文章编号：0253-4339(2012)05-0074-05
doi：10.3969/j.issn. 0253-4339. 2012. 05. 074

冷冻消融探针J-T节流制冷器降温特性的实验研究

叶 萍[1] 常兆华[1,2] 赵庆孝[1] 徐彬凯[2] 刘美静[2]

（1 上海理工大学能动学院 上海 200093；2上海导向医疗系统有限公司 上海 201318）

摘 要 通过实验测定了不同氮气预冷温度、热负荷条件下冷冻消融探针内J-T节流制冷器温度与流量。实验结果表明：冷冻消融探针工作温度随氮气预冷温度变化而变化，热负荷越大所需氮气预冷温度越低；氮气预冷温度过低会造成制冷量浪费与回热换热器换热效率降低；氮气流量随高压氮气出口温度的降低而增大，除临界区域外氮气计算流量符合测试结果。

关键词 热工学；节流制冷器；冷冻消融探针；冷冻消融

中图分类号：TB69; TB657 **文献标识码**：A

Experimental Characterization of the Joule-Thomson Cryostat of a Cryoprobe

Ye Ping[1] Chang Zhaohua[1,2] Zhao Qingxiao[1] Xu Binkai[2] Liu Meijing[2]

(1. College of Energy and Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Accutarget MediPharma Co., Ltd., Shanghai, 201318, China)

Abstract Various experiments were conducted to measure the temperature and flow rate of a Joule-Thomson cryostat corresponding to different precooling temperatures of nitrogen and thermalload. The results demonstrated that the steady-state temperature of cryoprobe changed with precooling temperature, and that the greater the thermal load, the lower the requisite precooling temperature of the nitrogen passing through the Joule-Thomson cryostat. The experiments further indicated that too low precooling temperature of nitrogen is not necessary as it may cause a great waste of nitrogen and lower heat exchanger efficiency; and the nitrogen flow rate increased as the outlet temperature of supply nitrogen decreased. The calculated results of nitrogen flow rate correlated well with the experimental measurement.

Keywords Pyrology; Joule-Thomson cryostat; Cryoprobe; Cryoablation

J-T节流制冷器是目前较成熟的一种小型制冷装置，具有结构简单、制作使用方便、体积小、无运动部件等优点，被广泛的应用于低温领域。Ng等[1]以氩气为制冷工质，通过实验研究了在96K的稳定工况下，不同压力与输出制冷量的对应关系，并建立了相应的数学模型，模型计算结果与实验数据吻合。Chua等[2]对前人的模型进行了优化，考虑了回热换热器几何形状对气体换热的影响，使实验与理论数据更加接近。Hong等[3]研究了不同初始压力条件下，J-T节流制冷器的温度与流量变化特性。目前，大多J-T节流制冷器主要用于红外、冷电子器件的冷却，对用于肿瘤冷冻消融微型J-T节流制冷器的研究国内外鲜有文献报道。传统冷却电子器件的J-T节流制冷器制冷量较小，一般不超过1W；肿瘤冷冻消融用节流制冷器制冷量大约为20~100W，系统工质流量也较传统J-T节流制冷器大的多。肿瘤冷冻消融用微型J-T节流制冷器，可单独使用(如美国Endocare公司的氩氦刀系统)，也可以与其它形式的制冷器联合，作为冷冻消融系统低温制冷机的末级使用。因此对冷冻消融用J-T节流制冷器降温特性的研究具有十分重要的意义。

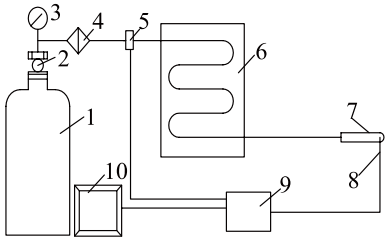
1 实验研究与分析

1.1 实验装置

冷冻消融探针J-T节流制冷器实验装置如图1所示，包括氮气供应系统，气体预冷装置，带J-T节流制冷器的冷冻消融探针和数据采集系统。氮气为99.999%高纯氮，氮气最高压力为14.5 MPa；气体预冷装置为自复叠制冷机，使用乙醇为载冷、蓄冷剂，可将氮气预冷至常温至−155℃温度区间内的任何温度。图2显示了冷冻探针内J-T节流制冷器的结构示意和温度测试点位置。经气体预冷装置预冷到一定温度的高压氮气进入探针内部J-T节流制冷器后，沿螺旋状的高压管道流动，在探针尖端的节流喷嘴处节流膨胀，氮气压力与温度降低，所获得的冷量一部分用于冷却探针冷冻消融段为冷冻消融

