水　利　学　报
2020年2月　　SHUILI　XUEBAO　　第51卷　第2期

文章编号：0559-9350(2020)02-0127-13

冰下爆破预防冰坝的理论探索及实践

杨开林[1]，郭新蕾[1]，王　涛[1]，郭永鑫[1]，彭旭明[2]，吴煜楠[2]
（1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室，中国水利水电科学研究院，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：把冰、水、热动力学理论与爆破效果相结合，提出了在冰坝易发点沿深泓线实施冰下爆破形成温度场预防冰坝灾害的理论，包括：爆破时间的选择，爆破孔的布置，爆破效果的估计，温度场水温及下游冰盖下水温的影响长度和冰盖融化速率的计算。黑龙江开江期冰下爆破的实践表明，爆破坑平均直径随炸药量的增加而增加，但在炸药量超过18 kg时，爆破坑平均直径随炸药量的增加变化不大；根据实测单位炸药量破碎的冰盖体积的效果，建议冰下爆破预防冰坝的单孔炸药量应不超过9 kg，包括冰盖厚度超过1 m的情况。

关键词：冰下爆破；冰坝；爆破孔布置；温度场；影响长度
中图分类号：TV875　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.13243/j.cnki.slxb.20190549

1　研究背景

我国高寒地区冬季江河冰情严重，开河时容易发生冰坝洪水灾害，如我国的黄河、黑龙江、松花江[1-2]。冰坝是开河期由大量的流冰在河道中局部堆积而成的[3]，一旦冰坝形成，上游水位短期内往往接近或超过历史上最高洪水位[4-5]，可导致水位壅高漫出河堤，淹没农田房屋，使沿岸水工建筑物和构筑物遭到破坏。采用爆破作业消除冰坝洪水危险是行之有效的非工程措施。

爆破作业清理冰的方法可以追溯到200多年前[6-8]。Fonstad等[8]通过冰盖下爆破试验提出了经验公式：

$$d = 0.388h,\ W_{opt} = 24.8h^3,\ D = 15.9h \tag{1}$$

式中：d为炸药放置在冰下的最优水深，m；W_{opt}为最佳装药量，kg；h为冰盖厚度，m；D为爆炸后爆破坑直径，m。Mellor[7]对以前资料进行了整编，给出的最佳装药量和爆破坑直径与冰厚的经验公式：

$$W_{opt} = 21h^3,\ D = 15h \tag{2}$$

他们的研究表明爆破的效果与炸药的类型无关，炸药筒可以放置在冰上的钻孔中，然后慢慢顺进冰下去，之后把它绑到木制的横挡上，横跨在钻孔上，如图1所示。

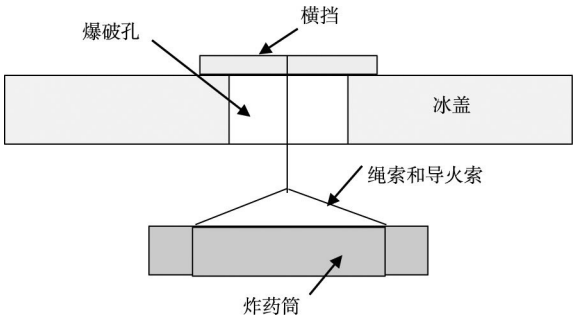


图1　炸药筒放置示意图

在我国黄河开河期，一直采用飞机投弹破除危险性冰坝，以防止严重冰坝洪水发生。黑龙江也曾经采用爆破破除危险性冰坝。近年来，已经

收稿日期：2019-08-05；网络首发时间：2020-03-03
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200229.1601.001.html
基金项目：国家重点研发计划课题(2018YFC1508402，2018YFC1508403)；公益性行业科研专项(201501025)；中国水科院科研专项(HY0145B642017)；国家自然科学基金项目(51979291)
作者简介：杨开林(1955-)，教授级高级工程师，主要从事水力控制研究。E-mail：yklciwhr@sohu.com

开展了大量的黄河冰盖下的爆炸破冰试验。梁向前等[9-10]试验研究了冰面接触聚能爆炸和冰下水中爆炸两种破冰方式，归纳提出了冰盖下单药包和多药包爆破水中冲击波压力经验公式。

爆破消除冰坝洪水风险作业可划分为两种：爆破破除冰坝和爆破预防冰坝，前者是在开河时冰坝已经形成条件下被动采取的应急措施，后者是在开河前主动采取的预防措施。

爆破破除冰坝需要考虑4方面问题[7]：时间、爆破效果、破冰顺序和冰的输运。一旦冰坝形成，河/江道过水断面就会严重堵塞，导致上游水位迅速上升，严重时将发生漫堤，甚至决堤事故，因此，在冰坝刚刚形成的几小时之内实施爆破破除冰坝是最好的时间。为了获得最大的爆破效果，炸药应该安装在冰坝下，但是如果不能够把人员放在冰坝上，这将很难实现。如果炸药不能安装在冰坝的下方，那就应该将炸药安装在有空洞或裂缝的地方，炸药一旦安装完毕，同时引爆炸药可获得最大的效果。破冰顺序应该从冰坝趾部开始向上游延伸，此时水流可以将破碎的冰块向下游输运。问题在于，在冰坝刚刚形成的几小时之内，水位还会不断的上涨，冰坝的稳定性一般还不能满足人员和设备的要求，实施冰下爆破存在很大的风险。

由于冰坝形成后采取冰下爆破作业存在很大的风险，因此，在水利部公益性行业科研专项“黑龙江冰情预报及灾害防治研究”资助下，把冰、水、热动力学理论与爆破效果相结合，开展了冰盖下爆破预防冰坝的理论探索和实践。

2　基础理论

为了使得冰盖下爆破预防冰坝的效果最大化，首先需要解决5个关键科学技术问题：爆破时间、爆破点、爆破效果、爆破孔的布置和温度场的作用。

2.1　爆破时间　冰下爆破后，爆破孔周围冰盖破碎，形成爆破坑，爆破后的碎冰除部分像雪花一样散落在爆破坑周围外，大部分堆积在爆破坑内，形成如图2所示水浸冰。当爆破后气温在0.0 ℃以下，则爆破坑内水会重新结冰形成冰盖，并把碎冰块冻结在一起，使得爆破效果大打折扣。因此，实施冰下爆破的最佳时间是气温由负温稳定转为正温的初期，以使爆破河段及下游冰盖有足够长的时间融化，达到爆破间接效果最大化。例如在开河前几个星期钻孔作业，这时冰盖承载能力较大，作业人员掉落冰窟窿的风险较小。



图2　黑龙江爆破坑照片

2.2　爆破点　冰坝易发点一般是河道变窄、弯道、浅滩、多分叉河段、跨河建筑物及水深由浅到深过渡区，当这些河段下游具有完整冰盖时，则上游来冰就可能在冰盖前堆积形成冰坝[2,11]。

