

船舶海洋工程表面处理超低温无阻碍冰沙射流技术 发展与研究现状

张杨杨¹, 赵远涛¹, 李文戈¹

(1.上海海事大学商船学院, 上海, 201306.)

摘要: 超低温无阻碍冰沙射流技术是一种新型表面处理技术, 其基本原理是以冰粒替代传统磨料, 在高速射流下高速冰粒流撞击船舶表面, 实现对船舶表面清洗的目的。针对船舶海洋工程表面表面处理超低温无阻碍冰沙射流技术的功能、结构特征、动力学性能及控制方法, 现已有大量学者开展研究, 其中喷嘴参数、冰粒制备是研究核心, 但目前缺乏对其的系统性总结。为此, 聚焦于船舶海洋工程表面表面处理超低温无阻碍冰沙射流技术的研究方法与技术, 首先对船舶海洋工程表面表面处理超低温无阻碍冰沙射流技术作业时的功能和设计特征进行了总结; 然后对船舶海洋工程表面表面处理超低温无阻碍冰沙射流技术进行了分类和比较。通过对比不同的船舶海洋工程表面表面处理技术参数对比, 指出了未来可研究的新方向。研究结果可为后续的超低温无阻碍冰沙射流技术研究提供一定参考。

关键词: 超低温无阻碍冰沙射流技术; 技术原理; 冰粒制备方法

Abstract: Ultra low temperature unimpeded jet technology is a new surface treatment technology. Its basic principle is to use ice particles instead of traditional abrasives. Driven by high-speed fluid, high-speed ice particle flow strikes the workpiece surface to realize the purpose of workpiece surface processing. At present, a large number of scholars have carried out research on the function, structural characteristics, dynamic performance and control methods of ultra-low temperature unimpeded jet technology for ship and ocean engineering surface treatment, in which nozzle parameters and ice particle preparation are the research core, but there is a lack of systematic summary at present. Therefore, this paper focuses on the research methods and technologies of ultra-low temperature unimpeded jet technology for marine engineering surface treatment. Firstly, the functions and design characteristics of ultra-low temperature

unimpeded jet technology for marine engineering surface treatment are summarized; Then, the ultra-low temperature unimpeded jet technology for surface treatment of marine engineering is classified and compared. By comparing the surface treatment technical parameters of different marine engineering, the new research direction in the future is pointed out. The research results can provide some reference for the follow-up research of ultra-low temperature unimpeded jet technology.

Key words: Ultra low temperature unimpeded jet technology; Technical principles; Preparation method of ice particles

1 前言

船舶长期在海面上漂泊,表面附着了大量海水盐分、灰尘及附着在船体上的海洋生物,因此对船舶海洋工程进行表面处理至关重要^[1]。船舶清洗经历一系列变革,从原始手工清洗、简单机械烤铲,发展到喷砂、机械清洗、化学清洗^[2]。首先,遵守国家环保低排放的要求,在进行表面处理的过程中应尽可能地减少外来物的引入,减少甚至避免清洗排放物对环境的污染。其次,工作环境友好的要求。清洗过程中应避免粉尘、有害排放物对操作者身体健康造成的不利影响。这样,传统的化学清洗、喷砂清洗等清洗方法已不能满足要求。传统表面处理首先采用高压淡水清洗,然后进行喷砂或打磨进行表面处理^[3]。高压水清洗涂层目的是先洗去船体上的海水盐分、灰尘及附着在船体上的海生物,这也是导致涂层早期失效的重要原因之一,但是不会进行磨砂处理。在喷砂过程中,钢砂四处飞溅,造成大量烟雾,其中还包含大量的可吸入粉尘,对环境保护和人体健康造成较大的危害。此外,在船坞中有许多船舶在进行维修,飞散的粉尘还会对自身和其他船舶新涂油漆造成污染,而且散落各处的废砂,需要回收处理的工时长,钢砂消耗量大,应用费用较高^[4]。

随着船舶清洗技术发展,船舶维修建造工艺水平越来越高,船舶清洗技术与工艺也随着发生了变化,最新的一种技术研发生产的超低温无阻碍冰沙射流技术设备^[5]。利用超低温无阻碍冰沙射流技术实现高效的清洗能力,达到了高效能,低污染,操作简便等特点。

