

## 液氧加注过程热力性能分析

高婉丽, 罗天培, 刘瑞敏, 孙 德  
(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

**摘 要:** 为满足某型号运载火箭动力系统试验液氧加注温度要求, 需对加注过程进行热力性能分析。通过对常规氧加注过程因漏热和流阻损失引起的温升、液氧泵效率损失引起的温升进行理论计算, 得出常规氧加注过程液氧温度变化规律。此外, 通过对过冷氧温度掺混特性进行理论计算和数值仿真, 得出过冷氧加注的热力性能。上述分析结果与实测数据进行了比对, 结果表明, 理论分析结果与实测结果吻合性好, 液氧加注过程热力特性分析方法正确可行。

**关键词:** 液氧加注系统; 温度调节; 数值模拟

**中图分类号:** V433-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2017) 03-0022-05

## Thermal performance analysis of liquid oxygen filling process

GAO Wanli, LUO Tianpei, LIU Ruimin, SUN De  
(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract:** In order to meet the requirement of liquid oxygen filling temperature in the test of a launch vehicle power system, the thermal performance in the filling process is analyzed. The temperature rise caused by heat leakage and flow resistance loss in normal liquid oxygen filling process, and the temperature rise caused by efficiency loss of liquid oxygen pump are calculated theoretically to get the temperature variation regularity in normal liquid oxygen filling process. The thermal performance of super cooling liquid oxygen filling process was obtained by theoretical calculation and numerical simulation of super cooling temperature mixing characteristics. The above analysis result and the detected result are contrasted. The results are coincided with experimental data. The results show that the thermal characteristic analysis method for liquid oxygen filling process is correct and feasible.

**Keywords:** liquid oxygen filling system; temperature adjustment; numerical simulation

收稿日期: 2015-11-11; 修回日期: 2016-07-21

作者简介: 高婉丽 (1982—), 女, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

## 0 引言

动力系统试验是考核全箭或火箭子级方案正确性、工作协调性和可靠性的重要手段。运载火箭动力系统试验的液氧加注过程与发射场加注过程类似, 包括常规氧加注和过冷氧补加 2 个主要阶段。加注过程对推进剂温度提出较强的约束性要求, 尤其要避免管内低温推进剂出现两相流动, 应保持一定的过冷度。为保证推进剂地面加注参数与火箭需求协调一致, 应分别开展箭上贮箱和地面系统的加注性能研究工作。文献 [1] 对低温推进剂加注过程, 火箭贮箱特性参数进行了建模计算。文献 [2] 和文献 [3] 对低温推进剂地面加注管路的设计方法和绝热性能进行过分析。文献 [4] 对变频泵在煤油加注系统中的应用进行过研究。文献 [5] 对液氧挤压加注过程进行过数值模拟。从文献调研的情况来看, 针对低温推进剂加注系统总体热力性能研究, 尤其是有实测值比对的研究文献还比较少。本文以某型号运载火箭动力系统试验台液氧加注系统为研究对象, 在常规氧加注热力性能分析过程, 选取典型泵压式加注工况, 考虑泵效率损失引起温升的基础上, 进行了沿管程热力和水力性能分析。在过冷氧加注的热力性能分析过程, 重点进行了过冷氧和常规氧掺混的温度在线调节方法研究。此外, 根据相平衡理论, 分析了贮罐初始压力对液氧加注温度的影响。上述理论分析所得到的计算结果, 均与实测数据进行了比对, 验证了研究方法的有效性。

## 1 常规氧加注过程热力性能分析

### 1.1 流速和管径的影响分析

温升不仅与管路绝热性能好坏有关, 而且与系统的流阻特性有关。当绝热层的热流密度一定时, 推进剂的温升主要与流速和管径有关。如何更合理地确定管径和流速, 一直是低温加注或输送系统设计中需要首先考虑的问题。

#### 1.1.1 管路温升计算公式

温升关系式推导过程如下<sup>[6]</sup>:

液氧稳态流动过程中, 管路任一截面建立能

量方程式:

$$dq = dh + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + dz \quad (1)$$

焓的一般关系式为:

$$dh = C_p dT - \left[ T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] dp \quad (2)$$