弯道的水力学特点是：在水流的离心力作用下，凹入的河岸受到侵蚀，侵蚀下来的泥沙，通过弯遭环流，搬运到对岸沉积，逐渐形成圆弧状坡缓的凸岸。凹岸通常水深、流速较大；凸岸坡度缓和，近岸水流缓慢。在寒冷的冬季，凸岸一侧封河期易于形成岸冰，并向河心发展，缩窄河道，当上游大量浮冰来临，则会形成冰桥，成为冰盖的起点并向上游发展。当“武开河”时，即开河顺序是由上游到下游，由于弯道冰盖较厚，不易破损，大量水面流冰易于在这里上挤下潜形成冰坝。

浅滩河道的水力学特点是：上游河道底坡较陡，水深较浅，平均流速较大，而浅滩河宽较大，水深浅，平均流速小。在封河期，在浅滩流速<0.3 m/s的水面形成静态冰[12]，在上游水面漂浮大量来冰的情况下形成封河冰盖。如果上游河道水流急，短时间内水面不能冰封，则在寒冷空气的作用下，通过空气与水面的热交换，水中将产生大量的冰花和水内冰流到下游浅滩，通过下潜堆积在冰

盖前缘下面形成冰塞，从而导致上游水位升高，流速减小，冰盖向上游发展。

如果在开河前在冰坝易发点实施冰盖下爆破，迫使这些河段冰盖或者冰塞在上游开河前融化消除，则可能防止冰坝洪水的发生。

2.3 爆破效果 冰下爆破的效果可划分为直接效果和间接效果。直接效果的常用评估指标是用药量与形成爆破坑的面积大小。间接效果是指爆破坑形成后，由于出现水与空气的直接接触，增强了爆破坑处水与大气、冰与水的热交换，不仅使得爆破坑内冰融化，而且使得爆破坑周围冰盖加速融化，进而使得自由水面不断增加，同时，由于冰盖的融化，原来的冰域也转变为水域，水深增加，槽蓄量增加，有利于开江时冰排的顺利通过。在黑龙江进行的冰盖下爆破结果证明，在水深较浅的地方开展爆破不能很好发挥炸药的能力，在水深较大的地方可以提高爆破的直接效果[13]。下面将通过分析冰盖厚度融化速率与气温、水温、流速、水深的关系，确定爆破孔的最佳位置，以提高冰下爆破的间接效果。

2.3.1 *冰盖厚度融化速率与气温、水温、流速、水深的关系* 在没有雪盖的条件下，冰盖厚度融化速率与气温和水温的关系是[14]

$$\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{h_{ai}\left(T_s-T_a\right)}{\rho_i L_i}+\frac{h_{wi}}{\rho_i L_i}\left(T_m-T_W\right) \tag{3}$$

式中：h为冰盖厚度，m；t为时间，s；T_W为水温，℃；T_a为空气的日平均气温，℃；T_s为冰盖顶的温度，℃；T_m为冰点温度，℃，$T_m\approx 0.0$℃；ρ_i为冰的密度，ρ_i=915～917 kg/m^3；L_i为单位质量冰的潜热，当水结冰时，$L_i=3.33\times10^5$J/kg的潜热被释放；h_{ai}为空气与冰的热交换系数，W/(m^2·℃)，是一个综合考虑太阳辐射、空气的温度和湿度、风速、气压、云及降雨和降雪等因素的参数；h_{wi}为水与冰的热交换系数，W/(m^2·℃)。观察式(3)，右边第一项是冰表面与大气的热交换产生的冰盖厚度减小的速率，右边第二项是冰底面水与冰的热交换产生的冰盖厚度减小的速率，显然当气温和水温均为正时，冰盖厚度上下都会发生融化减小。

热交换系数h_{wi}与流速和水力半径的关系可描述为[3]：

$$h_{wi}=1622U^{0.8}/R^{0.2} \tag{4}$$

式中：U为沿流向的水深平均流速，m/s；H为过水断面横向坐标y处的水深，m；R为水力半径，m。假设河道单位长度上冰盖与河底湿周相同，则R=0.5H，这时式(4)可改写为：

$$h_{wi}=1863U^{0.8}/R^{0.2} \tag{5}$$

丹麦DHI的流速横向分布公式[15]：

$$U=\alpha U_m\left(H/H_m\right)^{3/2} \tag{6}$$

式中：U_m为整个河道过水断面的平均流速，m/s；H_m为过水断面平均水深，m；α为常数。显然，在河道过水断面上，水深H越大，流速U越大，当然，一些局部深坑除外。

把式(6)代入式(5)消去H得：

$$h_{wi}=c_{wi}U^{0.667} \tag{7}$$

式中$c_{wi}=1863\left(\alpha U_m\right)^{0.133}/H_m^{0.2}$。对于给定的过水断面和恒定流，$c_{wi}$是常数。

观察式(7)、式(6)、式(3)可得重要结论1：当水温为正时，在河道同一过水断面上，流速与水深成正比，冰盖厚度减小的速率随流速的增加而增加。

2.3.2 *爆破坑侧壁冰融化的速率与水温和流速的关系* 类似地，当采用柱坐标系时，爆破坑侧壁冰融化的速率与水温的关系可描述为：

$$\frac{\partial r}{\partial t}=\frac{h_{wi,z}}{\rho_i L_i}\left(T_m-T_W\right) \tag{8}$$

式中：r为水深z处侧壁到坐标原点的距离，m；$h_{wi,z}$为爆破坑侧壁的水与冰的热交换系数，W/(m^2·℃)，假设$h_{wi,z}$与流速具有式(7)关系，则：

$$h_{wi,z} = cv^{\beta} \tag{9}$$

式中：v为爆破坑内侧壁附近的流速，m/s；c和β为待定系数。

对于宽深比较大的河道，冰盖下流速的纵向分布特点是：冰盖底和河床上的流速为零，最大流速在冰盖和河床之间，最大流速与冰盖及最大流速与河床之间近似呈对数规律分布[16]，因此，在爆破坑尺寸相对河宽较小的情况下，冰盖下的较高流速将拖拽爆破坑内水流运动，增强了质量和热量的对流交换，水温趋于均匀，在坑内形成上下和左右环流，且迎水侧v大于背水侧，下部v大于上部。假设爆破坑内水温掺混均匀，则从式(8)和式(9)可得重要结论2：当水温为正时，爆破坑侧壁范围内冰融化的速率随水深的增加而增加，迎水侧融化速率大于背水侧。

图3是美国陆军寒冷地区研究与工程实验所(CRREL)在冷冻水槽中观测到的直径2.54 cm钻孔边缘的融化现象，迎水侧融化速率明显大于背水侧，下部大于上部。根据结论2，这种钻孔边缘的冰融化形状应是由于钻孔侧壁流速分布不同产生的。类似地，可以得出，爆破坑融化的形状类似吊挂的顶部开口的不对称的喇叭型。

