

文章编号:0559-9350(2017)03-0253-08

## 黑龙江防凌爆破试验研究

刘之平<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 郭新蕾<sup>1</sup>, 付辉<sup>1</sup>, 杨开林<sup>1</sup>, 彭旭明<sup>2</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. 黑龙江省防汛抗旱保障中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 炸药爆破冰盖或冰坝是防凌减灾的重要手段, 确定爆破坑半径同炸药用量、冰盖厚度等相关影响变量的关系是有效实施爆破的前提。通过黑龙江上游江段现场防凌爆破试验研究, 提出了防凌爆破的可靠方法和关键技术, 建立了表达黑龙江冰凌爆破中冰盖厚度、冰下水深、炸药用量同爆破坑半径之间关系的公式。新公式预报的爆破坑半径值和实测值平均相对误差在8.5%以内。同已有的研究成果比较, 本文论证了冰下水深对爆破坑半径的影响, 所提出的爆破坑半径公式不仅适应于冰盖厚度小的河流, 也适合高寒地区冰盖厚、强度大、水深浅的天然河流, 且预报精度较高。研究成果应用到2015—2016年开河前黑龙江上游漠河江段防凌爆破中, 确保该江段开河期间未发生冰塞和冰坝凌汛灾害。

**关键词:** 黑龙江; 河冰; 冰盖; 厚度; 凌汛; 爆破; 炸药

**中图分类号:** TV875

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slx.20160759

## 1 研究背景

黑龙江位于我国最北端, 为中俄界河, 平均每3年会发生一次具有一定规模的冰坝, 凌汛灾害严重。但黑龙江地处偏远, 交通和通讯不发达、观测设备和技术落后, 其防凌减灾研究一直处于相对落后状态。作为中俄界河, 不能通过修建水工建筑物等工程措施控制、预防或者减缓冰情灾害的发生, 只能采用有效的非工程措施实现预防冰坝发生或冰坝顺利破除等<sup>[1-2]</sup>。实测资料显示黑龙江上游开河前实测冰盖厚度能达1.8 m, 冰盖强度大, 冰盖上积雪覆盖层厚, 很难通过冰表面处理、冰盖的机械破坏、切割冰盖、气垫船破冰和河道开孔等非工程措施实现大面积的冰块结构的破坏和移动, 因此炸药爆破冰盖或冰坝成为黑龙江预防或缓解冰情灾害最有效的方法。

尽管在100年前就有采用炸药破冰的记载<sup>[3]</sup>, 但因开展该项研究受到河道冰情条件、河道周边环境限制, 且测量难度大、危险度高, 其研究进展一直比较缓慢<sup>[4-5]</sup>。美国陆军工程兵团Mellor通过10余年冰下爆破试验得到系列爆破资料, 运用回归分析开展爆破坑半径和冰盖厚度、炸药用量关系的研究<sup>[6-7]</sup>。在国内, 何秉顺等<sup>[8]</sup>提出了黄河上飞机投弹破冰与炮射技术破冰原则。梁向前等<sup>[9-10]</sup>以黄河内蒙古冰厚冻层为研究对象, 研究了冰面接触聚能爆炸和冰下水中爆炸两种破冰方式下, 炸药爆破的振速和水中冲击波压力的变化。佟铮等<sup>[11]</sup>通过黄河冰凌现场爆破和数值模拟, 研究爆破后冰块裂缝和冰的承压分布。在爆破技术方面, 段元胜等<sup>[12]</sup>通过工程实践, 总结防凌爆破冰盖的炸药孔布置方式、爆破的适宜河道宽度等参数指标。殷怀堂等<sup>[13]</sup>通过研究炸药本身的性能, 推导出冰盖下延长

收稿日期: 2016-07-19; 网络出版日期: 2017-01-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20170120.0929.001.html>

基金项目: 公益性行业科研专项(201501025); 国家自然科学基金项目(51179209, 51679263); 中国水科院基本科研业务费专项(HY0145C222016)