超低温无阻碍冰沙射流技术在 20 世纪 80 年代得到广泛发展。传统冰沙射流加工在喷射除锈过程中需要消耗大量的磨料,在清理完船舶表面之后,磨料会污

染环境，对磨料的处理和回收比较困难。此外，会在加工船舶表面残留一定量的微细磨粒对船舶的物理性能产生一定的影响，因而不适用于清洁度要求较高和封闭空间的场合^[6]。随着科技革新，超低温无阻碍冰沙射流技术得到了发展，以其无污染、对船舶表面损伤小、加工完成后无残留、无需后处理等优点在加工及清洗方面得到了应用。冰粒射流的基本原理是用冰粒替代传统磨料，在高速流体的带动下形成类似磨料流撞击到船舶表面达到对船舶加工的一种射流抛光技术。利用冰粒在低温下具有较高的强度和硬度的特点，对船舶表面进行表面处理^[7]。

综上可知，现有船舶除锈除漆技术虽可有效去除船体表面铁锈与油漆，但对于船舶修造中增加粗糙度的要求，难以实现，仅有喷砂或水喷砂达到，但又受限于环保要求。针对以上现有船舶除锈除漆技术的不足，寻求一种类似于喷砂，且达到环保要求的技术势在必行，即超低温冰粒无阻碍射流技术。本项目旨研发一种超低温冰粒无阻碍射流技术与设备，利用超低温冰粒实现类似喷砂效果，且满足环保要求。超低温冰粒无阻碍射流技术与设备的研发对于船舶修造产业的快速发展具有重要的推动作用。

为此，针对冰沙射流技术的研究方法与技术，对其进行分析总结，主要包括：1) 现有冰沙射流技术的功能和设计特征；2) 现有冰粒制备方法。通过对比不同的研究方法，利用水射流和一定硬度的冰粒对物体表面产生的冲蚀和磨削作用对船舶表面进行除锈作业，旨在探究现有研究方法的不足并提出未来可研究的新方向。

2 超低温无阻碍射流原理

超低温无阻碍射流技术主要是利用冰粒的物理特性和力学性能，取决于在射流过程中借助高速气流的加速作用，形成高速冰粒射流束，用比较高的流度冲洗船舶体表面，目的是去除船舶表面污垢。冰粒去除表面污染物的过程如图 1 所示：冰粒高速冲击船舶表面的污垢层，首先通过冲击力、剪切力来去除表面污垢；随后破碎的冰粒在船舶表面划擦并逐渐融化，在这个过程中将松动的污垢从船舶表面冲走，冲击、擦洗和冲洗的综合作用使冰粒射流能有效去除表面污染物。

