

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.02.011

# 中硬岩管沟爆破对近距离既有管道的影响<sup>\*</sup>

费鸿禄  谭文华  周健华  蒋安俊  
辽宁工程技术大学爆破技术研究院(辽宁阜新,123000)

[摘  要]  为研究中硬岩管沟爆破时10~20 m范围内既有并行管道所受到的影响,进行现场爆破试验,并采用ANSYS/LS-DYNA数值模拟软件来研究既有管道的地表质点振速峰值和管沟成型效果,得出适用于中硬岩地段管沟开挖的爆破参数,并分析了既有管道迎爆面和背爆面的振动响应。研究表明:管沟爆破试验的振速均能保证既有管道的安全,试验2<sup>#</sup>的爆破参数更适合中硬岩岩石;垂直地表方向(*Y*方向)的质点振速峰值最大,且振动速度随着爆心距的增大呈非线性减小;既有管道在迎爆面受到的扰动大于背爆面,迎爆面*Y*方向的应力、振速均最大。

[关键词]  中硬岩;管沟爆破;既有管道;地震波传播;振速

[分类号]  TD235;O382<sup>+.2</sup>

## Influence of Pipe Trench Blasting of Medium Hard Rock on Close Distance Existing Pipeline

FEI Honglu, TAN Wenhua, ZHOU Jianhua, JIANG Anjun  
Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

[ABSTRACT]  In order to study the influence of pipe trench blasting on the parallel pipeline with a distance of 10-20 m, field blasting test was conducted and ANSYS/LS-DYNA numerical simulation software was used to study the peak vibration velocity of the existing pipeline and the forming effect of the tube groove. Appropriate blasting parameters were obtained to be applied in the excavation of medium hard rock, and the vibration response of the pipeline was analyzed by numerical simulation. Results show that vibration velocity in blasting test can ensure the safety of the existing pipeline, and the blasting parameters of Test 2<sup>#</sup> are more suitable for the medium hard rock. The maximum peak vibration velocity is in the direction of vertical surface (*Y* direction), and vibration velocity decreases linearly with the increase of distance. Disturbance at attack surface of the existing pipeline is greater than that at the backplane, and the stress and speed in *Y* direction at attack surface are the largest.

[KEYWORDS]  medium hard rock; pipe trench blasting; existing pipeline; propagation of seismic waves; vibration velocity

## 引言

随着我国天然气工业的迅速发展和能源需求的不断增长,传统单条管道的运输能力已经不能满足需求<sup>[1-2]</sup>。在既有管道附近增建新的输送管道可以满足输送能力的不足,同时也方便施工与维护,能有效提高输送能力。于是近年来,新建管道与原有管道并行或交叉的现象逐渐增多,比如西二线和涩宁兰复线<sup>[3]</sup>。管道途经石方地段时,爆破开挖作为一

种高效、经济的施工方法,在实际建设工程中的作用无以替代。特别是随着爆破器材、钻孔机具、爆破工艺的改进以及爆破技术的创新,都带来石方管沟爆破技术的发展<sup>[4-5]</sup>。

中国石油天然气集团公司于2010年发布的Q/SY 1358—2010油气管道并行敷设技术规范规定:石方地段新建管沟开挖与既有管道并行间距大于10 m且小于或等于20 m时,若采用爆破方式开挖,应论证爆破方案的可行性,若既有管道处的质点振速峰值小于10 cm/s,即视为既有管道安全<sup>[6-8]</sup>。

本文中,以现场爆破试验为依据,对10~20 m

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-10-27  
作者简介:费鸿禄(1963-),男,教授,博导,主要从事工程爆破、地下工程教学和科研工作。E-mail:feihonglu@163.com  
通信作者:谭文华(1994-),男,硕士,主要从事爆破方面的研究。E-mail:1715001842@qq.com

近距离范围内中硬岩管沟爆破开挖方案的可行性进行研究,在保证近距离既有管道安全的前提下,分析管沟爆破的成型效果,为今后类似工程提供参考。

## 1 爆破参数设计及单孔爆破试验

### 1.1 试验场地概况

试验场地位于辽宁省阜新市建设镇的新德石灰石矿。该石灰石矿资源丰富,矿物主要成分是方解石,此外还含有白云石、菱铁矿、石英、长石、云母等矿物质,其主要化学成分是碳酸钙。通过对现场实地考察,发现石灰石的普氏硬度系数为6~15,有属于中硬岩范畴的岩石,而且新德石灰石矿地势平坦,场地面积足够大,方便现场试验和仪器监测。

