

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.1139

LU Jinzhi, YU Hongjing, WANG Tao, et al. Experimental study of anti-ice blasting with explosive in Huma section of the Heilongjiang River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1):276-281. [路锦枝, 余弘婧, 王涛, 等. 黑龙江呼玛段炸药破冰试验研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1):276-281.]

## 黑龙江呼玛段炸药破冰试验研究

路锦枝<sup>1</sup>, 余弘婧<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 马朝猛<sup>2</sup>, 李昕阳<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 3. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450045)

**摘 要:** 黑龙江几乎每年开河期都有不同程度的冰坝发生, 由此引发的洪水泛滥给人们生命财产带来了巨大损失, 而防凌爆破是预防冰坝发生的主要手段之一。为了确保开河期间不发生因冰坝造成的凌汛灾害, 2018年开河前在黑龙江呼玛段实施防凌爆破。通过冰厚、水深同步测量的冰水情数据分析, 找到河道狭窄、流速缓慢的地方为冰坝潜在发生的位置, 采取针对性的爆破。分析了爆破坑实测直径与炸药用量、冰厚、水深间的关系, 并将爆破后呼玛段测量数据带入本项目组提出的爆破坑半径计算新公式中, 计算值和实测值较为接近, 可为北方高寒区河流冰下爆破提供参考。

**关键词:** 冰盖; 爆破; 炸药; 黑龙江; 凌汛

**中图分类号:** TV875 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)01-0276-06

### 0 引言

黑龙江位于我国最北边, 地理位置介于 $108^{\circ}20'$ ~ $141^{\circ}20'$  E、 $42^{\circ}00'$ ~ $55^{\circ}45'$  N。每年10月下旬出现流凌, 11月初开始封冻, 4月底5月初开河, 封冻期长达5个月以上。上游额尔古纳河和石勒喀河两大支流从低纬度流向高纬度, 在洛古河汇入黑龙江, 之后穿行在外兴安岭和大兴安岭的深山峡谷之中, 岛屿、浅滩、分流、急弯和背阴河谷交替出现。这种地理、气候条件和干支流走势为倒开江提供了先决条件, 使得黑龙江上游凌汛灾害严重, 几乎每年开河期都有不同程度的冰坝发生, 平均每三年会发生一次具有一定规模的冰坝。

黑龙江地处偏远, 交通、通讯、观测设备落后, 水文站的数量远远低于国内平均水平, 故水文数据缺乏, 灾害的观测、预报、防治和研究一直处于相对落后状态, 甚至出现被延误或者数据不准确的被动局面。已有研究也只根据封江水位、河槽蓄水蓄冰量、开河期气温变化等动力和热力因

素预报凌汛形势和开河日期, 主动防凌破冰技术方面基本没有进行研究, 这严重制约着防凌减灾工作的有效开展。黑龙江地理位置特别, 凌汛灾害严重, 国际影响大, 冰坝的预防与破除研究极为重要。

### 1 研究区概况

位于黑龙江上游的呼玛段处在大兴安岭地区, 曾多次发生严重的凌汛灾害, 尤以1958年、1960年、1971年、1985年最为严重。冰凌引发的冲刷可导致河岸及河床的侵蚀<sup>[1]</sup>, 严重时堵塞河道、抬高水位, 造成漫滩、甚至决堤等重大灾害<sup>[2]</sup>。在灾害最严重的1985年, 洪水位短期内超过历史最高洪水位<sup>[3]</sup>, 形成了自上而下的倒开江, 呼玛县新街基、老富岛、上江岛等地形成多处冰坝, 最长的冰坝达42 km, 带来巨大损失, 造成了呼玛段有水文记载以来最严重的凌汛灾害。

冰塞形成或冰坝溃决的时候, 易引发严重的洪

收稿日期: 2018-09-04; 修订日期: 2018-12-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508402); 中国水利水电科学研究院科研专项(HY0145B64217; HY0145B912017)资助

作者简介: 路锦枝(1995-), 女, 山西吕梁人, 2017年在苏州科技大学获学士学位, 现为中国水利水电科学研究院在读硕士研究生, 从事河冰水动力学及冰情预报研究。E-mail: 1115143386@qq.com

通信作者: 王涛, 教授级高级工程师, 从事河冰水力学及水文学研究。E-mail: 53737123@qq.com.

