

DOI: 10.7652/xjtub201905015

采用液氮喷雾技术的低温环路结构模拟系统研究

张蓓乐¹, 陈小砖¹, 薛绒², 刘秀芳²

(1. 河南理工大学机械与动力工程学院, 454000, 河南焦作; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为进行座舱盖高空低温环境飞行疲劳试验考核,设计并搭建了采用液氮喷雾技术的小型环路结构低温环境模拟测试试验台,开展了风速以及喷射流量对系统降温速率影响的特性研究。试验测试了在液氮喷雾流量为 37.2、42.4 和 49.3 kg/h,系统风速为 2.21、4.53 和 6.77 m/s 时,工作段温度从 21℃ 降至 -30℃ 时各测试面的降温特性,验证了运用液氮喷雾技术快速降温的可行性。结果表明:在相同喷雾流量下,风速越大,环路的降温速率越慢,测试面的温度均匀性越好;在相同风速下,喷雾流量越大,降温速率越快,测试面的温度均匀性越差。液氮喷雾降温能够满足座舱盖疲劳测试的低温环境要求,工作段温度场均匀性良好。本文研究可为低温环境模拟系统和大空间液氮喷雾冷却系统的设计提供参考。

关键词: 低温环境模拟;液氮喷雾;低温风洞

中图分类号: TB69 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)05-0109-06

Study on the Low-Temperature Air Loop Simulation System Based on Liquid Nitrogen Spray Technology

ZHANG Beile¹, CHEN Xiaozhuan¹, XUE Rong², LIU Xiufang²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To examine the canopy fatigue during low-temperature flights, a small air loop canopy fatigue test-rig using liquid nitrogen spray cooling technology was designed and developed to investigate the effects of air speed and spray flow rate on the cooling rate of the system. In the experiment, as the liquid nitrogen spray flow rates were 37.2, 42.4 and 49.3 kg/h and the air speeds were 2.21, 4.53 and 6.77 m/s, the cooling performance of each test section was tested when the system temperature decreased from 21℃ to -30℃. The results show that the high flow rate enables the cooling rate to slow down and enhances the temperature uniformity under the same injection pressure and mass flow rate. As the flow rate is constant, with the cooling rate increasing, the temperature non-uniformity of each test face is obvious when the mass flow rate increases. The liquid nitrogen system can provide a low-temperature environment and a uniformed temperature field for simulation of canopy fatigue test. The present work could be a guidance for the design of low-temperature environment simulation and large-space liquid nitrogen cooling systems.

Keywords: low-temperature environment simulation; liquid nitrogen spray; cryogenic wind tunnel

收稿日期: 2018-11-02。 作者简介: 张蓓乐(1993—),男,硕士生;刘秀芳(通信作者),女,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51406160);中国博士后科学基金资助项目(2014M560773)。

网络出版时间: 2019-02-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190221.0900.009.html>

座舱盖作为战斗机外部唯一的透明部件,是战机的关键部件,它的可靠性决定着飞行员的生命安全和战机的正常飞行,应具有较好的强度和疲劳性能。进行高空低温环境模拟试验是考核座舱盖性能的重要指标之一,因此建立专用的高低温环境模拟试验台,验证座舱盖强度及疲劳特性,是飞机设计定型过程中必不可少的环节。

低温环境模拟系统作为高低温环境模拟试验台重要的一部分,近年来受到了越来越多的重视。低温环境模拟系统的关键问题之一就是采用有效的低温制冷手段。美国、法国、俄罗斯等国对低温环境模拟试验室的研究较早;美国的试验设备最初采用干冰直喷法,后来随着科学技术的提高,改为更具制冷效果的液氮;法国的试验系统整体上与美国的类似,而俄罗斯则采用涡轮空气制冷直喷法^[1]。在国内,大型低温环境试验室大多采用蒸汽压缩式制冷和空气制冷这两种方式,但这两种制冷方式都存在制冷系数小、降温速率慢、能耗大的缺点^[2-6]。

