

中国工程热物理学会

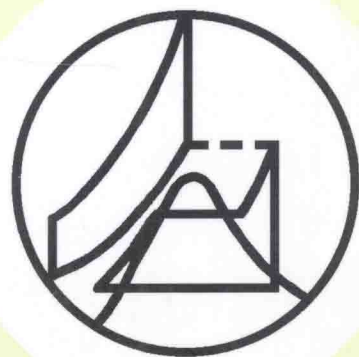
工程热力学与能源利用学术会议

论文集（下册）

二〇〇六

重庆

中国工程热物理学会编



工程热力学与能源利用学术会议论文集（下册）目录

三. 制冷循环（续）

- 061077 燃气和电驱动热声发动机的对比研究.....
.....孙大明 邱利民 董绍鹏 郭珊芝 赵 亮(509)
- 061078 一种新型冰浆生成器的性能研究.....张学军 邱利民 张 鹏(514)
- 061079 高精度混合物汽液相平衡实验系统研究.....
.....韩晓红 陈光明 乔晓刚 崔晓龙 王 勤(518)
- 061081 磁场条件下氨水降膜吸收的模型研究.....牛晓峰 杜 垲 杜顺祥(525)
- 061082 填料型绝热吸收器传质过程影响因素实验研究.....
.....王 林 陈光明 王 勤(532)
- 061084 微型冷热电联供系统优化运行研究.....孔祥强 李 瑛 王如竹(538)
- 061086 两种混合动力燃气热泵系统的性能比较.....李应林 张小松 蔡 亮(543)
- 061087 地源热泵热水装置及其初步实验研究.....李舒宏 单 奎 张小松(550)
- 061092 单效溴化锂吸收式制冷机的优化设计.....
.....唐 聪 崔晓钰 黄彬彬 石景祯(556)
- 061093 单效溴化锂吸收式制冷机组的稳态模型.....
.....唐 聪 崔晓钰 黄彬彬 石景祯(562)
- 061096 微型涡旋压缩机泄漏的理论分析.....陈 荣 王 文(568)
- 061106 水合物蓄冷过程影响因素的实验研究.....
.....梁德青 谢应明 樊栓狮 李栋梁 杨向阳 赵翔勇(573)
- 061112 平板降膜吸收的数值模拟.....彭潺潺 高洪涛(580)
- 061116 压缩空气蓄冷系统循环形式的选择.....王亚林 陈光明 王 勤(586)
- 061118 小型全热回收新风机组模拟及性能分析.....陈 林 李 震(594)
- 051121 小孔型脉管制冷机的二维数值研究...赵春风 何雅玲 黄 竞 刘迎文(602)
- 061123 热声系统中振荡滞后特性的试验研究.....
.....刘迎文 何雅玲 黄 竞 沈 超(607)
- 061124 混合工质热声发动机热力特性的试验研究.....
.....刘迎文 何雅玲 黄 竞 沈 超(612)
- 061130 溴化锂吸收式制冷机性能特性研究（单效型循环焓解析）.....
.....王 晓 张宝怀(617)
- 061131 三种固体转轮除湿系统的模拟比较...葛天舒 李 勇 王如竹 代彦军(622)

061132	太阳能液体除湿直接蒸发冷却装置及其全年运行调节方案	熊珍琴 王如竹 代彦军 梅 林(629)
061133	直膨式太阳能热泵热水器过热度 PI 控制的实现	李郁武 王如竹 王泰华 吴静怡 许煜雄(634)
061137	低温可变容积空间温场特性分析	孙培杰 吴静怡 徐 烈(641)
061138	GAX 循环的能量耦合改进	邓文宇 郑丹星(646)
061142	理论制冷循环绝热压缩过程的改进计算	王怀信 马利敏 王继霄(651)
061147	热泵热水器安全稳定性研究	江明旒 吴静怡 郭俊杰 许煜雄 王如竹(658)
061148	16.1 K 的高频两级脉冲管制冷机的实验研究	赵密广 杨鲁伟 梁惊涛(663)
061149	空气源热泵热水器蒸发器匹配特性研究	郭俊杰 吴静怡 江明旒 王如竹(668)
061151	主动回热式室温磁制冷机性能实验研究	姚冠辉 吴剑峰 公茂琼(673)
061153	主动式磁回热制冷机的磁力及磁功分析	栗 鹏 余国瑶 公茂琼 姚冠辉 吴剑峰(677)
061162	HFC134a/矿物油/纳米 TiO_2 粒子体系的冰箱实验研究	维翰林 毕胜山 史 琳(683)
061163	零 ODP 的中高温热泵工质 HTRO4 实验研究	咎 成 史 琳(690)
061169	一种基于弹性膜片的脉管制冷机	胡剑英 罗二仓 戴 巍 吴张华(696)
061170	通道轮式新风换气机结霜规律	高 波 罗二仓 程志刚 董重成(702)
061171	热声斯特林制冷机与脉管型双活塞斯特林制冷机热力性能的比较	吴张华 罗二仓 戴 巍 李山峰(709)
061172	油润滑压缩机驱动脉管型双活塞斯特林制冷机的实验研究	吴张华 罗二仓 李山峰 戴 巍(715)
061173	室温行波热声制冷机热缓冲管实验研究	余国瑶 戴 巍 罗二仓 朱尚龙 吴张华(721)
061176	小型太阳能吸收式制冷循环的数值模拟	李新梅(726)
061184	聚乙二醇/二氧化硅复合相变蓄热材料的研究	杨晓西 王维龙 方玉堂 丁 静(732)

