

文章编号: 1006-2467(2011)09-1400-06

无排放加注影响因素的试验研究

王彩莉, 邓冬, 李阳, 汪荣顺
(上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200240)

摘要: 通过搭建低温液体无排放加注试验台, 定量控制进液温度、进液流量、初始壁面温度、加注结构和加注高度 5 个影响因素, 并分析了其对加注特性参数(压力、最终充满率和加注时间)的影响规律. 结果表明: 进液温度、初始壁面温度对接收容器内压力产生正面影响; 进液流量影响加注时间, 而加注高度和加注结构对无排放加注产生综合影响.

关键词: 无排放加注; 进液温度; 流量; 初始壁面温度; 加注口高度; 加注结构

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Experimental Study on Influencing Factors and Their Effects on No-Vent Fills

WANG Cai-li, DENG Dong, LI Yang, WANG Rong-shun
(Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A test rig of no-vent fills for cryogen was set up to study the feasibility and influencing factors of no-vent fills. Five main parameters, including incoming liquid temperature, inflow rate, initial wall temperature, outlet height and filling configurations are changed to find out their effects on the performance of no-vent fills. It is experimentally shown that the pressure in the receiver tanks will increase if either the incoming liquid temperature or the initial wall temperature increases. Inflow rate impacts mostly on the filling time. The filling outlets' height and configuration make combined influence on the performance of novent fills.

Key words: no-vent fills; incoming liquid temperature; inflow rate; initial wall temperature; outlet height; filling configuration

我国开展低温技术研究已有 50 余年的历史, 从 20 世纪 50~60 年代的空分、小型氢和氦的液化、绝热技术的研究, 已逐渐发展成为大型工业应用、储运行业的发展、与生物医药和超导等学科的交叉发展以及空间技术的拓展^[1]. 随着低温产品需求的日益增加, 低温液体贮运产业呈现出一派欣欣向荣之势,

而与贮运密不可分的低温液体加注环节也受到关注. 低温液体在常温常压下易汽化, 使得有效加注的液体量锐减; 另外, 由于低温液体中的危险品液氢(LH₂)和液化天然气(LNG)等易燃烧, 禁止在大气中排放, 且低温液体中的有价介质如液氦(LHe)获取不易, 在转移的过程中需小心处理, 因而采用无排

收稿日期: 2010-04-29

作者简介: 王彩莉(1981-), 女, 上海市人, 博士生, 研究方向为低温液体储运和低温液体加注特性等.

汪荣顺(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-34206055; E-mail: rs.wang@sjtu.edu.cn.

放加注替代传统的排放加注模式已成为发展趋势。

国外对无排放加注技术的研究可追溯到20世纪60年代,以美国国家航空航天局(NASA)为代表,陆续开展了一系列性能测试和理论研究^[2-4],但国内开展无排放加注的研究起步较晚。杜玉清^[5]在LNG汽车燃料储罐加注技术的研究中发现,采用无排放加注具有较好的优越性;另外,围绕无排放加注过程中的压力特性^[6]和加注结构的影响^[7]也陆续开展了研究。

由于增大供液容器与接收容器间的压差可以保证流体的稳定加注,故在规定供液压力的前提下,控制接收容器内的压力和升压速度,对成功实现无排放加注十分重要。另外,确保最终充满率达到指定值和尽可能缩短加注时间也是衡量无排放加注质量的重要指标。因此,接收容器内压力、最终充满率和加注时间成为衡量无排放加注性能的主要特性参数。研究表明^[8],进液温度、进液流量和接收容器内壁面

温度对接收容器内压力的影响显著。鉴于此,本文针对上述主要影响因素对接收容器内压力的影响规律进行试验研究,并分析了加注结构、加注口高度对3个主要特性参数的影响,以期降低无排放加注技术的操作难度和改进无排放加注方法提供依据。

