

文章编号:1671-6833(2011)03-0115-04

## 天然气液化用高压涡流管内流动与传热分析

孔松涛, 刘娟, 赵丽君, 蔡萍, 黄悦

(重庆科技学院 机械与动力工程学院, 重庆 401331)

**摘要:** 高压涡流管是撬装化天然气液化的关键设备。由于管内高压引起的超音速强旋转流与传统涡流管有本质的区别。由于强大的离心力, 目前对三维强旋转湍流流动的测量与真实情况还有很大差异。利用数值计算方法, 研究了在高压环境中涡流管内流场和温度场结构特性, 提出利用冷热端压差配合特殊设计的喷嘴, 有利于形成超音速流动, 并在喷嘴段形成低温区域。控制高压涡流管的热端背压, 有利于获得更高的制冷效率。

**关键词:** 涡流管; 液化天然气; 撬装化

**中图分类号:** O633.11 **文献标志码:** A

### 0 引言

偏远小产量天然气、油田伴生气、煤层气等非常规天然气具有气源远离大型工业区和居民区; 气井大面积分布、不集中、气源形不成规模; 单井产量不够大, 储量有限, 可开采期短等特点。这些可燃气体严重威胁安全生产, 并且具有强烈的温室效应。一些天然气被加工成压缩天然气(CNG)。由于CNG经济有效运输半径仅为150~200 km, 因此, 更多的天然气被直接烧掉。目前, 基于撬装化的液化技术可将这些气体转换为液化天然气(LNG), 从而可以远距离经济安全运输和使用。

虽然在天然气液化工艺中, 可以选择膨胀机、热声机等制冷设备, 但是涡流管由于自身所具有的结构紧凑、体积小、重量轻、无运动部件、无需定期检修等特点, 在野外现场天然气高效液化工艺中, 具有突出的优点, 是首选的制冷元件。但是与传统制冷用涡流管不同, 天然气液化用涡流管在高压高膨胀条件下工作, 这给涡流管的设计带来了很多问题。

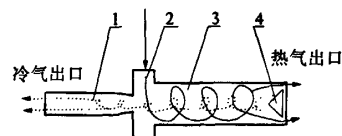
涡流管管内流场结构非常复杂, 一般认为涡流管内气体的强旋转流动、工质可压缩性、黏性和湍流脉动等因素导致了能量分离。Bruun<sup>[1]</sup>, Takahama<sup>[2]</sup>, Boye Ahlborn<sup>[3]</sup>采用皮托管对管内流场进行测量, 但由于皮托管对流场的干扰较大, 因此结果并不理想, 后来, Robertson等应用激光多普

勒进行非接触式测量, 但由于巨大的离心力作用导致离子的跟随性差, 所得数据并不理想。通过实验获取涡流管内全流域特性还有待于测试技术的进步。计算流体力学(CFD)的发展为管内流场研究提供了一种全新的手段, 其结果已经被广泛接受。H. Unger<sup>[4]</sup>, N. F. Aljuwayhel等<sup>[5]</sup>利用CFD软件对涡流管内能量分离过程进行模拟, 证实了数值模拟是一种研究涡流管的理想方法。笔者利用数值计算方法对高压涡流管的流场和温度场结构进行了研究。

### 1 计算模型

#### 1.1 物理模型

涡流管结构如图1所示。



1—冷端管; 2—涡流室; 3—热端管; 4—热阀

图1 涡流管结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of vortex tube

勒涡流管由喷嘴、涡流室、冷孔板、热阀以及冷热两端管组成。高压气体由进气管导入涡流管喷嘴, 在喷嘴中膨胀降压后沿切向进入涡流室, 形成涡流, 经过动、热能交换分离成温度不同的两部分, 中心部分即为冷气流, 边缘部分的气体集中至

收稿日期: 2011-01-20; 修订日期: 2011-03-02

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2009BB7379)

作者简介: 孔松涛(1969-), 男, 四川自贡人, 重庆科技学院副教授, 研究方向: 流体流动与传热, E-mail: kst@tom.com.

