

液氮抽真空制冷的理论及试验

陈振华, 张伟, 高荣, 陈万华, 赖欢, 宋远佳
(中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 在考虑液氮总质量变化、储罐罐体热容的前提下, 基于化学势温差、传热系数和传质系数等参数, 详细建立了液氮降压制备过冷液氮的数学模型。理论计算的液氮温度及质量变化和制取过冷液氮试验值吻合较好, 结果表明: 该数学模型能准确描述液氮相变过程, 且获得了液氮抽真空制冷中相变传热的化学势温差为 1.21 K、传热系数为 2942.37 W/(m² · K) 及传质系数为 0.0044 m/s。
关 键 词: 抽真空制冷; 过冷液氮; 化学势温差; 传热系数; 传质系数
中图分类号: V23; O51 **文献标志码:** A

Theoretical and experimental studies of vacuum cooling
of liquid nitrogen

CHEN Zhenhua, ZHANG Wei, GAO Rong, CHEN Wanhua,
LAI Huan, SONG Yuanjia

(Facility Design and Instrumentation Institute,
China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: Considering the total mass change of liquid nitrogen and heat capacity of tank, the mathematical model of vacuum cooling of liquid nitrogen based on the physico-chemical depression, heat transfer coefficient and mass transfer coefficient approach was built. The theoretical results were in satisfactory agreement with the experimental data of making subcooled liquid nitrogen, which indicated the mathematical model could well predict the phase change of liquid nitrogen. The physico-chemical depression of 1.21 K, heat transfer coefficient of 2942.37 W/(m² · K) and mass transfer coefficient of 0.0044 m/s respectively were also obtained.

Key words: vacuum cooling; subcooled liquid nitrogen; physico-chemical depression; heat transfer coefficient; mass transfer coefficient

风洞试验要遵循一系列相似准则, 其中雷诺数是最主要的相似参数之一。雷诺数表征气体惯性力与黏性力之比, 是流动分型与演化的关键参数。为了模拟飞行雷诺数, 国外采用液氮降低风洞内气流温度的方法来提高试验雷诺数^[1-2], 包括

现在世界上仅有的两座生产型高雷诺数风洞——美国国家跨声速风洞(NTF)和欧洲跨声速风洞(ETW)均为低温风洞, 它们在研发大型客机、大尺寸航空航天飞行器等高雷诺数飞行设备过程中发挥了举足轻重的作用, 有效提升了大型客机、运

收稿日期:2019-03-22
基金项目:国家自然科学基金青年基金(51806234)
作者简介:陈振华(1966—),男,研究员,硕士,主要从事风洞结构设计。
引用格式:陈振华,张伟,高荣,等. 液氮抽真空制冷的理论及试验[J]. 航空动力学报,2019,34(9):1971-1976. CHEN Zhenhua, ZHANG Wei, GAO Rong, et al. Theoretical and experimental studies of vacuum cooling of liquid nitrogen[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9):1971-1976.

输机、远程作战飞机的精细化设计水平,同时改进并有效保障其安全性、经济性和舒适性^[3-5]。喷入风洞的液氮气化后需排出风洞以维持洞体内压力平衡。由于低温风洞试验运行具有间歇性,并非连续 24 h 运转,运行工况宽,相应地造成排出氮气不连续,变化范围大^[6-8]。以 ETW 为例,排气质量流量范围为 0.6~250 kg/s,温度范围为 110~280 K,总压范围为 115~450 kPa(A,绝对压力)。单次试验时风洞排放低温氮气约 2 700 t(总温为 110~280 K)^[7],这些氮气仍然具有巨大的冷能。如果用于制冰,则可以获得 250~280 t。但低温风洞运行工况范围宽的特点导致氮气回收系统入口参数工况不稳定,给系统设计带来极大挑战。常规的蓄冷介质回收冷量方案和压缩液化方案或不能实现氮气及冷量的同时回收,或难以与低温风洞匹配运行。