式 (2) 代入式 (1), 并且忽略动能和位能的变化:

$$dT = \frac{1}{C_p} dq + \frac{1}{C_p} \left[ T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] dp \quad (3)$$

焦耳-汤姆逊系数表达式:

$$\mu_J = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \frac{1}{C_p} \left[ T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] \quad (4)$$

式 (4) 代入式 (3), 并做积分得到:

$$\Delta T = \frac{Q}{m_L C_p} + \int_{p_0}^{p_c} \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h dp \quad (5)$$

式 (5) 等号右边第二项可以理解为因压降损失带来的温升:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \frac{Q}{m_L C_p} + \frac{\Delta p}{\rho_L C_p} \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 液氧温升由管路漏热引起的温升和流动阻力损失带来的温升两部分组成。前者随流速的增大而降低; 后者随流速的增大而升高; 总温升为两曲线的叠加, 呈现出随流速增加先变小后变大的变化规律。

#### 1.1.2 最优流速和管径

在设计过程中, 对 DN150, DN125 及 DN100 几种管材做了对比计算, 温升和流阻的计算结果如表 1 所示。

表 1 不同管径的温升和流阻计算结果

Tab. 1 Calculated results of temperature rise and flow resistance in tubes with different diameters

通径/mm	流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	温升/K
DN150	18~180	0.28~2.83	0.11~0.31
DN125	18~180	0.44~4.42	0.15~0.46
DN100	18~180	0.64~6.37	0.21~0.55

由图 2 和表 1 可知, 3 种管材在工作流速范围内, 温升均能满足加注的温度要求, 但是

DN100 的管路流阻过大，不宜采用。在保证液氧加注流量的前提下，应从经济性和操作性考虑，选择通径 125 mm 的管材作为长距离液氧输送管路。

1.2 泵效率损失的影响分析

主管道总冷量损失的另一方面是液氧泵水力损失引起的发热量，计算式<sup>[7]</sup>为：

$$N_s = \frac{(1-\eta)}{\eta} H \cdot q_v \cdot \rho \cdot g \tag{7}$$

$$\Delta T_3 = \frac{N_s}{q_m \cdot c_p} = \frac{(1-\eta)}{\eta \cdot c_p} H g \tag{8}$$

可见，由泵引起的温升与扬程成正比，与机组效率成反比。泵水力效率的温升计算结果如表 2 所示。

表 2 不同流量泵效率损失的温升数据  
Tab. 2 Results of temperature rise caused by pump efficiency loss at different flow rates

流量 (L·min <sup>-1</sup> )	扬程/m	效率/%	温升/K
500	54	27	0.84
1 000	94	46	0.64
1 500	88	53	0.45
2 000	106	60	0.41
3 000	140	74	0.28

由表 2 可知，液氧泵效率损失引起的温升在 1 K 以内；小流量工况，液氧泵的效率最低，由泵引起的温升最大，为 0.84 K。

1.3 常规氧加注温度变化规律

加注过程中，液氧温度和压力沿管道长度方向变化曲线如图 1 所示。

由图 1 可知，沿管道轴线方向，液氧压力下降，对应的饱和温度随之降低，如图 1 曲线 c 和曲线 a 所示；此外，因管道漏热和摩擦阻力损失，液氧温度逐渐升高，如图 1 曲线 b 所示。通过比较，可知液氧的温度始终低于对应加注压力下的饱和温度，并保持一定的过冷度，能够满足加注任务要求。不同加注流量工况，进箭温度以及过冷度计算数据如表 3 所示。