收稿日期：2011年9月23日

治疗提供冷量，另一部分由逆流的低温回气与螺旋翅片管进行换热、冷却高压进气，使高压氮气在比初始温度低的状态下节流，获得更低温度的低压回气，最后低压回气排入大气。如此连续不断的进行下去，探针冷冻消融段温度越来越低，直至平衡。为提高J-T节流制冷器的效率，冷冻消融探针外壳采用一体高真空绝热杜瓦，减少冷量损失；在高压进气管外加绕翅片增加换热面积，在螺旋管内放置双头封闭中空衬管提高低压回气流速，增加回热换热器的换热效率。为获得冷冻消融探针微型节流制冷器降温特性，主要是测量探针降温过程的温度与流量变化。测温采用直径0.079mm、校准精度为±0.1K的T型热电偶，分别焊接在螺旋翅片管的进口与出口端以及探针冷冻消融段的外侧中间部分，测量J-T节流制冷器的高压氮气进口温度(T_{hi})、高压氮气出口温度(T_{ho})和冷冻消融探针工作温度(T_P)，为避免低压氮气回气对测温的影响，探针内热电偶均涂环氧胶保护。测流量采用Line-TechM20气体质量流量计，测量单位为标准公升每分钟流量值(Standard Liter Per Minute，SLPM)。实验中的温度与流量模拟信号由agilent HP34970A数据采集仪获得，所有实验测量值的采样频率为1次/秒，并存储于计算机中。



1 高压氮气瓶 2 压力调节阀 3 压力表 4 分子筛过滤器 5 气体流量计 6 气体预冷装置 7 节流制冷器 8 热电偶 9 数据采集仪 10 计算机

图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

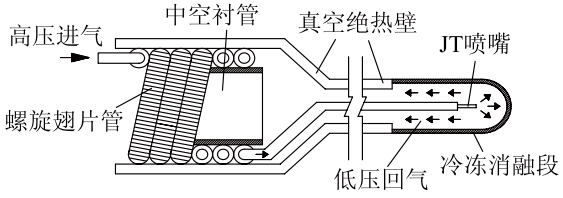


图2 J-T节流制冷器示意图

Fig.2 Schematic of J-T cooler

1.2 实验设计

为了分析J-T节流制冷器的降温特性，需要确定的初始实验参数主要有高压氮气进口温度(T_{hi})、出口温度(T_{ho})、探针工作温度(T_P)和氮气质量流量值(SLPM)，取系统稳定后的5次实验数值的平均值为最终测量值。

热负荷、预冷温度的影响：实验装置放置于26℃恒温室内，冷冻消融探针分别垂直放入10℃恒温水浴或用绝热材料包裹，模拟热负荷与空载。前期实验证实8MPa为氮气经济有效工作压力[4]，调节压力阀，使氮气压力恒定为8MPa。改变气体预冷装置内乙醇的温度，使氮气在进入J-T节流制冷器前分别从室温降至不同温度，从而获得不同热负荷、预冷温度条件下，各点温度与流量随时间的变化值及系统稳定后探针工作温度、流量与预冷温度的对应关系。

流量变化关系：经过回热换热器降温后的高压气体的节流膨胀是借助于节流元件实现的，冷冻消融探针内的节流元件是J-T槽，由于长度很短可以将J-T槽当成喷管进行计算，T_{ho}可认为是节流前的氮气温度。对于J-T节流制冷器，气体最大流量对应的临界压力始终大于回气压力，所以通过J-T槽的最大流量就等于临界压力下的气体流量$\dot{m}$，即

$$\dot{m} = F\left(\frac{2}{k+2}\right)^{\frac{1}{k+1}}\sqrt{\frac{2kp_1\rho_1}{k+1}} \tag{1}$$