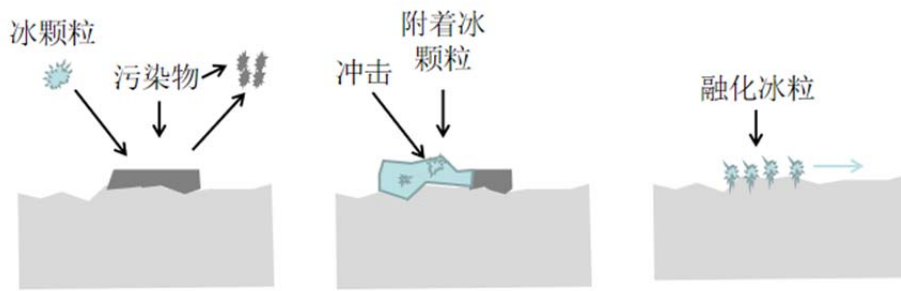


图 1 表面去污过程

Fig. 1 Surface decontamination process

在标准大气压下，水在低于 0°C 凝结成冰。超低温冰粒射流的除锈除漆的原理类似于喷砂，依靠高速冰粒的强度对锈层与污垢产生冲击破坏，另外超低温冰粒也可引起锈层、油漆层与基底钢板的体积收缩性差异，进而实现高效的除锈除漆效果；同时利用冰粒的硬度冲击效果，增加钢板表面粗糙度。以上船舶表面清洗效果主要取决于超低温冰粒射流中冰粒的物理特性，而冰粒温度的控制对冰的机械性能至关重要。冰粒之所以能够作为磨料在基体表面产生冲蚀和磨削作用的重要因素是由于在一定的温度下冰粒具有一定硬度^[8]。Fletcher N.H.^[9]等通过对冰的硬度研究得到冰的硬度随温度变化的曲线如图 3 所示。冰粒的硬度随着温度降低而逐渐升高，当温度 -70°C 左右时达到最大硬度 4 HM，硬度接近于橄榄石硬度。另一方面，作为磨料的磨粒在整个加工过程中不能产生晶粒相互黏结和黏结管壁现象，不仅会影响加工效率而且会对设备造成一定的损伤。对不同温度冰粒间的粘结力进行的研究表明，随着温度的降低冰粒之间的粘结力显著减小^[10]；此后的研究进一步表明，当温度降低到 -27°C 时冰粒间的粘结力几乎为零。冰的这两个性质决定了只要控制好温度冰粒可以作为磨料射流的磨粒使用。此外，为了保证冰粒射流的连续性，还要避免冰粒粘结在冰粒制备容器及管道上。因此，采用 $-30\sim-50^{\circ}\text{C}$ 的超低温冰粒不仅可以避免颗粒间的黏结，保证冰粒的硬度，而且避免了 -70°C 左右时冰粒与管壁的强大黏结。为进一步减轻 $-40\sim-50^{\circ}\text{C}$ 的超低温冰粒与制冰腔室及传输管壁的粘结强度，对制冰腔室等关键位置采用耐低温疏水材料保护。一些疏水材料可在 $-180\sim-260^{\circ}\text{C}$ 服役，可降低水分与管壁的结合力，使得水分在高压气体的作用下从管壁内部吹走，极大降低冰与管壁的粘结强度，降低结冰堵塞现象的发生。因此，通过合理选取冰粒温度，不仅能有效提高冰粒射

流的效率，而且能提高加工后船舶的表面质量，提高能源利用率。

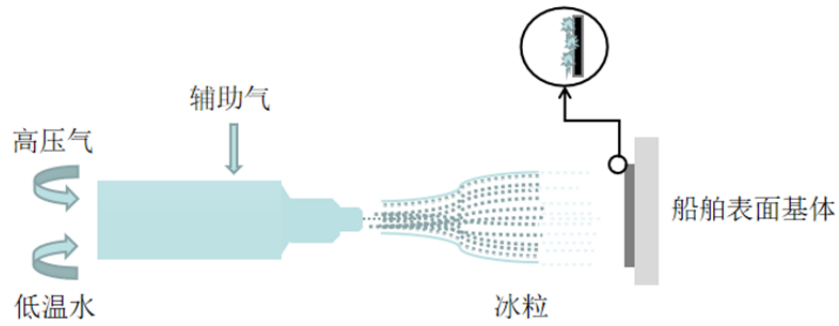


图 2 超低温冰粒无阻碍射流技术工作示意图

Fig. 2 Working diagram of ultra-low temperature ice particle unimpeded jet technology

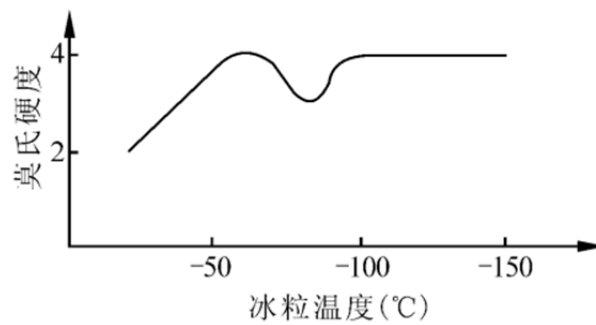


图 3 冰的硬度随温度变化的曲线

Fig. 3 Curve of ice hardness with temperature

3 超低温无阻碍射流关键技术

要获得-20 °C到-50 °C的超低温冰粒射流技术，就需要有合理的制冰技术、低温射流技术及相关设备。现有制冰与射流技术主要包括以下 3 类，其为：

(1) 制冰+破碎+压缩空气输送技术

图 4 为制冰+碎冰+压缩空气输送技术路线及装置示意图，包括制冷系统，与制冷系统相连的成冰系统，成冰系统设有动力组件，成冰系统包括成冰腔，底部设有收集桶，成冰腔轴心位置设有一个旋转轴，旋转轴上活动套接有刀片，刀片两侧边缘延伸至成冰腔内侧壁，即制冰机制冰，机械破碎，通过液压传输输送冰粒进行除锈除漆工作。但该技术方案有明显的缺陷：1) 制冰碎冰过程复杂，

