

线性装药爆破去除输电线覆冰研究

宋巍¹, 谢东升¹, 黄铁铮¹, 孙滔¹, 李海涛², 范志强²

(1. 国网山西省电力公司经济技术研究院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学理学院, 山西 太原 030051)

摘要: 针对输电线由于覆冰引起各类事故灾害的问题, 采用线装药爆破方式进行除冰是一种新思路。为研究该方法的除冰机理和关键技术, 通过小尺寸覆冰输电线的爆破实验和数值模拟, 研究爆破除冰机理和爆破参数影响规律。结果表明: 爆炸载荷的直接作用使迎爆面覆冰大量粉碎, 背部覆冰内形成贯穿型裂纹, 随后解体或者在电线的冲击振动下脱除。当覆冰对导爆索约束较弱时, 爆炸能量从约束较弱侧迅速衰减, 当覆冰无法形成贯穿型裂纹时则不能脱冰。导爆索位于覆冰内部时有利于爆破除冰, 因此应根据覆冰厚度预估装药间隔。

关键词: 输电线; 覆冰; 线性装药爆破; 有限元; 延米药量

中图分类号: O383.3

文献标识码: A

输电线覆冰是指在特定的温度和风等自然条件下空气中的水分或降雨因冻结而在输电线上形成冰霜的一种自然现象, 一般多发于山区输电线路。覆冰自重使输电线弧垂、内部张力增大, 在人工或者自然脱落时将导致输电线内力的剧烈释放, 输电线路随之产生较大幅度的舞动, 也称为“冰跳”。输电线振动时可能造成闪络和跳闸等电气事故, 甚至引起输电杆塔的倒塌和结构失效、绝缘子串等金具的断裂破坏^[1]。例如, 2008年1月至2月, 我国南方大范围遭遇严重冰灾, 对输电网络造成了重大经济损失。因此, 输电线路的安全除冰技术研究具有重要的理论意义与工程实用价值。

目前常用的除冰方法大致可分为以下几类: 机械除冰、热力融冰、激光和电脉冲除冰等^[2-5]。机械除冰法应用较为广泛但工作效率低, 被动除冰主要是利用平衡锤、阻雪环等辅助设备, 使输电线上的覆冰达到一定程度时自动脱落, 主动性差; 热力融冰虽然效果明显, 但基础设备投资巨大、能耗高。此外, 还有使用防冰材料或涂层等方法, 虽然都能取得一定效果, 但目前仍缺乏一种技术成熟、安全高效的除冰方式, 因此仍需积极探索。

采用预先敷设在输电线路上的线性装药爆破的方法去除部分电线覆冰是近年来提出的一种成本低、见效快、效率高的除冰思路, 可以保障电网全天候、全方式运行, 保障电网和输电线路安全稳定, 实现系统最大化的资源和能源节约。然而, 此方法对装药参数和线路安全性要求较高, 目前鲜有针对输电线覆冰耦合体系在爆炸载荷作用下的力学行为和除冰机理的研究。本研究拟通过小尺寸模拟爆破除冰实验和数值计算, 探讨爆破除冰的机理, 并确定具体的实施方法和参数。

1 小尺寸电线爆破除冰实验

由于目前关于输电线覆冰爆破的实际施工经验和案例都较少, 为正确建立数值模型并获取参考爆

* 收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-08-21

基金项目: 国家电网公司科技项目(520533160002)

作者简介: 宋巍(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网规划设计及电力系统发展研究。

E-mail: songweidj95@126.com

通信作者: 范志强(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事爆炸冲击动态测试技术研究。

E-mail: fanzhq@nuc.edu.cn

破药量和其他模拟参数,进行小尺寸覆冰输电线的爆破除冰模拟实验。该实验可以为数值模拟结果的可靠性提供参考和验证。

1.1 实验设计

1.1.1 线装药的实现

实验采用平行布设的导爆索实现线性装药,导爆索采用铝制外壳的金属纤维导爆索^[6-7]黑索金(RDX),装药密度约为 1.55 g/cm^3 。本实验共采用两种规格的导爆索:导爆索 A, 外径 2.4 mm, 药芯直径 1.7 mm, 延米药量 $\rho_L=3.6 \text{ g/m}$; 导爆索 B, 外径 1.6 mm, 药芯直径 1.0 mm, 延米药量 $\rho_L=1.2 \text{ g/m}$ 。