对于大空间的快速降温,喷雾冷却是最为经济实用的途径。喷雾冷却是将液体工质加压后从喷嘴喷出,形成均匀的微细雾状液滴,通过液滴蒸发将环境中的热量带走^[7]。与其他制冷方式相比,喷雾冷却具有换热效率高、工质需求量少、温度均匀性好、无沸腾滞后性等一系列优点^[8]。目前,对于大空间喷雾冷却的研究主要集中在对水等常温工质的理论与试验研究。Montazeri 等通过数值模拟对水在大空间喷雾冷却系统中的降温特性进行了研究,发现欧拉-拉格朗日法可以较准确地预测水喷雾系统的蒸发过程^[9-10]。Sadafi 等研究了盐水在喷雾冷却塔中的降温效果,发现盐水喷雾冷却系统的降温效果相较于纯水喷雾冷却系统有明显优势,但存在腐蚀现象^[11-12]。Alkhedhair 等对自然通风的干燥管道在水喷雾条件下的降温特性进行了数值模拟和试验

研究^[13]。屠欣丞等针对大空间内细水雾喷射对局域环境的调节进行了数值模拟和试验研究^[14]。此外,以水为工质的大空间喷雾冷却技术应用广泛,如隧道^[15-16]、矿井^[17]、温室^[18]、大型室内场馆^[19]等的喷雾降温。虽然以液氮为工质的喷雾冷却技术近年来在低温风洞中的应用被广泛关注^[20-24],但对于液氮喷雾冷却的研究及大空间喷雾降温的低温试验相对较少。

本文根据座舱盖高空低温环境模拟试验的要求,设计了采用液氮喷雾冷却技术的小型环路结构低温环境模拟系统低温风洞,用于验证液氮喷雾冷却方案的可行性,研究系统低温运行过程中关键截面的温度分布和降温特性。

1 试验系统介绍

该低温环境模拟系统主要由低温环路系统、液氮喷雾系统和测试系统组成,试验台设计流程图和实物图如图1和图2所示。低温环路系统由风机、可视化窗口、喷雾降温段、工作段及连接件组成;液氮喷雾系统由高压氮气瓶、液氮杜瓦、过冷器、喷嘴以及相关连接管路组成;测试系统包括了流速测量系统、压力测量系统、电磁比例阀压力控制系统、温度采集系统以及电加热和功率测量系统。

环路结构试验台以 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 的喷雾降温段和工作段为主要结构,两者由弯管及管路连接。为尽可能减少漏热,在环路管路外加装保温棉绝热处理,将管壁导热减小到最低程度;为防止试验中管路内气体泄漏,维持环路内正压,用热熔胶对管路连接处做密封处理。