不易实现对冰粒大小的控制；2) 冰粒温度较高，不易控制在所需的-30~-50℃范围内，使得冰粒强度与硬度较低，清洗效果不好；3) 制冰或碎冰后短暂储存或输送过程中，冰粒温度较高可导致冰生长结晶的问题；4) 采用常温压缩气体进行冰粒高速输送，室温气体对冰粒融化存在严重影响；5) 常温压缩气体中的水分易导致冰粒黏结。由此可知，虽然该技术方案简单可行，但仍存在较多的缺陷亟需改进，尤其在冰粒温度控制及压缩气输送冰粒过程^[11]。

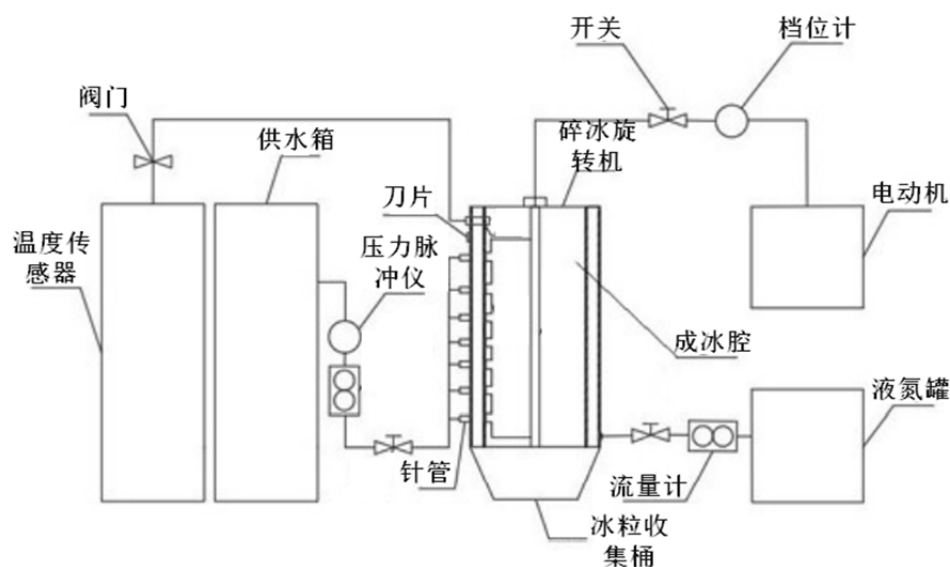


图 4 制冰+碎冰+压缩空气输送技术方案^[11]

Fig.4 Technical scheme for ice making+ice crushing+compressed air transportation^[11]

(2) 液氮制冷+喷雾制冰+压缩空气输送技术

图 5 为典型的液氮制冷+喷雾制冰+压缩空气输送技术。该设计机构简单可行，采用喷雾技术及液氮制冷技术可以实现冰粒大小的有效控制，同时液氮制冷技术可以有效降低冰粒的温度至所需范围。但该方案也存在严重的技术限制与缺陷，主要包括：1) 液氮为一次性消耗品，价格高，增加了除锈除漆成本，且液氮罐在船舶修造车间使用时存在较大安全隐患；2) 高压空气如为常温压缩气体，便可导致冰粒融化，及压缩气体中的水分易导致冰粒黏结；如为高压气瓶，虽减少了水分存在，但仍存在冰粒融化问题及成本增加问题。由上可知，虽然以上技术方案可有效解决过冷冰粒制备控制及过冷气输送问题，但液氮的大量使用也将限制该技术的应用^[12]。

