

· 港口 ·



# 加拿大某极地码头除冰方案及船型论证

李惠娟, 范忆平, 黄黎辉

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 位于极寒地区海域的码头, 若要保证全年运营, 需要采取除冰措施, 并对船型组合进行合理安排, 以满足其运量要求。以加拿大北极地区某矿石出运码头工程为例, 针对其所在地自然条件、冰况、运营要求等特点, 提出适用的冰级散货船船级、破冰船及气泡系统等除冰方案以及满足运量要求的船型组合, 并通过泊位利用率的计算对船型组合进行验证。

**关键词:** 北极圈; 碎冰; 破冰船; 冰级; 气泡防冰系统; 纽卡斯尔型船; 泊位利用率

中图分类号: U 652.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0050-05

## Ice control and ship mix demonstration of a dock in the Arctic area of Canada

LI Hui-juan, FAN Yi-ping, HUANG Li-hui

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** For terminals located in extremely cold seas, to be operated uninterruptedly in the whole year, appropriate ice control measures shall be taken, and ship mix shall be arranged accordingly for the throughput demand. An ore loading dock project in the arctic area of Canada is taken as an example in this paper. Based on the natural conditions, ice conditions and operation requirements, this paper proposes applicable ice ship class, ice control measures such as ice management vessels and air bubbler system, as well as ship mix for the annual throughput. Berth occupancy is also calculated to demonstrate the proposed ship mix. The proposal of this paper can provide reference for the design of similar projects.

**Keywords:** the Arctic Circle; brash ice; ice management vessel; ice class; air bubbler system; Newcastlemax; berth occupancy

加拿大某矿石出运码头位于北部地区岛屿, 在北极圈以北约 500 km。项目建成后, 该码头作为主要的矿石出运点, 将承担每年 1 800 万 t 的矿石处理及出运至中国的任务, 同时在其工艺设计上考虑预留未来每年 3 600 万 t 的装卸能力。

由于项目位于北极地区, 工程的建设、设备的运输、铁矿石的开发及出运等都会受到极寒冰冻天气的影响。笔者针对该矿石出运码头所在地的自然条件、冰况、运营要求等特点, 就其船级、航道及码头前沿除冰措施提出建议, 并对船型出运组合进行论证。

### 1 自然条件

项目所在地区属降雨量很少的半干旱气候, 气温通常在 $-50\sim 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 年平均气温约 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最暖月份为 7 月, 日平均温度 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 最冷月份为 2 月, 日平均气温约 $-30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该地区约在 11 月 12 日至次年的 1 月 29 日会经历 24 h 的极夜, 仅有不到 2 h 的暮色。在冬季(12 月至次年 4 月), 荒芜的地形会带来细粉状的飞雪, 能见度有限。无冰冻期很短(7 月底至 8 月底)。从 5 月初至 8 月初为极昼期。9—11 月, 气温降低, 白天时间减少, 到 10 月中旬, 平均日气温远低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

收稿日期: 2021-05-20

作者简介: 李惠娟(1979—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程、岩土工程设计。

最大降雪量通常发生在此期间。湾内常风向为西北向。

随着全球气候变暖, 北极地区的气温持续升高, 在过去的 10 年间, 项目所在区域冬季平均气温上升了 2.5 ℃, 夏季平均气温上升了 1.5 ℃, 港区无冰通航期相应延长。根据 1980—2014 年的观测数据, 项目所在海湾破冰期每年平均提前约 0.7 d, 结冰期平均每年推迟约 0.62 d。

2 冰况及除冰方案

2.1 冰况

项目所处海域的冰通常为当年冰龄, 多年冰龄或者来自冰山的冰基本上可以忽略, 冬季每年冰层厚度约 2 m。由于船舶航行会导致冰层破碎, 形成的碎冰在寒冷天气下又会重新冻结累积, 从而导致进港航道及码头前沿水域的碎冰厚度远大于未受扰动正常累积的冰层厚度。如图 1 所示, 当船舶通过航道时, 一部分碎冰会被推到原有冰盖下方, 其余碎冰会留在航道内, 而在码头前沿水域, 船舶运动产生的所有碎冰会留在此处, 导致码头前沿碎冰大量累积。