### 1.2 爆破参数设计

#### 1.2.1 炮孔直径及深度

考虑管沟爆破尺寸和钻孔机具的因素,钻孔直径取89 mm。管沟炮孔深度为:

$$L=H+h。$$

(1)

式中: $L$ 为炮孔深度; $H$ 为管沟的设计深度, $H=3\text{ m}$ ; $h$ 为超深,一般情况下 $h=(0.10\sim0.15)H$ ,这里取 $h=0.3\text{ m}$ 。

故炮孔深度为3.3 m。

#### 1.2.2 最小抵抗线 $W$

在中硬岩管沟爆破中,通常选取最小抵抗线:

$$W=25\varphi。$$

(2)

式中: $\varphi$ 为钻孔直径; $W$ 为最小抵抗线。

#### 1.2.3 孔距及排距

管沟爆破中,炮孔密集系数 $m$ 通常取0.8。

$$a=m\times W。$$

(3)

式中: $a$ 为孔距。计算得出孔距为1.784 m,取 $a=2\text{ m}$ 进行计算。

$$b=0.8a。$$

(4)

式中: $b$ 为排距。通过计算得出排距为1.6 m。

#### 1.2.4 炸药单耗

查阅文献得知,管沟爆破所需最小单耗 $q=0.5\text{ kg/m}^3$ ,实际单耗取值还需通过管沟爆破试验获得。

#### 1.2.5 单孔装药量

单孔装药量 $Q$ 的计算式:

$$Q=q\times H\times a\times b。$$

(5)

由计算可得,管沟爆破的最小单孔装药量为4.8 kg,实际药量需依据爆破试验确定。

### 1.3 单孔爆破试验

采用TC-4850型号测振仪,监测距离爆破中心10、12、14、16、18 m和20 m处地表质点振速。结合

理论计算进行3次单孔爆破试验,爆破参数见表1,仪器布设见图1,测得的垂直地表方向( $Y$ 方向)的振速峰值见表2。

表1 单孔爆破参数

Tab.1 Single-hole blasting parameters

爆破试验	钻孔深度/m	单孔装药量/kg	装药高度/m	填塞高度/m
1 <sup>#</sup>	3.0	5	1.0	2.0
2 <sup>#</sup>	3.3	6	1.2	2.1
3 <sup>#</sup>	3.5	7	1.4	2.1

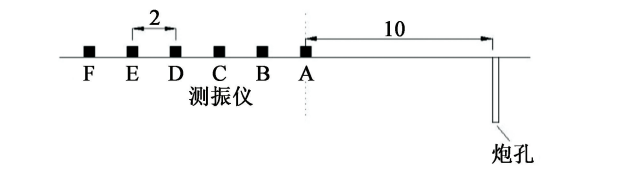


图1 试验测点布置(单位:m)

Fig.1 Layout of measuring points (Unit: m)

表2 单孔爆破试验监测数据( $Y$ 方向)

Tab.2 Monitoring data in single-hole blasting test ( $Y$  direction)

仪器编号	爆心距/ m	振速峰值/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )		
		试验1 <sup>#</sup>	试验2 <sup>#</sup>	试验3 <sup>#</sup>
A	10	7.931 7	9.212 8	10.398 6
B	12	5.112 3	6.389 4	7.421 2
C	14	5.002 0	5.486 8	5.857 3
D	16	4.065 8	4.165 8	4.608 4
E	18	3.128 1	3.537 4	3.826 9
F	20	2.257 4	2.817 1	2.885 1

管沟爆破产生的地震波主要有3个传播方向: $X$ 方向平行地表面并垂直于管沟方向; $Y$ 方向垂直于地面; $Z$ 方向与管沟走向一致并平行于地面。

由试验测得,地表质点的振速峰值出现在垂直于地表的 $Y$ 方向上。

采用萨道夫斯基<sup>[9]</sup>:

$$v=K\left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{\alpha}。$$

(6)