水泛滥。黑龙江作为中俄界河,河道上没有也不能修建任何水工建筑物控制或者调控水量,能采取的减少冰凌灾害风险的措施只能是非工程措施<sup>[4-6]</sup>。Beltaos<sup>[7]</sup>总结了防凌减灾的主要非工程措施,详情见表1。在冰坝未形成前,防凌爆破是预防冰坝发生的主要手段之一;在冰坝形成后,防凌爆破是缓解因冰坝发生造成洪灾的重要措施。黑

龙江冰盖厚且强度大,常规破坏冰盖的措施难以产生预期效果,而冰盖爆破可削弱、破坏冰盖或已经形成的冰坝,控制冰盖或者冰坝沿着既定线路溃决,在防凌渡凌实践中取得了明显的效果<sup>[8-10]</sup>。根据黑龙江呼玛段冰情和河道特点,本文开展了冰下爆破现场试验研究,提出有效的防凌爆破方法。

表1 常见的防凌爆破非工程措施

Table 1 The non-engineering measures for preventing ice jam flood

分类	目标	实施时间	方法	具体措施
冰坝的预防措施	预防冰坝发生	在冰坝形成之前	抑制冰情	热量改进
				冰表面处理
			冰盖的机械破坏	火药爆炸冰盖
				切割冰盖
				气垫船
冰坝的破坏或者移除措施	一旦形成冰坝,减少其破坏性,缓解将会产生的问题	在冰坝形成以后或者冰坝形成期间	爆破	河道开孔
				火药爆炸
				炸弹
				空中投放炸弹
			破冰	机械移冰

## 2 爆破实施方案

爆破技术破冰可以追溯到200多年前,1758年在德国第一次成功地实施了冰凌爆破。美国陆军工程兵团使用多种类型炸药进行了冰下爆破试验,发现爆破效果与炸药类型基本无关,因为各种炸药产生的爆破能量区别不大<sup>[11-12]</sup>。在我国,工程兵学院进行爆破采用了TNT炸药<sup>[13-14]</sup>,黑龙江自2010年开展防凌爆破以来采用的均是岩石乳化炸药<sup>[15]</sup>,该炸药易于储存和运输,本次爆破采用2号岩石乳化炸药。爆破炸药采用横向放置(图1),炸药在冰下的放置深度采用美国陆军工程兵团给出的最佳距离:炸药安放在冰盖底部 $0 \sim 0.6 t$ ( $t$ 为冰厚)深度范围。

## 3 爆破位置的选择

多年历史资料统计表明黑龙江上游严重冰坝多发生在开河期,防凌爆破通常选择在气温稳定转为正温后、开河前20天左右执行,既要保证爆破的冰块不会再冻结,也要确保冰盖有足够强度

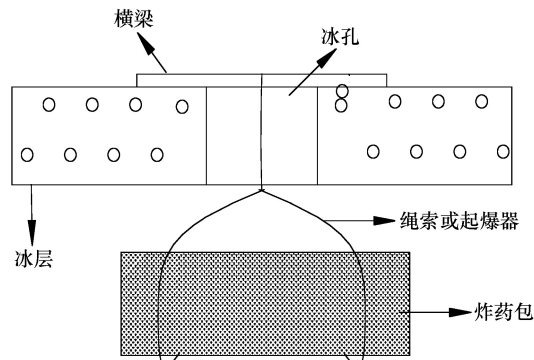


图1 炸药放置方式

Fig. 1 The explosive placement

满足冰面上爆破工作的顺利进行。所以,开河日期和冰坝发生情况的准确预报是选择防凌爆破时机的前提<sup>[4,7]</sup>。通过预防性的爆破,一方面使冰盖能够在开河时较为顺利地破碎成小尺寸的冰块,易于向下游流动;另一方面,太阳辐射通过爆破后形成的爆破坑可直接与水体进行热交换,使水温升高,削弱冰盖的强度,加速开河时冰盖的破裂<sup>[8,16]</sup>。

