

# 用于 900 W/4.5 K 氦低温测试系统的 低温喷射器设计

倪清\* 毕延芳 冯汉升 康帅  
(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

## Design of Cold Ejector for 900 W/4.5 K Cryogenic System

Ni Qing\* ,Bi Yanfang ,Feng Hansheng ,Kang Shuai  
(Institute of Plasma Physics ,Chinese Academy of Sciences ,Hefei 230031 ,China)

**Abstract** Here ,we addressed the development of the cold ejector used for sub-cooling supercritical helium ,a key component in the cryogenic distribution box of the 900 W/4.5 K cryogenic system ,which is a sub-project of the international thermal nuclear experimental reactor. The jet coefficient of the cold ejector under the realistic operating conditions was physically modeled ,analytically approximated and calculated. The interdependence of the pressure , mass flow rate of the working fluid ,structures of the ejector ,and jet coefficient was theoretically evaluated. The prototyped cold ejector was designed ,constructed ,and to be tested. The preliminary results show that the jet coefficient can be up to 1.15 under the required working conditions. The cold ejector remains to be improved and optimized by experimental study.

**Keywords** Cryogenic system ,Sub-cooler ,Ejector ,Distribution box

**摘要** 低温喷射器在 900 W/4.5 K 氦低温测试系统分配阀箱中的应用主要功能是过冷超临界氦 ,通过高压低速的超临界氦流在喷管中形成的低压高速的喷射流体引射过冷槽中的氦蒸气 ,从而达到过冷槽的减压降温 ,其作用相当于抽气泵。本文对该低温喷射器的工作环境及流程进行了说明 ,分析了喷射器工作流体在设计工况下的可达喷射系数及其影响 ,工作流体压力及流量变化情况下喷射器的工况变化 ,最后对试验件进行了结构设计。

**关键词** 低温系统 过冷槽 喷射器 分配阀箱

中图分类号:TB661;TB79 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1672-7126.2013.09.20

中科院等离子体物理研究所承担了部分国际热核聚变堆 (ITER) 部件设计及制造的工程项目 ,如 31 根超导磁体馈线其中包含了 30 对不同电流等级的高温超导电流引线、矫正场线圈等<sup>[1]</sup>。这些组件在加工装配完成后需要进行相应的低温性能测试以保证达到设计要求<sup>[2]</sup>。为满足这些组件的低温测试需要 ,一台 900 W/4.5 K 的氦低温测试系统已经设计完成并投入建设。其中氦制冷机系统是由 Linde Cryotechnik AG 公司提供的 LR280 型 ,共四个冷却级:液氮预冷、第一级膨胀(二台膨胀机)、第二级膨胀(一台膨胀机)、节流降温。分配系统是自主设计<sup>[3]</sup>。系统能够为测试用户提供并分配 4.5 K 超

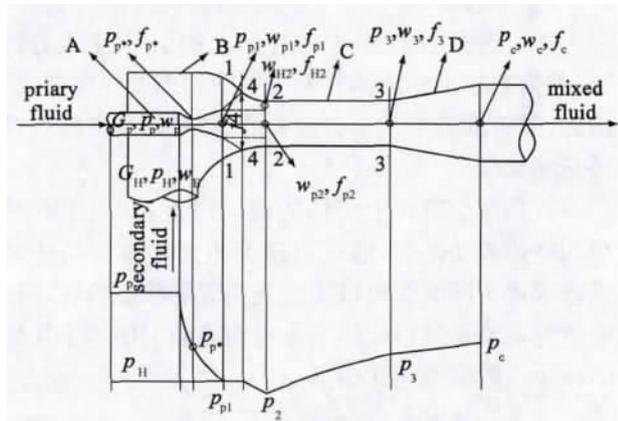
临界氦 ,50 K 氦气 ,80 K 氦气等冷媒。为保证 4.5 K 超临界氦的供给温度 ,分配系统中设计了过冷槽 ,其稳定运行状态为 0.8 bara/4 K ,由制冷机提供的超临界氦进入过冷槽内盘管换热器换热降温后再供给用户使用。过冷槽通过低温喷射器的抽吸作用形成负压以减压降温 ,达到设计状态。本文主要介绍该低温喷射器的工作环境 ,对不同工况下喷射器的工作状态进行了分析 ,最后给出试验件的结构设计 ,并提出严格的工艺要求。

