic)描述, 遵循 von Mises 屈服 准则, 其表达式为

$$\sigma = \begin{cases} E_{s}\varepsilon & \varepsilon \leqslant \varepsilon_{e} \\ \sigma_{y} + E_{i}(\varepsilon - \varepsilon_{e}) & \varepsilon > \varepsilon_{e} \end{cases}$$
(3)

式中: σ 为应力; σ_y 为屈服应力; E_s 为弹性模量; E_t 为切线模量, $0 < E_t < E_s$; ε 为应变; ε_e 为弹性极限应 变。管道和焊缝的具体材料参数见表 4^[15-18], 其中, μ 为泊松比。

表 4 管道及焊缝材料参数[15-18]					
Table 4 Material parameters of pipe and weld bead ^[15-18]					
Material	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	μ	E _s /GPa	E _t /GPa	σ _y /GPa
X70-pipeline ^[15–16]	7.90	0.3	210	13.5	0.48
Weld bead ^[17-18]	7.25	0.3	220	15.3	0.55

2 结果与讨论

2.1 管道应力分析

图 4 为边长 14.0 cm 的正方体 TNT 炸药爆炸时, 炸高 h_B 为 60.0 cm, 埋深为 1.5 m 的两种 X70 管道 焊缝附近的 von-Mises 应力云图。由图 4 可以看出: 当传播时间为 1 440 μs 时, 爆炸应力波阵面已经接 触管道; 当传播时间为 1 600 μs 时, 焊缝有 2.0 mm 余高的管道 A 和焊缝无余高的管道 B 的最大应力增 幅分别为 81.4 MPa 和 43.0 MPa; 当传播时间为 1 920 μs 时, 管道 A 和管道 B 的最大应力均大于焊缝与 管道的材料屈服应力, 且应力沿迎爆面正对爆心位置向外扩展, 其中管道 A 的应力呈"十"字形扩展, 而 管道 B 的应力以椭圆形向四周扩展; 在 3 520 μs 时, 管道应力集中主要沿裂缝位置发展, 管道 A 和管道 B 的应力最大值分别为 601.2 MPa 和 591.0 MPa; 在 6 080 μs 时, 管道 A 和管道 B 继续变形但应力减小, 应 力最大值分别减小到 581.8 MPa 和 565.8 MPa; 在 9 120 μs 时, 管道 A 和管道 B 的应力集中基本消失。



Fig. 4 von Mises stress of X70 steel pipe at different moments

图 5 和图 6 分别为两种管道外表面上正对爆心位置的焊缝与管道分界面处焊缝单元与管道单元 的应力时程曲线。在管道受爆炸载荷作用阶段,两种管道的应力在大约 480 μs 内呈跳跃式上升。其主 要原因是管道为瞬时受力,一部分爆炸能量使管道变形并向管道四周传递,导致焊缝与管道分界面处 两个典型单元的应力呈降低趋势,此现象与图 4 的应力云图吻合。根据应力集中系数和余高关系的经 验公式^[19]可得:管道 A 和管道 B 的应力集中系数分别为 1.016 和 1.008,即随着余高增大,应力集中系 数逐渐增大。对比图 5 和图 6 可知,管道 A 的焊缝单元应力峰值较高,应力下降趋势相对较陡。这也 说明焊缝余高的存在使得焊缝与管道分界面的截面尺寸突变增大,从而导致焊缝有余高的焊接管道受 应力集中的影响较大。在 1 912 μs 时,图 5(管道 A)和图 6(管道 B)的焊缝单元应力最大,分别约为 560.0 MPa(焊缝的屈服强度为 550 MPa)和 545.6 MPa。同时,管道 A 的焊缝处首先达到管道屈服强度 (480 MPa),按照 von Mises 屈服准则,管道 A 开始进入局部塑性变形阶段,此时管道 B 的应力尚未达到 材料的屈服强度。