1.1.2 实验装置

模拟电线直径 26.0 mm(模拟 JLHA3-425 型导线), 覆冰段长度 60 cm, 覆冰厚 25 mm。考虑到北方地区实际覆冰多为疏松多孔的雨淞和硬雾淞, 密度一般为 $0.60 \sim 0.90 \text{ g/cm}^3$, 强度低于纯水冻结的冰体。为在实验中模拟此类覆冰, 在纯水中加入疏松剂, 制得覆冰密度约为 0.85 g/cm^3 , 内部呈现疏松状结构, 如图 1 所示。导爆索与电线平行布设, 间距为 δ (装药间隔), 采用导爆管雷管起爆, 实验采用高速相机对整个爆炸过程进行拍摄, 速率为 4×10^4 帧每秒。



图 1 实验模拟覆冰输电线试样

Fig. 1 Experimental sample of ice-coated power line

1.2 实验结果

针对导爆索 A($\rho_L=3.6 \text{ g/m}$) 进行 4 组实验, 分别考察导爆索与电线间距 δ 对除冰效果的影响规律。其中 $\delta=10 \text{ mm}$ 和 $\delta=20 \text{ mm}$ 工况下导爆索位于覆冰之内; $\delta=25 \text{ mm}$ 时, 导爆索直接平行绑扎在覆冰表面; $\delta=35 \text{ mm}$ 时, 导爆索平行布设在覆冰之外, 空气间隔 10 mm。4 组实验覆冰的破碎效果依次如图 2(a)~图 2(d) 所示。由图 2 可知, 4 种工况下都能使电线覆冰段 100% 除冰, 且导爆索位于覆冰内部时, 覆冰呈粉碎状, 当导爆索位于覆冰外部时, 直接作用于覆冰的爆炸能量减少, 覆冰粉碎程度较小。

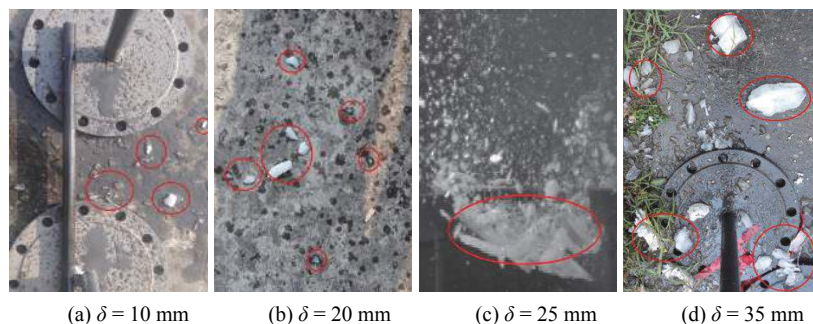


图 2 A 型导爆索实验冰体破碎效果

Fig. 2 Crushing results of Type A detonating cord

由图 3 所示的高速摄影图像可知, 导爆索位于覆冰内部时, 爆炸载荷(冲击波与爆生气体)直接作用于冰体, 冰的粉碎效果最强。当导爆索位于覆冰外部或者表面时, 如图 4 所示, 炸药爆炸后仅有部分能量直接作用于冰体, 迎爆面覆冰破碎程度有限, 但在电线的冲击振动下, 覆冰内部形成贯穿型裂纹, 促使背部覆冰解体脱离。