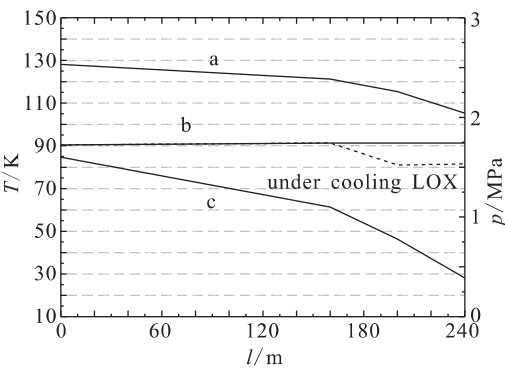


图 1 沿管道长度方向温度和压力变化曲线图  
Fig. 1 Temperature and pressure curves along tube

表 3 不同流量加注温度和过冷度理论计算数据

Tab. 3 Calculated results of filling temperature and super cooling temperature at different flow rates							
流量/(L·min <sup>-1</sup> )	漏热温升/K	流阻温升/K	泵损失温升/K	加注温度/K	加注压力/MPa	饱和温度/K	过冷度/K
500	0.28	0.17	0.84	91.29	0.10	97.24	5.95
1 000	0.21	0.23	0.64	91.08	0.22	102.77	11.69
1 500	0.16	0.29	0.45	90.90	0.32	106.35	15.45
2 000	0.12	0.35	0.41	90.88	0.56	112.86	21.98
3 000	0.05	0.46	0.28	90.79	0.68	115.49	24.70

表 3 的起始点温度按 0 MPa 初始压力对应的饱和温度 90 K 进行设定。实际加注过程, 随贮罐压力保压时间增加, 液氧有建立较高压力下新相平衡的趋势, 起始温度会有所提高。此处仅考察温升变化规律, 可以采用 90 K 作为理论工况进行分析。由表 3 可知:

- 1) 正常加注过程, 200 m 液氧管路加注过程因漏热、流阻和泵损失所带来的总温升约为 1 K;
- 2) 大流量加注的温升主要由流阻损失造成, 因此, 在管材选择时, 应充分考虑流阻是否满足要求;
- 3) 小流量加注过程泵损失温升占总温升比例最大, 因此, 小流量加注不宜采用泵压加注方式, 应采用挤压加注;
- 4) 由于大流量加注过程压力较高, 对应的饱和温度相应提高, 因此过冷度最大。

## 2 过冷氧加注热力性能分析

### 2.1 过冷氧掺混温度特性研究

通过冷却剂和液氧之间的热交换, 液氧在过冷器中被冷却到其压力所对应的饱和温度以下, 实现过冷的目的<sup>[8]</sup>。过冷氧加注温度需求为 ~78 K、80 ~82 K、~83 K 等多种温度值。对此, 建立了过冷器和多个阀门组成的在线连续调节系统。针对不同温度的常规氧与过冷氧掺混工况, 进行理论计算, 程序框图如图 2 所示, 计算结果如图 3 所示。掺混过冷氧温度取决于常规氧比例, 加注过程依据常规氧掺混比例计算结果, 来判断切换阀开度值。此外, 常规氧温度变化对掺混后总温产生影响, 要获得稳定的温度输出值, 应调整掺混比例。

### 2.2 过冷氧掺混流动仿真

为了验证理论计算的准确性, 同时考察常规氧和过冷氧掺混的均匀程度, 依据实际管道尺寸建立数值模型。2 个进口均选取质量流量入口, 出口为自由流出口, 其中常规氧温度 93 K, 过冷氧温度 78.2 K, 两者掺混比例为 1: 2.8。管壁简化为绝热无滑移边界条件。计算采用  $k-\varepsilon$  两方程模型来考虑管内流体的湍流效应, 压力和速度采用 simple 格式进行耦合, 并用二阶迎风格式进行

差分。在三通处, 过冷氧受常规氧带动, 全部向管路下游流动; 而常规氧流线受过冷氧流线压制, 流通面积减小, 流线集中在管路底部。随着流动的进行, 2 种液氧将不断掺混、换热。图 4 为管路对称面的温度分布云图。由图 4 可见, 在三通下游约 1 m 处, 两种流体已掺混均匀, 此时管路出口处流体温度为 81.2 K。

