

叶片整流器强化涡流管制冷性能研究

艾国生¹, 赵志勇¹, 耿远力¹, 刘凤霞²

(1. 塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000; 2. 大连理工大学 化工与环境生命学部, 辽宁 大连 116024)

摘要:为解决涡流管工作过程中气体易产生旋涡的问题,设计一种新型叶片整流器,将旋流转化为平行流,实现能量回收利用。搭建实验平台,通过调整装置结构及工况进行相关研究。实验结果表明:压比为2时,与无整流器涡流管相比,相同长径比下安装整流器的涡流管制冷效应(入口与冷端出口温差)提高3.5℃;相同制冷效应下,整流器能将长径比缩短一半;冷流率为0.5时,两端同时安装整流器时单位制冷量最大提升3.5 kJ/kg,只安装在热端时单位制冷量最大提升2.6 kJ/kg,只安装在冷端时单位制冷量最大提升0.64 kJ/kg;当压比较低时整流器叶片入口角度较小有利于提升制冷效果,当压比较高时叶片入口角度较大有利于提升制冷效果。

关键词: 涡流管; 叶片整流器; 实验

中图分类号: TB657 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.08.018

[引用本文格式]艾国生,赵志勇,耿远力,等. 叶片整流器强化涡流管制冷性能研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(8): 121-126. AI Guo-sheng, ZHAO Zhi-yong, GENG Yuan-li, et al. Study on refrigeration performance of enhanced vortex tube of blade rectifier[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 121-126.

Study on Refrigeration Performance of Enhanced Vortex Tube of Blade Rectifier

AI Guo-sheng¹, ZHAO Zhi-yong¹, GENG Yuan-li¹, LIU Feng-xia²

(1. Tarim Oilfield Company, Korla, China, Post Code: 841000; 2. School of Chemical Engineering and Environmental Life, Dalian University of Technology, Dalian, China, Post Code: 116024)

Abstract: In order to solve the vortex caused in gas in the working process of the vortex tube, a new type of blade rectifier was designed to convert the swirling flow into parallel flow, realize energy recovery and utilization. The relevant research was carried out by building an experimental platform and adjusting the structure and working conditions of the device. The experimental results show that comparing with the vortex tube without rectifier, the refrigeration effect (temperature difference between inlet and cold end outlet) of the rectifier vortex tube is increased by 3.5 °C under the same length-diameter ratio when the pressure ratio is 2; the rectifier can reduce the length-diameter ratio by half under the same refrigeration effect; when the cold flow rate is 0.5, rectifiers are installed at both ends at the same time, and the unit cooling capacity is increased by 3.5 kJ/kg, when only installed at the hot end, the unit cooling capacity can be increased by 2.6 kJ/kg at most, when only installed at the cold end, the unit cooling capacity can be increased by 0.64 kJ/kg at most; when the pressure ratio is relatively low, the smaller inlet angle of the rectifier blade is beneficial to improve the refrigeration effect; when the pressure ratio is relatively high, a larger blade inlet angle is beneficial to improve the refrigeration effect.

Key words: vortex tube, blade rectifier, experiment

引 言

涡流管^[1]是一种结构简单、工作平稳的能量分离装置,它具有体积小、低成本和免维护等特点,因此广泛应用在科研^[2-8]、机械及天然气脱水脱炔^[9-11]等领域,具有极高的发展及推广价值。

但是,涡流管同样存在一些缺陷,例如制冷效率较低,大长径比时占用空间较大,因此其在工程应用中受到限制。流道在涡流管冷热两端出口发生变化,加之气体在涡流管内为强旋流流动,因此气体在管内易产生小旋涡,致使流体内部摩擦作用增大,造成大量能量耗散及余速损失。

为解决上述问题,相关科研人员通过尝试在热端管末端增加整流器来提高制冷效率,并缩短涡流管长径比。但是,传统的十字形整流器入口与出口处结构存在突变,造成气流在该处产生小旋涡。后续科研工作^[12]则从气体动力学角度出发,设计了二次曲线型叶片整流器,以改善上述问题。但是,其结构设计比较单一,曲线变化未能良好拟合气体流动轨迹,并且未有科研人员在冷端出口安装整流器进行相关研究。