2.3.3 *爆破孔的最佳位置* 由上面结论1和2，当爆破孔位于流速较大的地方时，爆破坑周围冰盖融化的速率较大，即冰下爆破间接效果较大，同时，对同一河道过水断面，水深越大的地方，水深平均流速也大，从中可得重要结论3：爆破孔的最佳位置是河道冰坝易发点的主槽深泓线，那里是水深流速大的地方。

2.4 爆破孔的布置 冰坝易发点的河道一般为复式河道，可划分为主槽和漫滩，主槽水深和流速较大，漫滩水深和流速较小。在滩槽交界面附近，水深和流速发生急剧变化，水流紊动强度大，形成复杂的横向二次流和螺旋流，使滩槽水体发生大量的质量交换和对流热量交换[17-18]。

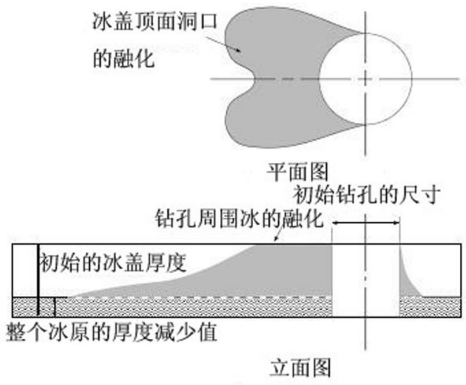


图3 冰盖上钻孔周围的融化状态

在黑龙江现场的观察发现，在冰下爆破实施江段，开河前会发生下游相当长江段的冰盖突然崩解的现象，这表明爆破提高的水温对下游冰盖融化有很大作用。为了使得冰下爆破预防冰坝的成功性和投入的经济性，理想的目标是通过爆破形成具有一定规模的温度场，不仅消除爆破河段的冰盖，而且消除下游相当长河道的冰盖。换句话说，冰下爆破预防冰坝不仅要考虑爆破的直接效果，更要考虑冰、水、热动力学作用的间接效果。为此，基于复式河道的流动和热交换特点及爆破坑周围冰盖融化的特点，可以采用下述爆破孔布置方式：

(1)根据河宽，只在深泓线附近沿流向布设几列爆破孔，例如1～3排，以形成一定规模的温度场，然后利用主槽和漫滩的质量和热量对流以促使两侧漫滩和下游冰盖的解冻；

(2)考虑爆破间接效果的作用，爆破孔之间的间距以大于相邻爆破坑的半径之和为宜，沿纵向的相邻爆破孔的间距宜大于横向相邻爆破孔的间距，其原因一是纵向流速大，二是上游爆破坑吸收的热量将传递到下游，增强了下游爆破坑周围冰盖的融化速率。

2.5 温度场作用 在按照上述爆破时间和爆破孔布置实施冰下爆破后，爆破坑内碎冰和周围冰盖将首先融化，然后爆破坑自由水面相互连通形成清沟，形成局部温度场，随后，随着清沟两侧冰盖的融化，形成全断面自由水面的温度场。

下面分析温度场形成后，场水温与长度的关系，场水温对下游冰盖下水温的影响长度，下游冰盖厚度与场水温和时间的关系等。为使问题简化，假设：(1)过水断面为矩形；(2)温度场明流和下游冰盖下流动为均匀流。

2.5.1 *温度场水温与气温和温度场长度的关系* 冰下爆破河段形成温度场后，忽略温度扩散的影

响，则一维热对流方程可描述[14]为：

$$\frac{\partial T_W}{\partial t}+U_1\frac{\partial T_W}{\partial x}=\frac{h_{wa}\left(T_a-T_W\right)}{\rho C_p H_i} \tag{10}$$

式中：x为沿流向的距离，m；U_1为温度场的流速，m/s；H_1为温度场的水深，m；ρ为水的密度，一般取ρ=1000 kg/m^3；C_p为水的比热，J/kg℃，在0℃时，C_p=4217.7 J/kg℃；h_{wa}为水向空气的热交换系数，是一个综合考虑太阳辐射、空气的温度和湿度、风速、气压、云及降雨和降雪等因素的参数，对北美地区，大气和水交界面的热交换系数h_{wa}=20 W/(m^2·℃)[3]。

采用特征线方法，式(10)可改写为：

$$\frac{\mathrm{d}T_W}{\mathrm{d}t}=\frac{h_{wa}\left(T_a-T_W\right)}{\rho C_p H_i} \tag{11}$$

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=U_1 \tag{12}$$

式中x为水流质点离温度场进口的距离，m。

在一天时间内，日平均气温为常数，求解式（11）常微分得：

$$T_W=T_a-\left(T_a-T_{W0}\right)\mathrm{e}^{-h_{wa}t\Big/\left(\rho C_p H_1\right)} \tag{13}$$

$$t=x\Big/U_1 \tag{14}$$

式中T_{W0}为t=0时刻温度场进口水温，℃。

对于静水，x=0，式(13)表示水温随时间的增加成自然指数增加。在爆破初期的爆破坑内的水体可以认为是静水，这时水温随气温的增加而快速增加，但随着碎冰的减少，冰盖下流动将使得爆破坑内水体流动，把热传递到下部，导致爆破坑内的水温下降。

当流速不为零时，把式(14)代入式(13)可得温度场水温与距离x的关系：

$$T_W=T_a-\left(T_a-T_{W0}\right)\mathrm{e}^{-h_{wa}x\Big/\left(\rho C_p H_1U_1\right)} \tag{15}$$

当温度场长度为x_1，则对应水温：

$$T_{W1}=T_a-\left(T_a-T_{W0}\right)\mathrm{e}^{-h_{wa}x_1\Big/\left(\rho C_p H_1U_1\right)} \tag{16}$$

式中：T_{W1}为温度场出口水温或下游冰盖前缘流入水温，℃。

在一般情况下，x_1<10^{4}m，即$h_{wa}x_1\Big/\left(\rho C_p HU\right)$成立，式(16)可改写为：

$$T_{W1}-T_{W0}=\left(T_a-T_{W0}\right)h_{wa}x_1\Big/\left(\rho C_p H_1U_1\right) \tag{17}$$

在自然环境下，冰盖下水温T_{W0}非常接近T_m，即$T_{W0}\approx$0℃[19]，因此，可得重要结论4：温度场出口水温T_{W1}与温度场长度、气温及水与空气热交换系数的积$T_aH_{Wa}x_1$成正比，与单宽流量H_1U_1成反比。

2.5.2　温度场水温对下游冰盖下水温的影响长度　对于温度场下游冰盖下的流动，一维热对流方程可描述[14]为：

$$\frac{\partial T_W}{\partial t}+U_2\frac{\partial T_W}{\partial x}=\frac{h_{wi}\left(T_m-T_W\right)}{\rho C_p H_2} \tag{18}$$