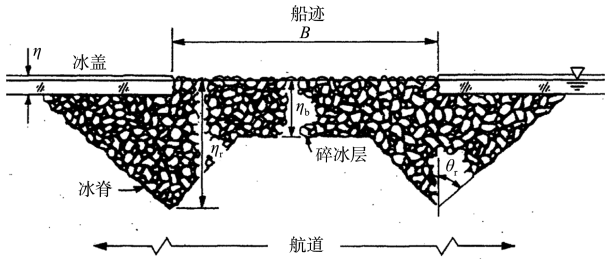


图 1 船舶航道内碎冰累积典型断面

根据附近已建的类似极地港口的观测数据, 在年运量为 1 800 万 t 的情况下, 矿石码头前沿的碎冰层厚度预计将达到 6~12 m, 而当未来出运量增加、冬季船舶航行更加密集时, 碎冰层厚度甚至 would 超过 6~12 m 的范围, 如果不采取措施, 这些碎冰层在来年冬天来临之前也不能完全融化。6~12 m 厚的碎冰层会严重影响船舶的靠离泊, 并可能导致码头停运, 因此需要采取措施减少码头前沿碎冰层的厚度。

图 2 为项目所在海域在 1 年中不同时段的海冰密集度(一个区域被冰而不是水覆盖的比例)来表示, 其中 5 月为全年积冰最多的时段。

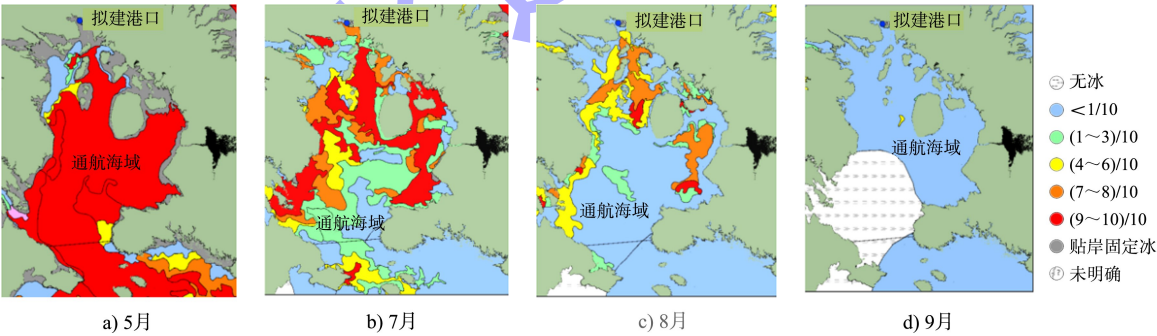


图 2 项目所在海域冰层覆盖范围

2.2 海冰管理

为了防止因船舶通航造成碎冰在港池内快速累积, 项目前期对码头前沿存在 4~8 m 厚未固结碎冰情况下就不同的码头结构形态(码头前沿完全封闭的连续式结构和码头前沿开敞的分离式结构)、散货船操纵模式、靠泊方位及破冰船辅助破冰等进行物模试验, 得出以下主要结论: 1) 船首靠泊十分困难, 带有低功率全回转推进器且船尾先靠泊的方式在所有工况下都更容易, 船舶与码头之间的残冰较少; 2) 利用带有全回转推进器的

推进装置可成功地冲刷和清除碎冰; 3) 由破冰船在散货船到达之前清除碎冰, 并且辅助靠泊操作行之有效; 4) 分离式结构更有利于清除前沿碎冰, 但在某些情况下由于船舶撞击受损的风险却大于连续式结构, 码头的结构形式最终取决于造价; 5) 破冰船足以适用于最差的冰况, 若有需求也可处理港外浮冰; 6) 辅助海冰控制方案如气泡系统及小型破冰船可酌情考虑。

综合以上结论及已建港口的经验, 通常配备专门的港口破冰船进行海冰管理。破冰船通过推

进器冲刷，定期清除码头前沿水域的碎冰，减小碎冰累积厚度。根据 Enkvist<sup>[1]</sup> 的计算结果，在 2 m 厚的冰层中以 1.55 m/s 的速度通行的破冰船可以处理的固结碎冰厚度为 6 m，需要的船舶功率约为 16 MW。本项目建议配备 2 艘破冰船用于冬季及秋季结冰期领航及破除港口周围的碎冰，并在全年配合 2 艘拖轮用于辅助进港及靠离泊。