低温喷射器主要原理是利用高压低温氦流通过喷嘴定熵流动过程 ,变成低压高速的流体 ,抽吸较低压力的流体 ,混合流体将以两股流体的中间某一种

收稿日期:2012-10-19

\* 联系人:Tel:(0551)65591075;E-mail:nqing@ipp.ac.cn

状态存在。该类喷射器有两个主要功能:①减压降温;②增大中压状态流量。存在三种流体形式:①供给流体;②引射流体;③混合流体。原理如图 1 所示<sup>[4]</sup>,高压的工作流体以很高的流速从喷嘴流出后抽吸引射流体,在混合室内工作流体动能一部分传递给引射流体,在沿喷射器流动的过程中,混合流体的速度渐渐均衡,混合流体在扩散器中部分动能转变为势能流出。喷射器较之其他减压降温低温机械设备如冷压机,效率较低约为 20%,且单级喷射器减压能力有限,但是其结构简单,制作、使用方便,热负荷小,也为中小容量的制冷带来一定的便利。流体在这样简单的结构中变化相当复杂,工作流体进入喷嘴时是高压、低速的超临界氦流,在出口处变成超音速、亚稳的液体。在混合室中工作射流因混合并加速了引射流体变成两相状态减速至亚音速伴有激波生成。基于这些原因,对于低温喷射器的优化设计很多时候也需要依据经验进行<sup>[5-7]</sup>。



A—喷管 B—接受室 C—混合室 D—扩散器 G—质量流量 P—压力 w—流体流速 f—面积 \*—临界截面 1—工作喷嘴的出口截面 2—混合室入口截面 3—混合室出口截面 下标 p—喷射器的喷嘴前的工作流体 下标 H—喷射器接受室前的引射流体 下标 c—喷射器扩散器后的混合流体 下标 p1—喷嘴出口截面上工作流体 下标 p2—混合室入口截面工作流体 下标 H2—混合室入口截面引射流体

图 1 喷射器工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the ejector

### 1 低温喷射器的工作环境

#### 1.1 喷射器工作流程

低温喷射器作为分配阀箱内部重要部件主要承担着过冷槽内过冷的任务,同时也是 400 L 液氦罐能够有效往过冷槽补液的重要保障,因此,超临界氦

回流路上低温喷射器设计的好坏直接影响分配阀箱过冷组件的运行效果。图 2 所示为低温喷射器工作流程图。超临界氦回流作为工作流体进入喷射器,引射过冷槽内冷回气使过冷槽减压降温,喷射器出口将混合后的流体压力转变成 400 L 液氦罐工作压力,流体将处于两相状态出喷射器进入液氦罐储存。通过喷射器的减压降温过冷供给用户的超临界氦,液氦容器与过冷槽由于存在压差,液氦容器也可以不断的往过冷槽内供给液氦,如此便保证了过冷槽内的液氦量。

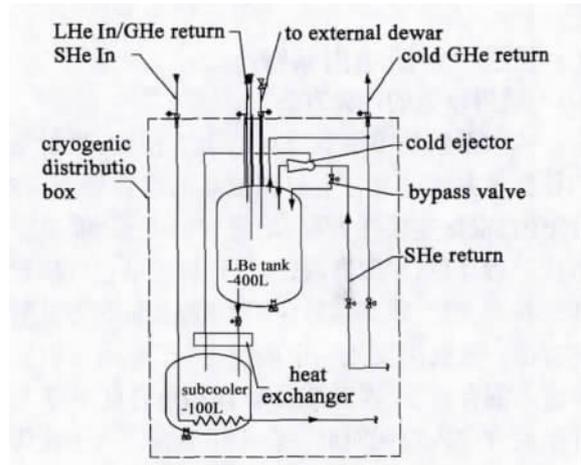


图 2 低温喷射器工作流程

Fig. 2 Working process of the cold ejector

#### 1.2 喷射器设计工况的描述

考虑到在测试小型试验件的时候,900 W/4.5 K 制冷机开启三台透平,本身能够提供充足的制冷量,因此此时不考虑使用喷射器,利用旁通阀将工作流体直接引入液氦容器内。喷射器的使用仅在测试大型磁体,需要过冷,从而进一步降低冷却介质温度,系统在满足用户制冷量的前提下,仅开启二级冷却级的两台透平,第三台透平旁通路打开,目的是保证工作流体的工作压力,以确保喷射器运行在最佳工况。大型磁体测试热负荷一般不大于 500 W,设计热负荷此处按照 500 W 进行计算,制冷机开启两台透平时最大流量为 55 g/s,此处按照 50 g/s 计,过冷后的工作流体温度约 4.2 K,由于系统主压机工作压力最大为  $13 \times 10^5$  Pa,考虑到流体在制冷机内部有一定的压力损失,因此超临界氦供给压力按照  $11 \times 10^5$  Pa 计,磁体压损  $10^5$  Pa,回流超临界氦的温度为 6.7 K,回流压力为  $10^6$  Pa。喷射器设计工况如表 1 所示。