涡流管的另一端即为热气流,这样同时获得冷、热两种效应。通过控制调节阀的开启度可以获得不同的冷气流率 $\mu$ (冷气流率 $\mu$ 定义为冷气流的质量流量与进口气流质量流量的比值),调节冷、热气流比例,可以得到最佳制冷效应或制热效应。涡流管主要参数如下:喷嘴截面积  $1\ 118\ \text{mm}^2$ ,冷端长度  $120\ \text{mm}$ ,热端长度  $520\ \text{mm}$ ,直径  $96\ \text{mm}$ 。该涡流管用于  $2 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$  天然气液化规模。

## 1.2 数值计算模型

H. Unger 等<sup>[4]</sup>证实,涡流管由于其轴对称结构与流动,其计算模型可以简化为二维轴对称模型,而且计算精度与实验结果符合较好。H. Unger 还证实, $\kappa-\varepsilon$  湍流模型计算结果与实验相差较大。笔者计算表明,包括 Realizable  $\kappa-\varepsilon$  在内的  $\kappa-\varepsilon$  湍流模型在低压情况,能计算收敛但结果于相应实验有较大差异,在高压区域( $>1\ \text{MPa}$  进口压力)就很难收敛,压力越高,收敛越困难。相反,Spalart-Allmaras 模型一直能很好工作,特别是管内出现超音速情况下,在低压条件下也和实验数据很吻合,因此,笔者计算采用 Spalart-Allmaras 湍流模型。考虑到壁面效应的影响,涡流管内近壁面处采用非平衡壁面函数(Non-Equilibrium Wall Functions)处理。

## 2 数值模拟结果分析

为验证数值模拟方法的准确性,将计算模型和边界条件与 Bruun<sup>[1]</sup> 实验数据对比,如表 1 所示。

表 1 CFD 计算冷端出口温降与 Bruun 实验比较

入口压力/kPa	200	300	500
Bruun/K	-20.0	-27.0	-38.0
CFD 计算/K	-21.1	-28.7	-40.1

注:上述结果为冷端气体占总气体流量的 30%。

表 1 显示,模拟结果是准确的,模拟方法也是可行的。

### 2.1 流场结构

由于高压涡流管的高膨胀比,导致涡流管内部气流达到超音速,如图 2 所示。

当高速气流部分通过滞点前端,一部分进入回流区,其他部分进入涡流管冷端。进入回流区内的气体,由于径向存在压力梯度及内摩擦力的作用,气流沿轴线向冷端和涡流管壁面方向流动。进入壁面附近的气流被加速,一部分从热端被排出,一部分被热阀挡回,从而进入中心区,等待进入冷端。气体进入冷端后,继续膨胀,在很短距离内达到音速,在特殊设计的拉法尔喷管里面,气体继续

膨胀达到超音速状态,期间压力降低很多,也在此范围内形成了低温区。这些现象在普通涡流管亚音速条件下是没有的。

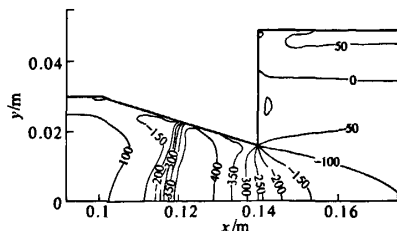


图 2 涡流管内超音速区域

Fig. 2 Supersonic region within the vortex tube

### 2.2 温度场分析

涡流管直接承受来自压缩机的高压,为了保证液化冷量和温度,要求涡流管提供最大冷量且最大温降要求大于  $60\ \text{K}$ 。Wang Peng-tao 等<sup>[6]</sup>认为,涡流管内在径向位置上不仅存在总温的分离,而且存在静温分离。但从模拟结果看,高压涡流管与低压涡流管的温度场<sup>[4-6]</sup>还是有较大差异。图 3 为涡流管内静温分布。

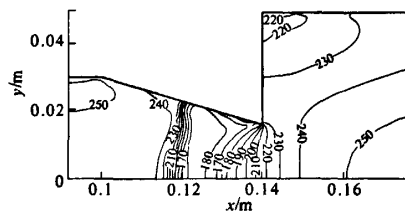


图 3 涡流管内静温分布

Fig. 3 Static temperature distribution within the vortex tube

从图 2 和图 3 看出,由于改进型高压涡流在涡流室与冷端管之间设置了拉法尔喷管,喷管内流体流速达到了超音速条件,压力很低,相对应的温度也很低,最低处低于  $160\ \text{K}$ ,和入口温度相比较,温降在  $135\ \text{K}$  左右。这个低温对于撬装化 LNG 装置十分有益,在一定压力和低温条件下, $\text{CO}_2$  和硫化物能够被液化并在涡流的高速旋转条件下,抛向壁面,从而完成  $\text{CO}_2$  和硫化物的物理脱除,避免使用醇胺等化学方法带来的装备庞大和投资上升,为真正实现 LNG 撬装化提出了开拓性的思路。

