



“冰雪魔术”变水成雪: 人工造雪技术

董佩文¹, 刘国强¹, 张博文², 徐荣吉^{2*}, 晏刚^{1*}, 王瑞祥²

¹ 西安交通大学能源与动力工程学院制冷与低温工程系, 西安 710049;

² 北京建筑大学北京市建筑能源综合高效利用工程技术研究中心, 北京 100044

* 联系人, E-mail: xurongji@bucea.edu.cn; gyan@mail.xjtu.edu.cn

Magic of turning water into snow: Artificial snowmaking technology

Peiwen Dong¹, Guoqiang Liu¹, Bowen Zhang², Rongji Xu^{2*}, Gang Yan^{1*} & Ruixiang Wang²

¹ Department of Refrigeration and Cryogenic Engineering, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

² Beijing Engineering Research Centre of Sustainable Energy and Building, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China

* Corresponding authors, E-mail: xurongji@bucea.edu.cn; gyan@mail.xjtu.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2022-0433

“三亿人上冰雪”目标的初步实现和北京冬奥会、冬残奥会的成功举办, 将人们对冰雪运动的热情推向最高潮, 然而冰雪运动的进行高度依赖于当地气候条件和雪资源。受全球气候变暖的影响, 人工造雪技术成为保障冰雪运动项目和产业发展的前提条件。人工造雪技术是人为创造成雪环境的制冷技术, 原理简单但工艺过程复杂, 对环境条件依赖性很高, 其成雪本质与自然成雪一致。

自然成雪过程包括三个环节: 晶核形成、雪晶生长、雪花自然沉降。大气中的微小水滴过冷冻结形成晶核, 或者大气中气溶胶颗粒直接作为晶核。晶核形成后, 大气中的水蒸气受环境中复杂的气流、湿度、杂质等影响, 在细小晶核表面以冰晶的形式生长, 呈现出具有结构多样性的雪花^[1,2], 最后发生自然沉降。自然成雪的形成条件可以概括为三点^[3,4]: (1) 环境水蒸气饱和, 雪晶才能成长; (2) 要有雪晶核; (3) 环境温度和湿度直接关系雪晶形状, 导致雪花的结构多样性。目前主流的人工造雪技术也是利用了自然成雪原理, 将水和空气在造雪机喷嘴内混合后喷出形成微小雾化水滴, 水滴在低温的空气中冻结, 成为雪花生长的关键要素——“晶核”。晶核再聚集周围雾化水汽, 在落地之前继续生长。从原理上看, 使雾化水滴凝结放热的原因有两种^[5]: 一是雾化水滴与寒冷空气接触后的热交换; 二是压缩空气的快速膨胀迅速降温, 使雾化水滴迅速释放热量凝结成核。环境温度越低, 传热温差越大, 水滴凝结时间越短; 环境相对湿度越低, 水滴周围的水蒸气分压差越大, 水滴蒸发冷却能力越强, 这都有利于雪花的形成^[6]。雾化水滴降落过程中与环境进行对流传热的同时也在不断蒸发, 会同时吸收蒸发热、太阳辐

射热和摩擦热, 成雪的热力学状态也在不断发生改变, 因此成雪过程相当复杂^[7]。

人工造雪技术的发展可以追溯到20世纪30年代, 最早的造雪方法是利用碎冰机制取碎冰再鼓吹至滑雪场地。1950年, P. Wayne率先提出利用压缩空气和喷嘴节流制取雪晶, 创造了第一台真正意义上的人工造雪机。时至今日, 随着冰雪运动的日益普及, 人工造雪技术得到了长足的发展。目前造雪机类型可以分为以下4种类型^[3]: (1) 内混型造雪机, 将压缩空气和高压冷水在核子器腔室内混合后, 在出口膨胀过冷, 雾化水滴凝结成晶核, 并聚集空气中的水汽和水滴继续冷却生长形成雪晶; (2) 外混型造雪机, 将高压冷水和压缩空气分别直接通过喷嘴喷出, 利用空气膨胀冷却来给雾化水滴降温形成晶核, 受外界风力影响较大; (3) 风扇型造雪机, 无需压缩空气和核子器, 雾化水滴经大功率的高速风扇吹出, 悬浮在高空中, 只在低温环境冷却; (4) 碎冰机型造雪机, 通过切削机将制取的冰块粉碎成小冰粒后, 经风机鼓吹落地成雪。