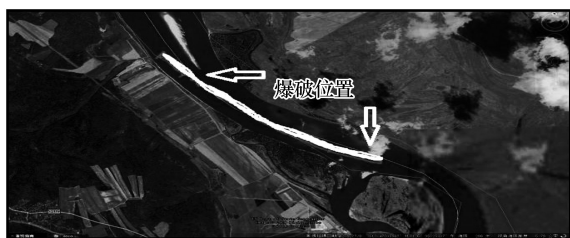
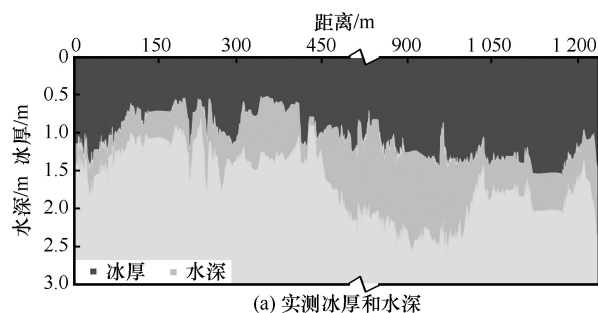
根据2018年3月底4月初多种方法预报的黑龙

江凌汛情况,呼玛段开河前爆破选在4月7-10日,并在GPR-10型雷达现场测量的基础上确定爆破河段(图2)。爆破前采用冰厚和水深同步测量雷达在呼玛段进行冰情调查,结合冰坝发生的历史状况,找到了冰块容易卡塞引发冰坝的位置。

选取的爆破河段如图3所示,可以看出,爆破河段上游水浅,中游水深,下游江面宽阔。水流从上游到中游,水深增加导致流速降低,使得开河期冰块容易在此堵塞形成冰坝。在此处进行开河前爆破,确保大量流冰块顺利通过该河段后下游有足够的开阔江面容纳上游来冰块,避免再次发生堵塞。



图2 GPR-10型冰厚、水深雷达同步测量系统测试现场  
Fig. 2 Photo showing the GPR-10 ice thickness and water depth radar synchronous measuring system



(b) 爆破位置在河道的分布

图3 爆破位置的选取

Fig. 3 The longitudinal section showing the ice thickness and water depth of the blasting section (a) and plan of the blasting location (b)

爆破河段河岸位置河道较浅,冰盖较薄,甚至存在连底冰,爆破效果不理想,因此本次爆破沿靠

近河道中泓线布置两排爆破坑。影响范围从中心界向岸边50~100 m,约占江心到岸边距离60%左右。

近年来,爆破手段在黄河上的应用取得了很大的进展<sup>[17-18]</sup>,而黑龙江作为界河以其地理位置、地形、水文气候的特殊性,使得冰盖厚、强度大、冰盖上有积雪层,黄河和美国陆军工程兵团的冰盖爆破经验不能直接套用。本项目组通过多年黑龙江冰盖爆破的观测,提出了爆破坑半径与炸药用量、冰下水深和冰盖厚度之间的关系式<sup>[19]</sup>。

$$R_c = 2.73W^{\frac{1}{3}} - 0.75t + \frac{1}{W^{\frac{1}{3}}} 0.42t^2 - 0.06 \frac{h_c^2}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

式中:  $R_c$ 为爆破坑半径(m);  $W$ 为炸药质量(kg);  $t$ 为冰厚(m);  $h_c$ 为冰下水深(m)。

在冰盖爆破中,孔距太大会导致相邻两孔难以贯通,太小则会浪费炸药。本次破冰爆破坑半径根据式(1)计算得到,孔间距选取为计算爆破坑直径的1.5倍。

#### 4 爆破坑直径的确定

实测爆破坑直径与冰厚的关系如图4所示,选取炸药用量3 kg、6 kg、9 kg和18 kg四种炸药量进行分析<sup>[20-21]</sup>。结果显示:(1)在相同炸药用量下,随着冰盖厚度从1 m增加至1.5 m,爆破坑直径也随之增加,表明在炸药用量小于18 kg时,冰盖厚度越大,炸药能更好地发挥效力。(2)在相同冰厚下,随着炸药量增加,爆破坑直径也明显增加,表明在冰盖厚度小于1.6 m、炸药量小于18 kg的情况下,炸药量越大爆破坑直径越大。