式中: $v$ 为爆破质点振速峰值, $\text{cm/s}$ ; $Q$ 为最大单段起爆药量, $\text{kg}$ ; $R$ 为并行间距, $\text{m}$ ; $K$ 、 $\alpha$ 为与爆破场地、地质条件相关的系数。

$$\text{令 } p=\frac{\sqrt[3]{Q}}{R},$$

(7)

对式(6)等号两端取以 $e$ 为底数的对数得:

$$\ln v=\ln K+\alpha \ln p。$$

(8)

利用式(8)的线性关系,运用 Origin 8.5 软件,将表 2 中的数据进行线性拟合,结果如图 2 所示。

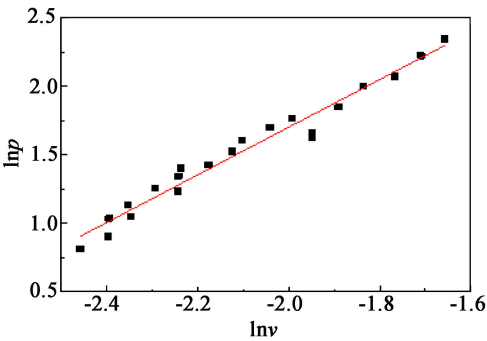


图 2 Y 方向振速峰值的拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of peak vibration velocity in Y direction

图 2 中的拟合方程为: $y = 1.725x + 5.15$ ,结合式(6)、式(7),可得场地相关系数  $\alpha = 1.725$ 、 $K = 172.43$ 。查阅岩性参数表,中硬岩岩性的  $K = 150 \sim 250$ , $\alpha = 1.5 \sim 1.8$ ,此次求得的  $K$ 、 $\alpha$  值属于中硬岩岩性,说明选取的试验场地符合研究要求。

2 近距离管沟爆破试验及地震波的传播规律

2.1 管沟爆破试验设计

设计管沟逐孔爆破试验。以外径 1 219 mm 的常用管材为例,以管沟沟底宽度 2.8 m、沟深 3.0 m 为设计尺寸,展开试验研究。采用 2# 岩石乳化炸药,为了降低爆破对既有管道的振动影响,选择毫秒延期雷管,孔内选用 10 段,孔外选用 3 段,依次逐孔起爆,时间间隔为 0.05 s。

2.2 管沟爆破试验研究

2.2.1 管沟爆破参数设计

管沟爆破设计 3 组试验,具体参数如表 3 所示。结合文献[10-12]和单孔爆破试验可知:对既有管道影响最大的是垂直地表方向的振动,故着重研究 Y 方向的爆破振速对既有管道的影响,而对 X 和 Z 方向只进行分析对比。

2.2.2 管沟试验布置方案

管沟爆破试验均布设 6 个监测点,第一个测振仪布置在距爆源中心 10 m 处,然后每相隔 2 m 依次布置一台测振仪器,仪器布置在炮孔走向中心线的中垂线上,具体布置方案如图 3 所示。

2.2.3 管沟爆破试验对比分析

试验后,从管沟成型尺寸和质点振速峰值两方面进行分析。

表 3 管沟爆破参数

Tab.3 Pipe trench blasting parameters

试验	1#	2#	3#
管沟深度/m	3.00	3.00	3.00
超深/m	0	0.30	0.50
钻孔深度/m	3.00	3.30	3.50
孔距/m	2.00	2.00	2.00
排距/m	1.60	1.60	1.60
爆破面积/m <sup>2</sup>	3.20	3.20	3.20
爆破体积/m <sup>3</sup>	9.60	9.60	9.60
单孔药量/kg	5.00	5.50	6.00
单耗/(kg·m <sup>-3</sup> )	0.52	0.57	0.63
延米药量/(kg·m <sup>-1</sup> )	5.00	5.00	5.00
装药高度/m	1.00	1.10	1.20
堵塞长度/m	2.00	2.20	2.30

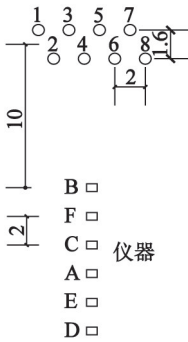


图 3 试验 2# 炮孔及测点的布置(单位:m)

