

淡水冰与不同材料间动摩擦因数的试验

秦绪祥¹,姜连杰²,周庆¹,贾青³,韩红卫¹,李志军¹

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 黑龙江省引嫩工程管理处, 黑龙江 安达 151400; 3. 黑龙江大学水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:为研究淡水冰的动摩擦规律,通过不同材料的滑道对淡水冰与多种材料间的动摩擦因数进行了试验研究,分析了温度、正压力和滑动速度的改变对动摩擦因数的影响。试验结果表明:各因素对动摩擦因数的影响取决于接触材料的表面粗糙程度,不同的接触面其摩擦作用的机理不同,接触面较粗糙时,摩擦力取决于软接触材料的抗剪强度;接触面较光滑时,接触界面的水膜对动摩擦因数的增大起主导作用。冰与不同材料间的动摩擦因数的大小顺序为木板、混凝土、冰。

关键词:淡水冰;抗剪强度;水膜;动摩擦因数;接触面

中图分类号: O313.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2012)06-0079-05

Experimental study on dynamic friction coefficient between freshwater ice and various materials//QIN Xuxiang¹, JIANG Lianjie², ZHOU Qing¹, JIA Qing³, HAN Hongwei¹, LI Zhijun¹(1. *The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*; 2. *North Nenjiang Conveyance Project Management Agency, Anda 151400, China*; 3. *College of Water Conservancy and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150086, China*)

Abstract: Based on tests carried out on sideways made of various materials, dynamic friction coefficients between freshwater ice and various materials were studied. The influences of temperature, positive pressure, and sliding velocity on the dynamic friction coefficient were analyzed. The test results show that the influences of temperature, positive pressure, and sliding velocity were mainly determined by the surface roughness of materials. Different contact areas have different friction mechanisms. For a rough touch area, friction is determined by the shear strength of soft material. The water film of the contact area plays a leading role in increasing the dynamic friction coefficient. The dynamic friction coefficient between freshwater ice and various materials followed the following order: plank, concrete, ice.

Key words: freshwater ice; shear strength; water film; dynamic friction coefficient; contact area

我国北方冬季气温骤降时,很多内陆湖、水库或平缓的河流等地表水就会出现不同程度的结冰现象。对于水库冰来说,天气转暖时,冰体会因受热膨胀而对坝体的受力面产生挤压。当挤压力大于冰块自身的极限抗压强度时冰块破碎,破碎的冰块在后续冰块的挤推作用下,沿水库护坡向上爬行,此过程中摩擦力对水利设施会产生很大的破坏作用;此外,冬季路面采取各种防滑措施时,摩擦同样也是不可避免的,研究淡水冰的摩擦规律,对于各种水体的岸堤加固、路面防滑和沿岸建筑防护都有一定的实际意义。目前对淡水冰摩擦问题的研究尚属空白,只有国家海洋局海洋环境保护研究所的有关研究人员

对渤海海冰的摩擦问题做了初步研究^[1]。本文通过淡水冰在不同材料滑道上的滑动试验,对滑动过程中动摩擦因素的影响因素进行试验研究,总结出一定的摩擦规律。

1 试验方法与数据处理

1.1 试验方法

试验研究黑龙江大庆红旗泡水库淡水冰在不同的温度、正压力和滑动速度条件下与不同材料间动摩擦因数的变化规律。

a. 滑道材料。采用 3 种不同的滑道材料:混凝土、冰和木板。

基金项目:国家自然科学基金(51079021);大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金(LP0903);黑龙江省水利厅科研开发项目(HSKY 2011-04)