因此,本文设计一种新型叶片整流器,安装在冷端及热端出口,通过实验研究不同工况下叶片整流器对涡流管性能的影响。

1 新型涡流管基本结构

图1为带新型整流器的涡流管的结构简图,主要由冷端出口、整流器、叶片连接件、进气口、喷嘴、涡流室、热端管、热端控制阀及热端出口组成。

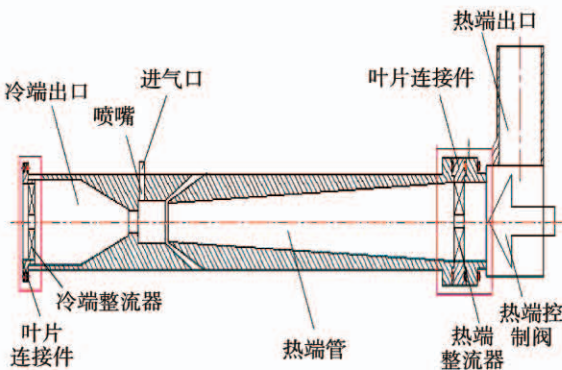


图1 带新型整流器的涡流管的结构简图

Fig.1 Structure diagram of vortex tube with new rectifier

如图2所示,新增整流器为三维导流叶片整流器,位于冷端及热端出口处,该三维叶片采用直母线设计方法,因此气流可以切向进、轴向出。当气体流经整流器时,其可以降低由于摩擦引起的能量耗散。

涡流管工作原理:经压缩机加压后的气体流入涡流管,并在喷嘴内部完成加速起旋,随后流入涡流室。在这个过程中,由于喷嘴采用渐缩型流道,气体将压力能转化为动能,温度降低,随后流入热端管内,形成冷/热两股气体,完成能量分离。其中,外层为高温气体,内层为低温气体。当冷/热两股气体流动到热端整流器时,外层高温气体经过整流后从热端阀两侧排出,而内层低温气体通过热端管返流,流入冷端整流器,经过整流后排出。

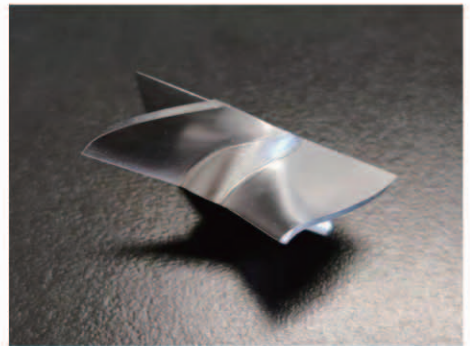


图2 三维导流叶片整流器

Fig.2 3D diagram of rectifier of guide vane

2 实验平台及性能评价指标

2.1 实验平台

新型涡流管实验平台如图3所示,实验流程如图4所示。



图3 涡流管实验平台

Fig.3 Experimental platform of vortex tube

实验设备主要包括压缩机、稳压罐、管路、涡流管装置及测量仪器。其中,压力测量工具为精密压力表,安装在进口及热端出口;温度测量工具为热电偶传感器,安装在进口、冷/热两端出口。

实验过程:首先,气体通过压缩机完成增压,随后流入稳压罐,压力恒定后,气体通过管道进入涡流管,充分完成能量分离后,高温气体经过热端阀门流出,低温气体经过冷端阀门流出。

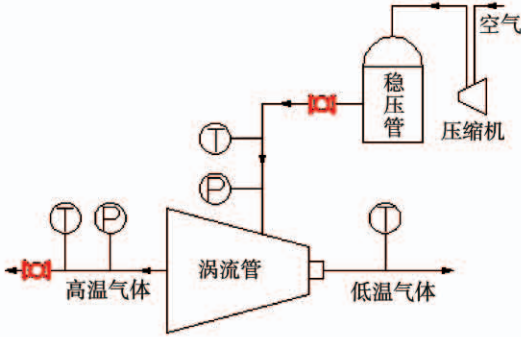


图 4 实验流程图

Fig. 4 Experimental flow chart

2.2 性能评价指标

制冷效应为进气口与冷端出口之间的温差 ΔT_c :

$$\Delta T_c = T_{in} - T_c \quad (1)$$

式中: T_{in} —涡流管入口温度, K; T_c —冷端出口温度, K。

制热效应为热端出口与进气口之间的温差 ΔT_h :

$$\Delta T_h = T_h - T_{in} \quad (2)$$

式中: T_h —涡流管高温端温度, K。

冷流率为涡流管低温出口与高压进气端口质量流量比 μ :