作者简介: 刘之平(1958-), 男, 山东青州人, 教授级高级工程师, 主要从事河冰水动力学和水工水动力学研究。

E-mail: liuzp@iwhr.com

通讯作者: 王涛(1975-), 女, 河南南阳人, 教授级高级工程师, 主要从事河冰水动力学及冰情预报研究。E-mail: 53737123@qq.com

药包长度同爆破破冰的炸药量用量的关系。以上河道冰下爆破研究成果中冰盖平均厚度多集中在0.5 m及以下。黑龙江实测最大冰厚可达1.8 m，故本研究根据黑龙江冰盖厚、冰层坚固、冰下水深浅的特点，开展黑龙江上游漠河江段冰下爆破现场试验研究，得到有效的防凌爆破方法和技术，建立爆破坑半径同炸药用量、冰盖厚度、冰下水深的理论关系，为实现炸药高效破冰提供科学依据和理论支撑。

## 2 防凌爆破试验方案

开河前炸药破冰主要用来预防冰坝形成，通过预防性的爆破，使开河期间冰盖能够顺利的破碎成小尺寸的冰块，易于向下游流动；爆破后，太阳辐射直接到达冰洞内与水体进行热交换，使水温升高，削弱冰盖的强度，加速开河时冰盖的破裂。冰坝形成后或冰坝形成期间的炸药破冰，主要为了破坏和移除冰坝，阻止或缓解将会产生的冰凌灾害<sup>[14-15]</sup>。

**2.1 炸药类型、用量和爆破时机选取** 美国陆军工程兵团研究表明：炸药类型对爆破效果影响可以忽略<sup>[16-17]</sup>。在中国，工程兵学院开展水下爆破采用了TNT炸药<sup>[18-19]</sup>。黄河上破冰采用了TNT炸药<sup>[11]</sup>和岩石乳化炸药<sup>[12]</sup>。黑龙江开河前的防凌破冰工作2011—2016年已经连续实施6年，均采用岩石乳化炸药<sup>[20]</sup>。

在冰的爆破中最关键问题是炸药用量的选取，美国陆军工程兵团根据多年爆破经验，推出了最优炸药用量 $W_{opt}$ 计算公式<sup>[8-9]</sup>：

$$W_{opt} = 21t^3 \quad (1)$$

式中： $W_{opt}$ 为最优炸药量，kg； $t$ 为冰厚，m。

式(1)在大量实测数据基础上拟合得到的，原始资料冰厚主要集中在0.5 m以下，对于黑龙江这种实测平均冰厚为0.9 m的情况通用性差<sup>[20]</sup>。所以通过黑龙江河道的爆破试验，找到适合黑龙江这种高纬度的天然河道冰下爆破理论成为研究的关键。

开河前爆破通常选择在冰坝形成前，气温稳定转正后进行。黑龙江爆破选择在开河前15 d左右进行，即保证爆破的冰块不会再冻结，也要确保冰盖有足够强度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开河防凌爆破时机的前提<sup>[21-24]</sup>。

**2.2 爆破地点选取** 黑龙江上游支流分布和河道走势如图1所示，额尔古纳河、石勒喀河及上游南侧支流额木尔河、盘古河等都是由西南流向东北，由低纬度流向高纬度，最大纬度差7度、纬距长700 km，使源头和支流开江早于干流，导致黑龙江上游江段形成“倒开江”。黑龙江上游河道特点：河道狭窄曲折，局部岛屿相连，分岔和串沟较多，比降变化较大，导致水流流态(流速和水深)沿程分布不均，所以上游河道在开河期间容易发生冰塞和冰坝，表1为黑龙江上游江段开河期冰塞冰坝分布情况<sup>[25]</sup>。从河道走势和历年资料来看，黑龙江上游河道易发生冰塞冰坝位置是从最上游洛古河到欧浦之间河段，21年记录数据显示冰坝中心在上游漠河县境内为16次。无论河道走势、支流分布、河床形态和历史冰情都显示上游漠河江段是冰塞冰坝的易发地点，所以把爆破试验、现场观测和数据采集均设在黑龙江上游的漠河段。



