

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.017

## 基于数字图像相关方法的导爆管爆速测试研究\*

崔新男<sup>1</sup>, 宋家旺<sup>2</sup>, 王尹军<sup>3</sup>, 陈志远<sup>1</sup>, 汪旭光<sup>1,3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古康宁爆破有限责任公司, 鄂尔多斯 017205;  
3. 北京矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

**摘要:** 高速摄影机为导爆管传爆特性研究提供了一种有效工具,但传统方法采用人工处理图像,测量结果受主观影响较大。因此,提出了一种基于数字图像相关方法的导爆管爆速测试方法。采用高速摄影机拍摄导爆管传爆过程图像序列并进行预处理。分别从爆轰波成长区和稳定区图像中选取波头图像模板,依据数字图像相关原理将模板与后续图像进行相关匹配以确定图像序列中波头的坐标,进而计算爆速和成长区间。采用折返式布线,布置4.5m导爆管,观测到了导爆管内爆轰波全长。结果表明导爆管稳定爆速为1700~1800 m/s,在拐弯处降至1600~1700m/s,成长区间为32~41cm。同时探讨了导爆管内爆轰波模型,依据灰度值高低将爆轰波划分为有效反应区和产物膨胀区,长度分别为31.92cm和1.05m。

**关键词:** 数字图像相关 导爆管; 爆速测试; 成长区间; 爆轰波模型

**中图分类号:** TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)01-0118-06

## Experimental Study on Nonel Tube Detonation Velocity by Digital Image Correlation Method

CUI Xin-nan<sup>1</sup>, SONG Jia-wang<sup>2</sup>, WANG Yin-jun<sup>3</sup>, CHEN Zhi-yuan<sup>1</sup>, WANG Xu-guang<sup>1,3</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Kangning Blasting Co Ltd Inner Mongolia, Erdos 017205, China;  
3. BGRIMM Group, Beijing 100160, China)

**Abstract:** High-speed camera is an effective tool for detonation propagating process research of Nonel tube. However, the traditional method using artificial processing images, which is affected by the subjective measurement. Therefore, a new detonation velocity test method based on digital image correlation was proposed. Image sequence of detonation propagation process in Nonel tube was captured and preprocessed by a high-speed camera. The detonation wave templates were selected in the growth zone and the stable zone. Then, correlation matching was performed with the templates and the sequence images to locate the wave heads in the subsequent images. Besides, the detonation velocity and growth range can be calculated. 4.5 m Nonel tube was arranged on the blackboard in zig-zag type and full detonation wave was photographed. The result indicates that the detonation velocity stabilizes at 1700~1800 m/s in straight line and 1600~1700 m/s in corners and the growth range is 32~41 cm. Meanwhile, the detonation wave model in the Nonel tube was discussed. The detonation wave can be divided into the effective reacting region and the product expansion region according to the gray value in images, and the lengths of the two regions are 31.92 cm and 1.05 m, respectively.

**Key words:** digital image correlation; nonel tube; detonation velocity test; growth range; detonation wave model

塑料导爆管(又称导爆管)是内壁涂覆有极薄层奥克托今、黑索金、太安、铝粉等粉末的空心塑料软管<sup>[1]</sup>。导爆管可用于传爆和起爆雷管,以其优异的抗电、抗火、抗冲击性能和操作简单、起爆方法灵活等特点,一经问世便广泛应用于矿山<sup>[2]</sup>、岩土<sup>[3]</sup>、拆除爆破等领域<sup>[4,5]</sup>。被激发后,导爆管内爆轰波由不稳定传播到稳定传播的过程称为成长期,成长期内传播的长度称为成长区间,关于成长区间的长短众说纷纭,文献<sup>[1]</sup>认为约 30 cm,高耀林测得为 30~40 cm<sup>[6]</sup>,邓军等人通过试验测得其为 40~50 cm<sup>[7]</sup>,陈士海<sup>[8]</sup>、胡升海分别测得为 16.7 cm 和 18.5 cm<sup>[9,10]</sup>。对导爆管起爆、传爆特性等的研究也十分丰富,倪磊研究了使用 3 种不同材料制作的导爆管在不同温度下其爆速、抗击穿性能及对不同材料雷管延期体的发火可靠性<sup>[11]</sup>;Kontis 利用高速纹影摄影和压力测量法对内壁不同粗糙度和不同大气压下导爆管内冲击波和气体产物进行了可视化研究<sup>[12]</sup>;陈雄胜应用光电感应元件的电测法研究了装药量与温度对导爆管爆速的影响<sup>[13]</sup>;刘大斌应用光谱分析法研究了导爆管起爆瞬间的火花放电温度和持续时间<sup>[14]</sup>;李洪伟应用高速和超高速摄影机拍摄导爆管传爆过程,并研究了其爆速、成长区间等性质,还测试了其在破损、断药、打结等特殊情况下起爆、传爆性能<sup>[15]</sup>。精确测量导爆管爆速、成长区间,弄清其影响因素,对于导爆管性能的研究十分重要。高速摄影方法适用于炸药起爆、爆轰波传播等高速过程的研究,然而在图像处理时,传统方法或采用肉眼观察,或采用量尺测量,或采用 CAD 画点测量等方法,不仅效率低下,精度更是受到人的主观影响。