$$\mu = m_c / m_{in} \quad (3)$$

式中: m_c —涡流管冷端出口气体流质量流量, kg/s; m_{in} —进口处气体总质量流量, kg/s。

制冷压比 ε 为:

$$\varepsilon = p_{in} / p_c \quad (4)$$

式中: p_{in} —涡流管的入口压力, Pa; p_c —冷端出口压力, Pa。

单位制冷量 q_c :

$$q_c = \mu c_p \Delta T_c \quad (5)$$

3 实验结果及分析

3.1 不同长径比下整流器对涡流管性能影响

涡流管长径比是指热端管长度与直径之间比值。将两个 30° 叶片整流器分别安装在冷/热两端, 当压比为 2 时, 通过改变冷流率, 记录相关实验数据。

图 5 为不同长径比下, 涡流管单位制冷量随冷流率的变化规律。冷流率较低时, 长径比及整流器对单位制冷量影响较小; 涡流管由于配置整流器, 随着冷流率逐渐增大, 单位制冷量迅速升高。当 $\mu = 0.45$ 时, 单位制冷量达到最大值。其中, 单位制冷量随长径比增大而提升, 单位制冷量提高最大幅度为 3.02 kJ/kg 。再次提升冷流率, 单位制冷量反而降低。

相同长径比下, 与无整流器涡流管相比, 整流器引起涡流管单位制冷量提升 2.86 kJ/kg 。在获得相同单位制冷量下, 安装整流器可将长径比缩短一半左右。

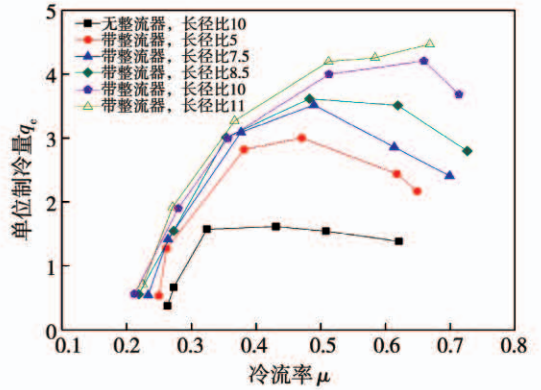


图 5 不同长径比下, 单位制冷量随冷流率的变化规律

Fig. 5 Variation of refrigerating capacity with cooling flow rate under different aspect ratio

图 6 为不同长径比下, 涡流管制冷效应随冷流率的变化规律。涡流管制冷效应先随冷流率增大而增大, 当 $\mu = 0.35$ 时, 制冷效应达到最大值, 随后呈下降趋势, 其中, 长径比为 11 时, 制冷效应最优, 高达 4.5°C 。并且, 长径比越大, 整流器对制冷效应影响越小。当 $\mu < 0.35$ 时, 涡流管制冷效应基本相同; 当 $\mu > 0.35$ 、长径比为 7.5, 8.5 时, 制冷效应迅速下降。此时, 当长径比为 10, 11 时, 制冷效应下降缓慢, 并且数值基本相同。

通过数据对比,可以得出结论:长径比一致时,与无整流器装置相比,配置整流器使制冷效应提升,最大增幅为 3.5 ℃。

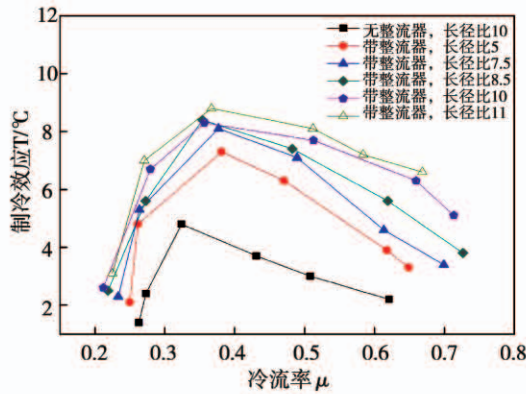


图 6 长径比改变时,制冷效应随冷流率的变化规律

Fig. 6 Variation of cooling effect with cooling flow rate under different aspect ratio