式中：U_2为温度场下游冰盖下流速，m/s；H_2为冰盖下水深，m，即冰盖底高程与江底高程之差。

与节2.5.1类似可得：

$$T_W=T_m-\left(T_m-T_{W1}\right)\mathrm{e}^{-h_{wi}\left(x-x_1\right)\Big/\left(\rho C_p H_2U_2\right)}\approx T_{W1}\mathrm{e}^{-h_{wi}\left(x-x_1\right)\Big/\left(\rho C_p H_2U_2\right)} \tag{19}$$

假设x=x_2时，由于水与冰的热交换，冰盖下水温从T_{W1}下降到温度场进口水温T_{W0}，则称L=x_2−x_1为温度场水温对下游冰盖下水温的影响长度，这时：

$$T_{W0}=T_{W1}\mathrm{e}^{-h_{wi}L\left/\left(\rho C_p H_2 U_2\right)\right.} \tag{20}$$

当$L<10^4$m时，$h_{wi}L\left/\left(\rho C_p H_2 U_2\right)\right.<<1$，上式改写为：

$$L\approx\frac{\rho C_p H_2 U_2}{h_{wi}}\left(1-\frac{T_{W0}}{T_{W1}}\right) \tag{21}$$

把式(5)代入式(21)：

$$L\approx\frac{\rho C_p H_2^{1.2} U_2^{0.2}}{1863}\left(1-\frac{T_{W0}}{T_{W1}}\right)$$

由上式可得重要结论5：场水温、冰盖下水深和流速越大，场水温对下游冰盖下水温的影响长度L越大。

当取ρ=1000 kg/m^{3}和C_p=4217.7 J/kg℃，则可得：

$$L\approx 2264H_2^{1.2}U_2^{0.2}\left(1-T_{W0}/T_{W1}\right) \tag{22}$$

2.5.3 温度场下游冰盖厚度与温度场水温、气温和时间的关系 式(3)也适合于温度场下游冰盖厚度的变化，在没有雪盖的条件下，冰盖厚度的变化与气温和水温的关系为：

$$h=h_0+\frac{t}{\rho_i L_i}\left(h_{ai}\left(T_s-T_a\right)+H_{Wi}\left(T_m-T_W\right)\right) \tag{23}$$

当取$T_s=T_m=0$ ℃，将式(19)代入式(23)可得温度场下游x处冰盖厚度随时间变化的计算公式：

$$h=h_0-\frac{h_{wi}T_{W1}t}{\rho_i L_i}\mathrm{e}^{-h_{wi}\left(x-x_1\right)\left/\left(\rho C_p H_2 U_2\right)\right.}-\frac{h_{ai}T_a t}{\rho_i L_i} \tag{24}$$

式中：右边第二项$Dh_1=h_{wi}T_{W1}t\mathrm{e}^{-h_{wi}\left(x-x_1\right)\left/\left(\rho C_p H_2 U_2\right)\right.}\left/\left(\rho_i L_i\right)\right.$为$x$处受冰和水热交换影响减小的厚度，右边第三项$Dh_2=h_{ai}T_a t\left/\rho_i L_i\right.$为$x$处受气温和冰热交换影响减小的厚度。

3 黑龙江冰下爆破预防冰坝的实践

3.1 基本情况 黑龙江位于我国最北端，为中俄界河，全长4363 km。黑龙江气候寒冷，最低气温可达-50 ℃以下，封江日期长，从每年的11初到次年的4月末，冰盖厚度超过1 m。开江时，通常是上游先开，下游后开，形成“武开江”。自1950年代以来，黑龙江局部江段卡塞几乎年年发生，平均3年左右形成一次具有一定规模的冰坝洪水，严重威胁到沿岸人民群众生命财产安全。

“黑龙江冰情预报及灾害防治研究”课题组与黑龙江防汛抗旱保障中心和黑龙江省水文局合作，从2015—2019年在黑龙江开展了冰下爆破预防冰坝的理论探索及实践，采用的是岩石乳化炸药。每年，在黑龙江上游漠河县、呼玛县和黑河市容易发生卡冰的22处冰坝易发点实施冰下爆破。初期，参考国内外的实践经验，破冰宽度一般为天然河道冬季河宽的60%左右，因为两岸附近40%左右的冰盖，其有效水深已经很小，甚至形成连底冰，在这些地方实施爆破的效果一般不好[13]。后期，随着把冰、水、热动力学理论与爆破效果相结合的研究，采用了2.4节爆破孔的布置，减小河道横向爆破宽度，增加了纵向爆破的长度，以便形成一定规模的温度场。下面分析2018年4月在呼玛县金山乡新街基王八大汉江段浅滩交界处的冰下爆破及其效果。

为了提高冰下爆破预防冰坝的效果，首先采用双频雷达[20]测量了爆破实施江段的冰盖厚度和水深的分布，以确定深泓线大致位置。如图4所示，所研究浅滩上游小岛将江道分成两部分，顺流向右侧部分属于我国，小岛及左侧部分属于俄国。交汇口上游水浅流速较快，主槽(有水区域)过水断面平均水深约1 m，平均冰盖厚度1.1 m，漫滩(无水区)铺满冰盖。交汇口下游浅滩主槽过水断面平均水深约1.5 m，流速较小，平均冰盖厚度1.5 m，如图5所示。由于黑龙江冰厚较大，融化后会使得槽蓄量大大增加，对开江洪水的影响不容忽视。