2.2 管道位移分析

埋地 X70 管道的迎爆面和背爆面的最大位移如表 5 所示。从表 5 可知,由于爆炸冲击波的一部分能量在土中被耗散,且随着爆炸冲击波在土中传播距离的增大,两种焊缝形式管道的迎爆面和背爆面的最大位移均呈现减小的趋势。当炸高 h_B从 60.0 cm 增加到 85.0 cm 以及从 85.0 cm 增加到 110.0 cm 时,管道 A 和管道 B 迎爆面的最大位移减小量分别为 2.303 cm、0.715 cm 和 2.300 cm、0.572 cm,而管道 A 和管道 B 背爆面的最大位移减小量分别为 0.391 cm、0.235 cm 和 0.373 cm、0.280 cm。两种焊缝形式管道迎爆面的最大位移减小量大于背爆面,这是由于爆炸冲击载荷在土中传播后直接作用于管道迎爆面,对管道迎爆面产生的影响较大,土体对管道背爆面具有一定的支撑作用,从而减小了管道背爆面位移。在相同炸高下管道 A 比管道 B 的最大位移大,且在炸高为 60.0、85.0 和 110.0 cm 时,两种焊缝形式管道迎爆面的最大位移差值分别为 0.270、0.267 和 0.124 cm,即随着炸高的增大,两种焊缝形式的埋地焊接管道最大位移的差值逐渐减小,也说明当炸高较小时,管道 A 整体抵抗变形的能力弱于管道 B。然而,随着炸高的增大,作用于管道的能量减小^[20],管道塑性变形较小,使得这种现象逐渐模糊。

Types of weld	h _B /cm	Maximum displacement/cm		
Types of weid		Explosion-front surface	Explosion-back surface	
	60.0	5.482	0.846	
Weld reinforcement ($H = 2.0 \text{ mm}$)	85.0	3.179	0.455	
	110.0	2.464	0.220	
	60.0	5.212	0.943	
No weld reinforcement $(H=0)$	85.0	2.912	0.570	
	110.0	2.340	0.290	

表 5 埋地 X70 管道的迎爆面和背爆面的最大位移 Table 5 Maximum displacement of explosion-front and explosion-back surfaces of buried X70 pipeline

2.3 管道等效应变分析

表 6 为两种不同类型焊缝的埋地焊接管道在不同炸高下的最大等效应变统计。从表 6 可知,管道 A 和管道 B 的最大等效应变均随炸高的增大而减小。当炸高从 60.0 cm 增大到 85.0 cm 时,管道 A 和管道 B 的最大等效应变分别减小约 58.12% 和 61.13%;当炸高从 85.0 cm 增大到 110.0 cm 时,管道 A 和管道 B 的最大等效应变分别减小约 45.92% 和 38.05%,在炸高相同时,管道 A 的最大等效应变大于管道 B,且 管道 A 的最大等效应变位于焊缝余高表面,而管道 B 的最大等效应变在焊缝与管道处一定范围内沿纵 向分布。这在一定程度上说明管道 B 能更好地协 调焊缝与管道分界处的应变, 有利于保障焊缝与 管道的局部协同变形性能。

2.4 管道振速分析

表 7 为不同炸高下两种焊缝形式管道的迎爆 面和背爆面处焊缝位置中心单元 X 方向的最大振 动速度。从表 7 可以看出,两种焊缝形式管道的 迎爆面和背爆面的最大振动速度均随着炸高增大 而减小,且迎爆面的最大振速均大于背爆面。这 说明迎爆面受爆炸地震波的影响较大。当炸高

表 6 不同炸高时埋地 X70 管道的最大等效应变

Table 6	Maximum effective strain of buried X70 pipeline
	with different blasting heights

Types of weld	$h_{\rm B}/{ m cm}$	Peak effective strain/10 ⁻³
Weld reinforcement $(H = 2.0 \text{ mm})$	60.0	9.937
	85.0	4.162
	110.0	2.251
N	60.0	6.877
No weld reinforcement $(H=0)$	85.0	2.673
	110.0	1.656

*h*_B为60.0、85.0和110.0 cm时,管道B的迎爆面的最大振动速度较管道A大,迎爆面差值分别为1.600、0.539和0.329 m/s,而背爆面差值在0.200 m/s 以内。管道峰值速度随着管壁厚度的增大而减小^[12],由于管道A增加了管道在焊缝位置的径向厚度,可将其视为管道焊缝位置的壁厚增大导致管道A的峰值振速减小。这说明管道A抵抗爆炸振动的性能优于管道B,且在炸高为60.0 cm时,管道A抵抗振动性能的优势较为明显。

表 7 埋地 X70 管道的迎爆面和背爆面最大振速 Table 7 Maximum vibration velocity of explosion-front and explosion-back surfaces of buried X70 pipeline

T	I. /	Maximum vibratio	Maximum vibration velocity/(m·s ⁻¹)		
Types of weid	n _B /cm	Explosion-front surface	Explosion-back surface		
	60.0	22.748	4.431		
Weld reinforcement ($H = 2.0 \text{ mm}$)	85.0	9.316	2.817		
	110.0	4.503	1.693		
	60.0	24.348	4.294		
No weld reinforcement $(H=0)$	85.0	9.855	2.867		
	110.0	4.832	1.746		