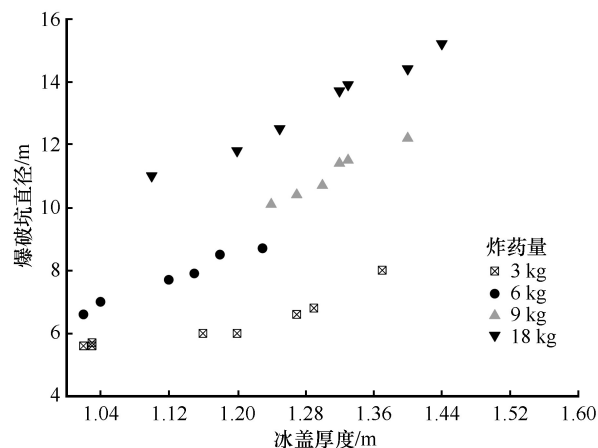


图4 实测爆破坑直径与冰厚的关系

Fig. 4 Relationship between measured blasting pit diameter and ice thickness for various explosive dosages

实测爆破坑直径与水深的关系如图5所示。结果显示:(1)炸药用量为3~6 kg时,随着水深在1.5~2.5 m增加,爆破坑直径基本保持不变,随着水深在2.5~3.0 m继续增加,爆破坑直径增加缓慢。表明在当前水深下,小的炸药用量已充分发挥其效力。(2)炸药用量为9~18 kg时,随着水深在2.5~3.0 m继续增加,爆破坑直径逐渐增加,且增加较快。表明炸药用量大时,水深较浅的地方开展爆破不能很好地发挥炸药的性能。

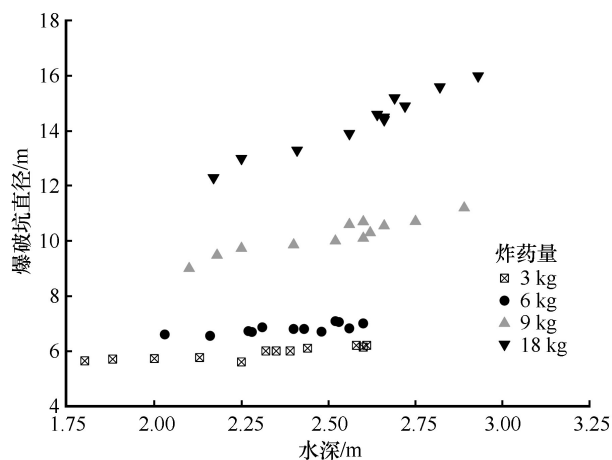


图5 实测爆破坑直径与水深的关系

Fig. 5 Relationship between measured blasting pit diameter and water depth for various explosive dosages

美国陆军工程兵团经验公式<sup>[11]</sup>为

$$D_{\text{opt}} = 15t \quad (2)$$

式中:  $D_{\text{opt}}$  为最优炸药用量条件下的爆破坑直径(m);  $t$  为冰厚(m)。

图6将由本项目组提出的新公式[式(1)]计算的爆破坑半径转化为直径,并与美国陆军工程兵团

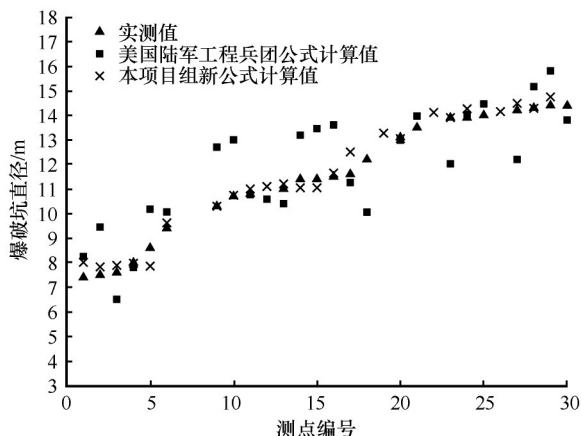


图6 实测爆破坑直径与预报爆破坑直径对比

Fig. 6 Comparison of measured blasting pit diameter and prediction of blasting pit diameter

经验公式计算的爆破坑直径、实测爆破坑直径进行了对比。如图所示,新公式计算值围绕实测值上下波动,二者差值较小,而陆军工程兵团经验公式计算的预测值与实测值数据差别较大。可知,新公式得出的爆破坑直径明显更接近实测值。