3.2 不同整流器安装位置对比

使用长径比为 10 的热端管及 30° 叶片整流器,通过改变整流器安装位置完成实验并对实验结果进行分析。

图 7 为不同整流器安装位置下,涡流管单位制冷量随冷流率的变化规律。当 $\mu < 0.3$ 时,整流器对单位制冷量影响较小;但随着冷流率不断增大,整流器使单位制冷量显著提升,达到峰值后缓慢下降。通过对比发现,冷端配置整流器使单位制冷量提升幅度较小;热端配置整流器使单位制冷量提升幅度较大;冷/热端配置整流器时,涡流管制冷效果最优。其中,当 $\varepsilon = 2, \mu = 0.5$ 时,两端配置整流器,可使单位制冷量增幅达 3.5 kJ/kg;整流器只安装在热端时,涡流管单位制冷量最大提升达 2.6 kJ/kg;整流器只安装在冷端时,单位制冷量可以提高 0.64 kJ/kg。

图 8 为不同整流器安装位置下,制冷效应随冷流率的变化规律。相比无整流器的装置,安装整流器的装置制冷效应较优。其中,当冷流率较低时整流器对制冷效应影响较小,当冷流率不断增大整流器对制冷效应则有显著影响。当 $\mu = 0.35$ 时,制冷效应达到峰值。其中,当 $\varepsilon = 2, \mu = 0.35$ 时,两端同时安装整流器,涡流管制冷效应可以提高 5.2 ℃。

整流器只安装在热端时,涡流管制冷效应最大提升 4.5 ℃。冷端整流器对制冷效应提升较小。

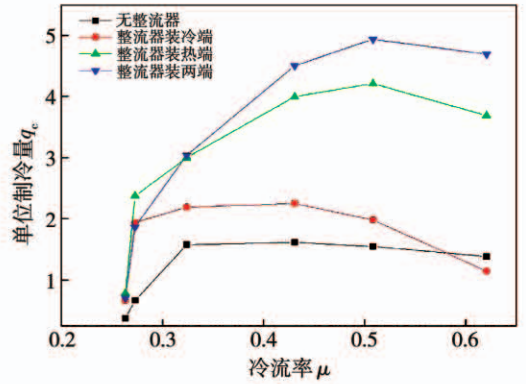


图 7 整流器不同安装位置下,单位制冷量随冷流率的变化规律

Fig. 7 Variation curves of unit refrigeration capacity with cooling flow rate

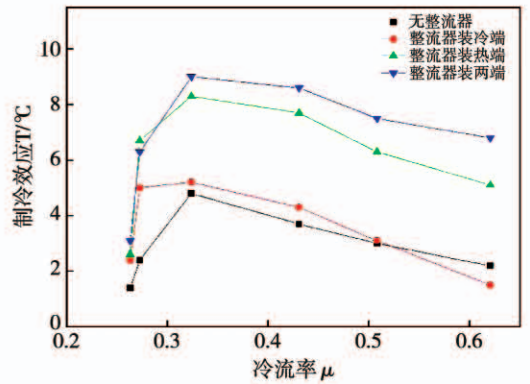


图 8 整流器不同安装位置下,制冷效应随冷流率的变化规律

Fig. 8 Variation curves of refrigeration effect with cooling flow rate under different rectifier installation positions

3.3 整流器叶片角度与压比的关系

由于不同压比下气流速度方向也不同,因此,整流器叶片最佳进口角也不同。通过改变压比、整流器叶片角度完成对比实验。

图 9 ~ 图 11 是当压比分别为 2, 3, 4 时,安装不同角度叶片整流器下,单位制冷量随冷流率的变化规律。

由数据分析可知: $\varepsilon = 2$ 时,当冷流率增大时,单位制冷量随之增大;当 $0.4 < \mu < 0.5$ 时,其单位制冷量达到最大值;进一步提升冷流率时,单位制冷量反

而减小。相同工况下, $\mu < 0.3$ 时,修正整流器叶片角度对单位制冷量影响较小;随着冷流率逐渐增大, 30° 叶片整流器对单位制冷量提升效果最优,当 $\mu = 0.6$ 时, 30° 叶片整流器对单位制冷量提升幅度达到最大值 2.86 kJ/kg 。