1.1 系统工作原理

系统采用喷入低温液氮的方式,利用液氮较大的汽化潜热和大温差下的显热达到快速降温的要求,工作过程如下。

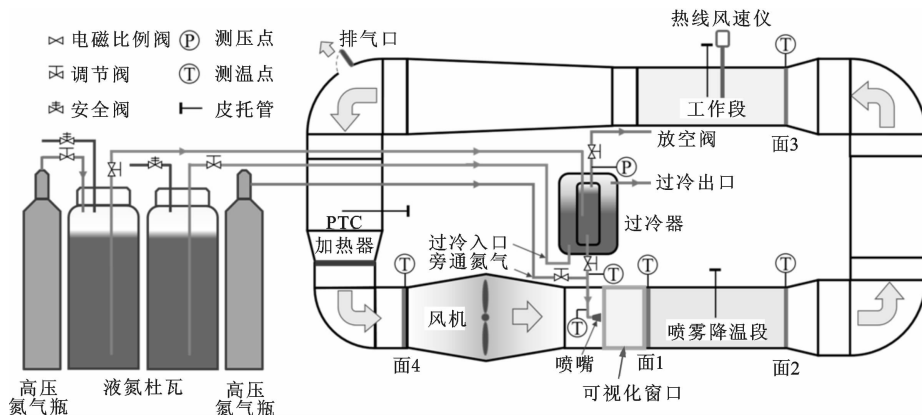


图1 试验台设计流程图

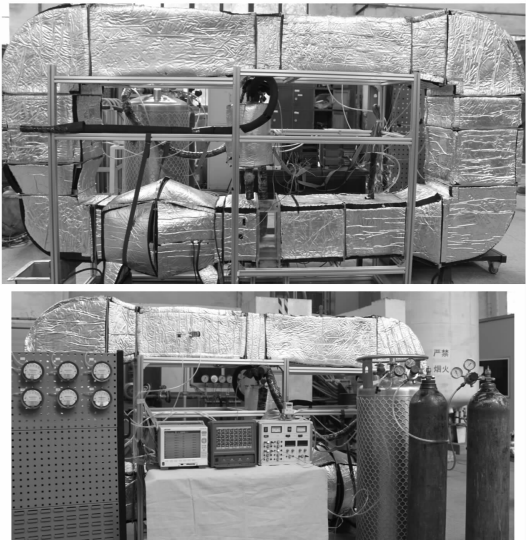


图 2 试验台实物图

(1)打开喷嘴处的旁通氮气阀和环路系统排气口,以较小频率开启风机,通过流道内低速循环风将系统内空气从排气口排出,防止空气中水蒸气在喷雾过程中结霜堵塞喷嘴。约 10 min 左右可认为氮气充满整个环路系统,关闭旁通氮气,闭合排气口。

(2)为避免流过喷嘴的液氮变为气液两相,将套管式过冷器外储液罐充入液氮进行预冷。

(3)调节电磁比例阀设定高压液氮的测试工况压力,高压两相液氮在高压氮气的压力下被送入过冷器中,流经内储液罐和铜盘管,与过冷器外储液罐常压液氮进行换热,被冷却为过冷高压液氮。

(4)将风机调节到测试风速,形成流道内循环风,将喷雾液滴吹入环路中。通过位于喷嘴和喷雾降温段之间的可视化窗口观察喷雾雾场,当看到连续稳定的雾场即可开始记录试验。

(5)喷雾液滴吹入喷雾降温段充分蒸发,流经右侧弯管均匀混合进入工作段,氮气将从左上角弯管处的排气口溢出,维持系统恒定正压力,其余气体流经加热板返回风机入口完成环路循环。

(6)在工作段通过热线风速仪实时观察温度及风速的变化情况,当采集的温度达到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,结束一组工况的试验记录并封闭排气孔。

(7)当热线风速仪采集的温度高于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,开始新一轮的试验测试。

1.2 喷嘴的选型

喷嘴采用 BETE 公司的细密雾化喷嘴 P32,喷嘴直径为 0.813 mm ,其雾场比较稀薄,液滴比较分散。为控制喷嘴流量大小,用称量法对喷嘴在不同压差下的流量进行测量,试验结果如图 3 所示。喷

嘴流量为单位时间内液氮杜瓦质量差的平均值,其数据如表 1 所示。

表 1 不同压差下的喷嘴流量

压差/MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
喷嘴流量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	21.0	31.7	37.2	42.4	49.3

1.3 绝热结构设计

为降低整个液氮喷雾降温系统的漏热量,减少液氮损耗量,保障系统内温度的均匀性,需对低温环路系统进行绝热设计。堆积绝热不需要工作在真空环境,适用于复杂绝热空间,因此选择该绝热方式。

堆积绝热绝热层的厚度对系统的漏热量及温升有很大影响,通过仿真模拟对比工作段在绝热层厚度分别为 0、10、20、30、40 和 50 mm 时的漏热量和温升情况,结果如图 4 所示,本试验选择厚度为 30 mm 的绝热材料对整个环路进行包裹。