作者简介:秦绪祥(1987—),男,山东日照人,硕士研究生,主要从事冰物理和力学性质研究。E-mail:tomxiangzi@163.com

b. 试验温度模拟。试验温度采用我国东北冬季气温环境来模拟,在试验过程中气温基本保持为某个恒定值,每次冰块在现场放置 30 min,即保证接触面上的冰层温度与气温相同。

c. 正压力。将不同质量的方形冰块进行叠加,组合出不同的正压力。本试验冰块组合质量分别为 63.8 kg,72.2 kg,78.1 kg,89.3 kg,103.2 kg 和 115.8 kg。其中底部冰块不更换,即试验冰块的表现接触面积保持为 1040 cm²。由于淡水冰为偏弹性材料^[2],表现接触面积对动摩擦因数会有影响^[3],因此将正压力组合换算为:6 011.9 Pa,6 803.5 Pa,7 359.4 Pa,8 414.8 Pa,9 724.6 Pa,10 911.9 Pa。

d. 滑动速度。用电机拖曳冰块,并用变频器控制电机转速,从而使冰块滑动速度比较精确地控制在 0~1 m/s 范围内。

e. 数据采集装置。电机转动拖曳冰块,测力传感器将所受拉力通过数据线、电路桥盒和动态电阻应变仪采集到计算机,最后利用相关程序处理数据。

1.2 数据处理

利用 SK1207BI 数据处理软件可得到摩擦力与时间的关系,如图 1 所示,可以看出峰值对应最大静摩擦力。求滑动摩擦力(下称摩擦力)时,可取变化较为稳定的一段,导出数据并求均值,最后求得动摩擦因数:

μ = F / N (1)

式中:μ 为动摩擦因数;F 为摩擦力;N 为正压力,即试验中的冰块重力。

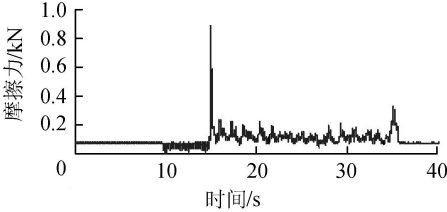


图 1 摩擦力与时间的关系

2 试验结果与分析

2.1 温度对动摩擦因数的影响

由于冬季气温变化不大,而试验温度采用环境温度,不易控制,因此只比较两个不同温度的动摩擦因数大小。

在混凝土滑道上,选用 7 359.4 Pa 的冰块组合,测得动摩擦因数如图 2 所示。比较发现-2℃时的动摩擦因数比-15℃时的相对偏小。

Bhushan^[4]通过系统研究得出黏着摩擦原理:两个光滑面在荷载作用下发生相对运动时,其摩擦力

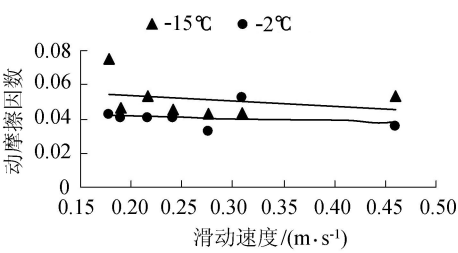


图 2 不同温度时冰与混凝土间动摩擦因数

实际上是两表面的微凸体顶端发生相互剪切而产生的,这种情况下摩擦力主要取决于软接触材料的抗剪强度。温度不同会引起冰块抗剪强度变化,进而影响摩擦力,产生不同的动摩擦因数^[5]。即当实际接触面积和正压力不发生改变时,温度引起的剪切强度变化会导致动摩擦因数μ的变化:

μ = Aτ₀ / N (2)

式中:A 为实际接触面积;τ₀ 为接触界面的剪切强度。

在摩擦试验中用冰进行抗剪强度测试,将冰做成长方柱状(190 mm×100 mm×90 mm),分别在-2℃和-15℃下以不同应力速率进行垂直生长方向的剪切试验,所得数据如图 3 所示。可看出此冰在-15℃的抗剪强度比-2℃时高,符合黏着摩擦原理。

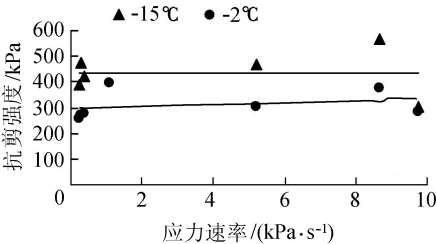


图 3 柱状冰抗剪强度变化曲线

冰与木板的接触面也具有图 2 的规律,即动摩擦因数在低温时较高。

图 4 为冰滑道上 10 911.9 Pa 的冰块组合在不同温度(-20℃和-2℃)下的摩擦情况。可以看出,冰与冰之间在-2℃时动摩擦因数较大,背离了黏着摩擦原理。原因是摩擦生热使部分冰融化,在接触面生成一层水膜^[6], -2℃时水膜更丰富,而且水膜的黏着能力大于润滑能力,使得接触面上的附加黏