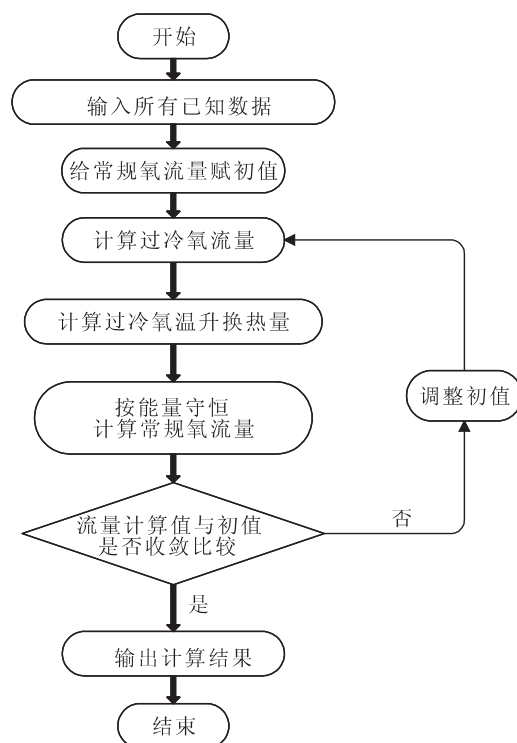


图 2 过冷氧掺混过程计算流程图

Fig. 2 Calculation flow chart of super cooling liquid oxygen mixing process

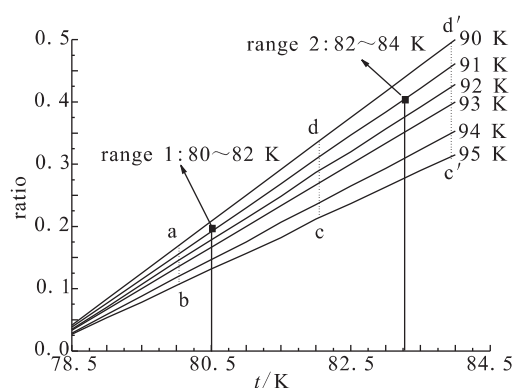


图 3 过冷氧温度曲线

Fig. 3 Temperature curves of super cooling liquid oxygen

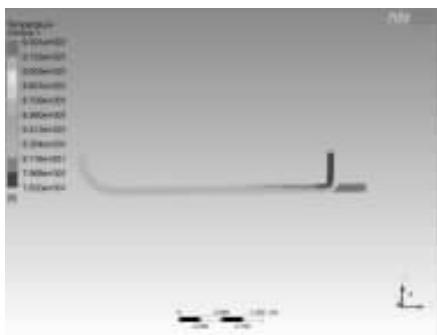


图 4 对称面温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in symmetry plane

3 贮罐初始压力影响

由于液氧加注过程要模拟发射场测发流程，停放时间较长造成常规氧加注温度升高现象。新的相平衡建立所带来的温升影响巨大，在研究工况范围，压力提高 0.1 MPa，饱和温度提高 2.3 K 以上<sup>[9]</sup>。加注前采取贮罐放空措施，可有效降低常规氧温度。根据实测数据，贮罐初始压力 0.08~0.20 MPa，常规氧加注温度较高，为 95.5~99.4 K。通过采取加注前提前放气措施，降低贮罐初始压力，液氧趋于低压饱和状态，液氧初始温度接近低压饱和温度，在加压加注过程，液氧加注温度低至 91.2 K。

4 实际工况验证

4.1 常规氧加注热力性能验证

以某型号运载火箭动力系统试验液氧加注过

程为例，先后进行了液氧 500 L/min 小流量挤压加注、3 000 L/min 大流量泵压式加注、1 500 L/min 泵压式加注，以及贮罐切换操作后的 2 000 L/min 大流量泵压式加注，加注流量和温度数据曲线如图 5 所示。

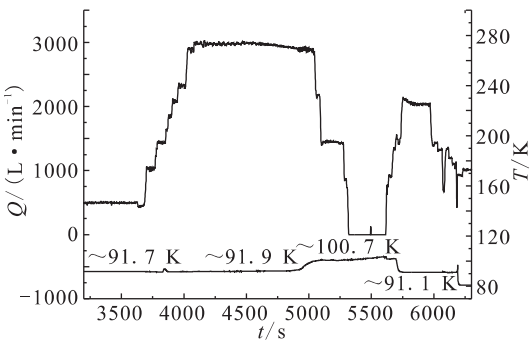


图 5 液氧加注流量温度曲线

Fig. 5 Flow rate and temperature curves in liquid oxygen filling process

由图 5 可知，贮罐的小流量挤压加注和大流量泵压加注过程，加注温度稳定在 91.7 K 左右；随加注过程进行，由液氧贮罐保压而造成液氧起始温度升高，以及降频带来泵损失温升增加，造成 1 500 L/min 的减速泵压加注过程温度升高至 100.7 K；切换贮罐后的 2 000 L/min 泵压式加注过程，又复现出较低的加注温度，约为 91.1 K。实测数据与理论计算数据对比情况如表 4 所示。