2.3 破冰船级

根据项目所在海域的冰况条件，按照国际船级社协会 (International Association of Classification Societies, IACS) 对极地船的冰级定义<sup>[2]</sup>，本矿石码头冬季适用的船舶应为 PC4 级极地散货船，即适用冰况为全年在当年厚冰状况下，可包括旧夹冰。破冰船用于领航及破除碎冰，其等级应高一级，为 PC3 级，即适用冰况为全年在第 2 年冰龄状况下，可包括多年夹冰。在春秋季融冰及结冰过渡期，可采用《芬兰-瑞典冰级规则》FSICR<sup>[3]</sup> 等级为 1C，即可以在轻度的冰级状态下航行 (最大冰厚 0.4 m) 的冰级散货船。

2.4 气泡防冰系统

除破冰船外，气泡防冰系统也是一种经过实践证实的可辅助抑制碎冰累积的方法。气泡系统由安装在结构表面的空压机与放置在水体深处或底部管壁设有若干气孔的穿孔管网组成，将压缩空气通入水中，形成一定数量的气泡群，气泡群在初始速度和浮力作用下向水面运动，对周围水体产生扰动形成流场，并夹带深处较暖的水流将其运送至表层，从而抑制冰的形成。气泡防冰原理见图 3<sup>[4]</sup>。

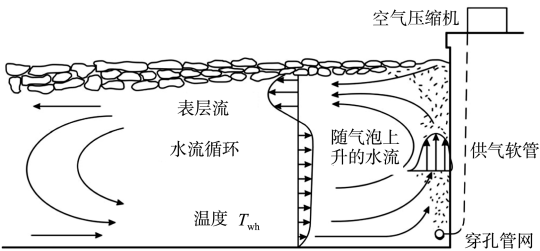


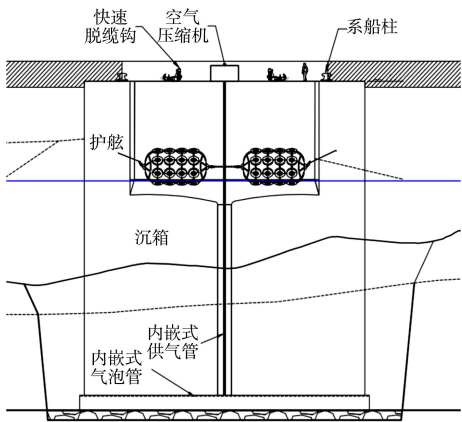
图 3 气泡防冰系统原理

气泡防冰设施在北欧国家港口及游艇码头比较常见，该系统在具备温度梯度的淡水和淡盐水

环境中应用良好。气泡系统有时会与工业厂房的热废水结合使用，在芬兰的一些港口如科特卡港，穆萨洛电厂冬季排入海里的热废水在天然冰层下方沿海岸漂流，沿港池岸线布置的气泡系统将一部分排放的热废水带入港池形成水体循环后，靠近码头前沿线的停泊水域内碎冰层全部融化，证明气泡系统结合港池内引入热能对于改善港池内的冰冻效果十分显著。

在北极海岸，由于海水含盐度基本在 3.0% ~ 3.5%，最大密度水体的温度基本接近水的冰点，冬季水体的温度缺乏梯度通常会导致气泡系统无法产生明显效果。但是在格陵兰北部地区，利用夏季港区水温的余热，在冰季的早期，气泡系统可以延迟和抑制港内冰的形成。该地区冰冻期始于 10 月初，但在码头前方直到 12 月底才会形成完整的覆冰层。观测发现，热储备会在大约 2 周后耗尽，在此时段内由气泡系统产生的表层流依然有助于抑制冰的形成，表明在初冬时段北极地区港口利用气泡系统控冰是有效的<sup>[5]</sup>。