表1 喷射器三种流体的设计工况

Tab.1 Design of the three working modes of the ejector

流体名称	温度/K	压力/ $10^5$ Pa	流量/g/s
工作流体	6.7	10	50
引射流体	4.0	0.8	-
混合流体	4.4~5.0	1.4	-

引射流体主要是过冷槽内的低压饱和液氦蒸气。混合流体出口温度、压力与工作流体、喷射系数及出口背压均有关系,设计混合流体出喷射器的状态为气液两相。

## 2 低温喷射器喷射系数

### 2.1 喷射系数的计算方法

喷射系数是喷射器设计的重要指标,喷射系数的计算主要通过混合室与扩散器的综合处理,在混合室内,根据连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程进行计算,扩散器内,通过定熵流动过程确定流体的状态变化,状态参数应用 HEPAK 氦状态参数软件查得。此处需要做一个假设,工作流体和引射流体进入混合室前,在和工作喷管相重合的平面与圆柱形混合室入口截面那一段不相混合。由于流体在喷管、扩压管中的流动不可避免存在摩擦损失,有能量的耗散,工程上常应用速度系数来进一步描述该不可逆的过程,速度系数视流体性质,喷管形式、尺寸,壁面粗糙度和膨胀压力比等因素而定,为一经验数值,通常由实验方法测定,一般在 0.92~0.98 范围内<sup>[8]</sup>。此处将采用速度系数来描述喷射器内摩擦引起的熵产。以混合室为研究对象满足以下关系

质量守恒方程

$$G_c = G_p + G_H = G_p(1 + u) \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\varphi_2 G_p w_{p2} + G_H w_{H2} - (G_p + G_H) w_3 = (p_3 - p_{p2}) f_{p2} + (p_3 - p_{H2}) f_{H2} \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\delta Q = \left( h_3 + \frac{1}{2} w_3^2 + g z_3 \right) G_c - \left( h_{p2} + \frac{1}{2} w_{p2}^2 + g z_{p2} \right) G_p - \left( h_{H2} + \frac{1}{2} w_{H2}^2 + g z_{H2} \right) G_H + dW_{net} + dE_{ev} \quad (3)$$

另外根据假设条件确定

$$\left. \begin{aligned} f_{p2} &= f_{p1} \\ w_{p2} &= w_{p1} \\ p_{p2} &= p_{p1} = p_H \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

混合室进口截面积

$$f_{p2} + f_{H2} = f_3 \quad (5)$$

式中: $G_p$  为工作流体质量流量; $G_H$  为引射流体流量; $G_c$  为混合流体质量流量; $u$  为喷射系数; $w_{p2}$  为圆柱形混合室入口截面上工作流体速度; $w_{H2}$  为圆柱形混合室入口截面上引射流体速度; $w_3$  为圆柱形混合室出口截面上混合流体速度; $p_{p2}$  为圆柱形混合室入口截面上工作流体静压力; $p_{H2}$  为圆柱形混合室入口截面上引射流体静压力; $p_3$  为圆柱形混合室出口截面上混合流体静压力; $f_{p2}$  为工作流体在圆柱形混合室入口截面上所占的面积; $f_{H2}$  为引射流体在圆柱形混合室入口截面上所占的面积; $\varphi_2$  为混合室的速度系数,取 0.975; $\delta Q$  为单位时间内,系统对外吸热量; $dW_{net}$  为单位时间内,系统对外做的净功; $dE_{ev}$  为单位时间内,开口系储存能变化; $h_3$  为出口截面上混合流体焓; $h_{p2}$  为圆柱形混合室入口截面上工作流体焓; $h_{H2}$  为圆柱形混合室入口截面上引射流体焓; $gz$  为单位质量物体重力位能。