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法通过对时间序列中相邻两幅图像相关性分析来确定质点的位移和应变,精度可达 0.1~0.01 mm,在实验力学<sup>[16]</sup>、岩土工程<sup>[17]</sup>、生物医药等领域应用极广<sup>[18]</sup>。针对传统高速摄影方法研究导爆管起爆、传爆特性过程中自动化程度低、结果易受主观因素影响等问题,基于 DIC 方法建立了用于导爆管爆速与成长区间的测量系统,将 4.5 m 导爆管以折返式布置于黑色绕线板,通过对高速摄影图像采用预处理、爆轰波头选取、模板相关匹配定位、波头坐标换

算等方法自动完成爆轰波速计算和成长区间测量。同时,对导爆管内爆轰波模型进行了探讨。

## 1 导爆管爆速测量系统

导爆管爆速测量系统由导爆管绕线板、起爆器和图像采集处理设备组成,如图 1。

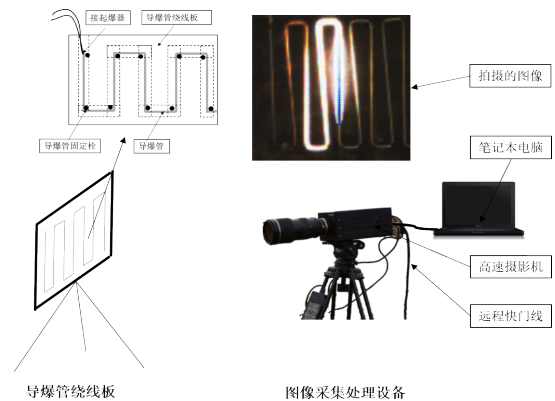


图 1 导爆管爆速测量系统

Fig. 1 Nonel tube detonation rate measuring system

### 1.1 导爆管绕线板

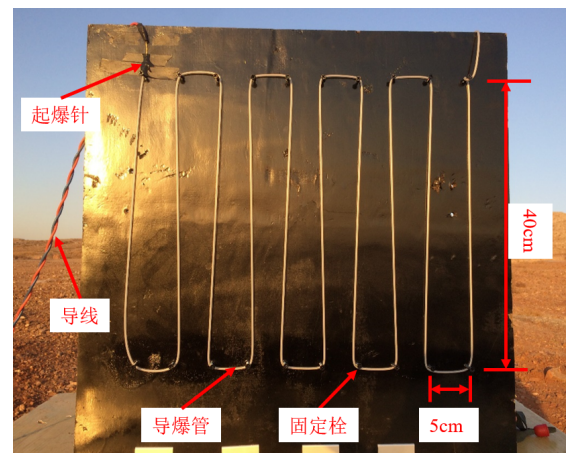


图 2 导爆管绕线板

Fig. 2 Wire-warp board of Nonel tube

因导爆管爆速较高,为了尽可能多的拍摄爆轰波传播过程,应在摄影机有限的视野内多布置导爆管。传统采用直线型布线,导爆管长度较短,采用折返式布线,可在木板上布置 4.5 m 导爆管,经多次试验,相邻导爆管距离大于 5 cm 时,爆轰波的闪光不会互相影响。当帧率为 10000 fps 时,曝光时间仅为 100  $\mu$ s,帧率增大则曝光时间进一步缩小,为增强对比度,将绕线板喷涂黑色底漆。在板上按照设计位置安装导爆管固定栓,将导爆管固定在绕线板上,如图 2。