针对导爆索 B($\rho_L=1.2 \text{ g/m}$) 进行 4 组实验, 导爆索与覆冰间距和 A 组实验设置相同, 分别考察导爆索与电线间距 δ 对除冰效果的影响规律。4 组实验结果依次如图 5 所示。由图 5 可知, 对于 B 型导爆索而言, 只有前 3 种工况能使电线覆冰段 100% 除冰, 且只要导爆索位于覆冰体内, 则覆冰都能够较大程度的粉碎。当导爆索布设在覆冰表面或与覆冰表面有一定间距时, 爆炸能量迅速由约束较弱侧衰减, 仅能够粉碎迎爆面上部覆冰, 背部覆冰虽然能够产生裂纹, 但能否使覆冰解体直接取决于爆炸载荷的作用强度。由于 B 型导爆索药量较小, 爆炸能量在空气中迅速衰减, 因此当 B 型导爆索位于覆冰之外时, 基本无法完成脱冰。

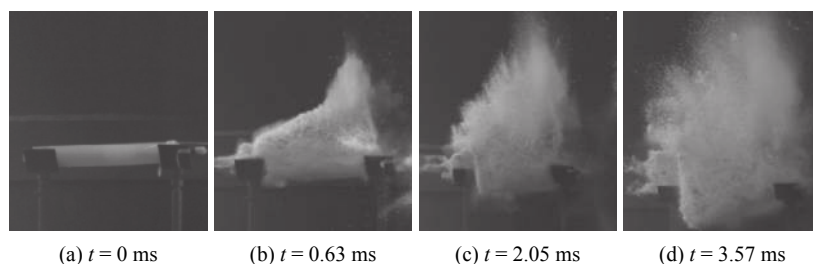
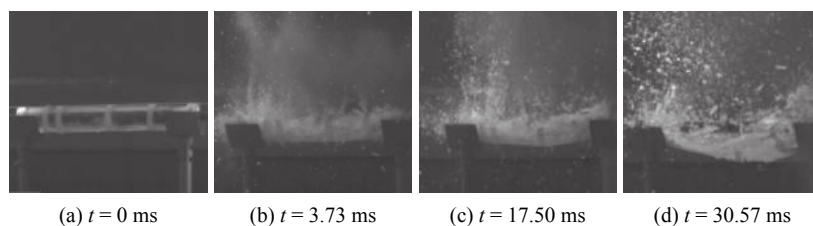
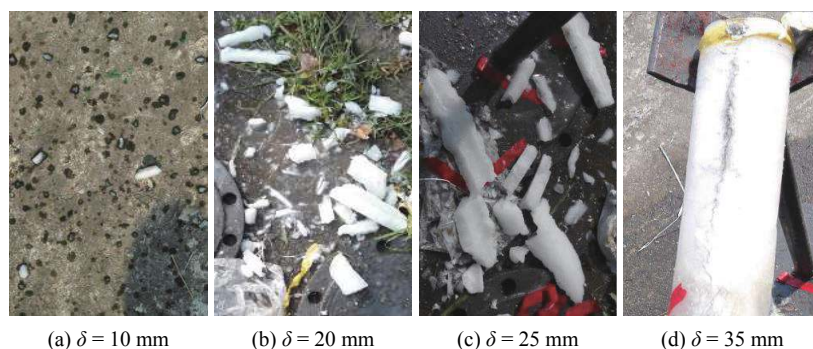
图 3 覆冰破碎过程(A 型导爆索, $\delta=20$ mm)Fig. 3 Ice crushing process (Type A detonating cord, $\delta=20$ mm)图 4 覆冰破碎过程(A 型导爆索, $\delta=25$ mm)Fig. 4 Ice crushing process (Type A detonating cord, $\delta=25$ mm)

图 5 B 型导爆索脱冰效果

Fig. 5 Crushing results of Type B detonating cord

2 覆冰输电线线装药爆破除冰数值模拟

2.1 计算方法

数值模拟采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 考虑到爆炸问题中结构的大变形和高应变率效应, 采用流固耦合方法计算炸药与覆冰、输电线之间的相互作用。炸药与空气采用 Euler 算法, 覆冰和输电线采用 Lagrange 算法。