### 2.2 喷管选型

喷射器是否能够达到所要求的引射流体的状态,就需要靠工作流体在喷管中的状态变化来完成,因此,喷管的选型是至关重要的,即是采用渐缩喷管还是缩放喷管。

首先考虑喷管中流体的流动过程,其属于有摩擦的绝热流动过程,通过可逆绝热流动过程与速度系数求得实际喷管出口流速及相应的状态参数。稳定的定熵流动过程流体沿流道动能的增加等于其焓的减少。数学表达式如下

$$w_{p1} = \sqrt{2(h^* - h_{p1})} \quad (6)$$

式中: $h^*$  为工作流体定熵滞止焓。

实际流速

$$\varphi_1 = w_{p1}' / w_{p1} \quad (7)$$

式中: $\varphi_1$  为喷管速度系数,取 0.95; $w_{p1}'$  为喷管出口截面工作流体实际流速; $w_{p1}$  为喷管出口截面工作流体理想流速。

利用喷管效率确定喷管出口实际焓值

$$\eta_N = \frac{w_{p1}'^2 / 2}{w_{p1}^2 / 2} = \frac{h^* - h_{p1}'}{h^* - h_{p1}} \quad (8)$$

式中: $\eta_N$  为喷管效率; $h_{p1}'$  为喷管出口截面工作流体焓。

喷管任意截面截面积

$$f_p = \frac{G_p}{\rho_p w_p} \quad (9)$$

式中: $f_p$  为喷管任意截面截面积; $\rho_p$  为喷管任意截

面流体密度;  $w_p$  为喷管任意截面流体流速;

其次, 需要通过比较出口背压即设计的引射流体的压力与临界压力确定喷管类型。可通过 Hepak 软件查得当地音速与喷管出口流速的比较来判断。值得注意的是, 超临界氦在喷管中的状态变化十分剧烈, 由超临界态逐渐变成亚稳的液态, 因此当地音速的变化也是非常剧烈的, 在超临界态与液态时, 当地音速变化相对稳定, 特别是当流体状态变化到有一定干度的亚稳液态时, 此时当地音速变化剧烈, 很不稳定<sup>[9]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 喷管内工作流体状态变化

喷管采用缩放型圆形截面喷管, 低温氦流在喷管内的定熵状态变化情况如图 3 所示。

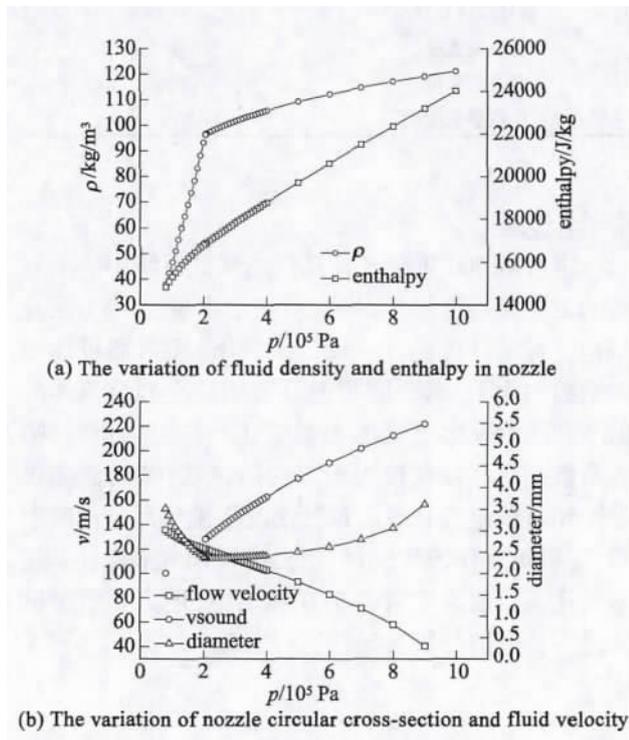


图 3 缩放喷管圆形截面直径及工作流体状态变化曲线

Fig. 3 Nozzle cross section and fluid status

当地音速从超临界态变化到液态时是逐渐减小的, 基本成线性变化, 处于亚稳液态的流体当地音速变化极不稳定没有确切值, 直到变为气态其值约为 100 m/s。喷管内的定熵流动流体出口流速约 136 m/s, 实际流速约 129 m/s。由此可以看出, 流体流速与当地音速的曲线中间必然交于一点, 压力约为  $2 \times 10^5$  Pa。另外, 喷管截面直径的曲线存在拐点,