## 5 爆破坑的分类

为了方便描述爆破后爆破坑的特性,通过黑龙江大量爆破试验观测,对爆破坑进行分类,爆破坑不同区域分别进行了定义。爆破后,爆破洞坑形态主要为完全破碎坑[图7(a)]、山包状破碎坑[图7(b)]和标准破碎坑[图7(c)]。

完全破碎坑分为两个区域:2区为完全破碎区,包含水、表面浮冰和雪;3区为爆破裂缝区,包含埋在破碎的冰块或积雪下的裂缝。

山包状破碎坑分为两个区域:1区为山包状破碎区,包含堆积为山包状的碎冰和雪;3区为爆破裂缝区,包含埋在破碎的冰块或积雪下的裂缝。

标准破碎坑分为三个区域:1区为山包状破碎区,包含堆积为山包状的碎冰和雪;2区为完全破碎区,包含水、表面浮冰和雪;3区为爆破裂缝区,包含埋在破碎的冰块或积雪下的裂缝。爆破后,冰盖上产生纵横相交的裂缝[图7(d)],大部分裂缝被积雪覆盖,这些裂缝在开河期间也有助于冰块破裂。

## 6 结论

冰凌爆破是我国应对冰凌灾害的重要措施之一,通过一系列现场试验研究,得到如下结论:

(1) 准确地找到冰塞冰坝的潜在发生位置是有效爆破的前提。采用新型冰厚水深同步测量雷达在黑龙江呼玛段测量,掌握该河段冰厚和水深的分布,提前探测到冰塞冰坝潜在的发生位置,采取对应的防凌爆破措施。

(2) 探明爆破坑直径同炸药量、水深与冰厚的关系是正确评估爆破效果的关键。结果表明,炸药用量在18 kg以下,在炸药量一定时,冰盖厚度越大,炸药性能发挥越充分;随着炸药用量的增加,需要足够的水深才能确保炸药性能的充分发挥。将黑龙江呼玛段测量数据带入本项目组提出的爆破坑半径计算新公式中,计算值与实测值较为接近,可为北方高寒区河流冰下爆破提供参考。通过防凌爆破,2018年黑龙江呼玛段开河期间未发生因