实际输电线为多股绞线, 模拟中将其简化为光滑圆柱体。输电线与覆冰之间的耦合需要考虑以下两方面因素: 一方面, 雨淞和混合淞与输电线的黏结力较强, 特别是对于多股绞线, 需要考虑覆冰和输电线之间的耦合方式; 另一方面, 爆炸作用下背部覆冰与电线间应力波来回反射会产生拉应力, 拉力的作用对于输电线脱冰而言具有重要意义。因此, 本计算采用固连断开接触方式模拟输电线与覆冰间的耦合^[8]。算法上考虑电线和覆冰之间最初为共节点, 当二者界面上的拉力满足一定的约束条件后, 覆冰和电线之间的绑定失效, 二者断开, 然后采用面接触算法。通过文献对比调研^[9-11], 设置本模拟中覆冰和输电线之间法向和切向黏结力分别为 0.8 和 1.0 MPa。

2.2 计算模型

考虑到单根导爆索平行布设时模型关于输电线横截面的直径对称, 只建立 1/2 模型。为提高网格划分质量, 将导爆索横截面简化为正方形, 最终建立的模型和网格划分效果如图 6 所示。

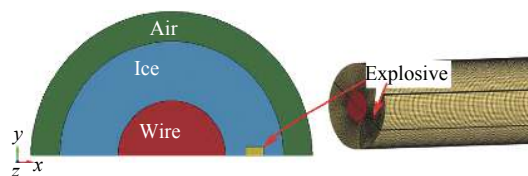


图6 覆冰-输电线有限元模型

Fig. 6 Finite element model of ice-coated power line

2.3 材料模型

炸药(RDX)、空气和铝合金电线均可采用文献中通用的材料模型进行模拟,但覆冰性质与冰体结构、组分、形成过程等有较大关系,采用目前模拟效果较好的各向同性弹性断裂模型,定义覆冰单元累积塑性应变达到0.35%时单元侵蚀以模拟覆冰粉碎^[12-13]。考虑到爆炸作用下覆冰受到载荷的多样性,

另添加最大压应力和拉应力材料失效控制参数,分别取值3.50和0.92 MPa^[14-16]。

2.4 模拟结果

针对小尺寸覆冰爆破除冰实验的典型工况进行模拟,结果见图7,工况编号按照导爆索类型-装药间隔编号,如A-10对应于A型导爆索、 $\delta=10$ mm时的工况。

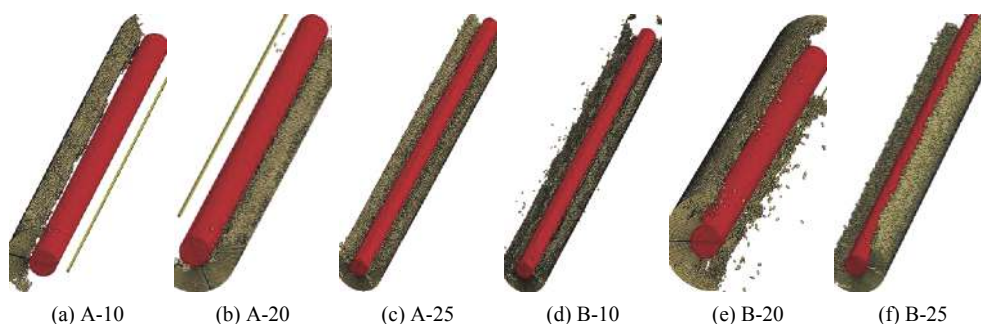


图7 典型工况的数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of typical tests

从图7所示6种工况可以看出,模拟结果与实验较为吻合。两种导爆索均可实现100%脱冰,但是B型导爆索脱冰后形成的脱落冰体块度明显大于A型导爆索。另外,模拟计算时间一般不超过1 ms,受计算时间所限,大块冰体的脱落过程并未进行模拟。考虑到当覆冰体内形成贯穿型裂纹、冰体与电线间形成明显脱开现象即认为脱冰完成,由此可知,该模拟方法能够正确反映实验结果。因此,可以采用该数值模拟方法对其他各工况进行数值实验,避免实验成本高、周期长等缺点,优化爆破参数。