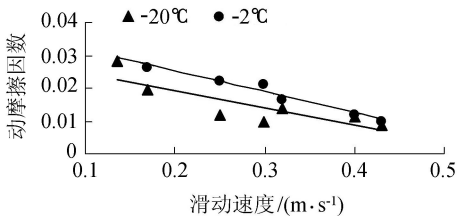


图 4 不同温度时冰与冰间动摩擦因数

着力变大,动摩擦因数相应变大。Bluhm 等^[7]在采用侧向力显微镜研究薄冰的摩擦力时,同样得出接触面间的水膜不能显现润滑作用的结论,并认为原因是实际接触面太小。

冰与混凝土、冰与木板的动摩擦因数在低温时偏大,而冰与冰的动摩擦因数在低温时偏小。

2.2 正压力对动摩擦因数的影响

当接触材料抗剪强度不受影响时,动摩擦因数就与实际接触面积和正压力有关。当正压力 N 增大时,实际接触面积也增大,且微凸体的塑性变形也增大,因此两个固体在发生相对滑动时,摩擦力不随正压力增大,但大多数情况下动摩擦因数都随着正压力的增大而减小^[8]。本试验为保证冰的抗剪强度不变,设置相同的温度和滑行速度,只调整正压力大小。

图 5 为 -15°C 的冰块在混凝土上以两种不同的速度滑动时动摩擦因数与正压力的关系。

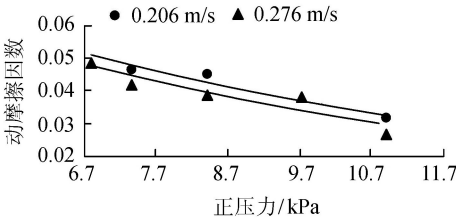


图 5 不同滑动速度时冰与混凝土间动摩擦因数与正压力的关系

由图 5 可见,在混凝土滑道上,随着正压力的增大动摩擦因数有减小的趋势。其原因为:当剪切强度不受影响时,正压力增大使得实际接触面积增大,但由于冰和混凝土的塑性都比较差,实际接触面积与载荷之间的变化关系是非线性的^[3],即实际接触面积的增大相对于正压力的增大比较慢,则动摩擦因数会相应减小。Pritchard 等^[9]认为,当正压力增大时,实际接触面积增大,相当于两种材料的相对粗糙度降低,因而动摩擦因数也相应减小。

图 6 为 -10°C 的冰块以不同速度在木板上滑动时动摩擦因数与正压力的关系。从图 6 可见,当正压力增大时,实际接触面积也会增大,但是木板刚性不如冰块或混凝土,容易发生变形,实际接触面积增

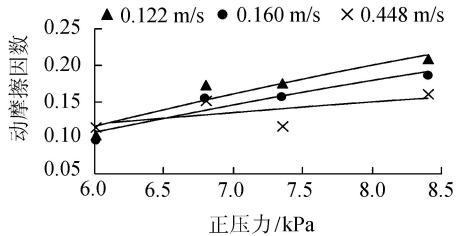


图 6 不同滑动速度时冰与木板间动摩擦因数与正压力的关系

加较快,根据式(2)可知动摩擦因数将增大;由于水膜的作用以及木板的特殊纤维结构,当压力增大时,冰与木板间的黏附更加紧密,附加荷载增大,相应动摩擦因数也增大。

对冰块在冰滑道上的试验数据进行分析可知即动摩擦因数随着正压力的增大而增大。相对于木板,冰的塑性较小,接触面积变化较慢,因此水膜的吸附作用对动摩擦因数的增大起主导作用。