图1 黑龙江上游支流及河道走势

表1 黑龙江上游历史冰坝情况统计

| 年份   | 冰坝产生河段           | 河段长度/m | 水文站最大水头高度/m | 中心位置          | 冰坝起止日期<br>(月-日) | 所属行政区 |
|------|------------------|--------|-------------|---------------|-----------------|-------|
| 1950 | 加林达-鸥浦           | 243    | 9.40        | 鸥浦            | 05-09-05-11     | 塔河    |
| 1953 | 洛古河-漠河           | 60     | 7.46        | 洛古河           | 05-05-05-08     | 漠河    |
| 1956 | 洛古河-漠河           | 30     | 7.39        | 洛古河           | 05-08-05-10     | 漠河    |
| 1958 | 连金-湖通镇           | 477    | 10.14       | 马伦            | 05-05-05-10     | 塔河    |
| 1960 | 洛古河-霍尔漠津         | 981    | 13.56       | 加林达/连崮        | 04-27-05-10     | 漠河    |
| 1961 | 连崮               |        | 8.03        | 连崮            |                 | 漠河    |
| 1964 | 加林达-马伦           | 52     | 8.00        | 古城岛           | 05-02-05-14     | 漠河    |
| 1970 | 呼玛               |        | 5.22        | 呼玛            |                 | 呼玛    |
| 1971 | 洛古河-三道卡          | 694    | 9.90        | 洛古河           | 04-23-05-04     | 漠河    |
| 1973 | 加林达-湖通镇          | 462    | 8.20        | 古城岛           | 05-06-06-01     | 漠河    |
| 1977 | 漠河-开库康           | 224    | 6.65        | 漠河            |                 | 漠河    |
| 1981 | 洛古河-漠河           | 30     | 7.46        | 洛古河           | 04-28-04-30     | 漠河    |
| 1985 | 洛古河-霍尔漠津         | 981    | 12.60       | 加林达/连崮        | 04-17-05-29     | 漠河    |
| 1986 | 洛古河-马伦/漠河-开库康    | 249    | 9.25        | 加林达/漠河        | 05-04-05-08     | 漠河    |
| 1987 | 开库康-鸥浦           |        | 6.17        | 鸥浦            |                 | 塔河    |
| 1988 | 开库康              |        | 5.11        | 开库康           |                 | 塔河    |
| 1991 | 洛古河-马伦           | 249    | 8.80        | 洛古河           | 04-28-05-04     | 漠河    |
| 1994 | 洛古河-开库康          | 285    | 10.93       | 洛古河           | 04-29-05-10     | 漠河    |
| 1995 | 洛古河-下游<br>20km   | 30     | 10.10       | 洛古河           | 05-05-05-09     | 漠河    |
| 2000 | 金山乡-呼玛县          | 52     | 9.23        | 金山乡/呼玛<br>上江岛 | 04-29-05-01     | 漠河    |
| 2009 | 北宏-红旗岭/北<br>红-鸥浦 | 34     | (7.0以上)     | 红旗岭           | 04-16-04-21     | 漠河    |

### 3 试验分析

冰下爆破起爆过程为：起爆-冲击波上升-冲击达到顶峰-冲击作用回落-冲击波逐渐渐失，该过程通常持续时间几十秒，图2为冲击波到达顶峰的瞬间，通常在相同炸药用量下炸药爆破效果较好的工况冲击波到达的高度偏小。黑龙江开河前冰上积雪厚度平均可到30cm，爆破坑周围是破碎冰块和雪的混合物，标准破碎坑见图3所示<sup>[20]</sup>。分为3个区域，1区为山包状破碎区，由碎冰和雪堆积成的小山包；2区为完全破碎区，主要为碎冰块、雪和水的混合物；3区为爆破裂缝区，为埋在雪下的裂缝组成。

爆破工作的关键是通过大量实测资料和观测数据建立爆破坑半径( $R_c$ )与爆破相关变量之间的关系。这些相关变量包括：炸药的重量( $W$ )、冰下水深( $h_c$ )、炸药在冰下埋深( $d_c$ )、冰厚( $t$ )等。Young通过大量水下爆破的实测资料表明，当 $W < 70\text{kg}$ ， $d_c/W^{1/3} < 10\text{m/kg}^{1/3}$ 时，冰下爆破中 $d_c/W^{1/3}$ 的值近似常量，Mellor的研究表明，当 $0.5\text{kg} < W < 50\text{kg}$ 时， $t/W^{1/3}$ ， $R_c/W^{1/3}$ 的值也变化很小<sup>[8-9]</sup>。为了减少分析中变量的个数，建立其它变量同 $W^{1/3}$ 的比例关系式(2)一式(4)。