图 7 为不同炸高时两种焊缝形式的管道典型 单元的速度时程曲线。当炸高 h_B 分别为 60.0、 85.0 和 110.0 cm 时, 管道 A 和管道 B 达到最大振 速的时间分别为 2 560 μs 和 2 560 μs、4 500 μs 和 4 600 μs、7 200 μs 和 7 200 μs, 两种焊缝形式的管 道达到最大振速的时间差值均在 100 μs 以内。这 说明两种焊缝形式的管道达到最大振速的时间主 要受炸高的影响, 受焊缝形式的影响较小。

3 结 论

(1)当炸高为 60.0 cm 时, 两种焊缝形式的埋 地 X70 焊接管道在爆炸载荷作用下焊缝位置均出 现应力集中, 但焊缝有余高的管道受应力集中影 响较大, 且会先于焊缝无余高管道进入屈服阶段。



Fig. 7 Velocity-time curve of typical pipeline elements

(2)当炸高为60.0~110.0 cm时,由于爆炸载荷直接作用于迎爆面,且管土间的相互作用对管道背爆面具有一定的支撑作用,两种焊缝形式管道迎爆面的最大位移均大于背爆面的最大位移。当炸高为

60.0、85.0 cm 时,焊缝有余高的管道整体抵抗变形的能力明显弱于焊缝无余高的管道。

(3)焊缝无余高管道较焊缝有余高管道在焊缝与管道分界处的应变更为协调,能更好地保障焊缝 与管道的局部协同变形性能。

(4) 在相同的爆炸载荷下,焊缝有余高管道抵抗振动的性能优于焊缝无余高管道。药量相同条件 下,相对于焊缝形式,炸高对含焊缝区管道的最大振速起主要作用。

参考文献:

- [1] 董绍华, 韩忠晨, 刘刚. 管道系统完整性评估技术进展及应用对策 [J]. 油气储运, 2014, 33(2): 121–128.
 DONG S H, HAN Z C, LIU G. Advancement and application measures of pipeline integrity assessment technology [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(2): 121–128.
- [2] 张震,周传波,路世伟,等.爆破振动作用下邻近埋地混凝土管道动力响应特性 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 46(9): 79-84.

ZHANG Z, ZHOU C B, LU S W, et al. Dynamic response characteristic of adjacent buried concrete pipeline subjected to blasting vibration [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 46(9): 79–84.

[3] 钟冬望, 黄雄, 卢哲, 等. 爆破荷载作用下不同尺寸埋地钢管的动态响应实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(13): 219-223.

ZHONG D W, HUANG X, LU Z, et al. Experimental study on dynamic response of buried steel tubes with different sizes under blasting loading [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(13): 219–223.

- [4] 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 D J, MA S G, YANG J D. Experimental study of dynamical stress of buried pipelines under explosion ground shock waves
 [J]. Engineering Blasting, 2006, 12(2): 19–23.
- [5] JI C, SONG K J, GAO F Y, et al. Experimental and numerical studies on the deformation and tearing of X70 pipelines subjected to localized blast loading [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 107: 156–168.
- [6] QU Y D, LIU W L, GWARZO M, et al. Parametric study of anti-explosion performance of reinforced concrete T-shaped beam strengthened with steel plates [J]. Construction and Building Materials, 2017, 156(15): 692–707.
- [7] 曲艳东, 刘万里, 翟诚, 等. 水下爆破破冰爆炸冲击波传播规律数值分析 [J]. 爆破, 2017, 34(2): 100-104. QU Y D, LIU W L, ZHAI C, et al. Numerical simulation of propagation law of shock waves in process of breaking ice by underwater blasting [J]. Blasting, 2017, 34(2): 100-104.
- [8] 梁政,张澜,张杰. 地面爆炸载荷下埋地管道动力响应分析 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3): 158–163. LIANG Z, ZHANG L, ZHANG J. Dynamic response analysis of the underground-buried pipeline under the ground-surface explosive load [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(3): 158–163.
- [9] 房冲. 内空和充水管道在爆炸冲击荷载下的数值模拟分析 [J]. 山西建筑, 2017, 43(11): 130–132. FANG C. The numerical simulation analysis of inner air pipes and water-filled pipes on the basis of explosive blast [J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(11): 130–132.
- [10] 余洋,纪冲,周游,等. 侧向局部爆炸荷载下钢质方管的损伤破坏及影响因素研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(15): 191–198.
 YU Y, JI C, ZHOU Y, et al. Damage and failure of steel square tubes under lateral local explosion loading and their influencing factors [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15): 191–198.
- [11] 杨天冰, 郭瑞杰. X70 管道环焊缝接头残余应力数值模拟 [J]. 电焊机, 2008, 38(11): 9-14.
 YANG T B, GUO R J. Residual stress simulation of X70 pipeline girth welding joint [J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(11): 9-14.
- [12] 曲艳东,杨尚,李思宇,等. TNT 炸药爆炸场中三波点的数值模拟 [J]. 工程爆破, 2019, 25(1): 1–6.
 QU Y D, YANG S, LI S Y, et al. Numerical simulation of triple point in the explosion field of TNT explosive [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(1): 1–6.
- [13] 李海超,魏连雨,常春伟.黄土中爆炸挤密实验与数值模拟 [J].爆炸与冲击, 2018, 38(2): 289–294.
 LI H C, WEI L Y, CHANG C W. Experiment and numerical simulation of explosion compaction in loess [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 289–294.
- [14] 杨秀敏. 爆炸冲击现象数值模拟 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 335-338.