式(1)中：F为J-T槽出口处的横截面积；p_1为节流前的气体压力；ρ_1为气体节流前的密度；k为气体的绝热指数。由于系统工作压力为8MPa，而进入J-T槽的氮气压力无法准确获得，将J-T槽直径为0.22mm、节流前氮气压力5~8MPa工况下，不同温度所对应的氮气密度代入公式(1)，可计算出不同压力、温度所对应的氮气流量。待系统稳定后逐渐降低氮气的预冷温度，记录下空载与10℃恒温水浴条件下，T_{ho}与所对应的氮气流量值。

回热换热器的换热效率：冷冻消融探针内的换热相当复杂，随着氮气预冷温度的降低，换热器内流量会逐渐变大，冷热流体侧均可能出现气液两相流，且低压流体侧的进出口温度容易受周围环境影响难以准确获得。回热换热器的热负荷可用式(2)计算，即

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_{hi} - h_{ho}) \tag{2}$$

可以认为不同工况下换热器的换热效率与高压侧氮气的进出口温度差有一定对应关系。

2 实验结果与分析

不同负载与预冷温度条件下，温度与流量随时间变化曲线如图3~8所示。不同预冷温度、热负荷与冷冻消融探针稳态工作温度、流量的对应关

系。在肿瘤冷冻消融手术中，探针工作温度及其降温速率是两个非常重要的评价指标[5]。探针工作温度越低，单针消融范围越大，降温速率越快，越容易形成胞内冰晶，导致肿瘤细胞直接死亡。由表1与图3~8可知，降低氮气预冷温度可以使探针获得更低的温度、更快的降温速率。冷冻消融探针的理论制冷量等同于一定温度氮气从大气压下等温压缩到节流前的高压所需用的最小压缩功，即为氮气作节流膨胀产生的理论制冷量。氮气的等焓节流效应总是小于其绝热节流效应，但随着温度的降低，氮气的等焓膨胀系数将增大，并且趋近绝热膨胀系数。等焓膨胀系数与等熵膨胀系数的关系可写成：

$$\frac{\mu_H}{\mu_S}=1-\frac{v}{T}\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_P \tag{3}$$

表1 不同预冷温度、热负荷与冷冻消融探针稳态工作温度、流量的对应关系

Tab.1 Comparison of cryoprobe steady-state temperature and flow rate under different precooling temperature and thermal load

预冷温度/℃	10℃恒温水浴		空载	
	探针工作温度/℃	氮气流量(SLPM)	探针工作温度/℃	氮气流量(SLPM)
−20	−15.82	19.13	−87.39	18.24
−40	−20.15	19.95	−95.52	19.34
−60	−32.5	21.2	−129.28	24.79
−75	−41.12	22.49	−150.56	28.18
−100	−60.28	25.55	−151.88	32.74
−115	−81.71	30.3	−150.6	37.6
−130	−141.02	41.23	−150.6	47.31
−140	−142.92	58.93	−149.74	55.21
−150	−143.87	65.43	−152.64	67.52

氮气预冷到接近其沸点进行节流膨胀时，可以获得接近膨胀机等熵膨胀的热力学效率。所以降低氮气的预冷温度，不仅可以增加探针的理论制冷量，而且可以提高系统的热力学效率。但氮气预冷温度并非越低越好，当氮气预冷到某一特定温度时，如表1所示，空载时预冷温度为−75℃、10℃恒温水浴中预冷温度为−130℃，即使预冷温度进一步降低，探针工作温度也未有明显的变化，而氮气流量有显著增加而造成制冷量的浪费。这是因为冷冻消融探针所用的节流元件J-T槽为固定孔型膨胀喷嘴，其主要缺点是气体质量流率的变化与要求制冷量相反。在进行冷冻消融手术初期，应有较高的质量流率来产生最大的制冷效应，使探针快速预冷到操作条件，并抑制消融区的血液流动与组织代谢，但此时由于消融区与探针的温度高，氮气密度较低，质量流量也较小，在冷冻消融手术后期，消融区的血液流动与组织代谢被完全抑制，探针内换热器冷端变冷了，所需的制冷量比初期少的多，但此时质量流量较大，会提供过多的制冷量而造成浪费。由于使用的冷冻消融探针不能适应热负荷的变化，按最大热负荷设计的J-T槽，在冷冻消融范围较小、低热负荷下工作时，J-T制冷器提供的气体质量流率将会过大，造成制冷量的浪费，此时适当提高氮气预冷温度(或降低气体压力)，可减少氮气的消耗量，避免能量浪费，同时减少氮气消耗也能减轻气体预冷装置的负荷与患者经济负担。