1 无排放加注试验台及流程

无排放加注试验台主要包括供液储罐、低温泵和180 L低温绝热接收容器,如图1所示。其中:供液储罐容积为5 m³,并附带自增压供液装置;低温泵选用卧式单级离心泵,额定流量为12 m³/h,扬程80 m,功率11 kW;低温绝热接收试验所用气瓶容积为180 L,采用高真空多层绝热方式(见图2);输液管路采用泡沫堆积绝热。试验采用的低温流体介质为液氮(LN₂)。LN₂从供液储罐底部用液阀流出,经过低温泵后被迅速增压而成为过冷液体,并流经输送管路及加注接头而进入低温绝热接收容器。

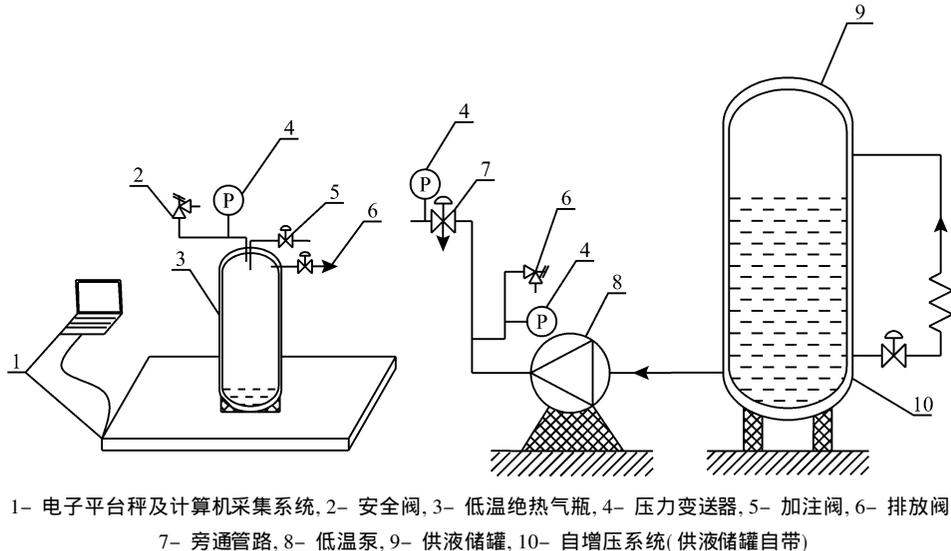


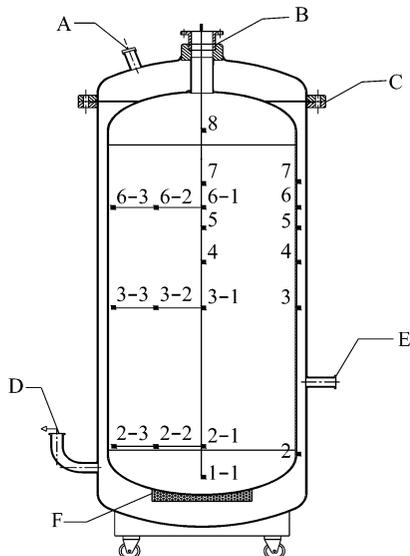
图1 无排放加注试验台结构示意图

Fig.1 Schematic of the no-vent filling test rig

在测试中,采用Micro Sensor公司制造的MPM 4730型传感器(精度±100 Pa)分别测量供液压力和接收容器内压力。采用T型热电偶分别测量加注口进液温度、容器外壁温度以及内部介质温度,热电偶分布位置见图2,共使用了21个热电偶。其中:14个用于测量内部介质温度,从下而上分为8层分布,在第2、3、6层从轴线至壁面径向等距离各布置了3个热电偶以测量轴向温度分布,其余各层只有1个位于轴线上的热电偶;将6个热电偶自下而上分布在接收容器内筒体的外壁面,用于测量容器外壁面温度,测点的高度分别与内部温度测点的高度相对应,1个热电偶布置于加注口内,用于测量进