Fig.3 Layout of blast holes and measuring points in Test 2#

1)在爆破区域采用机械手段挖开管沟,查看其爆破成型效果,整理管沟成型的参数,如表 4 所示。

表 4 中硬岩管沟爆破参数测试值

Tab.4 Parameters tested in pipe trench of medium hard rock

爆破试验	沟底中心宽	沟底左深	沟底右深	沟底中心深
1#	2.55	2.84	2.82	2.86
2#	2.86	3.06	3.08	3.09
3#	3.12	3.30	3.28	3.36

由表 4 可以看出,3 组试验中:试验 1#的管沟平均深度为 2.84 m,比设计值小 5.33%;沟底的宽度为 2.55 m,比设计值小 8.93%。试验 2#的管沟平均深度为 3.08 m,比设计值大 2.67%;沟底的宽度为 2.86 m,比设计值大 2.14%。试验 3#的管沟平均深度为 3.31 m,比设计值大 10.33%;沟底的宽度为 3.12 m,比设计值大 11.43%。

综合比较,试验2<sup>#</sup>与设计最符。

2)分析监测数据,绘制Y方向的振速峰值曲线如图4所示。

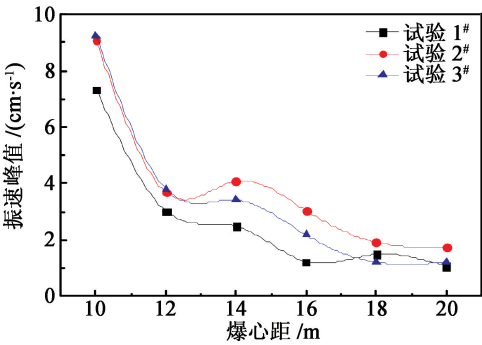


图4 Y方向的质点振速峰值曲线

Fig.4 Peak vibration velocity curves in Y direction

从图4中可以看出:3组爆破试验的质点振速峰值均小于10 cm/s,由规范可知,3组爆破参数均能保证既有管道的安全。试验1<sup>#</sup>的质点振速峰值小于试验2<sup>#</sup>和试验3<sup>#</sup>的振速峰值,衰减程度优于试验2<sup>#</sup>;试验2<sup>#</sup>与试验3<sup>#</sup>的衰减曲线比较相似,在爆心距10~12 m范围内,质点振速迅速减小,之后由于地震波的叠加呈现反增长的趋势,但总体上,试验3<sup>#</sup>的振速衰减程度优于试验2<sup>#</sup>。

将图4中的质点振速峰值与单孔试验的质点振速峰值比较可以看出:管沟逐孔微差爆破试验的质点振速峰值小于单孔爆破试验,说明逐孔微差爆破方式能够有效地控制爆破振速峰值,减小爆破振动对既有管道造成的损伤。试验3<sup>#</sup>的单孔药量虽大于试验2<sup>#</sup>,但其质点振速峰值有几处小于试验2<sup>#</sup>,分析原因有二:一是单孔药量加大后,增加了岩石的节理裂隙,导致第一孔爆破后振速峰值衰减较多;二是增加单孔药量意味着同时也加大了炮孔深度,从而导致了振速峰值的减小。

将爆破成型参数和质点振速峰值进行综合考虑可得出,试验2<sup>#</sup>的爆破参数最适合中硬岩管沟爆破。图5为由TC-4850型号测振仪监测到试验2<sup>#</sup>各测点X、Y、Z方向的质点振速。

从图5中可以看出:3个方向的质点振速峰值都是随距离增大而减小,在爆心距10~12 m范围内质点振速峰值衰减较快,尤其是Y方向,在12~18 m范围内振速峰值衰减较快,18~20 m振速峰值衰减较慢。爆心距在10~20 m范围内,X方向的质点振速峰值衰减率为83.43%,Y方向的衰减率为80.60%,Z方向衰减率为90.04%。从峰值方面来看,Y方向质点振速峰值最大,且大大高于X和Z方向的质点振速峰值,X方向的振速峰值略大于Z方