目前针对低温风洞排放氮气的回收研究较少,较多的则是液化天然气(LNG)冷量再利用。Bai 等、Bian 等、仇阳等^[9-11]通过多级循环组合实现常规冷量和 LNG 冷量的综合利用,提高系统整体效率。这些能量回收或梯级循环是充分利用 LNG 在由液态自发转发为气态过程中的气化潜热,而低温风洞的氮气及冷量回收过程则相反,需对低温氮气进一步提供冷量将其液化回收。赖欢等^[12]从原理的角度介绍了常规冷量的回收利用方式,常规蓄冷介质回收方式能量利用阶差大,品质低,并且不能实现氮气循环,而空分液化装置循环则难以适应风洞排气工况的不稳定性。高荣等^[13]简要提出了蓄冷氮浆回收氮气可行性。另一方面,深入研究抽真空制冷过程中的传热传质有助于减少实际抽取量,提升试验效率,提高氮气回收系统经济性。Sun 等^[14]分析了多孔食材在抽真空制冷时传热分析时,由于降温温差和比热容小,且食材不存在相变,抽取的水分质量有限,常忽略其质量变化。谢福寿等^[15]采用集总参数法开展了基于真空泵抽气速率的降温理论分析,但鲜见开展气液相变微观分析和试验研究。

针对蓄冷氮浆回收低温氮气方案中的制备过冷液氮环节,开展了进一步的理论和试验研究,建立了基于平均温度下的传质系数 k_c ,化学势温差 ΔT ,传热系数 K 等的液氮抽真空制冷数学模型,详细分析了生成氮浆前期形成过冷液氮中的传热传质,理论计算结果与开展的验证试验数据吻合较好,能够准确描述物理过程。

1 理论分析

氮浆蓄冷回收氮气方案核心是利用氮的三相变化,如图 1 所示。氮气在作为风洞流场介质的同时,又是热量传递的载体。风洞试验前预先制备低温氮浆(温度为 63 K,12 kPa(A)下固氮和液氮混合物),在风洞运行时将排出的氮气(温度为 110~300 K,115~450 kPa(A))直接送入氮浆中冷却液化,实现了氮气和冷量的同时回收。其中氮浆制备是根据抽真空制冷原理,即采用真空泵降低储罐压力促使液氮气化吸热,从而降低余下液氮温度,当温度到达三相点时液氮固化从而获得氮浆^[16]。与此同时,真空泵抽取的氮气将送入类似于空分流程的压缩膨胀液化系统再次成为液氮,最后输送返回至液氮储罐,从而实现风洞排出的低温氮气的冷量和物质同时回收。

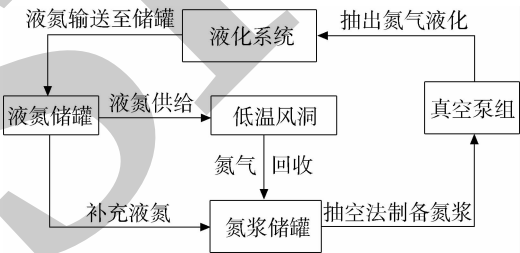


图 1 蓄冷氮浆回收氮气方案原理
Fig. 1 Schematic of reclaiming system using cooling energy-stored slush nitrogen

本文首先针对第一个环节——降压制备过冷液氮开展研究,基于如下假设建立了如图 2 所示的数学模型。

1) 暂不考虑该真空储罐漏热。事实上,储罐中液氮热容大(试验中存储液氮质量为 1 655.1 kg),占主导作用,而真空夹层带来的漏热较小,在后续计算中也会有更进一步的对比分析。