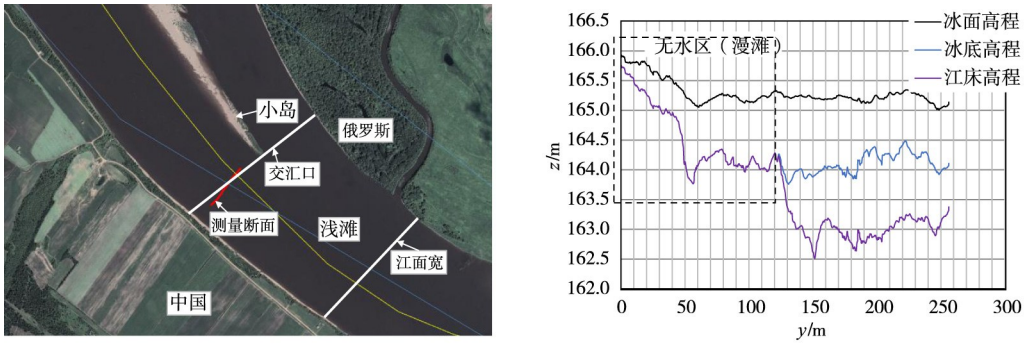


图4　浅滩上游典型断面实测冰面、冰底、江床高程

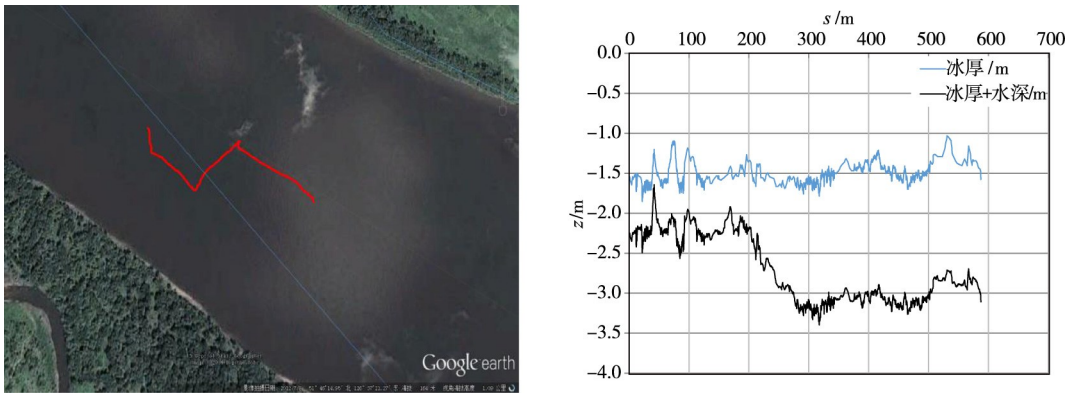


图5　浅滩中部纵向和横向典型断面实测冰面、冰底、江床高程

3.2　炸药量及爆破孔布置　为了研究需要，把长约2300 m的江段按照从上游到下游顺序划分为6个区，爆破孔布置如下：

1区(交汇口上游)：长500 m×宽100 m，布置2列，孔距50 m，共20孔，每列每孔炸药量分别是24、27 kg；

2区：长400 m×宽80 m，布置2列，孔距40 m，共20孔，每列每孔炸药量分别是24、27 kg。

3区：长400 m×宽80 m，布置2列，孔距40 m，共20孔，每列每孔炸药量分别是21、27 kg。

4区：长400 m×宽80 m，布置2列，孔距40 m，共20孔，每列每孔炸药量分别是21、27 kg；

5区：长300 m×宽90 m，布置3列，共40孔，每列每孔炸药量分别是3、9、18 kg，分别对应孔距15、30、30 m；

6区：长度300 m×宽90 m，布置3列，共40孔，每列每孔炸药量分别是6、9、18 kg，分别对应孔距15、30、30 m。

呼玛合计炸药用量2660 kg，爆破孔160个。在下面统计分析的过程中，把冰盖厚度变化在0.1 m范围的相同炸药量的爆破坑归为同一类，例如：爆破孔装药量为3 kg，冰盖厚度在1.0 ~ 1.1 m之间，则归为同一类；爆破孔装药量为3 kg，冰盖厚度在1.1 ~ 1.2 m之间，则归为另一类；以此类推，爆破孔装药量为6 kg，冰盖厚度在1.0 ~ 1.1 m之间，也归为同一类等。为了减小观测误差和冰厚不均的影响，对同一类爆破坑的冰厚、水深、爆破坑直径分别取平均值，则可得表1爆破区平均冰厚h、平均水深H、炸药量W、爆破坑平均直径d的一览表，其中炸药量24 kg爆破坑冰厚变化从0.3 m到1.2 m，爆破坑直径变化较大，表中只列出冰厚超过1 m的统计结果。

观察表1可得下述结论：

(1)爆破坑平均直径随炸药量的增加而增加，但在炸药量超过18 kg时，爆破坑平均直径变化不大，甚至减小。例如，在炸药量18 kg、冰厚1.16 ~ 1.44 m时，爆破坑平均直径在12.6 ~ 13.32 m之间，但是，在炸药量分别为21、24、27 kg、冰厚超过1 m时，爆破坑最大平均直径分别为12.5、11.7、11.86 m。一般来说，炸药量增大到一定程度，爆破坑直径可能增大微小，但爆破坑直径随炸

表1　爆破直接效果一览表

序号	区域	平均冰厚 h/m	平均水深 H/m	炸药量 W/kg	爆破坑平均直径 d/m	单位炸药量破冰量 V/(W/(m³/kg))	说明
1	5	1.04	0.89	3	6.68	12.10	
2		1.18	1.07		6.50	13.09	
3		1.26	1.14		6.68	14.73	
4		1.34	1.08		7.38	19.07	
5	5,6	1.02	1.20	6	7.32	7.16	
6		1.16	1.20		7.14	7.70	
7		1.24	1.27		7.24	8.52	
8		1.34	1.12		6.83	8.19	
9	5,6	1.27	1.20	9	10.24	11.58	
10		1.36	1.16		10.58	13.28	
11		1.45	1.11		10.58	14.13	
12	5,6	1.16	1.50	18	12.60	8.07	
13		1.25	1.41		13.05	9.32	
14		1.36	1.31		13.32	10.55	
15		1.44	1.30		13.27	11.07	
16	3,4	1.06	0.70	21	12.36	6.03	
17		1.16	0.65		12.50	6.79	
18		1.27	0.30		10.58	5.30	水深浅
19	1,2	1.23	0.55	24	11.70	5.51	
20	1–4	0.64	1.03	27	14.00		
21		0.75	1.07		13.97		
22		0.95	0.69		10.85		
23		1.07	0.98		11.86	4.36	
24		1.17	0.55		11.24	4.29	
25		1.25	0.18		10.50	4.01	水深浅

药量增加减小属于异常，产生这一原因可能是21 ~ 27 kg炸药量爆破孔下面过水断面水深偏小，不能充分发挥炸药的爆破的能力，今后冰下爆破应尽可能在水深处实施。

(2)在炸药量小于等于18 kg且冰厚在1 ~ 1.5 m时，同一炸药量产生的爆破坑平均直径随冰厚的变化不大。例如，当炸药量为6 kg时，在冰厚1.02 ~ 1.34 m范围内，最小与最大爆破坑直径分别为6.82 m和7.32 m，仅相差0.5 m。利用空气、冰与水物理特性差异实现水情全天候自动化监测[21-22]表明，在实施冰下爆破前，气温表现为白天正温，夜晚负温，冰盖内部出现液态水，冰盖层疏松[23]，这可能是产生前述现象的主要原因。