向。这与规范中规定的以垂直方向的振速作为管道安全的判据相符,也验证了本爆破试验的正确性。

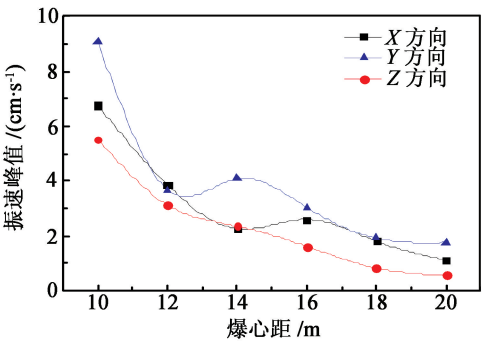


图5 试验2<sup>#</sup>中3个方向的质点振速峰值

Fig.5 Peak vibration velocity in three directions of Test 2<sup>#</sup>

### 3 近距离管沟爆破对既有管道的数值模拟研究

采用ANSYS/LS-DYNA对管沟爆破进行模拟分析,根据管沟爆破试验2<sup>#</sup>,以管沟尺寸和测点实际位置建立模型,采用Solid164三维实体单元<sup>[13]</sup>,采用爆破岩体模型材料\*Mat\_Plastic\_Kinematic、炸药模型材料\*Mat\_High\_Explosive\_Burn、既有管道模型材料\*Mat\_Johnson\_Cook、既有管道回填模型材料\*Mat\_Ppastic\_Kinematic以及空气模型材料\*Mat\_Null所构建的模型如图6所示。材料参数如表5~表9所示。

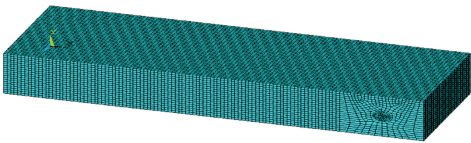


图6 模型图

Fig.6 Mesh graph

表5 岩体材料参数

Tab.5 Rock material parameters

密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ GPa	切线模量/ GPa
2 000	15	0.20	0.08	1.5

表6 炸药材料参数

Tab.6 Explosive material parameters

炸药类型	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	爆速/ (m·s <sup>-1</sup> )	p <sub>CJ</sub> / GPa
2 <sup>#</sup> 岩石 乳化炸药	1 000	3 200	5.3



表 7 既有管道材料参数

Tab. 7 Material parameters of the existing pipeline			
密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	剪切模量/ GPa	泊松比
7 800	210	82.68	0.27

表 8 回填材料参数

Tab. 8 Backfill material parameters				
密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ GPa	切线模量/ GPa
1 000	10	0.10	0.04	1.0

表 9 空气材料参数

Tab. 9 Air material parameters		
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	材料内能/kJ	相对体积
1.29	0.25	1.0

3.1 管沟爆破地表振速模拟分析

由于现场爆破试验并没有埋设既有管道,为了方便对比分析质点振速的传播规律,此次模拟不设置管道模型、回填模型以及空气模型等。模拟 X、Y、Z 3 个方向地表质点振速峰值随距离的变化规律,如图 7 所示。

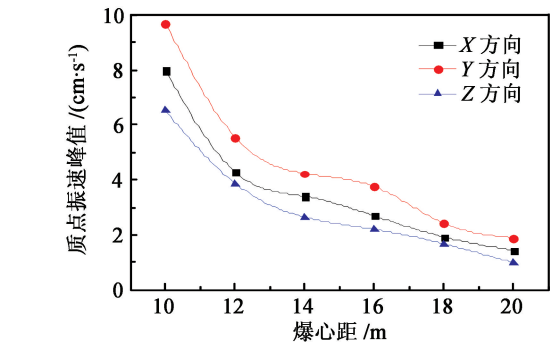


Fig. 7 Decay curves of peak vibration velocity in the simulation

从图 7 可见:距离爆源中心处 10 m 位置,X 方向的质点振速峰值为 7.96 cm/s,Y 方向质点振速峰值为 9.68 cm/s,Z 方向质点振速峰值为 6.51 cm/s,最大振速小于规范值。比较可知:质点振速峰值衰减率在模拟中小于试验中的衰减率,质点振速峰值衰减率在 X 方向模拟比试验值低 1.39%,在 Y 方向模拟比试验值低 0.12%,在 Z 方向模拟比试验值低 5.25%。模拟结果与试验结果存在的误差较小,尤其 Y 方向,说明此模拟是可靠的。Y 方向模拟和试验振速峰值如图 8 所示。