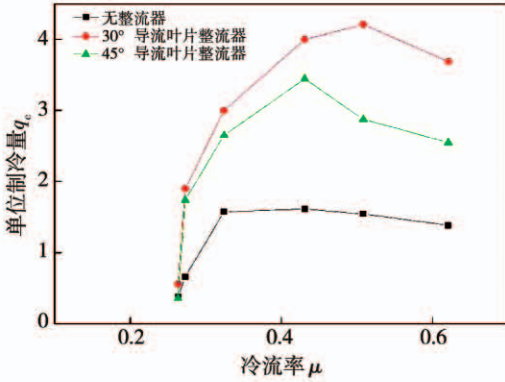


图9 压比为2时叶片角度与单位制冷量关系

Fig.9 The influence of blade angle on unit refrigeration capacity when pressure ratio is 2

当 $\varepsilon = 3$ 时,叶片整流器角度使单位制冷量增幅较小,最大提升量达 2.54 kJ/kg ,提升幅度为 43.6% 。

当 $\varepsilon = 4$ 时, $\mu < 0.35$ 时,改变叶片整流器角度对单位制冷量影响较小;但 $\mu > 0.35$ 时, 45° 整流器使制冷性能增幅最大。当 $\mu = 0.6$ 时,整流器角度为 45° 时,涡流管单位制冷量增幅最大,可达 1.55 kJ/kg ,提升幅度为 24.3% 。

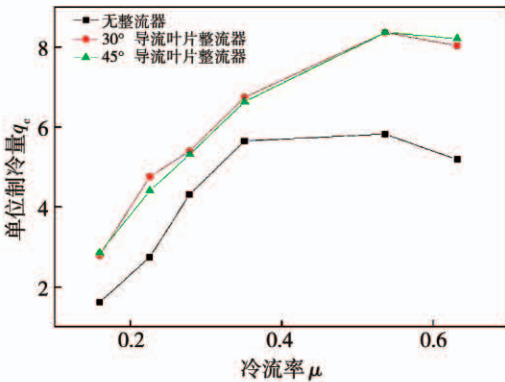


图10 压比为3时叶片角度对单位制冷量的影响

Fig.10 The influence of blade angle on unit refrigeration capacity when pressure ratio is 3

通过数据对比,可以得出结论:当压比较低时,叶片角度较小的整流器对制冷效果的影响更为显著;当压比较高时,叶片角度较大的整流器对制冷效果的影响更为显著。这是由于压比升高,气体速度方向发生改变。当压比较低时,气体切向速度与水平线夹角较小,因此减小叶片入口角度则有利于提升制冷效果。当压比较大时,气体切向速度与水平线夹角较大,因此增大叶片入口角度有利于提升制冷效果。

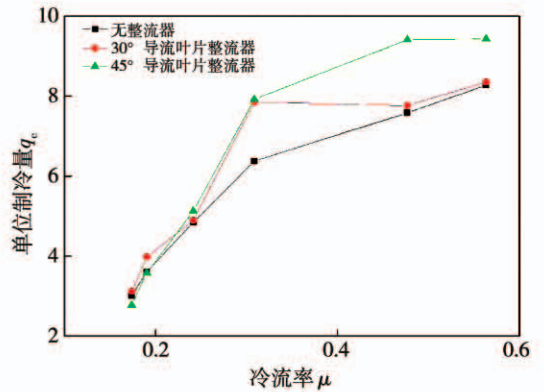


图11 压比为4时叶片角度对单位制冷量的影响

Fig.11 The influence of blade angle on unit refrigeration capacity when pressure ratio is 4

但是,假设叶片入口角度过大,叶片高度会随之增加,涡流管轴向长度增加,与整流器短距离完成整流的目的不符。因此,在增大叶片角度时,需考虑叶片高度对涡流管性能影响。

4 结论

在传统涡流管基础上,增设新型三维导流叶片整流器,对结构及操作参数开展相关实验研究,得出结论:

(1) 整流器能够提升涡流管制冷性能,减少热端管长径比。压比为2时,与不带整流器的涡流管相比,相同长径比下,安装新型整流器的涡流管制冷效应提高 3.5°C ;相同制冷效应下,安装新型整流器能够将长径比缩短一半。

(2) 当整流器只安装在热端时,涡流管制冷效果优于其只装冷端;当涡流管冷热两端同时安装整流器时,涡流管制冷效果最优。当压比为2、冷流率为0.5时,两端同时安装整流器、只安装在热端及只