从国外经验式(1)和(2)来看，评定冰下爆破的直接效果是炸药量和爆破坑直径与冰厚的最优关系。当冰厚1.1 m和1.45 m时，如果采用式(2)确定炸药量W_{opt}和爆破坑直径D，当冰厚1.1 m时，W_{opt}≈28 kg和D=16.5 m；当冰厚1.45 m时W_{opt}=63.6 kg和D=21.7 m，但是，在呼玛县江段的爆破实测，在冰厚1.07 m和炸药量为27 kg时，D=11.9 m，比式(2)计算的D=16.5 m小得多，其爆破直接效果不如炸药量18 kg的。其主要原因可能是式(1)和(2)来源的爆破试验是气温长期在负温下进行的，那时冰盖坚实，结构强度高，而冰下爆破预防冰坝是在冰盖疏松条件下进行的。可以得出重要结论6：国外经验公式(1)和(2)炸药量和爆破坑直径与冰厚的最优关系不适用于黑龙江开江期冰下爆破实际，当冰厚超过1 m时，将造成炸药量的很大浪费。

根据表1，在冰厚超过1 m时可得图6爆破坑直径与炸药量关系图，其中曲线为多项式趋势线，爆破坑直径与炸药量的函数关系近似为：

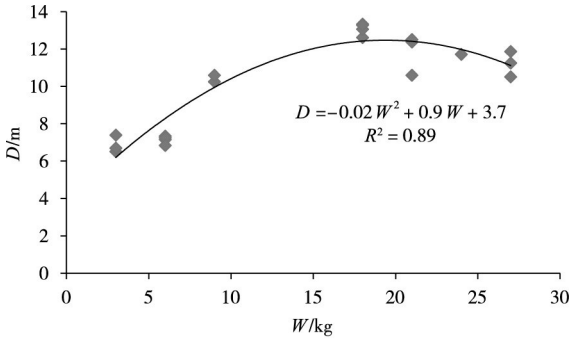


图6　爆破坑直径与炸药量关系

$$D = -0.02W^2 + 0.9W + 3.7 \tag{25}$$

为了评估爆破的直接效果，表1也列出了单位炸药量的破冰量V/W，其中：$V = \pi h d^2/4$为炸药量W破碎的冰盖体积。V/W大，表示1kg炸药量破碎的冰盖体积大，爆破的直接效果好。观察表1可知，当W=3 kg时，V/W=(12.1 ~ 19.1)m^3/kg，爆破的直接效果最好；当W=9 kg时，V/W=(11.6 ~ 14.1) m^3/kg，爆破的直接效果次之；当W=18kg时，V/W=(8.1 ~ 11.1)m^3/kg；当W>18kg时，V/W<7.0 m^3/kg，爆破的直接效果较差。

综上所述，考虑实施冰下爆破前冰盖层疏松的特点，建议黑龙江冰下爆破预防冰坝的单孔炸药量不超过9 kg。

3.3　爆破后冰情的变化　呼玛县天气预报日平均温度将在2018年4月7日转正，所以冰下爆破于这天实施。表2列出了呼玛县2018年4月实际历史天气，从中可知呼玛县日平均气温直到2018年4月14日才稳定转正。需要说明的是，黑龙江爆破江段的气温通常比呼玛县气温低，另外，由于缺乏日平均气温资料，采用了以最高气温和最低气温平均的方法估计。

2018年4月爆破江段的冰情变化可划分为四个阶段：

第一阶段：7日至13日期间，日平均气温在−2.5 ℃与5.5 ℃之间交替变化，当夜晚气温在零度以下时，爆破坑水面会结冰；当白天气温转正后，冰盖表面融化形成水膜。

第二阶段：14日至17日期间，日平均气温从2.5 ℃增加到11 ℃，自17日开始爆破江段1区和2区爆破区域冰盖融化形成明水清沟，如图7所示；但是，其他爆破区域爆破坑没有出现明显水面。产生这一现象的主要原因是：(1)1区和2区的冰盖较薄，爆破区域冰厚在0.3 ~ 1.1 m之间，虽然爆破孔间距较大，达40 ~ 50 m，但是由于冰下过水断面平均水深约为1 m，流速较高，爆破坑内碎冰同时受到水温融化和底部流速的冲蚀，另外，由2.3节结论1和2：当水温为正时，冰盖厚度和爆破坑侧壁冰融化的速率随流速的增加而增加，所以1、2区爆破坑融化速度快；(2)其他爆破区域冰盖较厚，流速较小，爆破坑融化较慢。

第三阶段：18日至23日期间，19日爆破江段下雪，延缓了爆破区域的解冻，经历20—23日的持续正温，特别是23日平均气温达12.5 ℃，到24日，除江中暗礁外，爆破江段完全解冻，形成明流，见图8，但爆破江段上下游仍然处于冰封状态。

第四阶段：25日至28开江期间，凌情总体平稳，仅黑龙江上游漠河县洛古河江段和呼玛县鸥浦江段由于河道水位偏低，河道中出现浅滩，导致水流动力不足，流凌不畅出现卡塞并形成冰坝。洛古河卡塞长度30多公里，历时5天后逐渐解体；鸥浦江段卡塞当日内解除，未造成险情和灾情。

综上所述，在冰盖较厚而流速较小时，考虑到初期爆破坑直径一般小于15 m：(1)应适当减小爆破孔间距；(2)在江面较宽且江中存在暗礁的情况下，应适当增加爆破坑纵向列数；(3)爆破孔应布置在水深的地方，以使得爆破江段尽早解冻，形成温度场相应，促使下游更大范围提前解冻，减小开江过程中发生冰凌卡塞的风险。

3.4　温度场的效果　下面应用式(17)、式(22)、式(24)计算分析爆破区形成明流后温度场出口水温T_{W1}、温度场对下游冰盖下水温的影响长度L及冰盖厚度随气温、热交换系数、温度场纵向长度的变化。

表2　黑龙江呼玛县2018年4月天气

日期	最高气温/℃	最低气温/℃	平均气温/℃	天气	风向风力	说明
2018/4/1	10	−5	2.5	阴~雨夹雪	西南风5~6级	
2018/4/2	3	−10	−3.5	多云	西北风4~5级	
2018/4/3	1	−12	−5.5	多云	西北风4~5级	
2018/4/4	0	−8	−4	多云~晴	西北风4~5级	
2018/4/5	1	−10	−4.5	晴	西北风4~5级	
2018/4/6	4	−15	−5.5	多云	东北风3~4级	
2018/4/7	3	−5	−1	雨夹雪~阴	北风3~4级	实施爆破
2018/4/8	6	−11	−2.5	多云	西北风3~4级	
2018/4/9	13	−3	5	多云	西北风3~4级	
2018/4/10	12	−1	5.5	阴~雨夹雪	西北风4~5级	
2018/4/11	10	−9	0.5	多云	北风3~4级	
2018/4/12	8	−11	−1.5	多云	北风3~4级	
2018/4/13	9	−10	−0.5	多云	西北风3~4级	
2018/4/14	11	−6	2.5	多云	西北风3~4级	
2018/4/15	13	−4	4.5	多云	西北风3~4级	
2018/4/16	19	3	11	多云	西南风3~4级	
2018/4/17	13	−8	2.5	多云~晴	西北风3~4级	出现清沟
2018/4/18	14	−6	4	晴	西北风3~4级	
2018/4/19	20	2	11	多云~中雨/雪	东风3~4级	
2018/4/20	12	−5	3.5	多云	东北风4~5级	
2018/4/21	9	−5	2	晴~多云	西北风4~5级	
2018/4/22	17	−3	7	晴	西风3~4级	
2018/4/23	23	2	12.5	晴	西风4~5级	
2018/4/24	25	1	13	晴~多云	西风3~4级	爆破区形成明流
2018/4/25	16	−2	7	阴~多云	西北风4~5级	