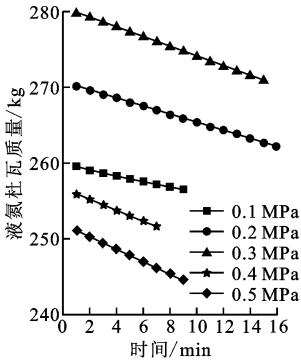


图 3 不同压差下液氮杜瓦质量下降曲线

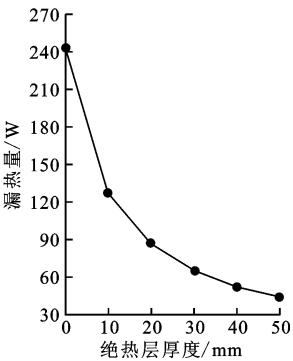


图 4 不同厚度绝热层壁面漏热量

1.4 其他主要部件

(1)循环风机采用定制的变频罗茨风机,通过改变风机电机的频率从而改变风机的转速;

(2)可视化窗口由有机玻璃构成,用于观察喷嘴的位置及喷雾状态;

(3)试验采用套管式换热器作为过冷器;

(4)在 4 个形状大小完全相同的截面(喷雾降温段入口截面 1、出口截面 2、工作段入口截面 3 和风机入口截面 4)均匀布置 9 对热电偶,如图 5 所示;

(5)工作段中心位置采用 testo405-V1 热线风速仪测量风速和温度,在喷雾降温段、工作段和风机入口采用皮托管和压差计测量环路中的流速。

2 实际运行结果分析

2.1 喷雾雾场

采用高速相机对各种工况的喷雾雾场进行拍

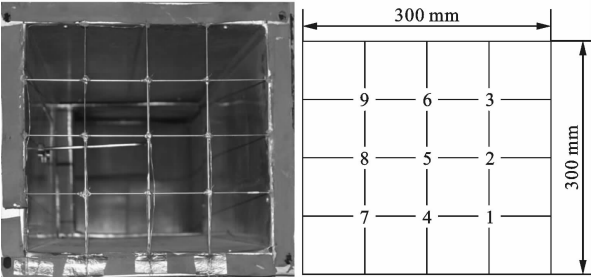


图 5 各测试面热电偶分布

照,获得喷雾雾场形态分布图,如图 6 所示。P32 的雾场前半部分是液氮喷射所形成的规则圆锥形,后半部分是气化形成的氮气,氮气受环境气流的影响导致雾场形状不规则。雾场中液滴直径较小,意味着液滴在向下游运动的较短距离内可以完全蒸发。

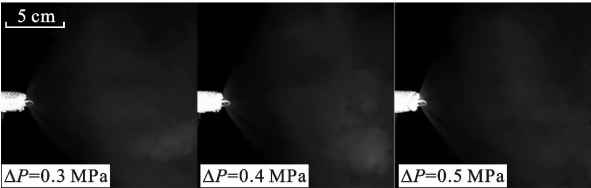


图 6 喷嘴 P32 在不同压差下的雾场

2.2 喷雾降温特性

在进行液氮喷雾环境降温试验时,系统内的最低目标温度为降至 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如表 2 所示,当风机频率在 $10\sim 30\text{ Hz}$ 变化时,分别测试液氮喷嘴压差为 $0.3\sim 0.5\text{ MPa}$ 时风洞环路的降温情况。选取其中 3 组试验数据($20\text{ Hz}/0.4\text{ MPa}$ 、 $30\text{ Hz}/0.3\text{ MPa}$ 和 $30\text{ Hz}/0.4\text{ MPa}$)分析喷雾流量和风速对降温特性的影响。图 7 和图 8 为两个主要测试面喷雾降温段入口测试面 1 和工作段入口测试面 3 的降温特性曲线。通过对比分析发现,各测试面的降温曲线具有类似规律,整个降温过程可分为 3 个阶段:阶段 I,初始平稳段,为环路系统温度稳定在环境温度的状态;阶段 II,中间波动段,为开始喷雾初期雾场未稳定的状态;阶段 III,稳定降温段,为喷雾雾场达到稳定时持续降温的状态。

表 2 试验测试工况

风机频率/Hz	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	压差/MPa
10	2.21	0.3,0.4,0.5
20	4.53	0.3,0.4,0.5
30	6.77	0.3,0.4,0.5