比例爆破坑半径 $Y$

$$Y = R_c / W^{1/3} \quad (2)$$

式中： $R_c$ 为爆破坑半径，m； $W$ 为炸药重量，kg。

比例冰厚 $X_1$

$$X_1 = t / W^{1/3} \quad (3)$$

式中： $t$ 为冰厚，m。

比例冰下水深 $X_2$

$$X_2 = h_c / W^{1/3} \quad (4)$$

式中： $h_c$ 为冰下水深，m。

选择回归方程(5)拟合上述变量之间的关系。

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_1^2 + b_4 X_1 X_2 + b_5 X_2^2 + b_6 X_1^3 + b_7 X_1^2 X_2 + b_8 X_1 X_2^2 + b_9 X_2^3 \quad (5)$$



图2 冰下爆破起爆瞬间

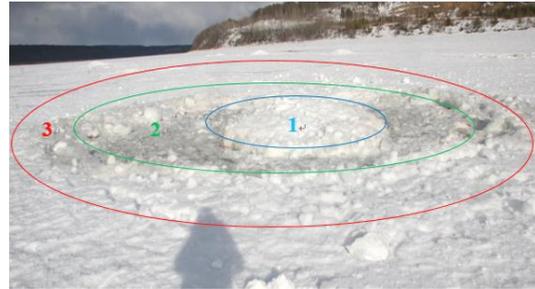


图3 标准爆破坑

**3.1 爆破坑半径同冰厚关系的研究** 作为中俄界河的黑龙江，其冰的爆破和观测存在如下困难：(1)受黑龙江冰厚和雪厚、河道地理信息数据不足、天气严寒、交通不便、爆破施工人员技术水平低等条件限制，测量数据的精度受限；(2)爆破坑边缘和爆破裂缝被爆破的雪和破碎冰覆盖，爆破坑边界和裂缝长度难以精确界定；(3)爆破后测量人员不敢近距离靠近爆破坑，测量爆破坑直径在外围一定距离内，目测爆破坑直径时不同的测量人员存在一定的偏差；(4)受到爆破客观条件限制，试验数值(如冰厚、水深)分布的范围有限，等。受上述爆破和测量条件限制，科研人员通过上百种工况试验，得到有效数据214组。破冰中炸药冰下放置位置遵循了美国陆军工程兵团提出的 $0 \sim 0.6t$ 为最佳距离原则<sup>[16]</sup>，故研究中忽略冰下埋深的影响。根据实测数据，建立爆破坑直径和冰盖厚度的关系如图4所示，实测冰盖厚度区间为 $0.51 \sim 1.55$  m，实测爆破坑直径主要分布区间为 $4.6 \sim 21.6$  m。从图上可以看出当冰盖厚度一定时，随着炸药用量增加，爆破坑直径随之明显增加。当保持炸药用量一定时，随着冰厚增加爆破坑直径在增加。研究表明当冰盖厚度大于一定值后，相同炸药情况下，随着冰盖厚度增加，爆破坑直径开始下降<sup>[9]</sup>。

建立在式(5)的回归方程基础上，计算的比例爆破坑半径同比例冰厚之间的纯三项式和二项式关系如下：

$$Y = 3.0815 - 2.6944 X_1 + 5.5689 X_1^2 - 3.2568 X_1^3 \quad (6)$$

$$Y = 2.6722 + 0.0640 X_1 + 0.0546 X_1^2 \quad (7)$$

**3.2 爆破坑直径同冰厚、水深关系的研究** 炸药水下爆炸时，在瞬间产生的高温和高压作用下，爆破产生的气体在水中形成气泡，气泡不断膨胀，当气泡内部压力达到静水压力时，由于惯性力作用，气泡继续膨胀，当膨胀压力为静水压力 $1/5 \sim 1/10$ 时<sup>[26]</sup>，受到外力作用，气泡开始收缩，同样由于惯性的作用，在气泡内压力达到静水压时仍继续收缩，这个过程反复作用，同时气泡在浮力作用下不断上升，直到脱离水面而爆破。这一反复的气泡脉动过程，引起连续脉动压力冲击水面和空气，导致水面下在反射波上面产生大量气穴，如图5所示<sup>[8]</sup>。所以炸药在水下爆破充分发挥其作用，需要适当的水深。