图7　2018年4月17日1区和2区形成清沟



图8　2018年4月24日爆破江段冰盖融化

计算时假设江道为矩形，大气和水的热交换系数h_{Wa}=20 W/(m^2·℃)，大气与冰盖的热交换系数h_{ai}=20W/(m^2·℃)；冰面温度T_s=0.0 ℃，冰盖底温度T_m=0.0 ℃，温度场进口水温T_{W0}=0.0 ℃；水的密度ρ=1000 kg/m^3，冰的密度ρ_i=917 kg/m^3，水的比热C_p=4217.7 J/kg℃，冰的潜热L_i= 3.33 × 10^{5}J/kg，温度场(爆破区)沿流向的长度x_1=2300 m。

由于缺乏实测的流速数据，采用两个典型情况确定温度场流速与水深的关系：

情况1：当弗劳汝德数$Fr_{c1}=U\Big/\sqrt{9.8H}$<0.06，则不会发生冰坝现象，取临界值$Fr_{c1}=0.06$确定温度场流速与水深的关系，即$U_1=0.06\Big/\sqrt{9.8H_1}$。

情况2：当$Fr_{c2}=U\Big/\sqrt{9.8H}$>0.09，必然发生冰坝现象[2]，取临界值$Fr_{c1}=0.09$确定流速与水深的关

系，即$U_1=0.09/\sqrt{9.8H_1}$。在同样的水深条件下，情况2的流速比情况1的大。

3.4.1 h_{Wi}和L与流速和水深的关系　爆破前，温度场进口冰下平均水深约为1 m和平均冰盖厚1.1 m，温度场出口平均水深约为1.5 m和平均冰盖厚1.5 m。爆破区冰盖融化形成温度场后，原来的冰域转变为水域，槽蓄量增加，由于下游冰盖尚未解冻，在上下游冰盖下流量不变的情况下，温度场出口水深将由原来冰下1.5 m增加到$1.5+1.5\rho_i/\rho=2.88$ m，温度场进口水深小于$1.0+1.1\rho_i/\rho=2.0$ m，由于温度场水深增加，流速将下降。

假设温度场下游冰盖下单宽流量与温度场相同，即$U_2H_2=U_1H_1$时，可得表3列出的冰和水热交换系数h_{Wi}与温度场对下游冰盖下水温的影响长度L的值。

观察表3可得下述结论：

(1)h_{Wi}随流速U_2的增加而增加。例如：对情况1，当U_2由0.13 m/s增加到0.65 m/s时，h_{Wi}由326 W/(m²·℃)增加到1218 W/(m²·℃)；对情况2，当U_2由0.19 m/s增加到0.98 m/s时，h_{Wi}由451 W/(m²·℃)增加到1685 W/(m²·℃)。

(2)因为$h_{Wi}>>h_{Wa}$和h_{ai}，所以微小的水温升高都会加快冰盖的融化。因h_{Wa}和h_{Wa}约为20W/(m²·℃)，对情况1，$h_{Wi}>(16\sim60)h_{Wa}$；对情况2，$h_{Wi}>(22\sim80)h_{Wa}$。

(3)温度场对下游冰盖下水温的影响长度L随水深和流速的增加而增加，其影响长度接近或者大于温度场长度。

表3　h_{Wi}和L与温度场及下游冰盖下流速和水深的对应关系

情况	H_1/m	U_1/(m/s)	H_2/m	U_2/(m/s)	h_{Wi}/(W/(m²·℃))	L/m
1	1	0.19	1.5	0.13	326	2229
	2	0.27	1.5	0.35	749	2744
	3	0.33	1.5	0.65	1218	3099
2	1	0.28	1.5	0.19	451	2417
	2	0.40	1.5	0.53	1036	2976
	3	0.49	1.5	0.98	1685	3361

3.4.2 温度场出口水温和下游冰盖前缘冰厚与气温和水深的关系　在温度场长度x_1=2300m条件下，对于情况1和2，在1天时间T=24×3600=84400 s时，可得图9和10温度场出口水温T_{W1}、下游冰盖前缘冰厚改变量随气温和水深的变化，图中Dh_1为下游冰盖前缘底部在水温T_{W1}时受冰和水热交换影响减小的厚度(没有考虑冰盖迎水面融化的影响)，Dh_2为下游冰盖前缘顶部受气温和水热交换影响减小的厚度，$H=H_1$。

观察图9和10可得下述结论：(1)温度场出口水温随水深的增加而减小，随气温的增加而增大，随流速的增加而减小；(2)温度场融化下游冰盖底部的能力Dh_1与气温融化冰盖顶部的能力Dh_2处于同一数量级，例如：在T_{W1}=0.1 ~ 0.5 ℃、T_a=10 ℃和$H=H_2$=1 ~ 3 m时，在1天时间内下游冰盖前缘底部融化量Dh_1=0.035 ~ 0.052 m，而冰盖前缘顶部气温融化量Dh_2=0.055 m；(3)在1天之内影响长度L融化的冰量=$(0.5Dh_1+Dh_2)L$。