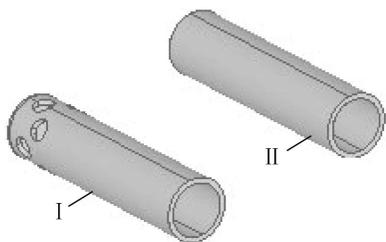
口液体温度。试验时,将接收容器置于SCS-600型电子平台秤(由METTLER TOLEDO公司制造,精度±0.1 kg)上,通过称重法累积记录被加注流体的质量,结合进液温度的测量而得到实际进液密度,由此计算出进液流量。通过测量内部介质的温度,可得容器内的实时液体密度,从而计算实际的充满率。

试验采用图3所示的2种不同加注结构。其中,结构I为侧向开孔喷淋结构,结构II为直管向下加注结构。结构I的侧向开孔直径为4 mm,并分列2层,每层包含4个等间距孔,2层开孔交错45°。加注管内径均为10 mm,加注出口总截面积基本一致。除了进行不同加注结构的比对外,本文还将加注口



A- 航空接头, B- 可更换式加注法兰, C- 外筒体法兰,
D- 抽空口, E- 真空规借口, F- 吸附剂
图 2 接收容器结构及热电偶分布示意图

Fig. 2 Distribution of the thermocouples and the structure of the receiver cylinder



I - 侧向喷淋结构, II - 直管向下加注结构
图 3 加注结构示意图

Fig. 3 Schematic drawing of the filling configurations

分别置于 2.7%、50.0% 和 92.0% 的充满率高度上而进行加注试验。

试验前, 首先对接收容器及输液管路预冷, 以防止大量液体汽化. 无排放加注过程为预冷接收容器、预冷低温泵、预冷加注管路、无排放加注, 具体操作过程详见文献[9]中.

2 影响无排放加注的主要因素分析

利用 180 L 低温绝热接收容器共完成无排放加注试验 26 组. 通过改变进液温度、供液压力、初始壁面温度、加注口高度和加注结构, 分别研究各因素对接收容器内压力的影响规律.

2.1 进液温度

图 4 所示为在 3 种进液温度 T_{in} 下接收容器内压力的变化情况. 图中, 选取 3 组初始壁面温度和供液压力近似但进液温度不同的工况进行对比, 所用平均初始壁面温度 $T_w \approx 115.5 \text{ K}$, 供液压力 $p_s =$

0.8 MPa. 可以看出, 随着进液温度升高, 接收容器内压力增大, 且升压趋势更加明显. 进液温度越低, 则在相同饱和压力下进入的液体所吸收的热量越多, 从而有效抑制了过量“余热”引发的汽化和压力升高. 由图 4 还可以看出, 由于加注初期的初始壁面温度较高而接收容器内的饱和压力又偏低, 进入的液体与“热”壁面接触的瞬间生成了大量气体, 使得接收容器内压力急剧上升, 但只要进液温度较低, 液体就处于过冷态, 过冷的液体和上升的液体表面分别与气相空间的气体发生换热传质而形成冷凝, 使得接收容器内压力逐渐降低(见图 4 中曲线 1); 反之, 若进液温度偏高, 则由于接收容器内压力在加注开始后的较长一段时间(175 s)内始终低于进液温度所对应的饱和压力(0.61 MPa), 使得进入的液体会发生闪蒸而接收容器内压力持续升高(见图 4 中曲线 3).