2) 降压降温过程中,液氮相变传热传质主要发生在气液界面的微层内,其余液氮在储罐内搅拌器作用下温度均匀。

相变传热及传质占主导作用的微层内气液界面的传热量 q_z 主要包括气液间的导热及对流换热量,可以通过下式描述^[17]:

$$q_z = -\lambda \frac{dT_f}{dz} + m(h - h_s) \tag{1}$$

式中 T_f 为微层下表面液氮温度; λ 为液氮的导热系数; m 为气液相间的质量传递速率; h 、 h_s 分别是液体内部和气液界面上的比焐。焐值可进一步

氮浆储罐为真空夹层绝热低温储罐,内罐有效容积为 2.3 m^3 ,上下法兰均采用金属包覆垫密封,罐体上分 3 层设置 6 个压力容器视镜,便于观察罐内氮固化过程,罐体总质量为 $2\,846.4\text{ kg}$,其中内罐质量为 $1\,110.1\text{ kg}$,外罐为 $1\,736.3\text{ kg}$ 。由于缺乏直接抽取低温氮气的真空泵,本试验抽真空系统由两台常温真空泵和气化器组成。氮浆储罐抽出的氮气先进入气化器 A 复温,然后再进入真空泵组。

氮浆制备阶段首先向氮浆储罐加注液氮并静置 1 h ,此后利用真空泵对其抽真空,使压力降低到 10.1 kPa(A) ,制备氮浆。试验过程中采用温度、压力传感器实时测量储罐中液氮的温度及压力变化,采用流量计测量进入氮浆储罐的氮气瞬时流量,采用质量传感器分别测量氮浆储罐以及液氮罐的质量变化。

3 结果分析

本文主要分析试验中制备过冷液氮的过程,储罐的温度、压力及质量如图 4 所示。储罐加注液氮后先静置 1 h 促进内部温度均匀,此时储罐质量和压力没有明显变化,表明了储罐绝热的可靠性。开启真空泵时,储罐总质量为 $4\,501.5\text{ kg}$ (含液氮质量为 $1\,655.1\text{ kg}$),压力约为 112 kPa(A) ,温度为 77.1 K 。此后真空泵连续工作 5.25 h ,抽取氮气共 272 kg ,液氮温度由 77.45 K 降低到 63.1 K ,罐顶压力稳定维持在 10.1 kPa(A) ,透过观察窗可明显观察到固态氮浮于液氮表面。

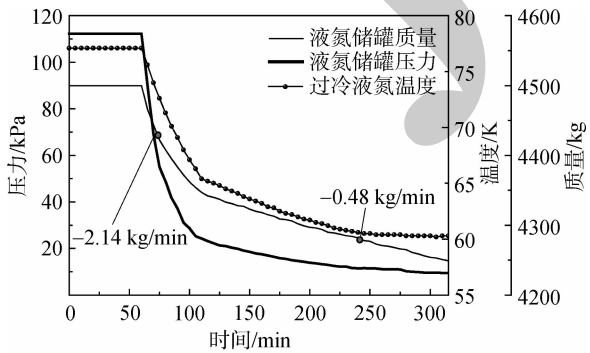


图 4 制备过冷液氮过程储罐参数变化
Fig. 4 Temperature and pressure dependence on time in the process of formation of slush nitrogen

基于理论模型的传热学分析,并以图 4 中的第 60 min ,也即是真空泵开启时刻,各传感器测量值作为模型求解初值条件:液氮质量为 $1\,655.1\text{ kg}$,压力为 112 kPa(A) ,液氮温度为 77.1 K ,液氮

储罐液位处截面直径为 0.7 m 。以试验过程中测量的储罐顶部氮气压力作为方程求解边界条件,基于 MATLAB 自编程序及优化算法^[18]求解微分方程组,从而获得储罐中液氮温度和质量随时间变化,用于工程中系统状态监测。计算结果如图 5 和图 6 所示,温度和质量计算结果与试验值的相对误差均在 10% 以内,总体吻合较好,能有效反映试验过程中的参数变化。

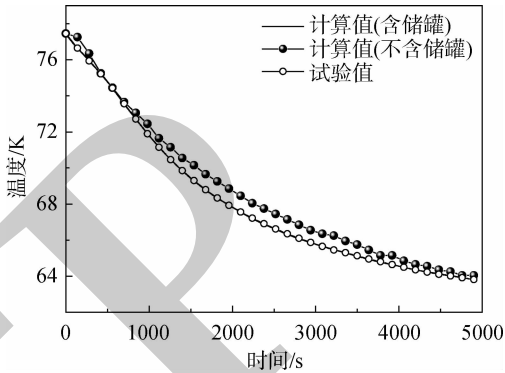


图 5 理论计算温度与试验温度对比
Fig. 5 Comparison between the theoretical calculated temperature and experimental value