本矿石码头为采用 4 个沉箱的墩式码头，结合以上实践及研究，在每个沉箱前沿安装 1 套压缩空气帘幕气泡系统，通过尽量减少冰与码头前沿立面的接触来控制碎冰累积。此外，气泡系统还用于将底部较暖的水流带至表层，从而融化部分表层冰。本项目附近无法提供工业热废水，但是北极海岸冬季会释放一定的地热能，也可将船舶底部排出的较暖的压舱水作为热源使用。码头前沿的气泡防冰系统布置见图 4。



a) 立面

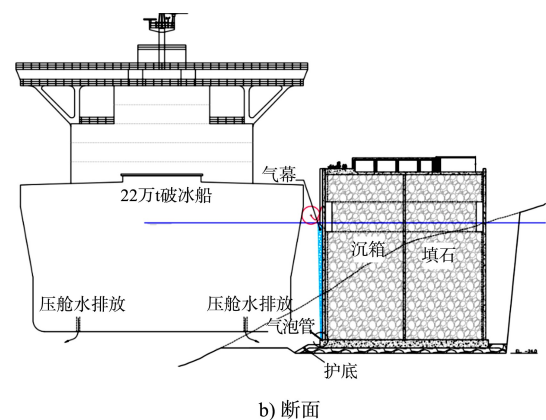


图 4 码头沉箱前沿气泡防冰系统布置

可以通过物理及数值模拟试验对上述气泡防冰系统的应用进行模拟, 选定参数, 对设计进行细化, 确定最佳的布置方案, 并对防冰效果进行评价。

3 设计船型及出运组合

3.1 设计船型

矿石出运船型全部采用有效载质量为 22 万 t 的散货船, 根据《港口设计手册》<sup>[6]</sup>中提供的置信

限为 75% 的 20 万吨级散货船型(最大有效载质量达 25 万 t) 确定的矿石码头设计船型尺度为: 总长 311.0 m, 型宽 50.0 m, 型深 25.9 m, 最大吃水 18.6 m。

3.2 船型组合

铁矿石出运的目的地为中国, 考虑到夏季开放水域时间仅有 1 个月, 为了保证结冰期、融冰期及冬季铁矿石出运, 拟在格陵兰岛南部海域建设一个水-陆-水中转不冻港, 将矿石从冰级或极地散货船转运到普通散货船, 通过普通散货船可全年运送至中国。

矿石码头至中转港的航程为 2 250 km, 按照航速 14.5 kn 计算, 冰级或极地散货船单程时间需要 3.5 d, 按平均在港时间 4.5 d 估算, 往返中转港需要的时间为 11.5 d。夏季可按需租用普通散货船直接将铁矿石出运至中国, 考虑码头及船舶的充分利用, 特别是夏季开放水域期航道及码头的充分利用, 建议采用的船型组合及对应的相应运量(按所有运输船舶载质量均为 22 万 t) 见表 1。

表 1 矿石码头出运(1 800 万 t/a) 建议船型组合

通航季节	通航时间/d	船舶类型	船舶数量/艘	航次	运量/万 t	目的地	往返时间/d
春季融冰期: 8 月 10—20 日	10	1C 级冰级散货船	4	4	90	中转港	11.5
夏季开放水域: 8 月 20 日—9 月 20 日	31	纽卡斯尔型散货船	19	19	420	中国	—
秋季结冰期: 9 月 20 日—10 月 20 日	30	1C 级冰级散货船及破冰船	4	12	260	中转港	11.5
冬季: 10 月 20 日—次年 8 月 10 日	294	PC4 级极地散货船及破冰船	2	47	1 030	中转港	11.5
合计	365			82	1 800		

由表 1 可知, 为了完成全年 1 800 万 t 的矿石出运量, 需要配备 4 艘 1C 级冰级散货船, 19 艘纽卡斯尔型散货船及 2 艘 PC4 级极地散货船, 共 82 次航程。在冬季及秋季结冰期, 还需要利用港

口破冰船辅助破冰。

3.3 泊位利用率

运量为 1 800 万 t/a 时, 矿石码头全年各时段泊位利用率如表 2 所示。

表 2 矿石码头泊位利用率

季节	船舶航次/次	作业时间/h										泊位占用时间/h	泊位占用率/%
		泊位空闲时间	靠泊时间	离泊时间	装船时间	天气影响时间	装船前后延误时间	装船机延误时间	倒换舱口时间	清仓时间	合计		
冬季(294 d)	47	5 409	168	168	841	0	219	38	141	71	7 055	1 646	23
春季融冰期(10 d)	4	84	14	14	67	24	19	3	12	2	239	155	65
夏季(31 d)	19	94	68	68	320	24	89	16	57	9	745	651	87
秋季结冰期(30 d)	12	300	43	43	202	24	56	10	36	6	720	420	58
合计	82	5 887	293	293	1 430	72	383	67	246	88	8 759	2 872	33