收稿日期:2019-04-22

作者简介:崔新男(1986-),男,河北唐山人,工程师;博士研究生,主要研究方向为岩土及爆破工程测试技术,  
(E-mail)chester\_tsui@sina.cn。

通讯作者:汪旭光(1939-),男,安徽枞阳人,教授,主要研究方向为工业炸药与爆破技术,(E-mail)243458313@qq.co。

基金项目:中国工程院咨询研究项目(2018-XY-12)

## 1.2 图像采集处理设备

采用国产千眼狼5KF10型高速摄影机,尼康AF70-200 mm F/2.8长焦镜头,同时配合快门线可以实现远程触发,在按下远程快门后迅速按下起爆开关。图像处理设备为笔记本电脑,编写了一套基于DIC方法的处理程序,可以实现图像预处理、爆轰波头搜索与相关性匹配和爆速计算等功能。

## 2 导爆管爆速测量试验

### 2.1 基于数字图像相关的爆速测试算法

图像在计算机中都是以矩阵的形式储存的,灰度图像一般采用8位灰度值矩阵,矩阵中的元素代表图像的像素,其值为像素的灰度值,一幅分辨率为  $M \times N$  的图像通常表示为  $I = f(x, y)$   $x \in (0, M - 1), y \in (0, N - 1)$ , 其中  $f$  为灰度函数,  $x, y$  为像素坐标。  $I_k (k = 0, 1, 2 \cdots n)$  表示拍摄到的序列图像,起爆后导爆管内爆轰波头作为序列的第一幅图像  $I_0$ , 爆轰波头离开起爆点的图像为  $I_k$ 。整个起爆过程分为成长区和稳定区,以图像  $I_0$  中的导爆管内爆轰波头区域作为成长区的参考子区,以图像  $I_s$  中的导爆管内爆轰波头区域作为稳定区的参考子区。参考子区  $R_0$  和参考子区  $R_s$  的图像大小为  $(2m + 1) \times (2n + 1)$ , 图像的中心分别为  $P_0(x_0, y_0)$  和  $P_s(x_s, y_s)$ 。如果  $f(x, y)$  表示参考子区的灰度函数,采用相关性匹配方法,在待匹配图像  $I_k (k = 0, 1, 2 \cdots n)$  中寻找与  $R_0$  或  $R_s$  相关性最大的区域  $R_k (k = 1, 2 \cdots n)$ 。相关性计算有多种方法,使用不同的相关函数,如直接互相关函数、归一化互相关函数等等。选用了抗干扰能力较强的匹配函数<sup>[19]</sup>。如果  $f(x, y)$  和  $g(x', y')$  分别为参考子区  $R_0$  和匹配子区灰度值函数  $R$ , 那么参考子区  $R_0$  和匹配子区灰度值函数  $R$  的相关性如式(1)所示。

$$C_{f,g} = \frac{\sum_{x=-m}^m \sum_{y=-m}^m [f(x, y) - f_m][g(x', y') - g_m]}{\sqrt{[f(x, y) - f_m]^2} \sqrt{[g(x', y') - g_m]^2}} \quad (1)$$

式中,  $f_m$  和  $g_m$  分别为参考子区和匹配子区灰度平均值

$$f_m = \frac{1}{(2m + 1)^2} \sum_{x=-m}^m \sum_{y=-m}^m f(x, y) \quad (2)$$

$$g_m = \frac{1}{(2m + 1)^2} \sum_{x=-m}^m \sum_{y=-m}^m g(x, y) \quad (3)$$

相关系数满足  $|C_{f,g}| \leq 1$ 。

如果  $P_k(x_k, y_k) (k = 1, 2 \cdots n)$  表示搜索到的匹配子区  $R_k (k = 1, 2 \cdots n)$  的中心坐标,  $D_l$  表示绕线

板上导爆管固定栓之间的物理距离,  $D_l$  表示绕线板上导爆管固定栓在图像  $I_0$  上的像素距离, 那么序列图像中导爆管爆速  $S_k (k = 1, 2 \cdots n)$  为

$$S_k = \frac{D_p d(P_{k+1}, P_k)}{D_l T} \quad (4)$$

$$d(P_{k+1}, P_k) = \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2} \quad (5)$$

式中,  $T$  为采样时间。

### 2.2 爆速测试流程

基于数字图像相关性爆速测量流程如图3所示, 主要包括以下几个步骤:

- (1) 高速摄影机拍摄照片;
- (2) 图像预处理, 将彩色图像转成灰度图像, 并对灰度图像进行高斯滤波;
- (3) 分别选定成长区和稳定区参考子区;
- (4) 读取序列图像;
- (5) 相关性匹配, 搜索爆轰波头位置;
- (6) 计算当前波速;
- (7) 记录数据;
- (8) 爆轰波是否达到终点。如果是, 爆速计算完成, 流程结束; 否则, 返回步骤(4)。

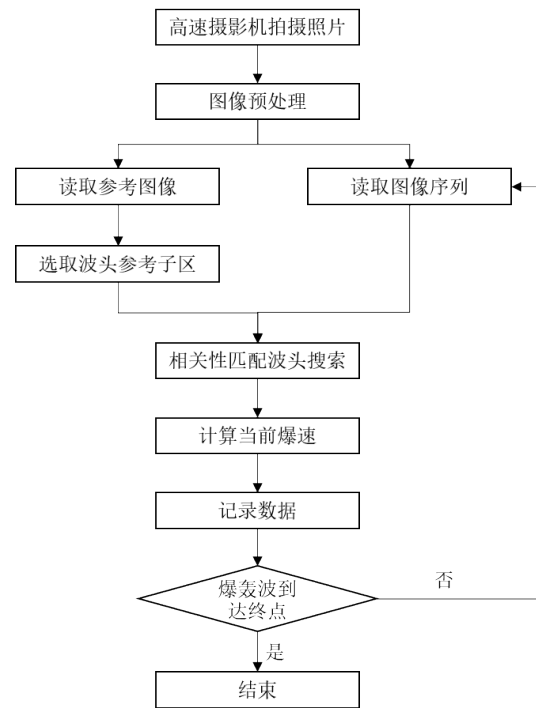


图3 爆速计算流程图

Fig. 3 Flow chart of detonation rate calculation

## 3 测试结果

本文共进行了3次试验,拍摄帧率为12 500 fps,图像分辨率128×140,曝光时间80 μs。试验结

果如图 4 所示, 3 次试验结果具有相似性, 这里仅列出其中某一次试验图像。由图 4 可知, 导爆管内爆轰波在成长区和稳定区波头形态不同, 第 1~3 帧波头形态相近, 第 4~32 帧爆轰波波头形态相近, 因此分别选取第 1 帧和第 4 帧为成长区和稳定区参考图像。在第 1 帧中以波头为中心点选取 13×13 参考子区, 与第 2、3 帧进行相关性匹配, 计算成长区爆速; 在第 4 帧中以波头为中心点选取 13×13 参考子区, 与余下图像进行相关性匹配, 计算稳定爆速。图像中相邻两个导爆管固定栓之间相差约 10 个像素, 而物理距离为 50 mm, 可知每个像素物理尺寸为 5 mm/pixel, 采样时间为 80 μs, 根据 2.1 节的方法计算出爆速。