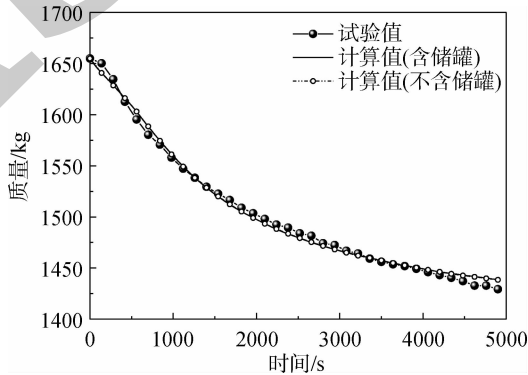


图 6 理论计算质量与试验值对比
Fig. 6 Comparison between the theoretical calculated mass and experimental value

同时求解得到降温过程中的平均参数,其中传质系数为 $k_c=0.0044\text{ m/s}$,气液相界面传热系数为 $K=2\,942.37\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$,化学势温差为 $\Delta T=1.21\text{ K}$ 。

3.1 储罐热容影响

在模型中考虑了储罐自身热容,也即是抽真空制冷降低液氮温度的同时,储罐内罐的温度也跟随降低。在图 5 和图 6 中,考虑储罐热容和不考虑储罐热容的计算结果基本重合。储罐自身质量为 $2\,846.4\text{ kg}$,该温度区间不锈钢平均比热容为

0.316 J/(kg · K), 即罐体热容为 0.899 kJ/K。液氮质量为 1 655.1 kg, 该温度区间平均比热容为 2.13 kJ/(kg · K), 热容为 3 525.36 kJ/K, 可见储罐热容占比为 0.026%, 因此方程求解结果重合。基于此可知液氮热容占绝对主导地位, 相对地真空储罐的漏热也可忽略不计。

3.2 化学势温差影响

在降压降温过程中, 储罐中的液氮并非处于饱和或相平衡状态, 液氮温度并不等于储罐中氮气压力对应的饱和温度, 而是存在化学势温差。若假定液氮基于饱和状态, 也即是不考虑传热过程中的化学势温差($\Delta T=0$ K), 则得到如图 7 和图 8 所示计算结果。在不考虑化学势温差时, 计算温度总是明显高于试验温度, 存在着较大的误差, 并且计算获得的最低温度为 65.02 K, 而考虑化学势温差的计算结果为 63.81 K, 与试验值(64.05 K)更加接近。同时不同的化学势温差对试验过程中液氮质量描述也不一, 如图 8 所示。

当假定化学势温差为 0 时, 计算的液氮质量 M_t 高于试验值, 最大偏差为 27.2 kg, 而在考虑化学势温差后, 计算所得的质量变化和试验曲线基本重合, 最大偏差为 10.1 kg, 结果更加准确。

3.3 传质系数影响

模型中传质系数决定了在压差的驱动作用下, 气液间相变速率的快慢, 尤其是液氮表面沸腾时液氮的气化速率。在上述模型求解获得了传质系数为 0.004 4 m/s。在程序求解时可通过将传质系数设置为 0.000 44 m/s 或 0.044 m/s, 从而计算得到在沸腾传质弱化或者强化下系统参数变化, 如图 9 和图 10 所示。当 $k_c=0.044$ m/s 时, 在初始阶段液氮气化速率较正常工况明显加快, 液氮质量下降更加陡峭, 相应地液氮温度也降低的更快。当 $t=4\,000$ s 时, 由于液氮状态逐渐靠近三相点, 储罐中压力降低趋势减弱, 压降速率由初始阶段的 -83.2 Pa/s 逐渐降低到 -2.01 Pa/s, 因此温度下降趋势减小, 靠近真实参数下的计算结果,