由图 7 可知,在降温过程中,中心测点 5 的降温速率最快,温度也最低,其次是左下方的测点 4、7 和 8,温度相对较高的是上方和右侧的测点 1、2、3、6 和

9。造成这种温度分布的原因是喷嘴正对着面 1 中心,液氮喷雾雾场中心的液氮最不易气化,未气化的液滴随气流撞击测点 5 导致其温度很低。雾场和未气化的液滴在重力作用下向下偏移,导致位于面 1 下方的测点温度也较低,而上方的测点温度较高。为了达到较好的雾化效果,喷嘴 P32 的出口装有撞针,撞针位于相对于面 1 的右侧,造成面 1 右侧的温度小于左侧对应位置的温度。面 3 中测点 1~9 降温曲线高度重合,如图 8 所示,说明在气流经过弯管充分混合后,测试面温度均匀。

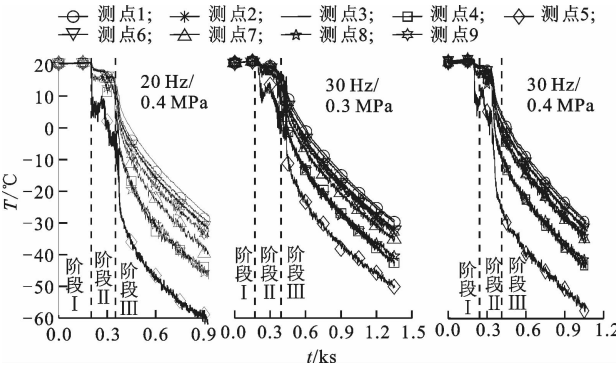


图 7 喷雾降温段入口截面降温特性曲线

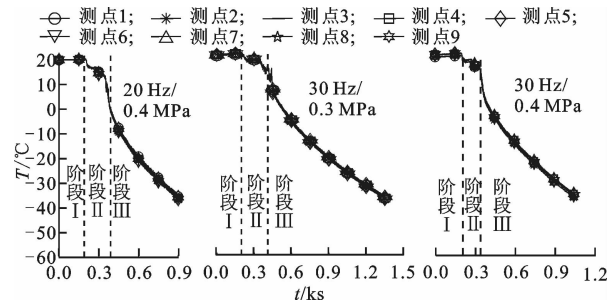


图 8 工作段入口截面降温特性曲线

图 9 和图 10 为测试面的平均温度和标准误差 σ 。由于面 1 靠近喷嘴,其平均温度也较低。标准误差用于反映各个面上温度分布的均匀程度,与平均温度分布相反,距离喷嘴越近标准误差越大,即测试面温度均匀性越差。选取风机频率为 20 Hz 、喷雾压差为 0.4 MPa ,分析系统在阶段 III 即稳定降温段 4 个测试面的温度均匀性,标准误差值从高到低分别是面 1、2、4 和 3。该工况下喷雾流量较大,最靠近喷嘴的面 1 由于雾场气液分布不均导致各测试点间温差较大,即标准误差最大;随着小液滴的完全蒸发以及冷热气流在喷雾降温段和在弯管处充分混合,工作段入口的面 3 各测点间温度达到较高的均匀性,且在整个稳定降温过程中均匀性保持稳定。面 4 受排气口的影响,不均匀性有所增加。