3 讨论与分析

对比两种工况和实验过程中的高速摄影图像,结合数值模拟结果,分析爆破除冰机理如下:首先,爆炸载荷(冲击波和爆生气体)的直接作用使迎爆面覆冰破碎并产生环向张力,同时,由于导线自身的约束作用和应力波在界面上的反射透射,使迎爆面背部覆冰-电线界面产生拉应力,由于覆冰和输电线间的黏结力较小,因此当次拉应力达到固连失效阈值时,背部覆冰和输电线间产生裂隙,此过程持续时间约为几十微秒,如图8(b)所示;其次,背部裂隙进一步发展,在背部覆冰体内形成径向裂纹,此过程持续时间约几百微秒;最后,迎爆面背部覆冰在环向和径向裂纹的发展过程中逐渐解体,如图8(c)所示。此时由于电线受到冲击载荷的作用后产生径向振动速度和位移,惯性作用加速已经解体的大块覆冰逐渐脱离电线,从而实现整个爆破除冰,此过程持续时间约为几毫秒至几秒。需要注意的是,无论是环向张力导致的环向裂纹还是背部间隙扩展产生的径向裂纹,其扩展速度快慢和最终能否形成贯穿型裂纹,都直接取决于爆炸载荷(冲击波和爆生气体)的作用强度。当导爆索位于覆冰内部时,炸药爆炸猛度直接作用于覆冰和输电线;当导爆索位于覆冰外部时,导爆索和覆冰表面间的空气间隔层能够使得爆炸作用迅速衰减,因此作用强度远小于内部工况。因此,导爆索位于覆冰内部有益于爆破除冰。

对于导爆索位于覆冰内部的工况,装药间隔 δ 和装药密度 ρ_L 直接决定炸药爆炸的作用强度。 δ 越小、 ρ_L 越大,则爆炸作用强度越大,脱冰效果越明显;反之, δ 越大、 ρ_L 越小,则爆炸作用强度越小,脱冰效

果越不明显。图9为B型导爆索在间距20 mm下爆破除冰模拟结果,虽然过程与A型导爆索爆破除冰相似,但背部覆冰脱落块体显然较大,这是由于爆炸能量不足导致。当间距过大、装药量过低时,甚至有可能出现炸药只去除迎爆面的部分覆冰,但无法产生足够背部裂隙、径向裂纹和环向裂纹,从而不能去除覆冰的现象,如实验中 $H=25\text{ mm}$ 、 $\delta=35\text{ mm}$ 、B型导爆索除冰工况,此时爆炸能量被空气间隔层迅速衰减,只有表层覆冰破碎,裂纹未贯通,因此覆冰并未去除。通过加大装药密度,实验中 $H=25\text{ mm}$ 、 $\delta=35\text{ mm}$ 、A型导爆索除冰工况则能够产生贯穿型裂纹,从而实现除冰,但此时裂纹数量较少,因此覆冰块度较大。需要说明的是,实验与数值模拟中,所设置的装药量和间隔等关键参数均须在导线无任何损伤的前提下,即实验过程中导线表面无任何可见损伤,模拟过程中导线材料无塑性变形。

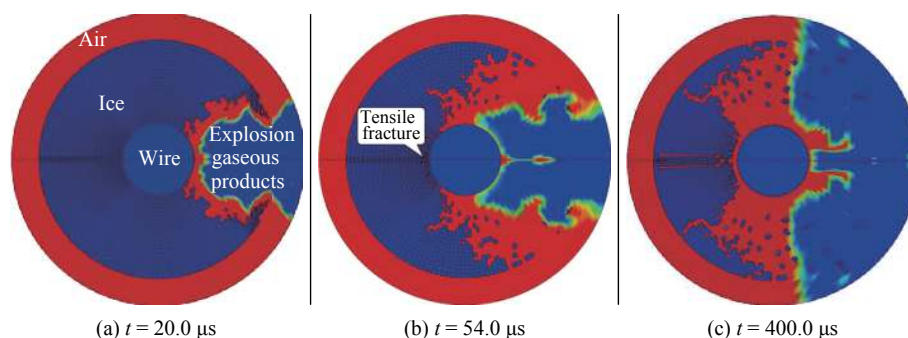


图8 爆炸载荷作用下覆冰破碎过程(A-20)