对于黑龙江这样的天然河道，河道分叉、浅滩交错，作为中俄界河，爆破地点只能在河道中泓线右侧，水深浅，冰盖厚，有的爆破坑甚至打孔到河道浅滩处。当炸药用量大时，水深较浅的地方开展爆破不能很好发挥炸药的性能。实测爆破坑直径同冰下水深的关系如图6所示，图上显示：(1)当炸药用量在 $1.0 \sim 6.0$  kg之间时，随着水深从 $2.0 \sim 5.0$  m之间增加，在相同炸药条件下爆破坑直径基本不变，表明在该炸药用量下当水深大于2 m时炸药性能能够得到充分发挥。(2)当炸药用量为9 kg

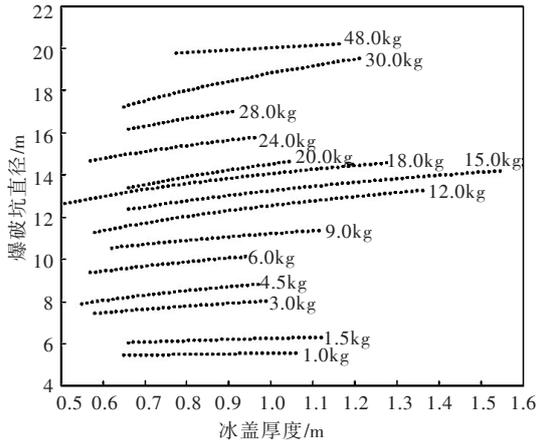


图4 实测爆破坑直径同冰厚关系

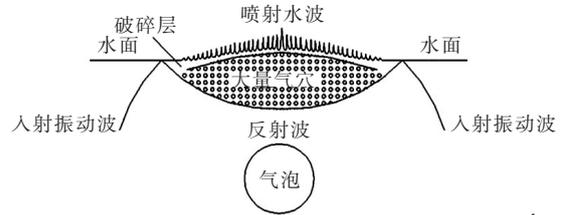


图5 水下爆破的过程特征

时，随着水深增加，爆破坑直径逐渐增加，但当水深增加到3.0 m，随着水深增加，爆破坑直径基本保持不变。(3)当炸药用量在12~15 kg之间时，随着炸药用量增加，爆破坑直径逐渐增加，当水深增加到4.5 m，随着水深增加，爆破坑直径仍然略有增加。(4)当炸药用量在20~30 kg之间时，受试验客观条件所限，试验样本的水深集中在0.5~2.5 m之间，随着水深增加爆破坑直径增加较快。

采用回归分析建立比例爆破坑半径同比例冰厚、比例水深关系的三项式(交差三项式和纯三项式)和二项式(交差二项式和纯二项式)见式(8)一式(11)。

$$Y = 3.2970 - 7.7716X_1 + 2.0904X_2 + 15.4095X_1^2 - 2.6299X_1X_2 - 0.6679X_2^2 - 8.7445X_1^3 + 1.7263X_1^2X_2 + 0.0054X_1X_2^2 + 0.1010X_2^3 \quad (8)$$

$$Y = 3.1993 - 6.1197X_1 + 1.5121X_2 + 10.0857X_1^2 - 0.8098X_2^2 - 5.1321X_1^3 + 0.1170X_2^3 \quad (9)$$

$$Y = 2.7515 - 1.0067X_1 + 0.4078X_2 + 0.9772X_1^2 - 0.3087X_1X_2 - 0.0264X_2^2 \quad (10)$$

$$Y = 2.7305 - 0.7480X_1 + 0.3225X_2 + 0.4232X_1^2 - 0.0560X_2^2 \quad (11)$$

**3.3 防凌爆破公式的推荐和试验结果评定** 式(6)一式(11)预报结果和实测结果的均方根误差和相关系数作为结果的评定标准，见表2。当忽略冰下水深的影响，只考虑比例爆破坑半径和比例冰厚关系时，三项式(6)和二项式(7)回归结果均方根误差均大于考虑冰下水深条件下的值式(8)一式(11)，相关系数前者均小于后者。表明在黑龙江河道开展防凌爆破研究中，冰下水深对爆破坑半径的影响不能忽略。