2.3 滑动速度对动摩擦因数的影响

-15°C 情况下,将正压力为 8414.8 Pa 和 10911.9 Pa 的冰块组合在混凝土滑道上试验,测得动摩擦因数与滑动速度的关系如图 7 所示。

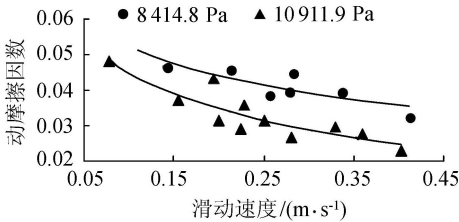


图 7 不同正压力时冰与混凝土间动摩擦因数与滑动速度的关系

由图 7 可看出,淡水冰在混凝土上的动摩擦因数是随滑动速度的增大而减小。Barker 等^[10]在研究海冰与砂砾质海滩间的动摩擦因数时也得出相同的结果。其原因可以由黏着摩擦原理解释,即滑动速度会对冰表面微凸体的抗剪强度产生影响,进一步影响摩擦力,其中摩擦过程中的滑行速度体现为剪切过程中的位移速率。

同样对试验冰样进行抗剪强度测试,图 8 为 -15°C 下淡水冰抗剪强度随着位移速率的变化趋势(此图为位移速率较快的情况)。可以看出,随着冰块剪切力加载时的位移速率增大,其抗剪强度明显减小,当速率增大到一定值时,抗剪强度趋于稳定。随着滑动速度的增大,动摩擦因数会减小,最后达到恒定值,此结论在图 7 中得到反映。

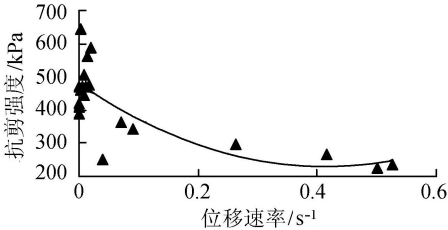


图 8 抗剪强度随位移速率的变化

图 9 为恒定温度下冰滑道上动摩擦因数与滑动速度的关系。由图 9 可知,当正压力为 8414.8 Pa 和 6803.5 Pa 时,动摩擦因数随速度增大而减小;当正压力为 6011.9 Pa 时,摩擦因数受速度变化影响很小。冰块在木板上滑行时,数据也呈现相同现象。

由此可认为,当接触面较光滑(冰与木板和冰与冰)时,正压力较大的情况下,动摩擦因数会受到滑动速度的影响,并符合黏着摩擦原理,随着滑动速度增大动摩擦因数有减小趋势;而正压力较小时,滑动速度对动摩擦的影响很小。

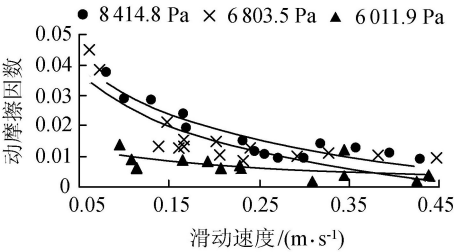


图9 不同正压力时冰与冰间动摩擦因数与滑动速度的关系

2.4 不同接触材料的动摩擦因数

接触材料的性质会影响到动摩擦因数的大小。当接触材料互溶性较大时,两者易发生黏附现象,使得摩擦因数增大。对于塑性材料来说,实际接触面积不受粗糙度影响,因此其动摩擦因数也不会受粗糙度影响;对于弹性或弹塑性材料,其表面粗糙度便会影响实际接触面积,进一步影响动摩擦因数^[11]。当接触面光滑平整、粗糙度较小时,表面间的分子力会产生很大的摩擦力,随着表面粗糙度的增大,实际接触面积相应减少,动摩擦因数也会下降,当表面粗糙度继续增大时,由于凸起对运动的阻挡作用使得动摩擦因数增大^[12]。