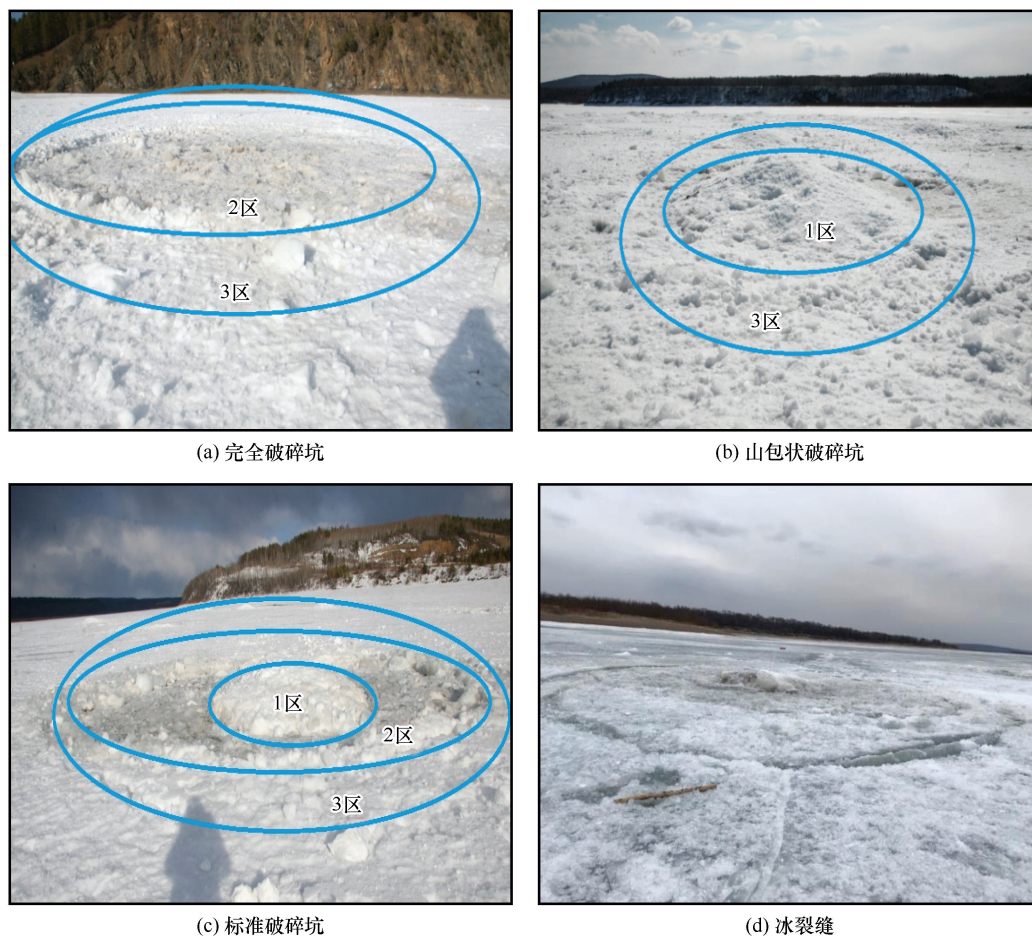


图7 爆破坑类型

Fig. 7 Type of blasting pits: complete crushing pit (a), mountain-shaped crushing pit (b), standard crushing pit (c) and post-blasting ice cracks (d)

冰塞冰坝造成的河道堵塞。

#### 参考文献(References):

- [1] Yang Kailin. Advances of ice hydraulics, ice regime observation and forecasting in rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 81–91. [杨开林. 河渠冰水力学、冰情观测与预报研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 81–91.]
- [2] Yin Huaitang, Yang Xuehai, Jiang Miao, et al. Experimental research on ice breaking by extended blasting cartridge under ice[J]. Engineering Blasting, 2010, 16(3): 12–15. [殷怀堂, 杨学海, 江淼, 等. 冰凌下水中延长药包爆破破冰的试验研究[J]. 工程爆破, 2010, 16(3): 12–15.]
- [3] Sun Zhaochu. Recent development of cold regions hydraulics in China[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 1990, 13(4): 97–105. [孙肇初. 中国寒冷地区水力学的近代发展[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1990, 13(4): 97–105.]
- [4] Wang Tao, Yang Kailin, Guo Xinlei, et al. Application of adaptive-network-based fuzzy inference system to ice condition forecast[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 112–117. [王涛, 杨开林, 郭新蕾, 等. 基于网络的自适应模糊推理系统在冰情预报中的应用[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 112–117.]
- [5] Wang Tao, Yang Kailin, Guo Xinlei, et al. Comparative study of ANFIS and ANN applied to freeze-up water temperature forecasting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 842–847. [王涛, 杨开林, 郭新蕾, 等. 模糊理论和神经网络预报河流冰期水温的比较研究[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 842–847.]
- [6] Wang Tao. River ice forecast[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2014. [王涛. 河冰预报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.]
- [7] Beltaos S. River ice jams[M]. [S. l.]: Water Resource Publication, 1995.
- [8] Wang Tao, Yang Kailin. Ice forecast by artificial neural networks in the middle route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1403–1408. [王涛, 杨开林. 神经网络算法在南水北调冰期输水中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1403–1408.]
- [9] Chen Chujun. Ice drain experience of several large projects during construction period in northern China[R]. Changchun: Northeast Survey and Design Institute, 1995. [陈储军. 我国北方河流几个大型工程施工工期流凌问题段排冰经验[R]. 长春: 东北勘测设计研究院, 1995.]
- [10] Duan Yuansheng, Wang Xianghong, Liu Shubao, et al. Application of blasting technique to against ice jam[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(Suppl 2): 220–226. [段元胜, 汪向红, 刘书宝, 等. 冰凌爆破技术探讨[J]. 冰川