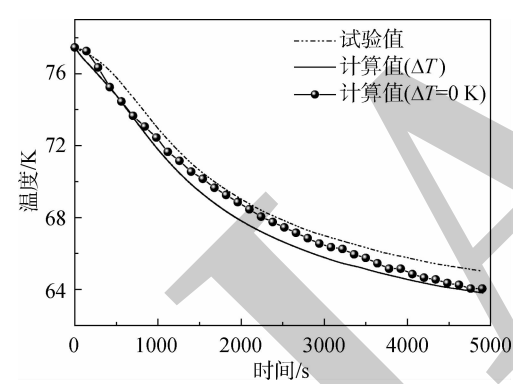


图 7 化学势温差对温度计算结果影响
Fig. 7 Effect of physico-chemical depression on the results of theoretical calculated temperature

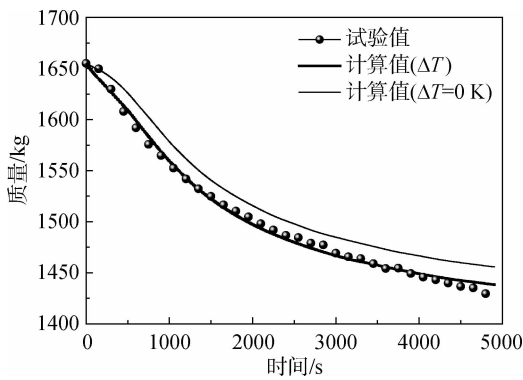


图 8 化学势温差对质量计算结果影响
Fig. 8 Effect of physico-chemical depression on the results of theoretical calculated mass

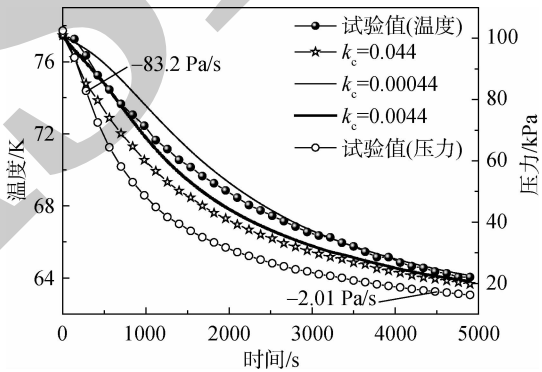


图 9 不同传质系数下液氮温度变化
Fig. 9 Temperature liquid nitrogen dependence on different mass transfer coefficients

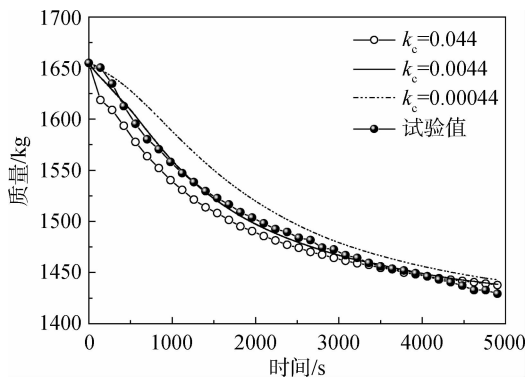


图 10 不同传质系数下液氮质量变化
Fig. 10 Mass of liquid nitrogen dependence on different mass transfer coefficients

相对误差减小。当 $k_c = 0.00044 \text{ m/s}$ 时,结果具有类似规律。

4 结 论

针对蓄冷氮浆回收低温风洞排气方案,通过理论建模和试验进一步开展了抽真空制备过冷液氮过程中的传热传质研究,得到如下结论:

1) 在考虑液氮总质量变化、储罐热容的前提下,基于化学势温差、传热系数、传质系数和真实物性等参数详细建立了液氮抽真空制冷的数学模型,计算结果与试验数据吻合较好,并获得了液氮抽真空制冷相变传热的平均参数,其中化学势温差为 1.21 K 、传热系数为 $2942.37 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、传质系数为 0.0044 m/s ,表明了理论模型的准确性,有助于后续开展的储罐内过冷液氮或氮浆的状态变化监测。