所对应的压力也在  $2 \times 10^5$  Pa 附近, 因此喷管采用缩放型喷管, 设计工况下, 喷管喉部直径约为 2.33 mm, 出口截面直径为 3.51 mm。

#### 3.2 设计工况下喷射器可达喷射系数

可达喷射系数决定了喷射器的工作范围。在确定了喷管内流体状态后, 将其带入混合室对喷射系数进行分析, 要保证喷射器的正常工作, 混合流体流速应小于当地音速进入扩散器。按照最理想的状态, 动量方程左、右两边都为零进行计算, 得到混合流体最大流速 85 m/s, 小于当地音速, 由此可得到最大喷射系数约为 1.15。喷射系数的变化对于混合流体进入扩散器内的温度、压力及喷射器出口温度、压力均不同, 喷射系数大于 0.5 时, 混合室出口流体状态变化较大, 而扩散器出口流体压力等于出口背压; 喷射系数小于 0.5 时, 混合流体状态变化较为平缓, 喷射器出口压力大于出口背压并随喷射系数减小而逐渐增大。喷射系数变化对混合流体的影响如图 4 所示。

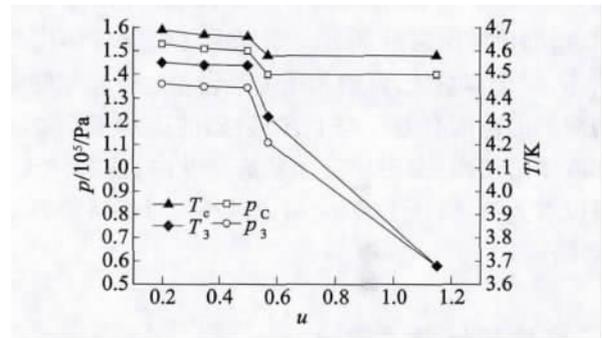


图 4 工作流体状态不变, 扩压管进、出口流体压力与温度随喷射系数变化的情况

Fig. 4 Fluid status in the ejector changes with the jet coefficient

#### 3.3 工作流体工况变化对引射流体的影响

喷射器中, 喷管功能直接影响喷射器的作用。喷管功能与工作流体的初始状态有直接关联。系统运行过程中, 工作流体流量、温度及压力会发生波动, 对于设计工况下确定尺寸的喷射器而言, 工作流体的有效工况变化范围将决定喷射器运行的好坏, 工作流体初始状态参数的变化会引起喷管内流体临界点的变化, 工作流体流量的变化会引起喷管内流体各不同状态下所需截面积的变化。

根据上述情况, 当工作流体流量一定, 压力降低时, 所需喉部直径略有增大, 喷管能够工作<sup>[10]</sup>。引射流体饱和蒸气压力升高, 饱和温度也随之升高, 工

作流体在  $7.5 \times 10^5$  Pa 时,引射流体压力约为  $1.2 \times 10^5$  Pa,饱和温度为 4.4 K,此时喷射器的运行效果已不再明显,如图 5 所示。

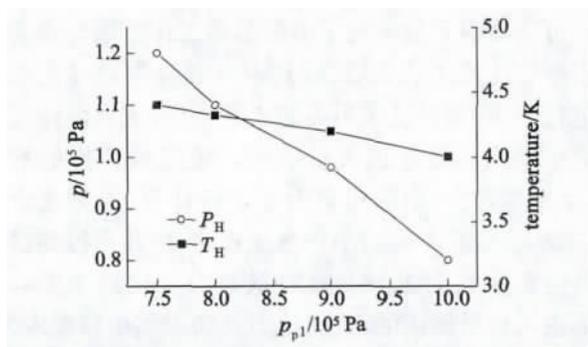


图5 工作流体流量不变、压力降低,引射流体状态变化

Fig. 5 Secondary stream changes in the ejector with primary flow

相反,如果工作压力升高,流量不变,则喷管内达到临界状态的喉部直径要减小,对于喉部尺寸确定的喷管而言,已无法正常工作,此时可以增大流量,增加流体所需喉部截面积以满足喷管流体出口状态,对于本系统,流量和压力受设备运行容量的限制而增加范围有限。综上,喷射器的正常工作与工作流体密切相关,工作流体状态变化时,压力增大,可以增大流量;压力减小,可以减小流量保持喷管正常工作。