表 4 液氧加注实测数据与理论计算结果比较

Tab. 4 Comparison between detected data and calculated results of liquid oxygen filling process

加注工况	流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	实际测量			理论计算				理论和实 际差值/K
		起始温度/ K	末端温度/ K	温升/K	漏热温升/ K	流阻温升/ K	泵损失 温升/K	温升/K	
小流量预冷	~500	91.41	91.74	0.33	0.28	0.17	/	0.45	0.12
大流量加注	~3 000	90.92	91.52	0.60	0.05	0.46	0.28	0.79	0.19
减速加注	~1 500	102.41	103.12	0.72	0.16	0.29	0.45	0.90	0.18
大流量加注	~2 000	90.51	91.19	0.68	0.12	0.35	0.41	0.88	0.20



由表 4 可知, 500 L/min 小流量加注未采取泵压加注, 没有泵效率损失, 总温升值最小, 符合加注规律。温升实际数据由管路起始点和末端的温度实测值得到, 实际值与理论值的变化规律相符合, 差值在 0.2 K 以内, 满足工程需要。引起偏差的原因主要是计算偏差和测量误差。此外, 序号 3 的减速加注过程液氧起始温度升高, 为 102.4 K, 一是由于该加注过程贮罐液位降低, 贮罐底部液氧换热增强带来较大温升; 二是由于 0.26 MPa 保压工作时间增加, 液氧温度与 0.26 MPa 所对应的饱和温度数据基本吻合, 此时建立了新的相平衡。

#### 4.2 过冷氧加注热力性能验证

在 2 次加注过程中, 采用在线调节手段, 实现了不同的过冷氧温度, 数据曲线分别如图 6 和图 7 所示。

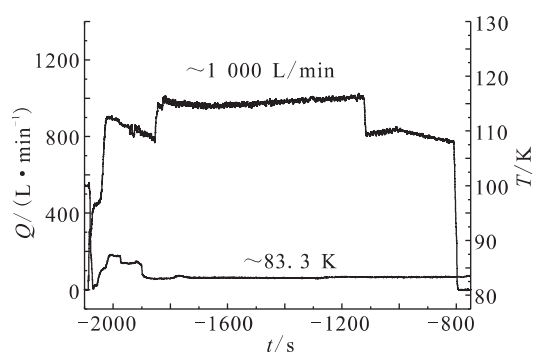


图 6 工况一过冷氧加注实测数据

Fig. 6 Detected results of super cooling liquid oxygen filling at state 1

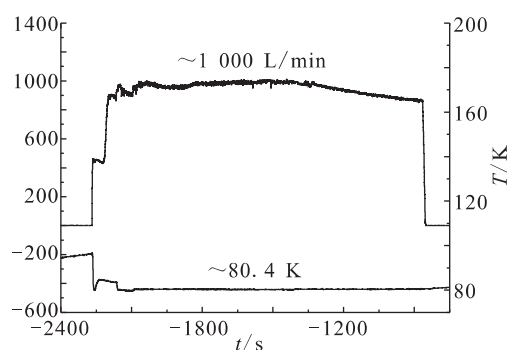


图 7 工况二过冷氧加注实测数据

Fig. 7 Ddetected data of super cooling liquid oxygen filling at state 2

由图 6 和图 7 可知, 采用过冷器切换阀保持小开度的方法, 通过过冷氧和常规氧不同比例掺混措施, 实现了过冷氧温度在线连续调节。在流量均为 1 000 L/min 工况下, 过冷氧温度分别为 83.3 K 和 80.4 K, 数据曲线平稳, 指标满足任务需求。

## 5 结论

1) 最优流速和管径的选择, 可以使因流阻损失和漏热造成的总温升最小。泵效率损失在小流量加注工况会引起大的温升, 应避免液氧泵长时间在小流量工况运行, 可采取挤压加注方式实现小流量加注, 或者采取液氧泵后分流的方法提高泵运行工况。