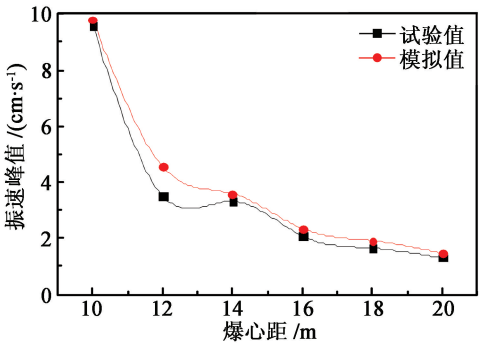


Fig. 8 Peak vibration velocity comparison in Y direction in simulation blasting test of medium hard rock

从图 8 可以看出,模拟的质点振速比试验的质点振速要大,并且模拟的质点振速衰减波形没有试验振速的波动大。出现以上现象的原因是:建立的模型是均质的,而自然界的岩石内部会有一定的裂隙,以至于试验测得的质点振速小于模拟值。从两条曲线的走势上可以看出,模拟的爆破振速和试验测得的振速具有较高的相似度,走势基本相同。

3.2 既有管道的应力分析

由于管道迎爆面会因为受到较大的冲击压力而破坏;且钢材质的输气管道抗拉强度低,背爆面也容易因为产生较大的拉应力而产生破坏,于是选择管道受影响较大的迎爆面和背爆面两个位置进行研究。将面对药包中心面的 5 行网格区域定义为迎爆面,背爆面为与迎爆面相对应的位置。

既有管道迎爆面、背爆面 3 个方向的应力云图分别如图 9、图 10 所示。

3.2.1 管道迎爆面的应力分析

迎爆面 X 方向的最大应力为 2.33 MPa,此刻红色代表最大应力颜色,管道迎爆面面积约 1/5 的区域呈现了红橙色,红色位置表明 X 方向的应力较大;迎爆面 Y 方向的最大应力为 2.39 MPa,此刻蓝色代表最大应力颜色,迎爆面面积约 2/5 的区域呈现了蓝色,蓝色位置表明 Y 方向的应力很大;迎爆面 Z 方向的最大应力为 1.96 MPa,此刻红色代表最大应力颜色,而迎爆面主要呈现黄绿色,说明 Z 方向的最大应力位置较少。

3.2.2 管道背爆面的应力分析

背爆面 X 方向的最大应力为 1.64 MPa,此刻蓝色代表最大应力颜色,管道背爆面面积大部分的区域呈现了蓝色,表明 X 方向的应力分布较大;背爆面 Y 方向的最大应力为 1.68 MPa,此刻红色代表最大应力颜色,而背爆面面积约 3/5 的区域呈现出黄绿色,说明 Y 方向的最大应力分布较小;背爆面 Z