气体流量计在较低温下测量误差较大，所以放置于实验装置常温段，流量计与J-T节流制冷器有连接管路，每次实验初期均有数秒钟的充气过程，待管路压力平衡后气体流量计测量氮气流量即等同于J-T节流制冷器的实际流量。J-T节流制冷器的氮气流量与进入J-T槽的氮气压力、温度、J-T槽出口处的横截面积有关，所以在压力、面积不变的情况下，随着氮气预冷温度的降低，T_{ho}变化明显，流量波动越大、所需平衡时间更长，如图3~8所示。由公式(1)可知，通过J-T槽的氮气流量随着节流前氮气温度的降低、压力的增加而变大。如图9所示，压力不变节流前氮气温度较高时，氮气计算流量的变化率较低，在温度为−140℃附近区域，氮气流量有大的突变，原因是氮的临界点温度为126.192K、压力为3.3958MPa，节流前的氮气工况接近临界点，氮气密度、比热容等状态参数变化大，这也是5MPa氮气比8MPa氮气在近临界区域流量变化更大的根本原因。在10℃恒温水浴与空载条件下，两条实测氮气流量随T_{ho}的变化曲线重合性好，说明T_{ho}能很好的反应氮气节流前温度，不受载荷条件的影响。在氮气节流前温度较高时，实测氮气流量变化曲线与进气压力5MPa工况氮气计算流量变化曲线相似度高，这表明氮气供应压力为8MPa时，流至J-T槽的氮气压损大约为3MPa，加大螺旋翅片管的长度虽然可以增大氮气的换热面积，提高回热换热器的换热效率，但是也增加了氮气压损，从而降低了氮气节流制冷量，当T_{ho}低于−130℃时，实测流量与5MPa工况氮气计算流量差值突然变大，达到氮临界温度时两者差值超过了20L/min，这说明在近临界区域实际气体与理想气体的偏差很大，公式(2)不能准确计算氮气流量。由上文叙述可知，使氮气在接近临界温度节流能使冷冻消融探针获得实际临床所需的制冷量，实验准确测量近临界区域氮气流量变化关系意义重大。

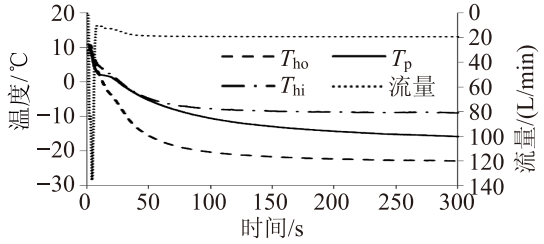


图3 −20℃恒温水浴时温度流量变化曲线

Fig.3 Relation of the temperature and flow rate in thermostatic waterbath and at −20℃ precooling temperature

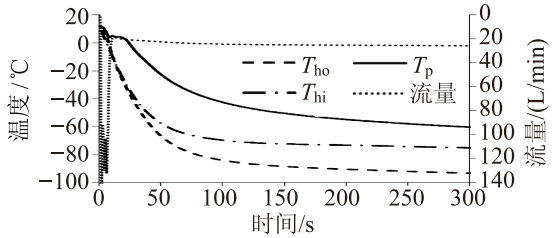


图4 −100℃恒温水浴时温度流量变化曲线

Fig.4 Relation of the temperature and flow rate in thermostatic waterbath and at −100℃ precooling temperature

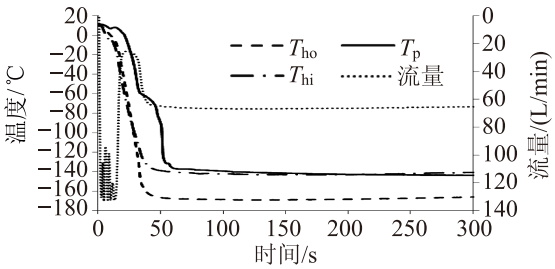


图5 −150℃恒温水浴时温度流量变化曲线

Fig.5 Relation of the temperature and flow rate in thermostatic waterbath and at −150℃ precooling temperature