Fig. 8 Ice crushing process under blast (A-20)

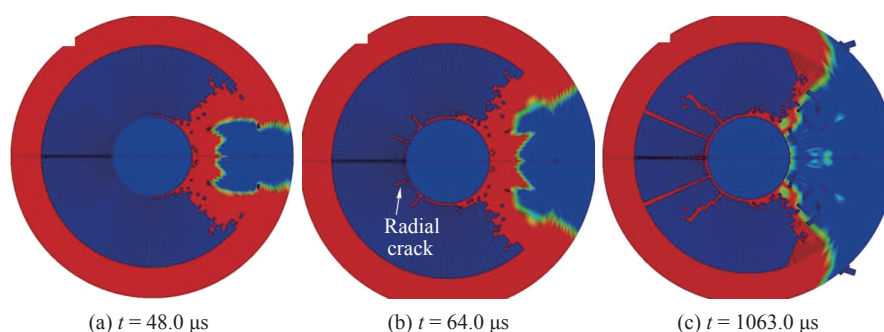


图9 爆炸载荷作用下覆冰破碎过程(B-20)

Fig. 9 Ice crushing process under blast (B-20)

4 结 论

(1)覆冰对导爆索的约束较强时(导爆索位于覆冰体内),炸药爆炸气体和冲击波的直接作用致使迎爆面覆冰大量粉碎,迎爆面背部覆冰内形成贯穿型裂纹,随之脱离电线或者在电线的冲击振动下脱离。当覆冰对导爆索的约束较弱时(导爆索位于覆冰边缘、表面或者之外),炸药爆炸产生气体和冲击波从约束较弱侧迅速衰减,能量利用率较低。迎爆面覆冰破碎,当裂纹能扩展至迎爆面背部时,覆冰在随后的电线振动下脱落;当覆冰无法形成贯穿性裂纹时,则不能脱冰。

(2)导爆索位于覆冰内部时,线装药量 $\rho_L=3.6\text{ g/m}$ 和 $\rho_L=1.2\text{ g/m}$ 两种导爆索都可以进行完全脱冰;导爆索位于覆冰外(与覆冰表面间距不大于10 mm),最小除冰药量为3.6 g/m。

(3)装药间隔 δ 需要根据预估覆冰厚度而定,使导爆索尽量位于覆冰内部,便于覆冰的粉碎和完全脱离。

参考文献:

- [1] 韩军科, 杨靖波, 杨风利. 500 kV 酒杯塔覆冰破坏形态分析 [J]. 电力建设, 2009, 30(11): 21-23.