- 冻土, 2003, 25(增刊2): 220 – 226. ]
- [11] United States Army Corps of Engineers. Design manual for river ice control engineering [M]. Wang Yisen, Yang Kailin, Zhang Bin, et al. trans. Beijing: China Water and Power Press, 2013. [美国陆军工程兵团. 河冰管控工程设计手册[M]. 汪易森, 杨开林, 张滨, 等译. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. ]
- [12] Malcolm M. Derivation of guidelines for blasting floating ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 1987, 13: 193 – 206.
- [13] Shi Rui, Xu Gengguang, Liu Derun, et al. Underwater test and analysis for explosion energy of explosives [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008, 31(4): 1 – 5. [史锐, 徐更光, 刘德润, 等. 炸药爆炸能量的水中测试与分析[J]. 火炸药学报, 2008, 31(4): 1 – 5. ]
- [14] Feng Bin, Fang Xiang, Mao Yiming, et al. Numerical simulation of ice blasting affected by different charge positions [J]. Explosive Materials, 2012, 41(4): 26 – 29. [冯彬, 方向, 毛益明, 等. 装药位置对冰凌爆破效果影响的数值模拟[J]. 爆破器材, 2012, 41(4): 26 – 29. ]
- [15] Wang Tao, Guo Xinlei, Fu Hui, et al. Effects of water depth and ice thickness on ice cover blasting for ice jam flood prevention: a case study on the Heilong River, China [J]. Water, 2018, 10(4): 700 – 712.
- [16] Guo Xinlei, Yang Kailin, Fu Hui, et al. Effect of uncertain parameters on ice processes simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 909 – 914. [郭新蕾, 杨开林, 付辉, 等. 冰情模型中不确定参数的影响特性分析[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 909 – 914. ]
- [17] Liang Xiangqian, Xiong Feng, Lu Xialing. Experimental research on underwater shock wave characteristic of ice blasting at Yellow River [J]. Blasting, 2014, 20(4): 1 – 4. [梁向前, 熊峰, 陆遐龄. 黄河爆破破冰的水中冲击波特性试验研究[J]. 爆破, 2014, 20(4): 1 – 4. ]
- [18] Liang Xiangqian, He Bingshun, Xie Wenhui. Experimental study on blasting effect upon thick ice of the Yellow River [J]. Engineering Blasting, 2012, 18(2): 83 – 85. [梁向前, 何秉顺, 谢文辉. 黄河冰层的爆炸破冰及作用效应试验[J]. 工程爆破, 2012, 18(2): 83 – 85. ]
- [19] Liu Zhiping, Wang Tao, Guo Xinlei, et al. Breaking ice with explosive in Heilongjiang River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(3): 253 – 260. [刘之平, 王涛, 郭新蕾, 等. 黑龙江防凌爆破试验研究[J]. 水利学报, 2017, 48(3): 253 – 260. ]
- [20] Wang Lu. Analysis of dynamic characteristics and explosion response of ice body [D]. Zhengzhou: North China Institute of Water Conservancy and Hydropower, 2011. [王璐. 冰体动力特性及爆炸响应分析[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2011. ]
- [21] Wu Ruibo, He Mingsheng, Wu Caigang, et al. The parameter optimization experiment of ice breaking by underwater blasting [J]. Engineering Blasting, 2014, 20(6): 25 – 28. [吴瑞波, 赫明盛, 武彩岗, 等. 水中爆破破冰参数的优化试验[J]. 工程爆破, 2014, 20(6): 25 – 28. ]

## Experimental study of anti-ice blasting with explosive in Huma section of the Heilongjiang River

LU Jinzhi<sup>1</sup>, YU Hongjing<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, MA Chaomeng<sup>2</sup>, LI Xinyang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co. Ltd., Tianjin 300222, China; 3. North China University of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** Ice dams of different degrees occur almost every year in Heilongjiang River during the ice cover breaking up period, and the resulting flood causes huge losses of people's lives and property, and anti-ice blasting is one of the main means to prevent the occurrence of ice dams. In order to ensure that ice jam flood disasters caused by ice dams do not occur when ice cover breaking up on a river, anti-ice blasting should carry out in the Huma section of the Heilongjiang River before ice cover breaking up in 2018. Through analysis of ice-water data including measured synchronously ice thickness and water depth, it was found that the narrow and slow flow channel is the potential location of ice dam and should be taken blasting measures. The relationship between the measured diameter of the blasting pit and the amount of explosive, ice thickness and water depth is analyzed, and the measured data in Huma section during blasting are brought into new equation for calculating the radius of blasting pit. The calculated value is close to the measured value, which would be useful for the anti-ice blasting in the northern cold regions.

**Key words:** ice cover; blast; explosive; Heilongjiang River; ice jam flood

(责任编辑: 周成林; 编辑: 武俊杰)