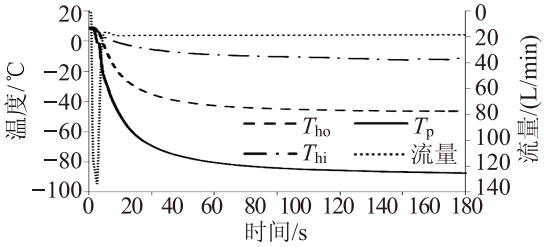


图6 −20℃空载时温度流量变化曲线

Fig.6 Relation of the temperature and flow rate without heat load and at −20℃ precooling temperature

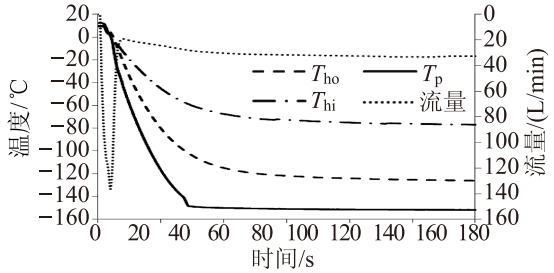


图7 −100℃空载时温度流量变化曲线

Fig.7 Relation of the temperature and flow rate without heat load and at −100℃ precooling temperature

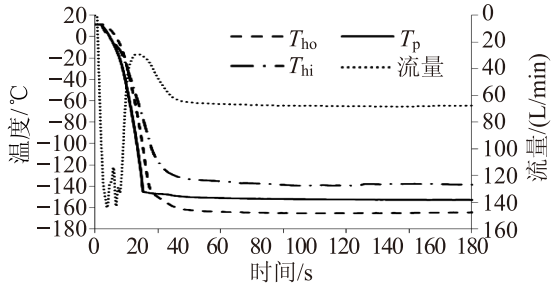


图8 −150℃空载时温度流量变化曲线

Fig.8 Relation of the temperature and flow rate without heat load and at −150℃ precooling temperature

在供应压力恒定的情况下，冷冻消融探针内氮气流量与高压氮气出口温度T_{ho}有关，探针制冷量也随着T_{ho}的降低而增大。T_{ho}值的大小即高压侧进出口温度差在回热换热器一定的情况下，与氮气预冷温度和探针热负荷有关，如图10所示。在预冷温度较低时，空载比有热负荷时高压侧进出口温度差高了几十度，当预冷温度低于−100℃时，两者的差距越来越小，直至接近于零。这是因为预冷温度较高时，氮气流量较小，探针制冷量较低，探针负荷使得节流后的气体升高，低压回气无法充分冷却高压进气；预冷温度降低，流量变大，氮气节流所产生的冷量仅有一小部分用于平衡热负荷，高压氮气在回热器的进出口温度差也越来越大，所以热负荷越小，探针工作段越容易达到极限温度。当预冷温度进一步降至低于−130℃时，高压氮气进出口温差不升反降，此时节流所产生的制冷量远大于热负荷，有无热负荷的区别不再明显，大量制冷量被浪费，回热换热器换热效率变低，这也是氮气预冷温度并非越低越好的原因之一。在实际肿瘤冷冻消融过程中，不同肿瘤因血液灌注率、组织代谢热、大小不同，所产生的热负荷也不尽相同，即时同一肿瘤在冷冻过程中所需冷量也有变化，所以冷冻消融探针内回热换热器的柔性应尽可能的大，以适应不同条件下的热负荷。

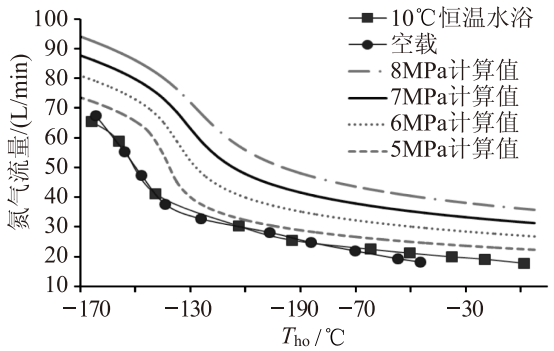


图9 高压氮气出口流量实验测定结果与计算结果对比

Fig.9 Comparison of high pressure nitrogen exit flow rate with calculated nitrogen flow rate