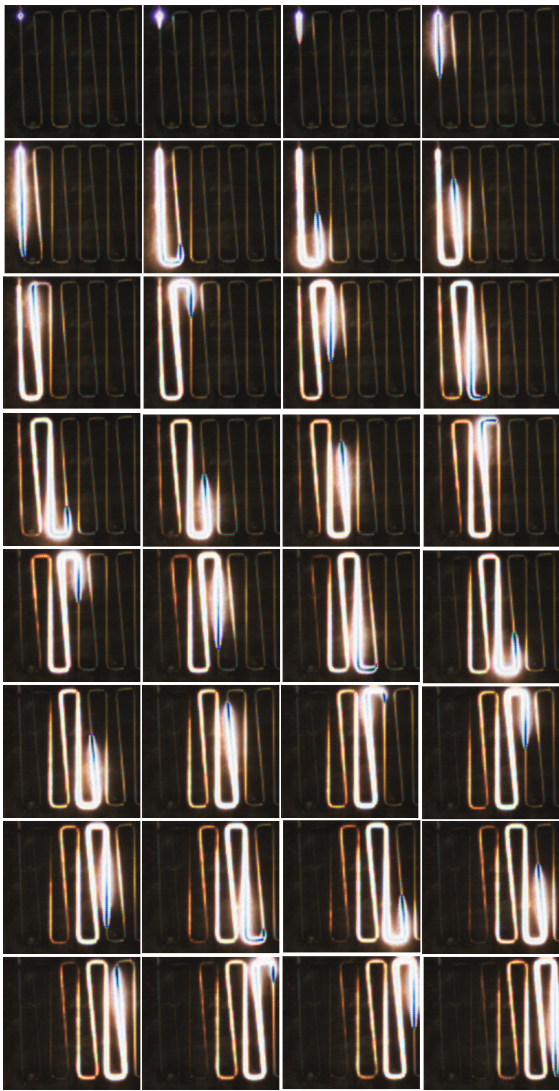


图 4 传爆过程图像序列

Fig. 4 Image sequence of detonation propagating process

试验所用导爆管标称爆速为 1700~1800 m/s, 以达到 1700 m/s 认为管内已形成稳定爆轰波。从图 5

可以看出, 3 次试验中爆轰波成长过程基本一致, 0.4 ms 达到稳定爆速, 随后爆速有一定程度波动, 多数时间爆速稳定在在 1700~1800 m/s 之间, 而数次处于 1600~1700 m/s 之间, 其中第 1、2 次试验有 8 次低于 1700 m/s, 第 3 次试验有 7 次低于 1700 m/s。进一步观察图 4 发现, 低爆速点恰好是爆轰波传播到绕线板的拐角处, 通过拐角后爆速又上升到稳定爆速。由于导爆管在拐角处都是直角弯, 弯角处导爆管受到一定拉伸和挤压, 使爆轰波波速降低, 这说明除涂覆炸药种类、温度等因素外, 一定角度的弯折、拉伸也会影响导爆管爆速, 因此在布置导爆管起爆系统时, 要求避免导爆管打结, 尤其是打死结。

图 6 给出了随着导爆管长度增加爆速的变化情况, 曲线形态与图 6 相近, 0.4 ms 时达到稳定爆速, 此时传播的导爆管长度为 32~41 cm, 与文献[6, 7]测得结果相近。

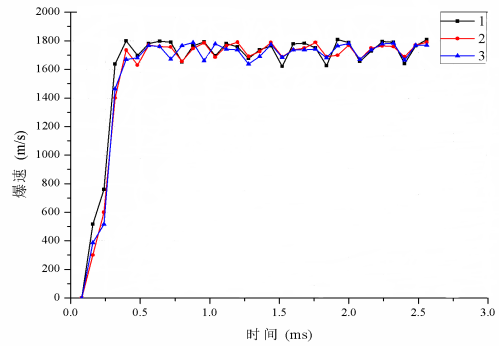


图 5 导爆管爆速-时间曲线图

Fig. 5 Detonation rate-time curve of Nonel tube

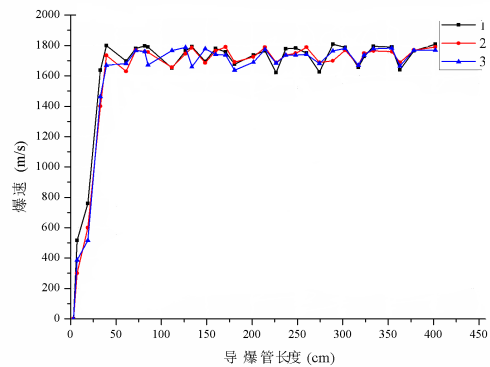


图 6 导爆管爆速-长度曲线

Fig. 6 Detonation rate-length curve of Nonel tube

## 4 导爆管爆轰波模型探讨

将导爆管传爆过程图像转化为灰度图,完整爆轰波图像如图7。图像灰度值的大小反应了该点温度的高低,根据灰度值大小和亮区宽度将爆轰波分为4个区域:Ⅰ区灰度值迅速增长,从45增长到200,亮区宽度也从0增长到最大值约7.5 cm,长度约3.42 cm,根据炸药爆轰理论,当温度达到最高时,炸药的化学反应已经基本完成;Ⅱ区灰度值稳定在200以上,且亮区宽度稳定在7.5 cm,由于导爆管内含有铝粉,此区域内铝粉进行二次反应,释放热量使产物温度下降缓慢,长度约15.58 cm;Ⅲ区内虽灰度值仍维持在200以上,但宽度不断减小,从7.5 cm减小到约2.5 cm,表明只有少量铝粉参与反应,产物温度下降较快,长度约12.92 cm;Ⅳ区灰度值和亮区宽度均不断变小,表明所有反应均已完成,产物膨胀降温,长度约1.05 m;Ⅳ区以外产物温度较低,膨胀运动较弱,不计入爆轰波结构中。将炸药与铝粉反应区统称为有效反应区,其长度约31.92 cm,与范钦文等人理论计算值0.3746 m(爆速为1600 m/s时)较为接近<sup>[20]</sup>。