YANG X M. Numerical simulation for explosion and phenomena [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2010: 335–338.

[15] 倪玲英, 郎健, 陈良路. 爆炸载荷作用下海底管道动力响应数值模拟 [J]. 油气储运, 2018, 37(2): 222-227.

NI L Y, LANG J, CHEN L L. Numerical simulation on the dynamic response of submarine pipelines under blast loading [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(2): 222–227.

[16] 姚安林, 赵师平, 么惠全, 等. 地下爆炸对埋地输气管道冲击响应的数值分析 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2009, 31(4): 168–172.

YAO A L, ZHAO S P, YAO H Q, et al. Numerical simulation of response of underground explosion ground shock to buried gas pipeline [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(4): 168–172.

- [17] 蒋勇. 超低氢高韧性 X70 管线钢配套焊条 CHE607GX 的研制及应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006: 5-46.
 JIANG Y. Study on ultra-low hydrogen high strength CHE607GX electrode for X70 pipeline [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006: 5-46.
- [18] 邓祎楠. X70 管线钢液相扩散焊数值模拟 [D]. 北京: 北京石油化工学院, 2017: 11–66.
 DENG Y N. Numerical simulation of transient liquid phase welding of X70 pipeline steel [D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2017: 11–66.
- [19] 王福山, 孙杨, 杨鑫华. 基于 Battelle 结构应力法的对接接头应力集中系数回归分析 [J]. 焊接技术, 2019, 48(6): 76-80.
 WANG F S, SUN Y, YANG X H. Regression analysis of stress concentration coefficient of butt joint based on battelle structural stress method [J]. Welding Technology, 2019, 48(6): 76-80.
- [20] 黄雄. 爆破荷载作用下埋地钢管的动力响应研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018: 17-46.
 HUANG X. Dynamic response of buried steel pipe subjected to blast loads [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018: 17-46.

Dynamic Response Analysis of Buried X70 Steel Pipe near Weld Zone under Blast Loads

LI Zhengpeng¹, QU Yandong^{1,2}

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China;
 2. College of Civil Engineering, Dalian Minzu University, Dalian 116650, Liaoning, China)

Abstract: The influence of blasting seismic effect on buried pipes has been an important research hotspot in the field of engineering blasting. Taking two kinds of buried X70 steel pipes with Y-type welds (groove with 2 mm weld reinforcement and groove without weld reinforcement) as examples, the dynamic behaviors of buried X70 steel pipes near the weld zone under blast loads were studied numerically by the finite element software ANSYS/LS-DYNA. The blast loads are formed by detonating 4.473 kg TNT with different blast heights (60.0, 85.0 and 110.0 cm). The results show that when the blast height is 60.0 cm, the pipe with weld reinforcement is greatly affected by stress concentration and that it yields earlier than the pipe without weld reinforcement to resist deformation is significantly weaker than that of the pipe without weld reinforcement. The interaction between soil and pipe supports the explosion-back surface of the X70 pipe, which can effectively reduce the displacement of the explosion-back surface of the X70 pipe. Under the same conditions, the vibration resistance performance of the X70 pipe with weld reinforcement is weaker than that of pipe without weld reinforcement. Moreover, compared with the weld form, blast height plays an important role in the maximum vibration velocity of the X70 pipe near weld zone.

Keywords: blast loads; X70 steel pipe; buried pipeline; dynamic response