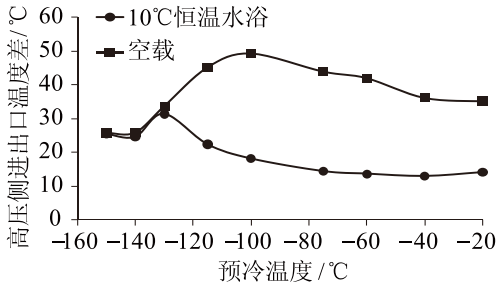


图10 预冷温度与高压氮气温度差变化曲线

Fig.10 Relation between supply nitrogen temperature difference and precooling temperature

3 结论

通过对不同氮气预冷温度、热负荷条件下冷冻消融探针内J-T节流制冷器温度与流量的测定，我们得出了以下结论：

1）降低氮气预冷温度可以使冷冻消融探针获得更低的探针工作温度，热负荷越大所需的氮气预冷温度越低，但过低的氮气预冷温度会因J-T节流制冷器提供的气体质量流率过大而造成制冷工质和制冷量的浪费；

2）氮气流量随高压氮气出口温度的降低而增大，在节流前氮气温度较高时氮气计算流量值符合实验测定结果，节流前氮气工况近临界区域时，计算结果不再可靠；

3）氮气预冷温度过低会影响冷冻消融探针内回热换热器换热效果，回热换热器应有较大柔性，以适应不同热负荷条件。

本文受上海市研究生创新基金项目（JWCXSL1021）及2010年上海联盟计划（LM1037）资助.（The project was supported by the Innovation Fund Project For Graduate Student of Shanghai（No.JWCXSL1021）and the Difficult Ploblem Foundation of Union Plan（No.LM1037）.）

参考文献

[1] Ng K C, Xue H, Wang J B. Experimental and numerical study on a miniature Joule-Thomson cooler for steady-state characteristics[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45（3）:609-618.

[2] Chua H T, Wang X L, Teo H Y. A numerical study of the Hampson-type miniature Joule-Thomson cryocooler[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49（3-4）: 582-593.

[3] Hong Y J, Park S J, Kim H B, et al. The cool-down characteristics of a miniature Joule–Thomson refrigerator [J].Cryogenics, 2006, 46（5）:391-395.

[4] 赵庆孝, 杨鹏飞, 常兆华.新型超低温冷冻医疗系统的设计与实验研究[J].制冷学报, 2009, 30（6）:57-60.（Zhao Qingxiao, Yang Pengfei, Chang Zhaohua. Design and Experiment of New Ultra-cryoablation System [J].Journal of Refrigeration, 2009, 30（6）:57-60.）

[5] Han B, Swanlund D J，Bischof J C. Cryoinjury of MCF-7 human breast cancer cells and inhibition of post-thaw recovery using TNF-alpha[J]. Technol Cancer Res Treat, 2007, 6（6）:625-634.

作者简介

叶萍，男（1981－ ），博士研究生，上海理工大学能动学院制冷与低温研究所，13774376966，E-mail：iamyeping@163.com。研究方向：低温生物医学相关器械和方法学研究。

About the author

Ye Ping（1981－ ）, male, PHD Candidate, Institute of Refrigeration and Cryogenics, College of Energy and Power Engineering，Shanghai University of Science and Technology, 13774376966, E-mail:iamyeping@163.com. Research fields: cryobiology and cryogenic medical instrument.

制 冷 学 报
（1979年创刊，双月刊）
2012年10月16日 第33卷 第5期

Journal of Refrigeration
(Started in 1979, Bimonthly)
2012-10 -16 Vol.33 No.5

主管单位：中国科学技术协会 | **Responsible Institution:** China Association for Science and Technology
主办单位：中国制冷学会 | **Sponser:** Chinese Association of Refrigeration
出版单位：《制冷学报》编辑部 | **Published by:** “Journal of Refrigeration” Editorial Department
主　　编：吴元炜 | **Chief Editor:** Wu Yuanwei
印刷单位：河北欣航测绘院印刷厂 | **Printing by:** Printing plant of Hebei Xinhang Surveying and Mapping Institute
发　　行：中国制冷学会秘书处 | **Distributed by:** Chinese Association of Refrigeration

ISSN0253-4339
CN11-2182/TB
境内定价：人民币10元　境外定价：美元8元