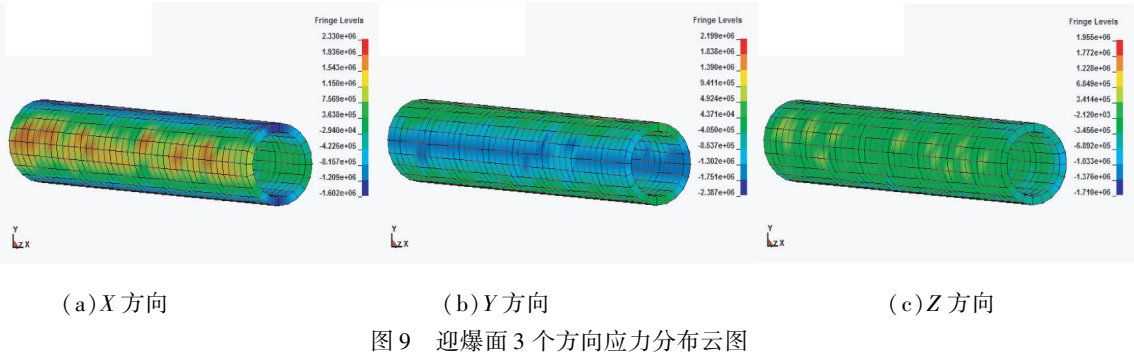


Fig. 9 Stress distribution nephogram in three directions at attack surface

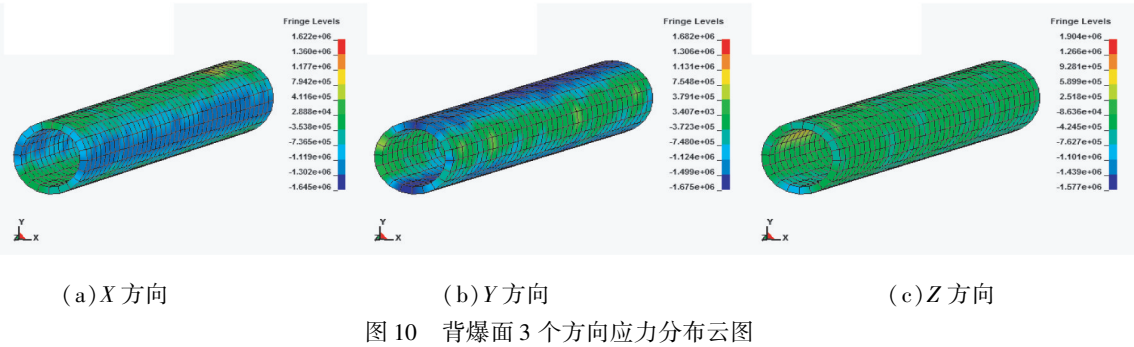


Fig. 10 Stress distribution nephogram in three directions at back blast

方向的最大应力为 1.90 MPa,此刻红色代表最大应力颜色,背爆面主要呈现出黄绿色,说明背爆面 Z 方向局部的应力较大。从背爆面的应力数值可知:背爆面 Z 方向的应力最大,Y 方向的应力次之,X 方向的应力相比较小。

通过分析距离爆源 10 m 处既有管道迎爆面和背爆面 X、Y 和 Z 3 个方向上的应力云图可知:既有管道在迎爆面位置 Y 方向应力最大,同时 X 方向的应力较大。背爆面 Z 方向应力最大,但是仍小于迎爆面的 Z 方向。管道 X、Y 方向的应力较大,但其应力峰值远远小于管道的屈服强度。

3.3 既有管道的振动响应分析

为了更好地分析既有管道的质点振速情况,选取既有管道的迎爆面中心质点和背爆面中心质点以及地表中心质点在 X、Y 和 Z 3 个方向上距离爆源 10 m 处的质点振速峰值进行研究,其质点振速峰值对比见表 10。

从表 10 可知:管道迎爆面主要受 X 和 Y 方向的振速影响,管道背爆面主要受 Z 方向的振速影响,地表振速峰值在 X、Y、Z 3 个方向上均大于迎爆面和背爆面振速峰值,但质点振速峰值均小于 10 cm/s。分析可知:管道的迎爆面在爆破荷载作用下受到较大的压应力作用,所以 X 方向的质点振速较大;背爆面在爆破荷载的作用下主要受拉应力作用,

表 10 不同位置处的质点振速峰值

部位	Peak velocity peak at different positions		
	X 方向	Y 方向	Z 方向
迎爆面	4.563 6	4.719 2	4.271 5
背爆面	3.091 3	3.215 6	3.498 6
地表处	5.213 5	5.831 5	4.962 3

所以受到的 Z 方向的质点振速较大。模拟结果可知,采用地表质点振速峰值判断地下管道的安全是合理的。

4 结 论

通过现场爆破试验和数值模拟,研究了中硬岩管沟爆破对近距离既有管道的影响,可得如下结论:

1) 中硬岩的场地系数  $K = 172.43$ 、 $\alpha = 1.725$ ,单孔药量理论计算取值为 4.8 ~ 7.0 kg,可以满足管沟尺寸设计要求;而管沟爆破试验得出单孔药量为 5.5 kg,超深 0.3 m 时,管沟成型效果较好。管沟逐孔微差爆破试验的质点振速峰值小于单孔爆破试验,说明逐孔微差爆破方式能够有效地控制爆破振速峰值,减小爆破振动对既有管道造成的损伤。同时,设置一定的炮孔超深有利于管沟爆破成型。