内混型造雪机由于效率高、造雪效果好, 迅速占据了造雪机的主流市场。将内混型造雪机与风扇型造雪机相结合, 演变出目前市面上应用的主流机型。内混型造雪机造雪过程如图1所示, 其中最核心的部件就是喷嘴环上的核子器、喷嘴和风筒内的风机。核子器是一种气液两相的空气助力式喷嘴, 内部高压空气与冷水相互作用使水雾化破碎成更细小液滴; 而喷嘴内部仅为单液相且有螺旋结构, 使水在离心力作用下形成空心锥形喷雾, 其雾化液滴尺寸稍大于核子器^[8]。核子器喷出的微小雾化液滴与冷空气换热后, 迅速过冷冻结成冰晶, 为雪花生长提供晶核。晶核与喷嘴喷出的雾化液滴

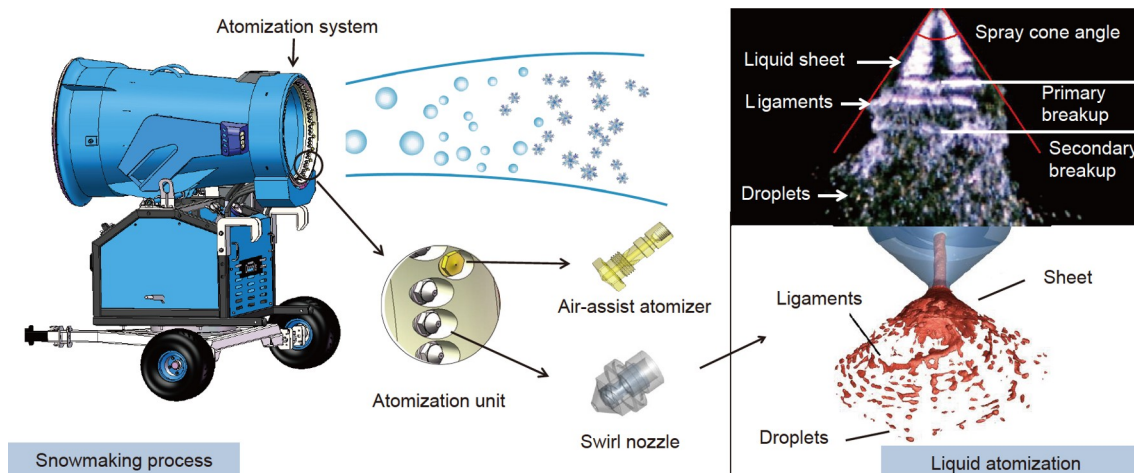


图1 (网络版彩色)内混型造雪机造雪过程^[8]

Figure 1 (Color online) Snowmaking process of the internal mixing snow maker^[8]

被风机鼓吹至空中发生碰撞,液滴接触过冷晶核后会迅速冻结,形成人造雪。核子器内部空气剪切作用能够有效提升雾化效果,使内混型造雪机的成雪效果远高于其他机型,是造雪机成雪的关键。然而,目前的内混型造雪机在改善核子器、喷嘴雾化效果,提高造雪机成核率,增大成雪量等方面都存在巨大的进步空间。西安交通大学联合上海理工大学和中国科学院理化技术研究所^[5]开展了造雪过程多相态变化机理与高效造雪协同优化技术研究,从成雪机理、造雪原理与设备等方面细致分析成雪条件和高效造雪调控策略,为改善人工造雪技术提供参考。

近年来,人工造雪技术不断改进,造雪机的改进措施主要包括4个方面:添加活性剂、喷嘴/核子器优化、预冷装置调控和智能控制。

(1) 添加活性剂^[9,10]。在冷水中加入活性剂能够有效改变水的物性,降低水表面张力、减小水的黏度等,使水高效雾化,减小压降,进而能够提高造雪过程中的成核效率,减少泵水所需的动力以提高造雪效率,从而提高造雪机的性能。

(2) 喷嘴/核子器优化^[11-13]。喷嘴和核子器作为造雪机的核心部件,对其结构优化将直接改善雾化效果。如采用渐缩-渐扩型喷嘴,在渐扩段设置圆形限流器,冷水会在渐缩-渐扩连接处预雾化,使最终雾化更均匀;采用热自动调节喷嘴,喷嘴材料根据不同环境温度发生变形以改变雾化水滴大小,适应在不同温度范围内高效造雪;采用产生纵缝空心锥形喷雾

的喷嘴,能够有效扩大射雪范围。

(3) 预冷装置调控^[14]。造雪机的成雪与环境温湿度密切相关,湿球温度低于 -2°C 才能成雪。利用预冷装置,对空气进行冷却除湿,可实现较高气温或水温时稳定造雪,且能节约大量能量。