表2 不同回归方法结果的评定

| 工况                   | 回归多项式类型            | 评定方法   |        |
|----------------------|--------------------|--------|--------|
|                      |                    | 均方根误差  | 相关系数   |
| 比例爆破坑半径、比例冰厚关系       | 纯三项式<br>(式(6))     | 0.8686 | 0.9087 |
|                      | 纯二项式<br>(式(7))     | 0.8745 | 0.9073 |
|                      | 交差三项式回归<br>(式(8))  | 0.7577 | 0.9371 |
| 比例爆破坑半径、比例冰厚和比例水深的关系 | 纯三项式回归<br>(式(9))   | 0.7621 | 0.9311 |
|                      | 交差二项式回归<br>(式(10)) | 0.8294 | 0.9184 |
|                      | 纯二项式回归<br>(式(11))  | 0.8308 | 0.9180 |

在比例爆破坑半径、比例冰厚和比例水深的拟合关系式(8)一式(11)中，均方根误差和相关系数的评定指标为三项式均好于二项式，交叉三项式和交叉二项式评定指标分别好于对应的纯三项式和纯二项式。式(8)一式(11)预报结果的相对误差比较见表3所示，表3显示2个三项式预报结果各项误差值接近，2个二项式预报结果各项误差值接近。为了公式使用简单，采用纯三项回归式(9)作为防凌爆破参考计算公式。将炸药用量、冰厚、冰下水深和爆破坑半径代入式(9)得到

表3 预报爆破坑半径和实测爆破坑半径的相对误差比较

| 预报值同实测值<br>相对误差 | 三项式回归             |                  | 二项式回归              |                   |
|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|
|                 | 交叉三项式回归<br>(式(8)) | 纯三项式回归<br>(式(9)) | 交叉二项式回归<br>(式(10)) | 纯二项式回归<br>(式(11)) |
| 相对误差均值/%        | 7.4               | 7.5              | 8.4                | 8.5               |
| 最大相对误差/%        | 24.6              | 24.7             | 25.9               | 26.2              |
| 最小相对误差/%        | 0.0               | 0.1              | 0.1                | 0.0               |

$$R_c = 3.20W^{1/3} - 6.12t + 1.51h_c + 10.09\frac{t^2}{W^{1/3}} - 0.81\frac{h_c^2}{W^{1/3}} - 5.13\frac{t^3}{(W^{1/3})^2} + 0.12\frac{h_c^3}{(W^{1/3})^2} \quad (12)$$

式中： $R_c$ 为爆破坑半径，m； $W$ 为炸药重量，kg； $t$ 为冰厚，m； $h_c$ 为冰下水深，m。

采用式(8)一式(11)计算爆破坑半径同实测爆破坑半径比较见图7，图中预报值和实测值分布和走势一致，4个公式计算的预报值非常接近。表3中二项式和三项式平均相对误差仅差1%，为了进一步简化公式的应用，推荐采用纯二项回归式(11)作为黑龙江防凌爆破参考计算公式。将炸药用量、冰厚、冰下水深同爆破坑半径代入式(11)得到

$$R_c = 2.73W^{1/3} - 0.75t + 0.32h_c + 0.42\frac{t^2}{W^{1/3}} - 0.06\frac{h_c^2}{W^{1/3}} \quad (13)$$