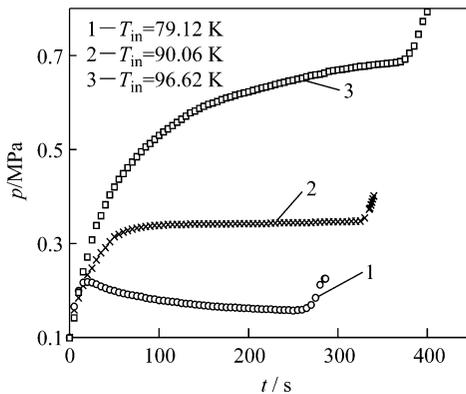


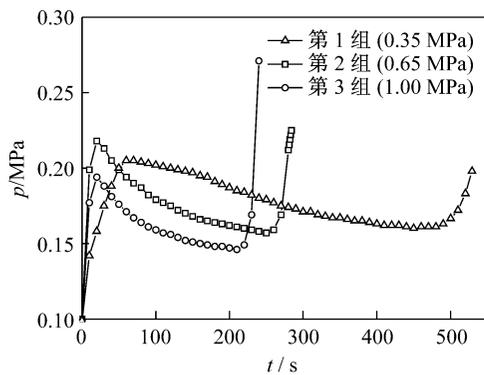
图 4 进液温度对接收容器内压力的影响

Fig. 4 Effects of the incoming liquid temperature on the pressure in the receiver tank

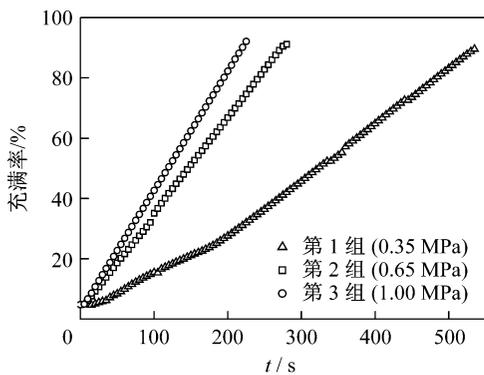
2.2 进液流量

常见的流体流量控制方法主要有 2 种, 即定流量控制法和定供液压力控制法. 定流量控制法通过在输液管路上安装流量计, 根据流量计反馈的流量值与设定值之间的差值而对流量进行实时调整, 使得实际流量尽可能稳定在设定值允许的范围内, 通常用于对流量需要严格限制的场合; 定供液压力控制法是指设定供液容器的供液压力不变, 利用供液容器与接收容器间的压差来实现流量控制. 若接收容器内压力保持不变, 则供液压差维持恒定, 因流量是压差的函数, 故流量恒定, 等同于定流量控制法; 若接收容器内压力不是恒定, 则流量随压差的变化而变化且正比于压差的平方根. 在工业和生活中, 由于定供液压力控制法的装置简单、操作便捷, 故本文选用定供液压力的流量控制方法来分析进液流量对加注特性的影响.

选取 3 组初始壁面温度和进液温度均近似但供液压力不同的试验工况进行对比. 在 $T_w \approx 115.5 \text{ K}$, $T_{in} \approx 79.12 \text{ K}$, $p_s = 0.35, 0.65, 1.00 \text{ MPa}$ 条件下, 所得结果如图 5 所示. 图中, 第 1 组的平均供液压差为 0.16 MPa , 第 2 和 3 组为 $0.47, 0.84 \text{ MPa}$. 由此可见, 第 3 组的进液流量最大, 其次为第 2 组, 第 1 组的进液流量最小. 由图 5 可以看出, 进液流量对接收容器内压力的影响不明显, 3 组试验的压力值基本处于 $0.15 \sim 0.22 \text{ MPa}$ 以内, 且由于进液温度较低, 对应的饱和压力较低. 在 3 组试验中, 接收容器内压力均逐渐降低并趋于进液温度所对应的饱和压力, 直至加注口被上升的液面浸没、气/液交界面换热能力被削弱的同时气相空间被迅速压缩, 使得加注结束时的压力突升. 因此, 接收容器内压力发生第 2 次突升可视为无排放加注结束的重要信号, 其与加注初期压力突升的成因不同. 加注初期压力快速上升主要是由于进液液体与热壁面换热的缘故; 而加注结束时的压力快速上升则是由于气/液交界面换热能力被削弱和气相空间被迅速压缩共同作用的结果.