注: 泊位占用率=泊位占用时间/总时间; 表中数据为根据经验估算, 在本项目设计中主要用于对船型组合进行调整及确认, 可能会与后期运营时的实际数据有偏差。



夏季矿石码头泊位利用率最高，达 87%；冬季最低，仅 23%。说明夏季开放水域期间的泊位利用率基本达到饱和，远期可通过在冬季增加 PC4 级极地散货船来增加总运量。

若在冬季将 PC4 级极地散货船增至 6 艘，则可完成的航次数量可达 144 次，根据表 2 数据，泊位占用时间相应增至 5 046 h，泊位占用率将达到 71.5%，码头总运量将增至 3 900 万 t，可满足远期 3 600 万 t 的出运量需求。

4 结 论

1)本工程冬季适用的船舶应为 PC4 级极地散货船，在春秋季融冰及结冰期，可采用等级为 1C 的冰级散货船。配备港口专用的破冰船是最有效破除碎冰的方法，破冰船等级为 PC3 级。配备 2 艘破冰船用于冬季及秋季结冰期领航及破除港口周围的碎冰，并在全年配合 2 艘拖轮用于辅助进港及靠泊。

2)在码头前沿每个沉箱处安装气泡防冰系统作为辅助防冰措施，在港池水体内存成循环，在初冬时节可以有效抑制港池内结冰，地热能结合船舶排放的压舱水可考虑作为底部水体的热源。

3)通过建设水-陆-水中转港，矿石码头可以实现全年运营，夏季由普通散货船直航中国，其余时段则由自带破冰功能的冰级或极地散货船运至

中转港，再换至普通散货船运往中国，通过船型组合的合理配置，可以完成每年 1 800 万 t 的矿石出运量。此外，在冬季增加极地散货船的数量可满足远期 3 600 万 t 的出运量需求。在实际运营中，须充分考虑影响泊位利用率的各种因素，根据船型组合，合理安排调整全年各时段的航程，以确保码头的出运量。

参考文献：

[1] ENKVIST E. On the ice resistance encountered by ships operating in the continuous mode of icebreaking [R]. Helsinki: The Swedish Academy of Engineering Science, 1972.

[2] 王燕舞,张达勋. 冰级定义的有关分析及建议[J]. 上海造船, 2010(4): 54-58.

[3] Finnish & Swedish Maritime Administration. Finnish-Swedish Ice Class Rules [S]. Helsinki: Finnish & Swedish Maritime Administration, 2002.

[4] PAN H C, ERANTI E. Applicability of air bubbler lines for ice control in harbors [J]. China ocean engineering, 2007(2): 215-224.

[5] US Navy Hydrographic Office. Study of oceanographic conditions as related to project Polyna, TR-80, technical report [R]. Washington DC: US Navy Hydrographic Office, 1961.

[6] THORESEN C A. Port Designer's Handbook [M]. 3rd ed. London: Thomas Telford Limited, 2014.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 37 页)

[7] SAGUÛÉS A A, LAU K, POWERS R G, et al. Corrosion of Epoxy-Coated Rebar in Marine Bridges—Part 1: A 30-Year Perspective[J]. Corrosion, 2010, 66(6): 065001.

[8] GARCIA-AIONSO M C, Escudero M L, Miranda J M, et al. Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete[J]. Cement and concrete research, 2007, 37(10): 1463-1471.

[9] 朱岩,陈雨,甘万强. 有机硅烷浸渍高性能海工混凝土防腐性能的研究[J]. 混凝土, 2007(10): 77-80.

[10] 杨海成,熊建波,范志宏. 硅烷防护对混凝土抗氯离子渗透性的影响[J]. 水运工程, 2013(8): 63-68.

[11] ZHU Y G, KOU S C, POON C S, et al. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete[J]. Cement and concrete composites, 2013, 35(1): 32-38.

[12] 李克非,景炜,杨睿. 混凝土表面硅烷浸渍及其长期防护效果研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(8): 1181-1190.

[13] 刘永满,王眺. 表面硅烷憎水处理混凝土码头结构的现场施工效果分析[J]. 水运工程, 2016(5): 149-155.

(本文编辑 郭雪珍)