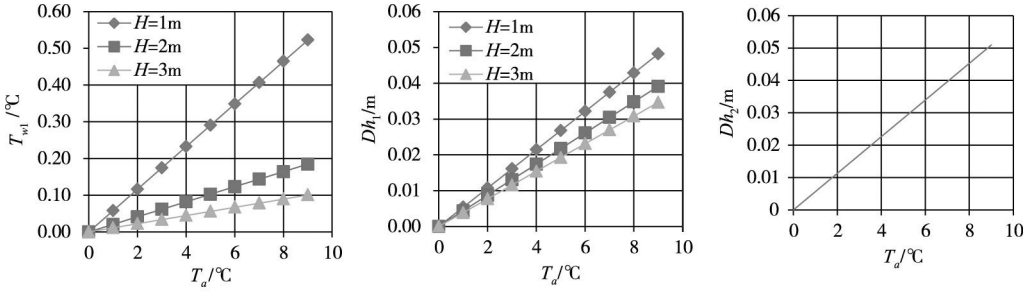


图9　情况1时温度场出口水温、下游冰盖前缘冰厚随气温和水深的变化

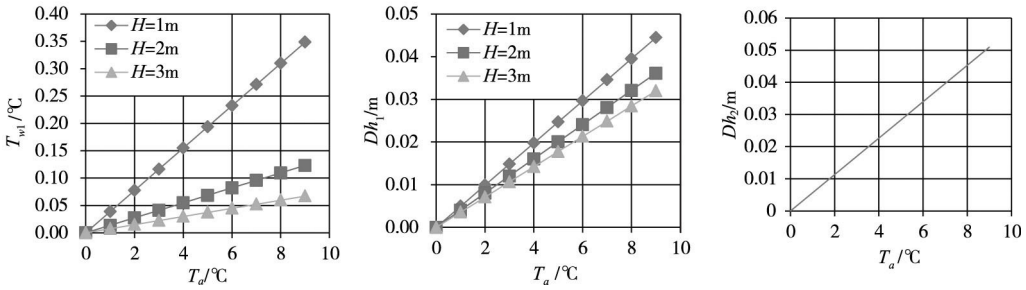


图 10　情况 1 时温度场出口水温、下游冰盖前缘冰厚随气温和水深的变化

4　结论

把冰、水、热动力学理论与爆破效果相结合，进行了冰盖下爆破预防冰坝的理论探索。建立了描述爆破坑融化扩大与气温、水温、流速关系的数学模型，证明了冰盖底部和侧壁冰融化的速率随流速的增加而增加，以及爆破孔布置的最佳位置是河道冰坝易发点的主槽深泓线附件。冰下爆破预防冰坝不仅要考虑爆破的直接效果，更要考虑冰、水、热动力学作用的间接效果，提出了在深泓线附近沿流向布设 1 ~ 3 列爆破孔形成一定规模温度场的方法，以便利用主槽和漫滩的质量和热量对流使漫滩和下游冰盖加速融化。然后，理论上证明温度场出口水温与温度场长度、气温及水与空气热交换系数的积成正比，与单宽流量成反比；冰盖下水深和流速越大，场水温对下游冰盖下水温的影响长度越大；并提出了冰厚随时间变化的解析式。最后，应用理论成果指导在黑龙江冰下爆破预防冰坝的实践，结果证明了理论的正确性，并得到了爆破坑直径与炸药量关系的经验公式。实践结果也表明，相同炸药量产生的爆破坑直径随冰厚的变化不大，每个爆破孔炸药量不宜超过 9 kg；冰水热交换系数 h_{Wi} 的是气温和水或者冰面的热交换系数 h_{Wa} 的数十倍，微小的水温升高都会加快下游冰盖的融化，并且温度场融化下游冰盖底部的能力与气温融化冰盖顶部的能力处于同一数量级。

参　考　文　献：

[1] 高霈生，靳国厚．中国北方寒冷地区河冰灾害调查与分析[J]．中国水利水电科学研究院学报，2003，1(2)：159-164．

[2] 王军，何亮，陈胖胖．水力与热力耦合的开河判别准则[J]．水科学进展，2010，21(5)：713-718．

[3] 沈洪道．河冰研究[M]．霍世青等译，郑州：黄河水利出版社，2010．

[4] 孙肇初．中国寒冷地区水力学的近代发展[M]．合肥工业大学学报(自然科学版)，1990，13(4)：97-105．

[5] 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)：81-01．

[6] ASHTON G D．River and Lake Ice Engineering[M]．Water Resources Publications，Littleton，Colorada 80161，USA，1986．

[7] 汪易森，杨开林，张斌，等．河冰管控工程设计手册[M]．北京：中国水利水电出版社，2013．

[8] FONSTAD G D，GERARD R，STIMPSON B．Explosive demolition of floating ice cover[C]//POPC，1981．

[9] 梁向前，何秉顺，谢文辉．黄河冰盖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] JASEK M．Ice jam release and break-up front propagation [C]//12th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers，Edmonton，AB，June 19-20，2003．

[12] MATOUSEK V．Types of ice runs and conditions for their formation[C]//Proc．IAHR Ice Symp．Hamburg，1984：315- 327．

[13] 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．

[14] 杨开林，王军，王涛，等．调水工程冰期输水数值模拟及冰情预报关键[M]．北京：中国水利水电出版社，2015．

[15] THÉRIAULT I, SAUCET J, TAHA W. Validation of the Mike-Ice model simulating river flows in presence of ice and forecast of changes to the ice regime of the Romaine river due to hydroelectric project[C]//The 20th IAHR International Symposium on Ice, Lahdi, Finland, 2010.
[16] 杨开林. 明渠冰盖下流动的综合糙率[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1310-1317.
[17] 杨开林. 河渠恒定非均匀流准二维模型[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 32-39.
[18] 杨开林. 冰盖河渠水深平均流速的横向分布[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 39-45.
[19] 杨开林, 刘之平, 李桂芬, 等. 河道冰塞的模拟[J]. 水利水电技术, 2002, 33(10): 40-47.
[20] FU Hui, LIU Zhiping, GUO Xinlei, et al. Double frequency radar system for measurement of ice thickness and water depth in rivers and canals: development, verification and application[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 154(10): 85-94.
[21] 李志军, 韩明, 秦建敏, 等. 冰厚变化的现场监测现状和研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 753-757.
[22] 秦建敏, 程鹏, 赵凯. 利用空气、冰与水物理特性差异实现水情全天候自动化监测[J]. 水力发电学报, 2008, 27(1): 24-27.
[23] 杨开林, 郭新蕾, 王涛, 等. 黑龙江冰情预报及灾害防治研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院报告, 2019.

Theory exploration and practice of preventing ice dam by blasting under ice

YANG Kailin[1], GUO Xinlei[1], WANG Tao[1], GUO Yongxin[1], PENG Xuming[2], WU Yunan[2]
(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 Center Flood Control and Drought Relief of Heilongjiang Province, Harbin* 150001, *China*)

Abstract: Combining ice, water and thermal dynamics theory with blasting effect, the theory of forming temperature field to prevent ice dam disaster is put forward by blasting under ice along thalweg line at the prone point of ice dam, including the selection of blasting time, the arrangement of blasting holes, the estimation of blasting effect, the calculation of the influence length of the temperature field water temperature and the downstream ice cover water temperature and the ice cover melting rate. The practice of ice blasting before ice cover breakup of Heilongjiang River shows that the diameter of the blasting pit increases with the increase of explosive quantity, but when the explosive quantity exceeds 18kg, the diameter of the blasting pit does not change much with the increase of explosive quantity. According to the measured volume of ice cover broken per unit explosive amount, it is suggested that the explosive amount per hole should not exceed 9kg for blasting under ice, including the case where the thickness of ice cover exceeds 1 m.
Keywords: blasting under ice; ice dam; blasting hole arrangement; temperature field; influence length

（责任编辑：李福田）