2) 液氮抽真空制冷化学势温差是相变过程不可忽略的影响因素,在不考虑化学势温差时,计算温度明显高于试验温度,液氮质量误差也相对较大。

3) 在抽真空初始阶段,传质系数偏高或偏低时都会导致计算结果大幅偏离试验值,而当液氮接近三相点时,传质系数影响减弱,相对误差减小。

参考文献:

- [1] ZHANG Z, NIU L. Current status and key technologies of cryogenic wind tunnel[J]. Cryogenics, 2015, 204(2): 57-62.
- [2] 廖达雄,黄知龙,陈振华,等. 大型低温高雷诺数风洞及其关键技术综述[J]. 实验流体力学, 2014, 28(2): 1-6.
- LIAO Daxiong, HUANG Zhilong, CHEN Zhenhua, et al. Review on large-scale cryogenic wind tunnel and key technologies[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(2): 1-6. (in Chinese)
- [3] MATTHIAS S, QUEST J. New techniques for operation in cryogenic windtunnels[R]. AIAA-2007-0749, 2007.
- [4] QUEST J. High quality test performance in cryogenic environment[R]. AIAA-2000-2206, 2000.
- [5] BOUIS X, PRIEUR J, TIZARD J A. ETW aerodynamic design; a case study[R]. Moscow, Russia; Symposium on Aerodynamics of Wind Tunnel Circuits and Their Components, 1996.
- [6] WAHLS P A. Cryogenic balance technology at the national transonic facility[R]. AIAA-2001-0754, 2001.
- [7] VENKI S, OWEN W, BISSETT R, et al. Reactivation of the NTF 3000 ton liquid nitrogen tank from ambient condition[R]. AIAA-2015-3009, 2015.
- [8] 周廷波,高超,张正科,等. NF-6 风洞喷液氮降温系统研制[J]. 航空动力学报, 2018, 33(2): 327-337.

- ZHOU Tingbo, GAO Chao, ZHANG Zhengke, et al. Development of liquid nitrogen injection cooling system of NF-6 wind tunnel[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(2): 327-337. (in Chinese)
- [9] BAI F F, ZHANG Z X. Integration of low-level waste heat recovery and liquefied nature gas cold energy utilization[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2008, 16(1): 95-99.
- [10] BIAN H J, XU W D, LI X X, et al. A novel process for natural gas liquids recovery from oil field associated gas with liquefied natural gas cryogenic energy utilization[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2011, 19(3): 452-461.
- [11] 仇阳,潘振,李萍,等. 一种发电和天然气再液化相结合的 LNG 冷能利用系统[J]. 化工学报, 2017, 68(9): 3580-3591.
- QIU Yang, PAN Zhen, LI Ping, et al. An LNG cold energy utilization system combined with power generation and natural gas re-liquefaction[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2017, 68(9): 3580-3591. (in Chinese)
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] 高荣,张伟,陈万华,等. 蓄冷氮浆回收低温风洞排气原理及实验研究[J]. 低温工程, 2016(3): 23-29.
- GAO Rong, ZHANG Wei, CHEN Wanhua, et al. Theoretical and experimental studies of nitrogen recycling by slush nitrogen[J]. Cryogenics, 2016(3): 23-29. (in Chinese)
- [14] SUN D W, HU Z H. CFD simulation of coupled heat and mass transfer through porous foods during vacuum cooling process[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(1): 19-27.
- [15] 谢福寿,厉彦忠,王磊,等. 低温推进剂过冷技术研究[J]. 航空动力学报, 2017, 32(3): 762-768.
- XIE Fushou, LI Yanzhong, WANG Lei, et al. Study on subcooled technology for cryogenic propellants[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3): 762-768. (in Chinese)
- [16] 江芋叶,张鹏,王如竹. 浆氮制备及其管内流动特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(8): 1403-1406.
- JIANG Yuye, ZHANG Peng, WANG Ruzhu. Experimental study of production and flow characteristics of slush nitrogen[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(8): 1403-1406. (in Chinese)
- [17] DOSTAL M, PETERA K. Vacuum cooling of liquids: mathematical model[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(4): 533-539.
- [18] KARL M, SUN D W. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(2): 55-65.