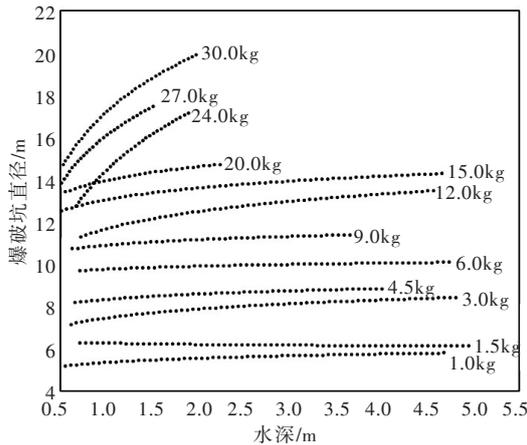


图6 实测爆破坑直径同冰下水深的关系

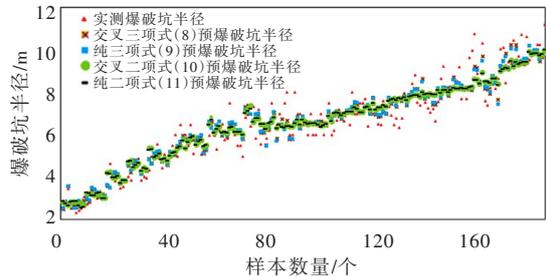
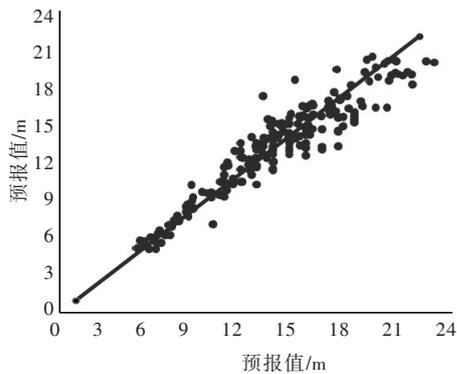
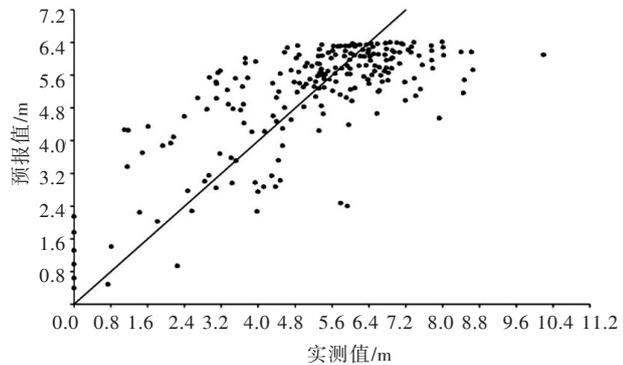


图7 实测爆破坑半径和预报爆破坑半径的散点图

图8(a)为式(12)计算的预测值同实测值的比较，图8(b)为美国陆军工程兵团采用回归分析方法计算的爆破坑直径和实测爆破坑直径对比<sup>[9]</sup>。数据点在1:1的直线两侧分布显示：图8(a)数据更加集中均匀分布在该直线的两侧，图8(b)中数据在线两侧比较分散，且爆破坑直径越大，实测值和预测值误差越大。所以本研究的数据点比图8(b)的更加集中在线的两侧，预报误差更小。



(a) 式(12)计算的预报值和实测值



(b) 美国陆军工程兵团的预报值和实测值

图8 实测爆破坑直径和预报爆破坑直径对比

## 4 结论

对于黑龙江这样冰盖厚度大、漫滩、分岔、江心岛分布较多的宽浅天然河道,开展冰上爆破有其特殊性。通过黑龙江现场防凌爆破试验和实测资料分析可得:(1)当忽略炸药类型和炸药冰下埋深时,除了考虑炸药用量和冰盖厚度影响到爆破坑半径外,冰下水深对炸药性能的发挥也起到关键作用。(2)通过回归分析法拟合出爆破坑半径同冰盖厚度、炸药用量和冰下水深之间关系的多个函数式,通过对这些公式预报结果的相关系数、均方根误差和相对误差进行分析,推荐出爆破坑半径的预测值和实测值误差小、相关性强、较为简单的公式(13)表达炸药破冰中各相关变量之间的关系。计算可得爆破坑半径的预测值同实测值平均相对误差为8.5%,预报精度高。提出的冰下爆破公式不仅适用于冰盖厚度小的天然河道,对于厚冰盖、浅河道的冰上爆破同样适用。(3)提出了开河前黑龙江防凌爆破的最佳时间,推荐了有效防止冰凌灾害发生的爆破地点。