2) 采用本文所述的管路温升计算方法, 得到的理论数据与实测数据吻合性好, 能够体现管路热力特性, 可用于工程实际。

3) 经实测数据验证, 过冷氧与常规氧掺混的方法可以实现不同的过冷氧加注温度, 系统方案正确。掺混点下游约 1 m 处实现过冷氧与常规氧的均匀混合, 设备布局和工艺测点安装应此要求。

4) 长时间憋压会造成贮罐内液氧温度上升, 加注管路内出现两相流的风险增加, 加注前应采取液氧贮罐充分放气, 建立低压状态相平衡的措施来降低液氧温度。

#### 参考文献:

- [1] 黄兵, 黄辉, 田玉蓉, 陈士强. 低温液体运载火箭推进剂加注过程分析[J]. 低温工程, 2015 (4): 62-66.
  - [2] 韩战秀, 王海峰, 李艳侠. 液氢加注管道设计研究[J]. 航天器环境工程, 2009, 12(6): 561-564.
  - [3] 高婉丽, 刘瑞敏, 王立生. 液氢真空输送管路内漏问题分析[J]. 低温工程, 2010 (2): 60-62.
  - [4] 杨寒, 吴志坚. 变频泵在地面煤油加注系统中的应用[J]. 火箭推进, 2015, 41(5): 111-114.
- YANG Han, WU Zhijian. Application of variable frequency pump in kerosene filling system on ground. Journal of rocket propulsion, 2015, 41(5): 111-114.

(下转第 78 页)

$$U_Q = k \times u_Q = 2 \times 0.44\% = \pm 0.88\% \quad (21)$$

### 3 结论

通过研究液氢质量流量测量系统的组成和测量原理,分析测量不确定度主要分量的误差来源,逐个对分量的确定度进行评定,最终得出液氢质量流量扩展不确定度为 $\pm 0.88\%$ ,满足发动机设计部门的要求。该分析与评定方法可以供同类应用液位计测量质量流量的系统参考借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 于玉绵,叶政学.低温推进剂的液位测量[J].低温工程, 1994(2): 1-4.
- [2] 马礼耀,汤维.高精度分节式电容液位计[J].制冷学报, 1980, (2): 17-25.
- [3] 赵万明.液氧密度测量技术研究 [J].火箭推进, 2007, (8): 52-62.
- [4] 朱子环,耿卫国,管理 等.某型号大推力火箭发动机试验推力测量不确定度评定[J].火箭推进, 2012 (10): 81-85.
- [5] 刘曼,李玮.大型低温贮箱容积标定方法及不确定度评估[J].火箭推进, 2015 (2): 68-74.
- [6] 马键,童飞,陈祖奎.贮箱容积偏差及测量精度分析[J].火箭推进, 2013 (2): 41-45.
- ZHAO Wanming. Research on liquid oxygen density measurement [J]. Journal of rocket propulsion, 2007(8): 52-62.
- ZHU Zihuan, GENG Weiguo, GUAN Li, et al. Assessment of thrust measurement uncertainty for test of large thrust rocket engine [J]. Journal of rocket propulsion, 2012, (10): 81-85.
- LIU Man, LI Wei. Volume calibration technology based on combination measuring application for large cryogenic tank [J]. Journal of rocket propulsion, 2015(2): 68-74.
- MA Jian, TONG Fei, CHEN Zukui. Analysis on deviation and measuring precision of tank volume [J]. Journal of rocket propulsion, 2013(2): 41-45.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 27 页)

- [5] 李宁,潘卫明.液氧加注数值计算模型 [J].低温工程, 2008 (3): 26-29.
- [6] 何家声.流速和管径对热力特性的影响 [J].低温工程, 2007 (2): 46-49.
- [7] 符锡理.加注过程中液氧的温升和液氧泵的变频调速技术[J].低温工程, 1998 (4): 1-4.
- [8] 周庭宇,鲁雪生.液氧过冷用热交换器的热力设计[J].低温工程, 2007 (3): 35-39.
- [9] 陈国邦,黄永华,包锐.低温流体热物理性质 [M].北京:国防工业出版社, 2006: 391-427.
- [10] 陈国邦,张鹏.低温绝热与传热技术[M].北京:科学出版社, 2004.

(编辑: 马 杰)