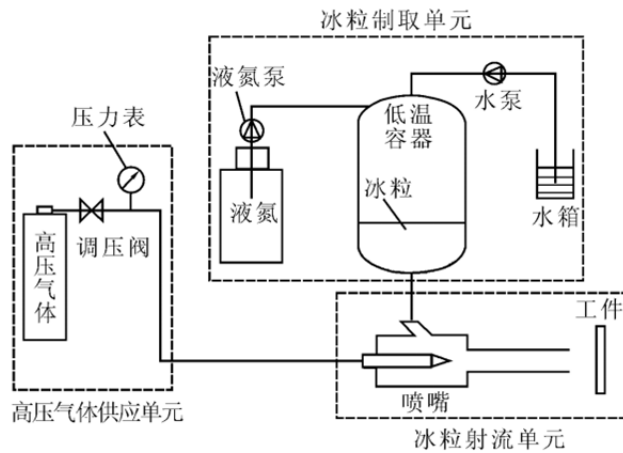


图 5 液氮制冷+喷雾制冰+压缩空气输送技术方案^[11]

Fig. 5 Technical scheme of liquid nitrogen refrigeration + spray ice making + compressed air transportation^[11]

(3) 枪头处液氮快速同步制冰与同步射流技术

图 6 为枪头处液氮快速同步制冰与同步射流技术方案装置图。此方案为常压缩气体运载喷雾水滴至液氮冷却腔内，在枪头内经过多级液氮冷却，达到所需温度的冰粒。该技术方案简单可行，能够有效解决过冷冰粒控制及管道传输融化问题。但其液氮消耗量较大，成本较高，且液氮分布范围较广，存在较大的安全隐患^[13]。

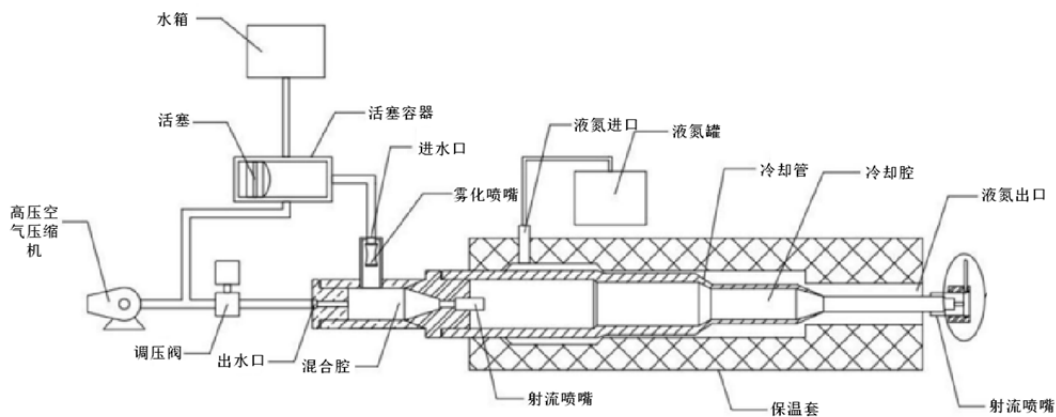


图 6 枪头处液氮快速同步制冰与同步射流技术方案^[13]

Fig. 6 Technical scheme of liquid nitrogen fast synchronous ice making and synchronous jet at gun head^[13]