(a) 接收容器内压力



(b) 充满率

图 5 进液流量对无排放加注特性参数的影响

Fig. 5 Effects of the inflow rate on the main characteristic parameters of no-vent fills

进液流量对无排放加注的影响主要体现在加注

时间和最终充满率 2 个方面. 如图 5(b) 所示, 3 组试验的最终充满率随着进液流量的增加而增大, 但其增幅不大, 这主要是由于加注口高度受限; 而加注时间对进液流量的影响却十分明显, 进液流量越大, 则加注时间越短. 例如, 第 3 组的进液流量最大, 其加注时间仅为 228 s ; 而第 1 组进液流量最小, 在其他加注工况相同的前提下, 其加注时间可达 529 s . 可见, 进液流量决定了加注时间的长短. 通过有效抑制接收容器内压力的上升趋势, 适当增大供液压差而维持进液流量, 从而达到缩短加注时间的目的.

2.3 初始壁面温度

壁面温度越高, 则整个系统的储能越高, 被加注的介质稳定贮存所需的热交换量越大. 选取 3 组供液压力和进液温度都近似但初始壁面温度不同的工况进行对比. 在 $p_s = 1.00 \text{ MPa}$, $T_{in} \approx 79.12 \text{ K}$ 条件下, 对 3 组工况的初始壁面温度进行加权平均后, 所得 $T_w = 169.8, 119.3, 106.9 \text{ K}$. 图 6 示出了高、中和低 3 种 T_w 下接收容器内压力的变化情况. 可见, 随着初始壁面温度的升高, 接收容器内的压力增大. 虽然 3 组试验的接收容器内压力均有所降低, 但由于初始壁面温度较高时, 液体与热壁面换热量较大, 甚至沸腾并生成气体而导致压力居高不下. 如果初始壁面温度过高, 则可能导致加注初期压力上升过快, 进液流量骤减, 最终超出允许的最大加注压力或接收容器的安全压力而无法实现加注. 因此, 有效降低初始壁面温度, 对实现无排放加注十分重要. 这也是在无排放加注前对供液管路、低温泵和接收容器进行预冷的目的所在. 只有减少带入容器内的多余热量, 才能够使得无排放加注顺利进行.

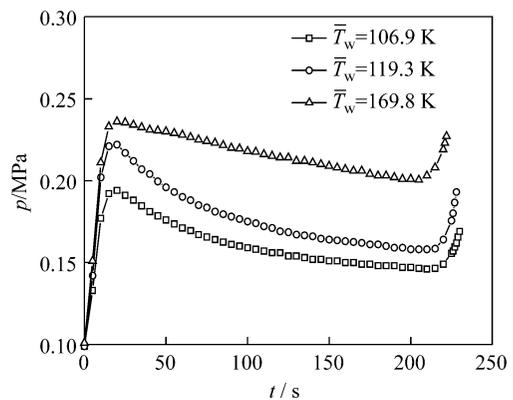


图 6 初始壁面温度对接收容器内压力的影响
Fig. 6 Effects of the initial wall temperature on the pressure in the receiver tank

2.4 加注高度

加注高度是指加注结构所处液位高度或所对应的充满率高度, 即液体进入接收容器的位置高度. 假

设最恶劣的加注工况为加注口浸没在液体中;在重力的作用下,气体与液体相互分离并始终处于液体之上,因而加注高度的变化将对无排放加注产生影响.加注高度直接决定了加注口被液体浸没的时机,这对解决无排放加注时的防超量(防止液体过量加注)有很大的帮助.

图7给出了加注高度对接收容器内压力及充满率的影响.其中,3组对比试验均采用直管向下加注结构, $p_s = 0.60 \text{ MPa}$, $T_{in} \approx 80 \text{ K}$,但加注口高度不同(分别对应于充满率为92.0%、50.0%和2.7%).可见,当加注口被浸没后,由于进入的液体直接注入液相区而减少了与气相空间内气体接触的机会,使得气/液换热面积减少,从而造成冷凝效果变弱,压力明显上升.在加注口未浸没前,由于加注口高度最高(充满率为92%)的一组进入的液体通过气相空间后落入液相区,液滴在气相空间内的飞行时间和距离最长,故其换热最充分;而加注口高度最低(充满率为2.7%)的一组在进液初期就已处于浸没状态,故其换热最不充分,由于冷凝效果不佳,累积上升的液体持续吸收热壁面的热量,使得接收容器内压力不断上升;而加注口高度居中(充满率为50%)的一组试验数据显示,在其加注口被浸没前的压力