对于河道现场冰凌爆破这种大尺度、测量危险性高、实测精度难以精确控制的现场试验,预测的爆破坑半径达到这样精度尚属不易。通过2015年和2016年开河前黑龙江上游漠河江段防凌爆破试验和试点应用,该江段开河期间未发生冰塞和冰坝凌汛灾害,特别是2016年,开河前4月份降雨量超过多年平均77%,但该河段仍能顺利开江。该研究成果能为高寒地区河流防凌爆破提供的技术支撑和理论依据。本研究中,受黑龙江河道条件限制,大炸药用量情况下水深对炸药性能的影响将需要开展试验进一步论证。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] SPYROS B . River Ice Jams[M] . USA: Water Resource Publication, 1995 .
- [ 2 ] SPYROS B . River Ice Breakup[M] . USA: Water Resource Publication, 2008 .
- [ 3 ] SHEN H T . Research on river ice processes: progress and missing links[J] . Journal of Cold Regions Engineering, 2003(12): 135-142 .
- [ 4 ] SHEN H T . River Ice Transport Theories: Post, Present, and Future[C]//15TH IAHR Symposium on Ice . Gdansk, Poland, 2000 .
- [ 5 ] WANG Tao, YANG Kailin, GUO Yongxin . Application of artificial neural networks to forecasting ice conditions of the Yellow River in the Inner Mongolia Reach[J] . Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(9): 811-816 .
- [ 6 ] MALCOLM M . Breaking ice with explosives[R] . USA: Cold Regions Research & Engineering Laboratory, US Army Corps of Engineers, 1982 .
- [ 7 ] United States Army Corps of Engineers . Ice Engineering: Engineering and Design[M] . Department of the Army, U . S . Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000, 2002 .
- [ 8 ] 何秉顺,丁留谦,闫新光,等 . 人工干预开河防凌措施与方案制定研究报告[R] . 北京:中国水利水电科学研究院,2009 .
- [ 9 ] 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 .
- [ 10 ] 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] . 工程爆破,2014,20(4): 1-4 .
- [ 11 ] 佟铮,杨旭升,薛培兴 . 黄河冰凌爆破机理研究[M]//中国爆破新技术Ⅲ . 北京:冶金工业出版社,2012 .
- [ 12 ] 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(9): 250-226 .
- [ 13 ] 殷怀堂,杨学海,江森,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 .
- [ 14 ] 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 .
- [ 15 ] 王涛,杨开林 . 神经网络理论在南水北调冰期输水中的应用[J] . 水利学报,2009,40(11): 1403-1408 .
- [ 16 ] 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,编译 . 北京:中国水利水电出版社,2013 .
- [ 17 ] MALCOLM M . Derivation of guidelines for blasting floating ice[J] . Cold Regions Science and Technology, 1987(13): 193-206 .

- [ 18 ] 夏长富 . 水下人工爆破冰凌技术研究与实践[J] . 爆破, 2014, 31(2): 126-130 .
- [ 19 ] 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 .
- [ 20 ] 杨开林, 郭新蕾, 王涛, 等 . 黑龙江开河防凌爆破试验研究报告[R] . 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016 .
- [ 21 ] 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 .
- [ 22 ] 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 .
- [ 23 ] 王涛 . 河冰预报[M] . 北京: 中国水利水电出版社, 2014 .
- [ 24 ] 郭新蕾, 杨开林, 王涛, 等 . 南水北调中线工程冬季输水数值模拟[J] . 水利学报, 2011, 42(11): 1268-1276 .
- [ 25 ] 戴长雷, 于成刚, 廖厚初, 等 . 冰情监测和预报[M] . 北京: 中国水利水电出版社, 2012 .
- [ 26 ] 俞统昌, 王晓峰, 王建灵 . 炸药的水下爆炸冲击波性能[J] . 含能材料, 2003, 11(4): 182-186 .

### Breaking ice with explosive in Heilongjiang River

LIU Zhiping<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, GUO Xinlei<sup>1</sup>, FU Hui<sup>1</sup>, YANG Kailin<sup>1</sup>, PENG Xuming<sup>2</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. Support Centre of Flood Control and Drought Relief of Heilongjiang Province, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Breaking ice cover or ice jam is essential to prevent flooding in Alpine region. Field experiments have been conducted to study ice-breaking process with explosive in the upper reach of the Heilongjiang River(Amur River)for several years. It is observed that the water depth under the ice cover is a crucial factor affecting crater radius of the breaking ice cover after explosion. Based on the experimental results, a theoretical model is developed to correlate the crater radius and the water depth, the cover thickness, and the explosive charge weight. The application of the model in the Heilongjiang River in 2015-2016 showed good agreement between predicted and measured crater radius. This research provides the scientific basis for breaking ice with explosive to prevent ice disaster in the river of Alpine region.

**Keywords:** Heilongjiang(Amur)River; river ice; ice cover; thickness; flood; blast; explosive

(责任编辑: 李福田)