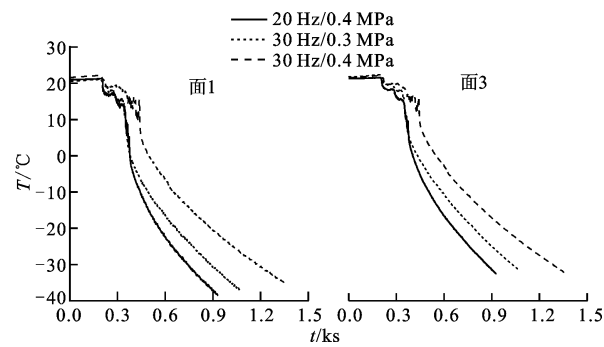


图 9 测试面平均温度

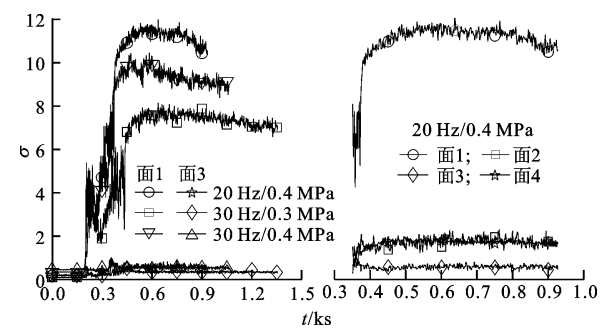


图 10 测试面的温度均匀性

2.3 喷雾流量和风速影响

从过冷液氮通入喷嘴开始,工作段温度从室温 21℃降至-30℃,平均降温速率如表 3 所示。

表 3 平均降温速率

工况	耗时/min	平均降温速率/℃·min ⁻¹
30 Hz/0.3 MPa	19	2.66
30 Hz/0.4 MPa	14	3.60
20 Hz/0.4 MPa	12	4.37

对比相同风速下的两组工况可知,随着喷雾流量的增大,阶段 II 即喷雾初期雾场未稳定状态的持续时间缩短,稳定喷雾时降温速率加快,导致降温时间缩短。由于受降温速率加快的影响,使得各测试点间的温度差异增大,测试面的温度均匀性也较差。

在相同的喷雾流量下,风速增大,降温速率减缓,测试面的标准误差减小,即同一测试面各测点间温差变小,具有更好的温度均匀性。这是因为风速越大,风机的功率越高,电机发热量增大导致系统的热负荷增加,减小了降温速率和测点间温差。

3 结束语

本文设计的采用液氮喷雾技术的小型环路结构低温环境模拟系统,控温范围为-30~20℃。在相同喷雾流量下,风速越大,环路降温速率越慢,测试面的温度均匀性越好;在相同风速下,喷雾流量越

大,降温速率越快,测试面的温度均匀性越差。试验验证了运用液氮喷雾技术快速降温的可行性,工作段温度分布均匀,满足座舱盖疲劳测试对环境降温速率和温度均匀性的要求,为进一步研究低温环路结构环境模拟系统中液氮喷雾的降温特性以及大空间液氮相变喷雾雾场特性奠定了基础,同时可为低温环境模拟系统和大空间喷雾降温系统的建设提供参考。

参考文献:

[1] 刘珊. 座舱盖高低温疲劳试验台换热数值模拟及热经济分析 [D]. 西安: 西北工业大学, 2001: 2-3.

[2] 马广顺, 马振库, 赵云峰. 大型低温环境试验室制冷系统设计 [J]. 装备环境工程, 2013(2): 96-98.

MA Guangshun, MA Zhenku, ZHAO Yunfeng. Design of refrigeration system for large environmental test chamber [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013(2): 96-98.

[3] 王珊珊, 黄永华, 张良俊, 等. 氦气氦高低温环境模拟系统及初调实验 [J]. 低温工程, 2012(5): 28-33.

WANG Shanshan, HUANG Yonghua, ZHANG Liangjun, et al. Design and preliminary experimental study on a high and low temperature system with helium gas in chamber [J]. Cryogenics, 2012(5): 28-33.

[4] 李兆坚. 某大型低温环境室制冷系统设计 [J]. 暖通空调, 2009, 39(2): 119-121.

LI Zhaojian. Refrigeration system design of a large-scale low temperature climatic chamber [J]. Journal of HV & AC, 2009, 39(2): 119-121.

[5] 李峰, 张开平. 基于 PLC 的低温环境试验室控制系统 [J]. 自动化仪表, 2006, 27(9): 54-56.

LI Feng, ZHANG Kaiping. PLC based control system for cryogenic environmental test [J]. Process Automation Instrumentation, 2006, 27(9): 54-56.