在10911.9 Pa 冰块组合、-2℃条件下分别在混凝土、木板和冰3种不同的滑道上进行试验,试验数据如图10所示。

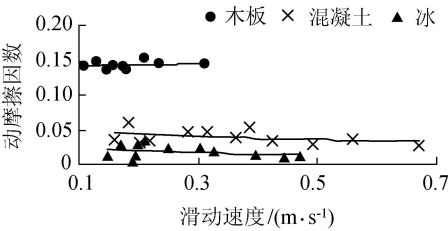


图10 不同滑动速度时冰与各材料间的动摩擦因数

相同条件下,动摩擦因数从大到小的顺序为:木板、混凝土、冰,而且数值上大概满足 $\mu_{\text{木}} = 3\mu_{\text{混凝土}} = 6\mu_{\text{冰}}$ 。Meine等^[13]于2002年在研究硅片与不同材料间的摩擦情况时,得出摩擦力会随着接触面粗糙度的增大而增大的结论,但是这只适用于能发生弹性变形的摩擦情况。如果黏附作用在摩擦过程中起到支配作用,那么摩擦力将会随粗糙度增大而减小。因此相同条件的冰块在木板和混凝土上的摩擦表现为:虽然木板表面比混凝土表面光滑,但是木板上水膜的黏附作用占主导,木板上的动摩擦因数更大一

些,而且木板特殊结构的亲水性^[14],更会增强水膜的黏附作用。在比较冰滑道和混凝土滑道时,两者以弹性变形为主,因而摩擦力随粗糙度变大而增大,混凝土滑道上动摩擦因数稍大。

3 结 论

a. 当冰块在比较粗糙的接触面上滑动时(如冰与混凝土),温度较高时动摩擦因数略为显小,动摩擦因数随着正压力增大而出现减小趋势,而且滑动速度增大时,动摩擦因数会减小。

b. 当冰块在比较光滑的接触面上滑动时(如冰与木板),温度对动摩擦因数的影响类似混凝土上的情况,但是滑行速度的影响开始受到正压力的影响,即正压力较大时,随着滑动速度增大动摩擦因数有减小趋势;而正压力较小时,滑动速度对动摩擦系数的影响很小。随着正压力变大,动摩擦因数相应增大。

c. 当冰块在很光滑的接触面上滑动时(如冰与冰),较高温度时动摩擦因数略为显大,滑行速度对动摩擦因数的影响与木板界面情况相似,随着正压力增大动摩擦因数有增大趋势。

d. 试验中冰与3种不同材料间动摩擦因数的大小顺序为木板、混凝土、冰,在数值上大概满足 $\mu_{\text{木}} = 3\mu_{\text{混凝土}} = 6\mu_{\text{冰}}$ 。

e. 接触面的粗糙程度会决定摩擦机理:当作用面较粗糙(冰与混凝土)时黏着摩擦理论占主导;当作用面较光滑(冰与木板和冰与冰)时,水膜理论更容易解释出现的摩擦问题,而且其中水膜的黏附作用体现得更加明显。

参考文献:

[1] 李志军,孟广琳,隋吉学,等.海冰与材料表面摩擦系数的动能分析[J].海洋工程,1990,8(1):69-75.
[2] GOLD L W. The elastic modulus of columnar-grain fresh-water ice[J]. Annals of Glaciology,1994,19(2):13-18.
[3] 温诗铸,黄平.摩擦学原理[M].3版.北京:清华大学出版社,2008.
[4] BHUSHAN B. Introduction to tribology [M]. New York: John Wiley & Sons,2002:114-123.
[5] 李贵谋,聂楚南.用真实接触面积计算静摩擦系数[J].武汉水利电力学院学报,1980,13(1):42-46.
[6] 孟广琳,张明远,隋吉学.海冰与材料的摩擦系数试验分析[J].海洋环境科学,1995,14(1):74-80.
[7] BLUHM H, INOUE T, SALMERON M. Friction of ice measured using lateral force microscopy [J]. Physical Review,2000,61(11):7760-7765.
[8] 刘承赫.摩擦理论及其应用[J].华北矿业高等专科学校

报,2001,3(4):61-63.

[9] PRITCHARD R S,KNOKE G S,ECHERT D C S. Sliding friction of sea ice blocks [J]. Cold Regions Science and Technology,2012,76:8-16.

[10] BARKER A,TIMCO G. The friction coefficient of a large ice block on a sand/gravel beach [C]//12th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Edmonton: CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment,2003.

[11] 翟玉生,李安,张金中. 应用摩擦学[M]. 东营:石油大

学出版社,1996:50-53.

[12] 林复生. 简明摩擦学[M]. 重庆:重庆大学出版社,1987.

[13] MEINE K, SCHNEIDER T, SPALTMANN D, et al. The influence of roughness on friction part II. the influence of multiple steps [J]. Wear,2002,253(7/8):733-738.