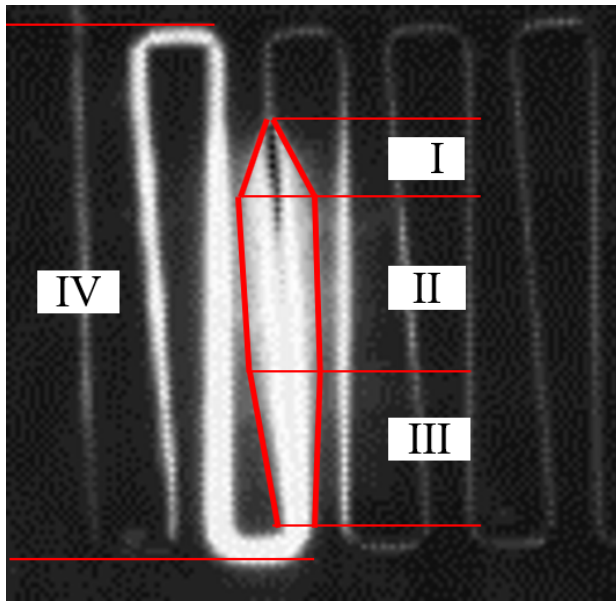


图7 稳定完整爆轰波灰度图

Fig. 7 Grayscale image of a steady full detonation wave

## 5 结论

进行了折返式布置的导爆管起爆、传爆试验,应用高速摄影机拍摄了管内爆轰波从成长到衰减的全过程图像。结合数字图像相关原理对图像进行了滤波、爆轰波头相关匹配定位、

波头坐标换算等处理,完成了爆轰波速和成长区间测量。结果表明导爆管稳定爆速为1700~1800 m/s,在直角拐弯处降至1600~1700 m/s,成长区间为32~41 cm。除温度和管内装药参数外,布置形式也影响导爆管爆速,在工程应用中应尽量避免导爆管直角弯折或打结。采用折返式布线方式布置了4.5 m导爆管,观测到了管内爆轰波全长,有效反应区长度为31.92 cm,产物膨胀区总长为1.05 m。

### 参考文献(References)

- [1] 陈嘉琨,范钦文,高耀林. 塑料导爆管[M]. 北京:国防工业出版社,1987:1-5.
- [2] 马立飞,陈能革. 高精度非电导爆管雷管起爆网络在罗河铁矿的应用[J]. 现代矿业,2017,33(10):81-83.
- [2] MA Li-fei, CHEN Neng-ge. Application of high-precision nonel tube detonators initiation network in Luohe Iron mine. [J]. Modern Mining, 2017, 33(10): 81-83. (in Chinese)
- [3] 傅洪贤,孔恒,吴进科. 复杂环境下隧道爆破施工控制技术[J]. 土木工程学报,2017,(S2):286-291.
- [3] FU Hong-xian, SUN Heng, WU Jin-ke. Controlled technology of tunnel blasting in complex environment. [J]. China Civil Engineering Journal, 2017 (S2): 286-291. (in Chinese)
- [6] 赵中字,梁向前,温新平. 禹门口扩建泵站岩坎爆破拆除与安全控制[J]. 工程爆破,2017,23(4):82-85.
- [6] ZHAO Zhong-yu, LIANG Xiang-qian, WEN Xin-ping. Blasting demolition and safety control for rock ridge of Yumenkou extension pumping station. [J] Engineering Blasting, 2017, 23(4):82-85. (in Chinese)
- [7] 谢钱斌,熊万春. 2座90m高的双曲线冷却塔爆破拆除[J]. 工程爆破,2018,24(3):44-49.
- [7] XIE Qian-bin, XIONG Wan-chun. Blasting demolition of two 90 m high hyperbolic cooling tower[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(3):44-49. (in Chinese)
- [9] 高耀林,范钦文,陈嘉琨. 塑料导爆管起爆过程[J]. 爆破器材,1984(4):3-7.
- [9] GAO Yao-lin, FAN Qin-wen, CHEN Jia-kun. Initiating process of plastic Nonel tube [J]. Explosive Materials, 1984(4):3-7. (in Chinese)
- [11] 邓军. 导爆管爆轰成长规律及其影响因素的试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2017.
- [11] DENG Jun. Research on detonation growth and its influencing factors. [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] 陈士海,胡峰. 导爆管的起爆特性[J]. 爆破,1990(2):9-12.