4 各参数对超低温射流效率的影响

一些学者^[14]通过实验研究,工作压力、冰粒的粒径、冰粒流量、冰粒温度和横移速度都会对船舶底漆造成一个破坏,当横移速度为 $v=90\text{ mm/min}$,靶距为 $S=50\text{ mm}$,冰粒流量为 $M=0.55\text{ kg/min}$,冰粒粒径 $d\leq 2.5\text{ mm}$,冰粒温度 $t=-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境温度 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$,最后发现当工作压力为 0.2 MPa ,对船舶表面破坏最小,脱漆效率为 $290\text{ mm}^2/\text{min}$ 。当工作压力 $p=0.75\text{ MPa}$,横移速度 $v=90\text{ mm/min}$,靶距 $S=50\text{ mm}$,冰粒流量 $M=0.55\text{ kg/min}$,冰粒温度 $t=-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境温度 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$,最后得出冰粒粒径存在一最佳值冰粒粒径太大或太小均导致破坏下降。当工作压力 $p=0.75\text{ MPa}$,横移速度 $v=90\text{ mm/min}$,靶距 $S=50\text{ mm}$,冰粒粒径 $d\leq 2.5\text{ mm}$,冰粒温度 $t=-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境温度 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$,实验得出冰粒流量 0.77 kg/min 时,对船舶表面的漆破坏最小,脱漆效率为 $850\text{ mm}^2/\text{min}$ 。当工作压力为 $p=0.75\text{ MPa}$,横移速度为 $v=90\text{ mm/min}$,靶距为 $S=50\text{ mm}$ 。冰粒流量为 $M=0.55\text{ kg/min}$,冰粒粒径 $d\leq 2.5\text{ mm}$,环境温度 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验得出,船舶表面脱漆效率随冰粒温度的变化效率随着冰粒温度的降低呈递增趋势。但当温度降低到 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时效率变化不大。当工作压力 $p=0.75\text{ MPa}$,靶距 $S=50\text{ mm}$,冰粒流量 $M=0.55\text{ kg/min}$,冰粒粒径 $d\leq 2.5\text{ mm}$,冰粒温度 $t=-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,周围环境温度 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验结果表明脱漆效率随横移速度的变化随着横移速度的增大效率迅速降低。

5 总结

冰粒射流抛光技术以其无污染、对船舶表面损伤小、加工完成后无残留、无需后处理等优点在加工及清洗方面得到了广泛应用。目前在国家可持续性发展的条件下,冰粒射流抛光技术在管道、船舶及核能清洗等领域具有十分广阔的应用前景。超低温射流清洗技术的出现,进一步扩大了冰粒射流抛光技术的应用领域,并逐步扩大其他的清洗等领域内。对于超低温冰沙射流技术研发会逐渐向具有模块高度集成化,冰粒传输距离短,冰粒硬度高,射流强度高等特点发展。通过对空压机中高压气体 ($0.6\text{--}1.5\text{ MPa}$) 的除湿降温过程及过冷水的喷淋过程,在喷枪位置处实现制冰与射流的同步进行,实现冰粒的快速、稳定和连续的制取就构成了成功用冰粒射流技术的关键。应积极发展冰粒射流技术的新工艺、新方法,对此方面的研究以推动冰粒射流技术的全面发展。

参考文献:

- [1]冯燕尔,张玉莲.船舶水下清洗设备控制部分设计[J].中国修船,2014,27(03):42-46.
- [2]郦智斌,龙彪.船舶水下清洗技术研究[J].中国修船,2011,24(05):33-36.
- [3]王震. 胶粘剂厚度与温度交变对 CFRP 板-钢粘结性能的影响[D].哈尔滨工业大学,2019.
- [4]张玉莲, 节能型船舶水下液压震荡清洗设备的研制和开发. 浙江省,浙江海洋学院,2010-03-27.
- [5]全玉臣.船舶清洗市场趋势[J].清洗世界,2007(01):35-38.
- [6]王鑫,张飞虎,李琛,饶小双.冰粒射流抛光技术的发展与研究现状[J].工具技术,2018,52(02):8-12.
- [7]郑小涛,姚景山,傅波.不同结构类型喷嘴对冰粒射流清洗效果的影响[J].液压气动与密封,2020,40(10):48-53.
- [8]陈志荣,袁隆基,高丽霞,丁艳.冰粒磨料射流系统设计[J].煤矿机械,2008(11):10-11.
- [9]Fletcher N.H.. Dendritic growth of ice crystals[J]. North-Holland,1973,20(4):
- [10]李德玉. 基于低温气体环境冰粒即时制备及冰射流表面脱漆研究[D].中国矿业大学,2012.
- [11]刘勇,魏建平,张宏图,温志辉,徐向宇,姚邦华. 一种刮片式冰粒即时制备装置及方法[P].河南省: CN112856879A,2021-05-28.
- [12]孙洪孟. 冰射流清洗设备[P]. 辽宁省: CN109015390B,2021-02-26.
- [13]黄飞,胡斌,李树清. 一种后混合冰粒磨料射流喷嘴[P]. 湖南: CN208117601U,2018-11-20.
- [14]刘力红,刘本立.冰粒射流表面清洗的试验研究[J].管道技术与设备,2007(06):40-41+43.