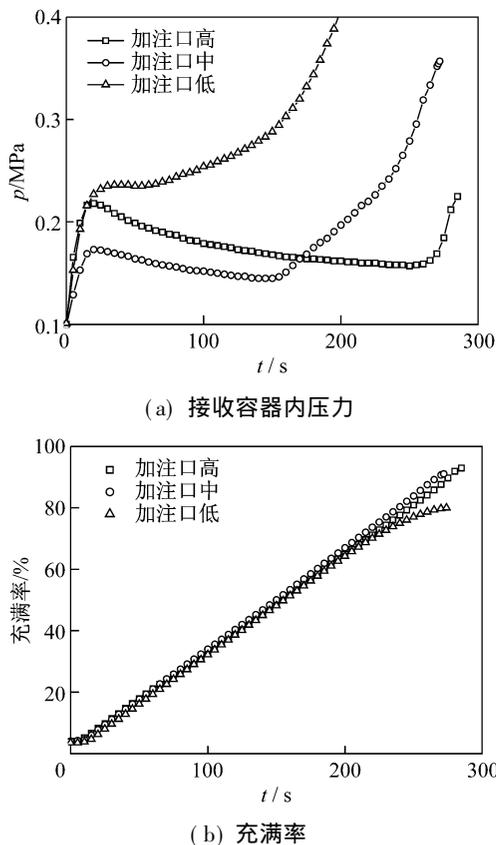


图7 加注高度对接收容器内压力和充满率的影响

Fig. 7 Effects of the outlet height on the pressure and filling by volume in the receiver tank

反而低于加注口高度对应充满率92.0%时的压力.这是由于虽然抬高进液口高度能够增强液体对气相区的冷凝效果,但在下落的同时出现大量的液体相互碰撞或径向飞行,直接与“热”壁面作用,并从“热”壁面吸收大量热量,抵消了部分冷凝效果,使得压力下降变缓.由图7(b)可以看出,随着进液高度增加,充满率增大,但考虑液体充装防超量的要求,不宜盲目抬高加注口高度.

2.5 加注结构

图8给出了侧向喷淋和直管向下加注结构在2种供液压力和进液温度均相近但初始壁面温度不同工况下的接收容器内压力.其中, $p_s = 1.00 \text{ MPa}$, $T_{in} \approx 80 \text{ K}$.可见,虽然两者的无排放加注压力曲线都经历了3个阶段,但采用侧向喷淋结构的接收容器在加注初期的压力明显高于采用直管向下加注结构,且随着初始壁面温度的升高,侧向喷淋结构在加注初期的压力上升明显.这是由于侧向喷淋的接收容器在加注时,大部分液体在进入接收容器后首先与“热”壁面接触,使得接收容器自身蓄热全部被进入的液体吸收并汽化,接收容器内压力骤然升高,随后,接收容器内形成的过冷环境促进了冷凝的形成和发展,使得接收容器内压力逐渐降低;而采用直管向下加注结构时,壁面的热量逐渐被累积的液相区吸收,因而压力上升不明显.为了避免压力上升过快,建议采用的接收容器应尽量避免与“热”壁面的过度接触.

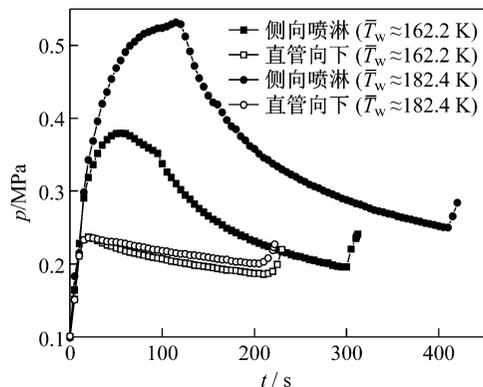


图8 加注结构对接收容器内压力的影响

Fig. 8 Effects of the filling configurations on the pressure in the receiver tank

3 结论

(1) 进液温度越高,接收容器内压力越高;进液流量影响加注时间和充满率.