### 2.3 制冷温度

图 4 为不同入口压力下涡流管的制冷温度效应随冷流率的变化曲线,从图中可以看出:在保持涡流管冷端出口压力不变的情况下,随着入口压力的增加,膨胀比也增加,在相同冷流率下,涡流管的制冷温度效应也呈现增加的趋势,在冷流率为 50% 时,入口压力为  $3.2\ \text{MPa}$  时涡流管的制冷

温度效应约为 50 K,而当入口压力为 4.0 MPa 时,涡流管的制冷温度效应约为 60 K,比入口压力为 3.2 MPa 时相同条件下多了 10 K 的制冷温度效应,但是当冷流率增大到一定值以后,再增加压力并不能提高涡流管的制冷温度效应。在冷流率为 80% 时,入口压力为 3.5 MPa 与入口压力为 3.7 MPa 时的制冷温度效应相同。因此,必须选择适当的冷流率,以便涡流管能获得较好的制冷效果。

在图 4 中压力较低的两条曲线上,当冷流率小于 30% 后,制冷温度反而上升。通过分析计算结果认为,之所以出现反常现象,主要原因是冷流率过小,在涡流管热端,大量的气体通过热端流出,在热端管中心流向冷端的气流减小,导致其旋转变角速度较低,能量分离效果变差,是涡流管制冷的一个特点。

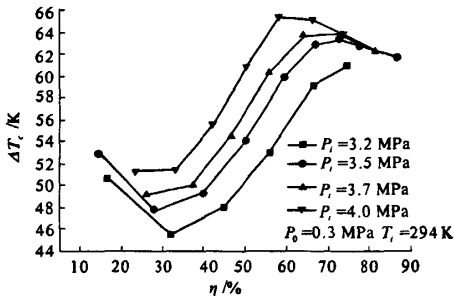


图 4 制冷温度随冷流率变化曲线

Fig. 4 Cooling curve of temperature with the cold flow rate

## 2.4 制冷量和制冷系数 (COP)

图 5 是不同入口压力下涡流管的单位制冷量  $q$  随冷流率的变化曲线。它与入口压力对涡流管制冷温度效应的影响规律一致,即在相同的冷端出口压力下,随着入口压力的增加(膨胀比增加),涡流管的单位制冷量和制冷系数均增加,但是当入口压力增加到一定值后,单位制冷量的增加逐渐变缓。

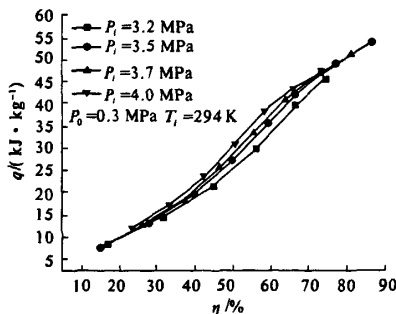


图 5 制冷量随冷流率变化曲线

Fig. 5 Cooling capacity curve with the cold flow rate

由图 6 可见,冷流率在较小时对 COP 影响较大,但是其较高时候对 COP 影响小。这个现象要求在设计高压涡流管的时候,一定要注意理想的冷流率;在涡流管运行期间,可以调控高压涡流管热端背压,来获得理想的 COP。上述研究结果为涡流管设计和运行提供了理论参考。