- [12] CHEN Shi-hai, HU Feng. Initiating characteristic of Nonel. [J]. *Blasting*, 1990(2):9-12. (in Chinese)
- [15] 胡升海,房泽法,熊鹏,等. 导爆管起爆与传爆过程的高速摄像研究[J]. *爆破器材*, 2013(4):45-48.
- [15] HU Sheng-hai, PANG Ze-fa, XIONG Peng, et al. High speed photography study on the initiating and detonation propagating process of Nonel tube [J]. *Explosive Materials*, 2013(4):45-48. (in Chinese)
- [16] 胡升海. 导爆管及其雷管传爆性能的试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
- [16] HU Sheng-hai. Experimental system on detonation propagating performance of nonel tube and its detonator [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [18] 倪磊,唐胜,况荣高,等. 高温环境对普通导爆管雷管点火可靠性的影响[J]. *爆破器材*, 2018, 47(4):55-59.
- [18] NI Lei, TANG Sheng, KUANG Rong-gao, et al. Influence of high temperature on ignition reliability of ordinary nonel detonator [J]. *Explosive Materials*, 2018, 47(4):55-59. (in Chinese)
- [20] KONTIS K. Shock interactions with structures and their associated induced flows [J]. *Blast Mitigation Strategies in Marine Composite and Sandwich Structures*, 2018:157-170.
- [13] 陈雄胜. 导爆管性能测试研究[J]. *爆破器材*, 2015, 44(3):48-50,54.
- [22] CHEN Xiong-sheng. Test study on properties of Nonel tube. [J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(3):48-50,54. (in Chinese)
- [23] 刘大斌,杨栋,蒋荣光,等. 导爆管起爆器瞬态电火花温度的光谱法测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, 22(4):670-672.
- [23] LIU Da-bin, YANG Dong, JIANG Rong-guang, et al. Spectroscopic determination of the dynamic electrical spark temperature of Nonel tube igniter. [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, 22(4):670-672. (in Chinese)
- [25] 李洪伟,邓军,徐飞扬,等. 塑料导爆管激发后爆轰成长的试验研究[J]. *火工品*, 2017(4):19-22.
- [25] LI Hong-wei, DENG Jun, XU Fei-yang, et al. Experimental study on detonation growth of plastic Nonel tube [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2017(4):19-22. (in Chinese)
- [26] 朱飞鹏,龚琰,白鹏翔,等. 基于数字图像相关的光学引伸计应变测量精度研究[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5):63-71.
- [26] ZHU Fei-peng, GONG Yan, BAI Peng-xiang, et al. Study on strain measurement accuracy of optical extensometers based on digital image correlation. [J] *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5):63-71. (in Chinese)
- [27] 袁媛,潘鹏志,赵善坤,等. 基于数字图像相关法的含填充裂隙大理岩单轴压缩破坏过程研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(2):339-351.
- [27] YUAN Yuan, PAN Peng-zhi, ZHAO Shan-kun, et al. The failure process of marble with filled crack under uniaxial compression based on digital image correlation. [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(2):339-351. (in Chinese)
- [29] 薛远. 三维数字图像相关的实时计算研究及生物医学应用[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
- [29] XUE Yuan. Research on real-time computation of three-dimensional digital image correlation and its biomedical applications [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [30] 潘兵,谢惠民,戴福隆. 数字图像相关中亚像素位移测量算法的研究[J]. *力学学报*, 2016, 39(2):245-252.
- [30] PAN Bing, XIE Hui-min, DAI Fu-long. An investigation of sub-pixel displacements registration algorithms in digital image correlation. [J]. *Chinese Journal of Theoretical Applied Mechanics*, 2016, 39(2):245-252. (in Chinese)
- [32] 范钦文,高耀林,陈嘉琨. 塑料导爆管稳定传爆的物理模型[J]. *爆破器材*, 1984(2):10-14.
- [32] FAN Qin-wen, GAO Yao-lin, CHEN Jia-kun. A physical model of steady propagation of detonation in plastic nonel tube [J]. *Explosive Materials*, 1984(2):10-14. (in Chinese)