#### 4 结构设计及关键尺寸

喷射器试验件的结构设计是可以调节喷管出口截面与混合室进口截面之间的距离的,这将直接影响到喷射器运行效果。通过焊接波纹管 and 调节螺母对喷管进行轴向微调。喷管及混合室扩散器在加工中要保证内表面通道的粗糙度尽可能小以减小摩擦损失。在装配过程中,喷管与混合室两个组件要保持一定的同轴度,因此,在接受室腔体内做了较长一段的套管进行轴向定位,同时利用调节锁母与喷嘴进行螺纹轴向连接,支撑套管与压板在此起到固定位置的作用。

喷射器的主要关键尺寸包括:喷管喉部与出口截面积(在上述设计计算过程中已经得到);喷管与混合室的距离(在试验中进行调节确定);圆形混合室直径,长度;扩压管长度等。混合室长度根据经验值取6~10倍的直径。扩散器按照 $8^\circ \sim 10^\circ$ 扩张角,长度以6~7倍的扩散器进出口直径差值确定。图

6所示为喷射器试验件设计结构。具体尺寸如表2所示。

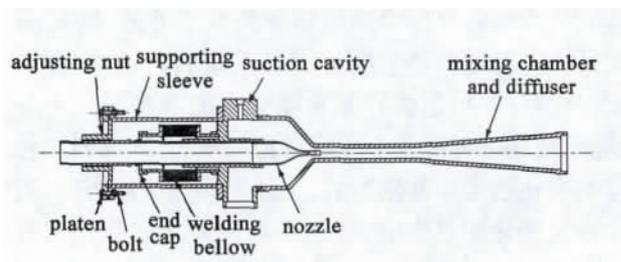


图6 喷射器试验件结构图

Fig. 6 Structure design of the prototyped cold ejector

表2 喷射器主要设计参数

Tab. 2 Design parameters of the cold ejector

设计参数	数值
喷管喉部直径	2.33 mm
喷管出口直径	3.51 mm
混合室直径	10.1 mm
混合室长度	90 mm
扩散器长度	120 mm

#### 5 结论

本文对900 W/4.5 K 氦低温测试系统中的喷射器的工作流程进行了讨论,对喷射器的运行工况及结构进行了分析设计。设计工况下,喷射器可达喷射系数约为1.15,并随喷射系数的减小混合流体的温度和压力发生显著的单调变化。稳定运行时,喷射系数则会保持在较为稳定的值,喷射器内流体也处于相对稳定的状态。设计工况下确定尺寸的喷射器,需要对工作流体流量、压力进行调节来保证其正常工作。目前该喷射器正在加工中,还需要通过试验进一步调节分析其最佳运行工况。

#### 参 考 文 献

- [1] Bauer P, Sahu A K, Sato N et al. The ITER Feeder Magnet Systems Functional Specification and Interface Document[J]. ITER\_D\_2EH9YM 2009:21-38
- [2] 倪清, 毕延芳, 丁开忠, 等. ITER 10kA 高温超导电流引线测试装置低温系统的研究[J]. 真空科学与技术学报 2011, 31(5):607-611
- [3] 洪晨, 毕延芳, 倪清, 等. 900 W/4.5 K 低温超导测试系统分配阀箱结构设计与分析[J]. 低温工程, 2012, 187(3):36-41
- [4] 索科洛夫 E R, 津格尔 H M. 喷射器[M]. 北京:科学出版社, 1977:17-77

- [5] Weisend J G II. Handbook of Cryogenic Engineering [M]. Taylor&Francis ,1998:398 - 399
- [6] Ageev A I ,Agapov N N ,Belushkin V A ,et al. Experimental Investigation of a Helium Cryogenic Ejector [J]. Chemical and Petroleum Engineering ,1976 ,12(10) :936 - 937
- [7] Johnson D L ,Daggett D L. A Cold Ejector for Closed-Cycle Helium Refrigerators [J]. The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report ,TDA PR 42-91 , 1987:102 - 111
- [8] 曾丹苓,敖越等. 工程热力学(第四版) [M]. 北京:高等教育出版社,2007:158 - 174
- [9] 张鹏,王如竹. 超流氦传热 [M]. 北京:科学出版社,2009:5 - 20
- [10] 霍夫曼 J D. 气体动力学 [M]. 北京:国防工业出版社,1984:98 - 140