[14] STAMBOULIDES C, ENGLEZOS P, HATZIKIRIAKOS S G. The ice friction of polymeric substrates [J]. Tribology International,2012,55:59.

(收稿日期:2012-08-17 编辑:周红梅)

(上接第 69 页)

3 结 语

本文通过自行研制的试验装置对自激脉冲射流装置的结构参数和运行参数进行试验研究,分析了上喷嘴直径为 8 mm 和腔径为 95 mm 时的自激脉冲射流装置结构参数和运行参数对打击力和脉冲效果的影响,故精确地给出了产生最佳脉冲效果的工作压力和结构参数范围,为自激脉冲射流结构参数和运行参数优化设计提供依据。分析可知:当下喷嘴直径在 14 ~ 20 mm、腔长为 30 ~ 90 mm 时均能产生脉冲;随着下喷嘴直径增加,与之配比腔长需相应增加,才能产生较好的脉冲效果。本次试验只采用了一种腔径,对于其他腔径的脉冲规律还需进一步通过试验进行探讨。

参考文献:

[1] 高传昌,陈豪,雷霆. 自激振荡脉冲射流的研究与进展 [J]. 华北水利水电学院学报,2009,30(3):41-44.

[2] 王循明,焦磊,王乐勤. 自激脉冲发生机理数值模拟及参数影响分析[J]. 浙江大学学报:工学版,2005,39(9):1450-1454.

[3] 李江云. 自激脉冲喷嘴发生机理数值模拟[J]. 工程热物理学报,2005,25(2):241-243.

[4] 王乐勤,王循明,徐如良,等. 自激振荡脉冲喷嘴结构参数配比试验研究[J]. 工程热物理学报,2004,25(6):956-958.

[5] 高传昌,雷霆,王好锋,等. 低压大流量自激式脉冲射流喷嘴装置性能参数试验研究[J]. 华北水利水电学院学报,2010,31(2):47-51.

[6] 李晓红,杨林,王建生,等. 自激振荡脉冲射流装置的固有频率特性[J]. 煤炭学报,2000,25(6):641-644.

[7] 高传昌,雷霆. 自激振荡脉冲射流喷嘴装置系统频率特性理论研究[J]. 应用力学学报,2009,27(1):33-38.

[8] 裴江红,廖振方,唐川林. 自激振荡脉冲射流频率特性实验研究[J]. 中国机械工程,2009,20(1):60-63.

(收稿日期:2012-02-27 编辑:周红梅)

(上接第 66 页)

防触电、防高空坠物等安全工作外,还应做好防毒、防菌等保护工作。

4 结 语

长期以来,钢围堰作为一种水下检修装置,由于不能彻底排除底水,应用受到很大限制。新型排底水系统的发明使钢围堰的适用水深在理论上突破了大气压力的制约,效率更高,使用更便捷,能设计安装在用于混凝土平面、斜面、立面维修的钢围堰上,维持施工界面无水。开敞式水下检修装置一般适用于混凝土检修或固定在混凝土表面的设备、金属结构的检修,对混凝土结构强度有一定要求,能否使用开敞式水下检修装置,还应对相关混凝土结构进行核算。

参考文献:

[1] 蔡平,周灿华,徐惠亮. 自浮式气压沉柜在水下工程检修中的应用[J]. 水利水运工程学报,1998(增刊1):64-67.

[2] 王德俊. 自浮式气压沉柜在谏壁闸水下检修中的应用与改进[J]. 江苏水利,2009(10):21-22,24.

[3] 周和平,汤可方,孙猛,等. DDC 开敞式水下混凝土无水检修装置研究与应用[J]. 治淮,2006(7):30-31.

[4] 曹周平,朱召泉. 钢结构[M]. 北京:科学技术文献出版社,1999.

[5] 徐道远,黄孟生,朱为玄,等. 材料力学[M]. 南京:河海大学,2000.

[6] 李家星,赵振兴. 水力学[M]. 南京:河海大学出版社,2001.

[7] 朱立明,柯葵. 流体力学[M]. 上海:同济大学出版社,2009.

(收稿日期:2012-02-16 编辑:骆超)