- HAN J K, YANG J B, YANG F L. Analysis of failure mode on iced 500 kV transmission cup type tower [J]. *Electric Power Construction*, 2009, 30(11): 21–23.
- [2] 陈科全, 严波, 吕欣, 等. 四分裂导线机械式除冰装置及可行性研究 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(20): 48–54.
CHEN K Q, YAN B, LÜ X, et al. A mechanical de-icing device for iced quad-bundled conductors and its feasibility [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(20): 48–54.
- [3] 向往, 谭艳军, 陆佳政, 等. 交直流输电线路热力融冰技术分析 [J]. *电力建设*, 2014, 35(8): 101–107.
XIANG W, TAN Y J, LU J Z, et al. Thermodynamic ice-melting technology for AC/DC transmission lines [J]. *Electric Power Construction*, 2014, 35(8): 101–107.
- [4] 谷山强, 陈家宏, 蔡炜, 等. 输电线路激光除冰技术试验分析及工程应用设计 [J]. *高压电技术*, 2009, 35(9): 2243–2249.
GU S Q, CHEN J H, CAI W, et al. Experimental analysis and engineering designing of laser de-icing technology for transmission lines [J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(9): 2243–2249.
- [5] LI Q Y, BAI T, ZHU C L. Deicing excitation simulation and structural dynamic analysis of the electro-impulse deicing system [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 66/68: 390–395.
- [6] 范志强, 马宏昊, 沈兆武, 等. 水下连续脉冲冲击波的声学特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(5): 501–506.
FAN Z Q, MA H H, SHEN Z W, et al. Acoustic characteristics of underwater continuous pulse shock wave [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(5): 501–506.
- [7] 贾虎, 沈兆武. 纤维爆炸索水下爆炸声信号特征的小波分析 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(9): 243–247.
JIA H, SHEN Z W. Characteristics of underwater detonation acoustics signals of fiber-based detonating cord based on wavelet analysis and power spectrum [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(9): 243–247.
- [8] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual [Z]. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2015.
- [9] 丁金波, 董威. 表面粗糙度对冰冻黏强度影响试验研究 [J]. *航空发动机*, 2012, 38(4): 42–46.
DING J B, DONG W. Experimental study of influence of surface roughness on ice adhesion [J]. *Aeroengine*, 2012, 38(4): 42–46.
- [10] TAVANA H, NEUMANN A W. Recent progress in the determination of solid surface tensions from contact angles [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2007, 132(1): 1–32.
- [11] 王国刚, 穆静静, 周红伟, 等. 覆冰垂直粘结强度的测试研究 [J]. *工程热物理学报*, 2012, 33(2): 282–284.
WANG G G, MU J J, ZHOU H W, et al. Research on the test technology for vertical ice adhesion strength [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(2): 282–284.
- [12] HU Z K, GUI H B, XIA P P, et al. Dynamic response analysis of the collision between ice and propeller at high speed [C]//The Society for Underwater Technology Conference (SUTTC 2013). Shanghai, China, 2013: 72–76.
- [13] XIA P P, GUI H B, HU Z K. The effect of the excitation position on the sound radiation of propeller [C]//The Society for Underwater Technology Conference (SUTTC 2013). Shanghai, China, 2013: 82–86.
- [14] JONES S J. A review of the strength of iceberg and other freshwater ice and the effect of temperature [J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2007, 47(3): 256–262.
- [15] ZHANG L M, LI Z J, JIA Q, et al. Uniaxial compressive strengths of artificial freshwater ice [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 243: 4634–4637.
- [16] 李志军, 周庆, 汪恩良, 等. 加载方式对冰单轴压缩强度影响的试验研究 [J]. *水利学报*, 2013, 44(9): 1037–1043.
LI Z J, ZHOU Q, WANG E L, et al. Experimental study on the loading mode effects on the ice uniaxial compressive strength [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(9): 1037–1043.

De-Icing Power Line by Linear Shaped Explosive Blast

SONG Wei¹, XIE Dongsheng¹, HUANG Tiezheng¹,
SUN Tao¹, LI Haitao², FAN Zhiqiang²

(1. *Economic Research Institute of State Grid Shanxi, Taiyuan 030051, China;*

2. *School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

Abstract: To control the risk of disaster that may be caused by ice-coated power line, a novel de-icing method by applying linear shaped explosive blast has been proposed in the past decade. To investigate the mechanism and the key technology, blast tests on short ice-coated power line are performed as well as corresponding LS-DYNA simulations. The effects of blast parameters on de-icing efficiency are also discussed. Results show that, ice on the blast side immediately crush while through-wall cracks appear in the other side ice which then fractures or falls from the line. The blast energy rapidly attenuates from the weakly constrained side of ice when the detonation cord is placed outside of the ice. As a consequence, in order to de-ice with high efficiency, the gap between conductor and detonation cord should be optimized according to estimation ice coating thickness to ensure that the detonation cord is located within the ice coating.

Keywords: power line; de-ice; linear shaped explosive blast; finite element; charge per meter