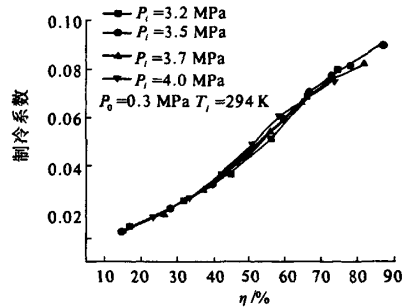


图 6 制冷系数随冷流率变化曲线

Fig. 6 COP curve with the cold flow rate

## 3 结论

Spalart-Allmaras 模型对高压涡流管具有收敛速度快、计算稳定等优点,能够充分反映出涡流管内能量分离现象,并与涡流管性能实验数据相吻合;提出利用冷热端压差配合特殊设计的喷嘴,有利于形成气流的超音速流动和低温,并利用涡流管强旋转作用脱去  $\text{CO}_2$ 、硫化物液滴,为撬装化 LNG 装置省去天然气前处理工艺,从而大大节约设备投资和设备体积,使撬装液化装置能够真正投入实用阶段;高压涡流管内部流场与传统的涡流管不一样,其流场结构和温度场都异于传统涡流管。研究表明,控制高压涡流管的热端背压,有利于获得更高的制冷效率。

## 参考文献:

- [1] BRUUN H H. Experimental investigation of the energy separation in vortex tubes[J]. J. Mechanical Engineering Science, 1996, 11(6): 567-582.
- [2] TAKAHAMA H. Studies on vortex tubes(2nd report)[J]. Bull JSME, 1965, 8(31): 433-440.
- [3] BOYE A. Secondary flow in a vortex tube[J]. Fluid Dynamics Research, 1997, 21(2): 73-86.
- [4] UNGER H, FROHLINGS DORF W. Numerical investigation of the compressible flow and energy separation in the Ranque-Hilsch vortex tube[J]. Heat and Mass Transfer, 1999, 42(3): 415-422.
- [5] ALJUWAYHEL N F, Nellis G F. Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3): 442

-450.

- [6] WANG Peng-tao, JIANG Ren-qiu, SONG Fu-yuan, et al. Numerical simulation and analyze of three-dimen-

sional strong swirl flow in the vortex tube[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2007, 35(1): 73 - 78, 83.

## Analysis of Flow and Heat Transfer in High-Pressure Vortex Tube for LNG

KONG Song-tao, LIU Juan, ZHAO Li-jun, CAI Ping, HUANG Yue

(School of Mechanical Engineering Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** The high-pressure vortex tube is a kind of key equipment in skid-mounted package liquefied CBM/NG. As a strong centrifugal force, the three-dimensional measurement to intense rotating flow is very different from the real situation. The method of numerical computing is used to study the high-pressure vortex tube flow field and temperature field. The pressure difference between hot and cold side and the special nozzle are conducive to the formation of supersonic flow, and lead to lower temperature in cold-side. The study also shows that to control the back pressure of hot end in high-pressure vortex tube will help to achieve higher cooling efficiency.

**Key words:** vortex tube; LNG; skid-mounted

(上接第 114 页)

- [5] HARTL G, LI Bao-chun. Loss inference in wireless sensor networks based on data aggregation[C]//In proceedings of the Third IEEE/ACM International Symposium on Information Processing in Sensor Network. New York: ACM Press, 2004:396 - 404
- [6] 张志勇, 胡光岷. 无线传感器网络拓扑识别算法[J]. 计算机应用, 2010, 30(3): 733 - 736
- [7] ZHAO Tao, CAI Wan-dong, LI Yong-jun. MPIDA: A sensor network topology inference algorithm[C]//2007 International Conference on Computational Intel-

ligence and Security. Washington DC: IEEE Computer Society, 2007: 451 - 455.

- [8] ZHAO Tao, CAI Wan-dong, LI Yong-jun. Using end to end data to infer sensor network topology[C]//2007 IEEE International symposium on signal processing and Information Technology. Washington DC: IEEE Computer Society, 2007: 504 - 508.
- [9] 陈荣, 江虹, 杨欢. Ad Hoc 网络路由协议性能对比仿真研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(18): 4672 - 4675.

## A Level-Topology Identifying Algorithm in Sensor Network

SHEN Jin-yuan, ZHAO Xu-dong, LIU Run-jie, MU Wei-xin

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Sensor network topology plays an important role in resource management and deployment. By using the lose/receive information of data collected in the sink, we proposed a level-topology identification algorithm based on data aggregation in this paper, and we can get the level information of the sensor network in the same time. Considering the low speed of all topology algorithms proposed when the loss rate of sensor network is low, we proposed a method which put some nodes into sleeping state to inferring the topology under low loss rate. The simulation shows that the proposed algorithm can infer the sensor network topology accurately and quickly.

**Key words:** sensor network; network tomography; topology inference; data aggregation