2) 管沟爆破  $Y$  方向的地表质点振速峰值最大, 其次是  $X$  方向,  $Z$  方向最小, 即垂直方向的质点振速对既有管道的影响最大; 在 10 ~ 20 m 的爆心距范围内, 试验 2# 的质点振速峰值的衰减率:  $X$  方向为 83.43%,  $Y$  方向为 80.60%,  $Z$  方向为 90.04%, 从衰减程度可知  $Z$  方向的衰减最快,  $X$  方向居中,  $Y$  方向最慢。

3) 模拟结果表明: 当既有管道埋深与炮孔深度接近时, 迎爆面的  $X$  和  $Y$  方向的峰值振速、应力均较大, 背爆面相比之下所受振动影响较小, 既有管道地表 3 个方向的质点振速峰值均大于迎爆面。结合试验结果, 可得出用地表的质点振速峰值来判断既有管道的安全是可行的, 既有管道所受振动影响均在安全允许范围内。

### 参 考 文 献

- [1] 赵龙, 王博. 石油天然气生产储运中安全管理策略研究[J]. 化工管理, 2015(22): 135-136.
- [2] 彭旭, 赵锴栋, 陈敬民, 等. 气田内部集输多管敷设间距剖析[J]. 天然气与石油, 2014, 32(2): 13-15.  
PENG X, ZHAO K D, CHEN J M, et al. Study on spacing between multiple pipelines in gas field gathering and transportation system[J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32(2): 13-15.
- [3] 马学海, 许研新, 董浩. 并行油气管道保护措施研究[J]. 石油工程建设, 2010, 36(6): 33-35.  
MA X H, XU Y X, DONG H. Research on protection measures of parallel oil and gas pipelines [J]. Petroleum Engineering Construction, 2010, 36(6): 33-35.
- [4] CHEN X H, FENG Q S, SHUI B Y, et al. The development and challenges of pipeline failure analysis in China [C]//Proceedings of the 7th International Pipeline Conference. Calgary, Alberta, Canada, 2008.
- [5] 张超. 水下炸礁工程浅点消除技术及有害效应研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.  
ZHANG C. Study on the technology to clear up the shallow point and adverse effects of underwater reef blasting [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012.
- [6] 朱海. 林区、多年冻土区并行敷设管道间距及施工技术探讨[J]. 油气田地面工程, 2016, 35(1): 83-85.  
ZHU H. Separation Distance and construction technology of parallel laid pipelines in the forest regions and permafrost regions [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2016, 35(1): 83-85.
- [7] 马学海, 许研新. 静态爆破技术在并行管道施工中的应用[J]. 石油工程建设, 2011, 37(1): 34-36.  
MA X H, XU Y X. Application of static explosion technique in parallel pipeline construction [J]. Petroleum Engineering Construction, 2011, 37(1): 34-36.
- [8] 张黎明. 中深孔台阶爆破振动对地下管道的影响研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.  
ZHANG L M. Research on effect of the medium-length hole beach blasting vibration on underground pipelines [D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.
- [9] 戴联双, 张海珊, 孟国忠, 等. 在役油气管道周边爆破作业风险分析[J]. 油气储运, 2012, 31(11): 801-803.  
DAI L S, ZHANG H S, MENG G Z, et al. Risk analysis of blasting operation around in-service oil and gas pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(11): 801-803.
- [10] 曹海峰. 城市地铁隧道掘进爆破对既有燃气管道的影响[J]. 山西建筑, 2016, 42(2): 171-172.  
CAO H F. The influence of urban subway tunnel excavation blasting on existing gas pipeline [J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(2): 171-172.
- [11] 禹海涛, 柳献, 袁勇, 等. 地下墙施工爆破对既有隧道的振动测试与分析[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(6): 566-572.  
YU H T, LIU X, YUAN Y, et al. Monitoring and analysis of an existing tunnel vibration induced by blasting construction of diaphragm wall [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(6): 566-572.
- [12] MATTA L. Experimental response of steel pipelines to close trench blasting [C]//Proceedings of the 11th International Pipeline Conference. Calgary, Alberta, Canada, 2016.
- [13] 张明. 城市浅埋隧道衬砌结构抗爆特性数值模拟研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.  
ZHANG M. Study on anti-blasting numerical simulation of urban shallow-tunnel lining structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009.