安装在冷端时,涡流管单位制冷量最大分别提升 3.5、2.6 和 0.64 kJ/kg。

(3) 当压比较低时,整流器叶片入口角度较小有利于提升制冷效果。当压比较高时,叶片入口角度较大有利于提升制冷效果。当压比为 2 时,30°及 45°叶片整流器的单位制冷量增幅分别为 2.86 和 1.84 kJ/kg;当压比为 3 时,30°与 45°叶片整流器对涡流管单位制冷量增幅达 2.54 kJ/kg,提升幅度为 43.6%;当压比为 4 时,30°及 45°叶片整流器对单位制冷量增幅分别为 0.08 和 1.55 kJ/kg,提升百分比为 24.3%。

参考文献:

[1] 史珂,吉洪湖. 涡流管制冷在航空发动机上应用的实验探索 [C]//第六届动力年会论文集(下). 南京航空航天大学,2006.

SHI Ke,JI Hong-hu. Experimental exploration of the application of vortex tube cooling in aeroengine [C]//Proceedings of the Sixth Annual Power Conference (2). Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2006.

[2] 计玉帮,吴玉庭,丁雨,等. 涡流管结构参数对其性能的影响 [J]. 航空动力学报,2006(1):88-93.

JI Yu-bang,WU Yu-ting,DING Yu, et al. Influence of structural parameters of vortex tube on its performance [J]. Journal of Aeronautical Dynamics,2006(1):88-93.

[3] 张歌. 锥形双回路涡流管的内部流动与性能分析 [D]. 大连:大连理工大学,2011.

ZHANG Ge. Internal flow and performance analysis of conical double circuit vortex tube [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2011.

[4] 徐正斌. 涡流管技术在天然气领域的应用前景 [J]. 油气储运,2009,28(1):41-43,86.

XU Zheng-bin. Application prospect of vortex tube technology in natural gas field [J]. Oil and Gas Storage and Transportation,2009,28(1):41-43,86.

[5] 大连理工大学. 一种立式多管束式强制冷却涡流管冷热分离装置 [P]. 中国:CN201710664552.6,2018-02-13.

Dalian University of Technology. A vertical multi tube cluster

forced cooling vortex tube cold and heat separation device [P]. China:CN201710664552.6,2018-02-13.

[6] 胡大鹏,朱彻,代玉强,等. 一种热管式涡流管 [P]. 中国:CN201215415,2009-04-01.

HU Da-peng,ZHU Che,DAI Yu-qiang, et al. A heat pipe type vortex tube [P]. China:CN201215415,2009-04-01.

[7] 吕萍. 带排液结构的涡流管的性能研究 [D]. 大连:大连理工大学,2018.

LYU Ping. Study on the performance of vortex tube with discharge structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2018.

[8] 高彦宁. 涡流管性能研究与参数优化 [D]. 大连:大连理工大学,2007.

GAO Yan-ning. Performance research and parameter optimization of vortex tube [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2007.

[9] 李玮,刘衍平. 涡流管技术在天然气输配调压系统中的应用 [C]//华北电力大学第五届研究生学术交流年会论文集. 华北电力大学,2007:1-5.

LI Wei,LIU Yan-ping. Application of vortex tube technology in natural gas transmission, distribution and pressure regulation system [C]//Proceedings of the Fifth Annual Conference of Graduate Academic Exchange of North China Electric Power University. North China Electric Power University,2007:1-5.

[10] 徐孝轩,黄业千,亢泽涛. 川气东送分输站压力能回收利用潜力分析 [J]. 天然气技术与经济,2013,7(2):48-51,79.

XU Xiao-xuan,HUANG Ye-qian,KANG Ze-tao. Analysis of pressure energy recycling potential of east Sichuan gas transmission and distribution station [J]. Natural Gas Technology and Economy,2013,7(2):48-51,79.

[11] 张汝冰,额日其太. 天然气井口节流不冻堵涡流管研究 [J]. 石油规划设计,2017,28(2):21-24,54.

ZHANG Ru-bing,ERRI Qi-tai. Study on the vortex tube for throttling and non freezing plugging at the wellhead of natural gas [J]. Petroleum Planning and Design,2017,28(2):21-24,54.

[12] 何曙,郭建,吴玉庭,等. 整流器对涡流管能量分离性能影响的研究 [J]. 制冷学报,2006,27(1):38-41.

HE Shu,GUO Jian,WU Yu-ting, et al. Study on the effect of rectifier on the energy separation performance of vortex tube [J]. Journal of Refrigeration,2006,27(1):38-41.

(金圣迪 编辑)