(4) 智能化控制^[15,16]。利用气象站的天气预报来指导造雪机造雪计划的控制方法,并实时监测每台造雪机的造雪速率和造雪量,预测造雪时间控制造雪机的启停。另外,将造雪系统与节能降碳、自动化控制等技术相结合,实现高效节能智能化造雪也将成为未来人工造雪技术的主要发展方向。

针对造雪机性能的提升,北京建筑大学^[8]开展了造雪机关键部件技术研发,创制高效雾化、均匀核化喷嘴、核子器等关键部件,并结合自动控制技术和5G云控系统,开发高效智能造雪装备。

我国冰雪产业起步较晚,但是近年来发展迅猛。截至2020年底,我国滑雪场数量已达715家^[17]。然而,我国滑雪场采用的造雪机多为进口机型,人工造雪技术与欧美国家相比,仍然存在造雪机理认识不清、技术装备落后、自主品牌竞争力差、产业普及率低等问题,在雾化结晶成雪机理研究、核心部件技术性能优化、系统全自动控制集成化、生产装配体系标准化等各方面都有着巨大的进步空间和发展潜力。未来随着国家的大力推动和我国科研人员的努力攻关,相信我国的人工造雪技术一定会取得质的飞跃,达到国际先进水平。

致谢 感谢国家重点研发计划(2020YFF0303901, 2020YFF0303902, 2020YFF0303903, 2020YFF0303904)资助。

推荐阅读文献

- Huang G, Su Z J, Guan L Y, et al. Observation and analysis of the aggregation growth among ice-snow crystals (in Chinese). J Appl Meteorol Sci,

- 2007, 18: 561–567 [黄庚, 苏正军, 关立友, 等. 冰雪晶碰并勾连增长的实验与观测分析. 应用气象学报, 2007, 18: 561–567]
- 2 Heighton V J. Every snowflake is different. Doctor Dissertation. Berkshire: University of Reading, 2008
- 3 Libbrecht K G. Morphogenesis on ice: The physics of snow crystals. Eng Sci, 2001, 1: 10–19
- 4 Liu G Q, Xiong T, Yan G, et al. Current technology situation and research progress of artificial snowmaking (in Chinese). J Refrig, 2021, 42: 1–16 [刘国强, 熊通, 晏刚, 等. 人工造雪技术现状与研究进展. 制冷学报, 2021, 42: 1–16]
- 5 Li J. The influence of meteorological conditions on artificial snow (in Chinese). Adv Meteorol Sci Technol, 2017, 7: 163–165 [李菁. 气象条件对人造雪活动的影响. 气象科技进展, 2017, 7: 163–165]
- 6 Spandre P, Morin S, Lafaysse M, et al. Integration of snow management processes into a detailed snowpack model. Cold Reg Sci Technol, 2016, 125: 48–64
- 7 Chen A Q, Liu B, Li B, et al. Analysis of evaporative cooling process of water droplet for artificial snowmaking (in Chinese). Chin J Refrig, 2020, 40: 13–17, 63 [陈爱强, 刘斌, 李斌, 等. 人工造雪水滴蒸发冷却过程分析. 制冷技术, 2020, 40: 13–17, 63]
- 8 Zhang B W, Wang R X, Wu H F, et al. Atomization characteristics of twin nozzles for outdoor snow-makers application. Int J Refrig, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.03.025>
- 9 Costa D C, Kostka S. Snowmaking process. US Patent, US7562831B2, 2009-07-21
- 10 Philips R D, Baus T A. Efficient snowmaking with polymer drag reduction. US Patent, US6797191B2, 2004-09-28
- 11 White J A. Snowmaking device. US Patent, US3923247, 1975-12-02
- 12 Taylor P. Self-regulating snowmaking nozzle, system and method. US Patent, US5890652A, 1999-04-06
- 13 Fredrik H. A nozzle for a snowmaking apparatus, a snow lance head and a method for producing a slitted hollow cone spray. EP Patent, EP3614077A1, 2020-02-26
- 14 Akiyama T. Snowmaking accelerating apparatus and method of snowmaking acceleration. WO Patent, WO2008075689A1, 2007-12-18
- 15 Rieder W. Method and system for managing the production of an artificial snowmaking plant. WO Patent, WO2020079546A1, 2020-04-23
- 16 Rieder W. Control system for an artificial snow making plant. EP Patent, EP2713119B1, 2015-09-16
- 17 Wu B. 2020 China Ski Industry White Book (in Chinese). 2021-07-03, <https://www.vanat.ch/2020%20China%20Ski%20Industry%20White%20Book-Chinese.pdf> [武斌. 2020中国滑雪产业白皮书. 2021-07-03, <https://www.vanat.ch/2020%20China%20Ski%20Industry%20White%20Book-Chinese.pdf>]