(2) 初始壁面温度越高,则接收容器内压力越大.有必要对输液管路和接收容器进行预冷,以避免

因壁面温度过高引发进入的液体大量汽化而无法实现无排放加注。

(3) 在重力环境下,加注口高度越高,则越有利于实现无排放加注;但需考虑防超量要求时,应适当合理设计加注口高度,以防止过量加注。

(4) 设计无排放加注结构时,应考虑尽可能减少进入液体与“热”壁面的过度换热。建议采用顶部直管向下加注结构替代顶部侧向喷淋加注结构。

参考文献:

- [1] Li S M. A brief overview of cryogenics in China [J]. **Cryogenics**, 1995, 35(5): 317-319.
- [2] Fester D A, Page G R, Bingham P E. Liquid fluorine no-vent loading studies [J]. **Journal of Spacecraft and Rockets**, 1970, 7(2): 181-185.
- [3] Chato D J. Cryogenic transfer options for exploration missions[DB/OL]. NASA Technical Memorandum, 105197. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1992[2009-11-25]. <http://catalogue.nla.gov.au/Record/4050978>.
- [4] Taylor W J, Chato D J, Moran M M, *et al.* On-orbit cryogenic fluid transfer research at NASA Lewis research center[J]. **Cryogenics**, 1992, 32(2): 199-204.
- [5] 杜玉清. 液化天然气汽车燃料储存与加注技术研究

[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2004.

- [6] 王彩莉, 李祥东, 李阳, 等. 175 L 绝热气瓶单管加注实验研究[C]// 第八届全国低温工程大会论文集. 北京: 《低温工程》编辑部, 2007: 354-359.
- [7] 王彩莉, 汪荣顺, 李阳, 等. 4 种不同加注结构在无排放加注中的性能比较[J]. **低温工程**, 2008, 165(5): 35-39.
WANG Cai-li, WANG Rong-shun, LI Yang, *et al.* Comparison of the performance about 4 different filling configurations in no-vent fill processes [J]. **Cryogenics**, 2008, 165(5): 35-39.
- [8] Moran M E, Nyland T W, Driscoll S L. Hydrogen no-vent fill testing in a 1.2 cubic foot (34 liter) tank[DB/OL]. NASA Technical Memorandum, 105273. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1992 [2009-11-26]. <http://catalogue.nla.gov.au/Record/4043625>.
- [9] 王彩莉, 汪荣顺. 单管加注可控操作的关键问题与分析[J]. **低温与超导**, 2007, 35(5): 391-394.
WANG Cai-li, WANG Rong-shun. Analysis on key problems of control of the no-vent filling process [J]. **Cryogenics and Superconductivity**, 2007, 35(5): 391-394.

(上接第 1399 页)

- [5] Taylor A M K P, Whitelaw J H, Yianneskis M. Curved ducts with strong secondary motion: Velocity measurements of developing laminar and turbulent flow [J]. **Journal of Fluids Engineering**, 1982, 104(3): 350-360.
- [6] 尚虹, 王尚锦, 席光, 等. 90° 圆截面弯管内三维紊流场试验研究[J]. **航空动力学报**, 1994, 9(3): 263-266.
SHANG Hong, WANG Shang-jin, XI Guang, *et al.* Experimental study of 3-D turbulent flow field in a 90°

bend pipe[J]. **Journal of Aerospace Power**, 1994, 9(3): 263-266.

- [7] 万津津, 施臻臻, 刘应征, 等. 贴壁方柱湍流场高分辨率 PIV 试验研究[J]. **上海交通大学学报**, 2009, 43(2): 322-324.
WAN Jin-jin, SHI Zhen-zhen, LIU Ying-zheng, *et al.* High-resolution PIV measurement of the wake behind a square cylinder flush-mounted on the wall[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2009, 43(2): 322-324.