[6] 赵雁纪. 空气制冷与蒸气压缩制冷在气候环境模拟试验中应用的经济性分析 [J]. 低温工程, 2000(3): 42-47.

ZHAO Yanji. Economic benefits of the air cycle refrigeration and the vapor compression refrigeration in the climatic environmental simulation test [J]. Cryogenics, 2000(3): 42-47.

[7] 黄龙, 蒋彦龙, 王瑜, 等. 以乙醇溶液为冷却工质的开式喷雾冷却系统实验研究 [J]. 低温工程, 2017(3): 28-33.

HUANG Long, JIANG Yanlong, WANG Yu, et al. Experiment study on spray cooling of an open system with ethanol as coolant [J]. Cryogenics, 2017(3): 28-

- 33.
- [8] ASHWOOD A C. Fluid property effects on spray cooling: an experimental and numerical study [D]. Madison, Wisconsin, USA: University of Wisconsin-Madison, 2006: 5-9.
- [9] MONTAZERI H, BLOCKEN B, HENSEN J L M. CFD analysis of the impact of physical parameters on evaporative cooling by a mist spray system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 608-622.
- [10] MONTAZERI H, BLOCKEN B, HENSEN J L M. Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis [J]. *Building & Environment*, 2015, 83: 129-141.
- [11] SADAFIMH, JAHN I, HOOMAN K. Cooling performance of solid containing water for spray assisted dry cooling towers [J]. *Energy Conversion & Management*, 2015, 91: 158-167.
- [12] SADAFI M H, GONZÁLEZ R S, VETRANOM R, et al. An investigation on spray cooling using saline water with experimental verification [J]. *Energy Conversion & Management*, 2016, 108: 336-347.
- [13] ALKHEDHAIR A, GURGENCI H, JAHN I, et al. Numerical simulation of water spray for pre-cooling of inlet air in natural draft dry cooling towers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 61(2): 416-424.
- [14] 屠欣丞. 细水雾大空间局域环境调节的研究 [D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2009: 24-64.
- [15] BARROW H, POPEC W. Droplet evaporation with reference to the effectiveness of water-mist cooling [J]. *Applied Energy*, 2007, 84(4): 404-412.
- [16] 王小芝. 崇明隧道运营累积温升及喷雾降温可行性研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007: 36-71.
- [17] YANG X J, HAN Q Y, PANG J W, et al. Progress of heat-hazard treatment in deep mines [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2011, 21(2): 295-299.
- [18] KATSOULAS N, BAILLE A, KITTAS C. Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2001, 106(3): 233-247.
- [19] HUANG C, YE D, ZHAO H, et al. The research and application of spray cooling technology in Shanghai Expo [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(17/18): 3726-3735.
- [20] 赖欢, 陈振华, 高荣, 等. 大型高速低温风洞冷量回收的方法研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(6): 136-142.
- LAI Huan, CHEN Zhenhua, GAO Rong, et al. Cold energy recycle from cryogenic wind tunnel exhaust system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(6): 136-142.
- [21] 阮一逍, 薛绒, 赖欢, 等. 单液氮液滴在气流中的蒸发运动特性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(6): 147-152.
- RUAN Yixiao, XUE Rong, LAI Huan, et al. Evaporation and movement characteristics of single liquid nitrogen droplet in high-speed gas flow [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(6): 147-152.
- [22] RUAN Y, CHEN L, LIU X, et al. Numerical study of evaporation and motion characteristics of liquid nitrogen droplet in high-speed gas flow [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 278(1): 012130.
- [23] FEY U, EGAMI Y, IJIMA Y, et al. Transition detection by temperature sensitive paint at cryogenic temperatures in the European Transonic Wind Tunnel (ETW) [C]// *International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 77-88.
- [24] 廖达雄, 刘晓波. 低温风洞新形式——换热引射式低温风洞 [J]. *实验流体力学*, 2009(3): 108-112.
- LIAO Daxiong, LIU Xiaobo. A new type of cryogenic tunnel-injection cryogenic tunnel with heat exchanger [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009(3): 108-112.

(编辑 荆树蓉 赵炜)