四. 工质热物性

061011	二甲基醚液滴超临界蒸发的数值模拟	刘 斐 魏明锐 赵卫东 孔 亮(738)
--------	------------------	----------------------

061019	位能函数的研究及物质过冷液密度的计算	童景山(745)
061020	液态金属工质热物理性质的研究	童景山(750)
061021	高压下液氮的 P-V-T 关系	童景山(755)
061032	覆盖亚临界到临界区的制冷工质物性快速算法 1. 计算方法	丁国良 吴志刚(760)
061033	覆盖亚临界到临界区的制冷工质物性快速算法 2. R410A 公式	丁国良 吴志刚(766)
061091	高温高压下湿空气的焓和熵计算	杨智勇 刘朝 刘娟芳(771)
061095	倾斜管式液体粘度测量方法理论及实验研究	何茂刚 张颖 王小飞 钟秋 李惠珍(778)
061100	二元混合工质气液相平衡的实验和理论研究	陈建新 陈则韶 胡芑(783)
061101	含氢氟烃、烷烃的二元混合物的交互作用系数研究	陈建新 陈则韶 胡芑(789)
061102	混合工质蒸发潜热的推算研究	陈建新 陈则韶 胡芑(797)
061111	界面活性剂的混合添加对溴化锂溶液表面张力及吸收水蒸气的影响	高洪涛(803)
061139	微量量热法测定生物柴油和菜籽油的比热容	武向红 郑丹星 何信菊 荆树宏(809)
061141	利用两种模型预测多孔介质中甲烷水合物分解平衡条件	李小森 张郁 冯自平 唐良广 李刚 梁德清(815)
061143	工质循环性能对比实验评价方法的改进探讨	王怀信 马利敏 王继霄(822)
061145	三种中高温热泵工质的循环性能	马利敏 王怀信 王继霄(830)
061152	R170+R23 系的气液液相平衡研究	张宇 公茂琼 刘加永 朱洪波 吴剑峰(836)
061154	CF ₄ (R14)饱和蒸汽压的实验研究	朱洪波 公茂琼 张宇 吴剑峰(842)
061155	气固两相介质音速研究	赵良举 李斌 高虹 李德胜 袁悦祥 曾丹苓(848)
061157	R12 在异三十烷中溶解度的实验测量	洪辉 公茂琼 吴剑峰(854)
061164	纳米颗粒在制冷剂中的分散特性研究	毕胜山 史琳 王磊(859)
061165	基于基团贡献法的 HFC+HC 混合物气液相平衡性质预测	侯树鑫 段远源(866)
061166	$p_v T(x)$ 实验中的吸附效应研究	冯晓娟 段远源(874)

061167	一般流体及含超临界组元混合物表面张力的密度梯度理论模型·····	
	·····	闵 琪 林 鸿 段远源 宋艺新(880)
061168	含卤代烃二元混合物气液相平衡研究中的混合规则评价·····	
	·····	方 锦 段远源 侯树鑫 宋艺新(886)
061177	振动弦粘度计研制及 MTBE 饱和液相粘度实验研究·····	
	·····	徐智渊 孟现刚 吴江涛 刘志刚(893)
061178	MTBE 饱和液相导热系数的实验研究·····	王玉刚 薛征欣 吴江涛 刘志刚(901)
061179	碳酸二乙酯饱和液相导热系数的实验研究·····	宋琳丰 吴江涛 刘志刚(908)

五. 环境及其它

061004	计算流体力学在过程模拟中的应用·····	徐 祥 肖云汉(912)
061012	Cz 结构浅池内硅熔体热对流的分岔特性·····	
	·····	李友荣 彭 岚 吴双应 曾丹苓 今石宣之(918)
061024	火电厂脱硫探讨·····	马一太 王洪利(923)
061031	高压自然循环干熄焦锅炉受热面热力计算分析·····	
	·····	程竹静 郁鸿凌 李国俊 刘幼幼 黄海苏 赵再三 惠建明 瞿永康(929)
061065	储液器对低温回路热管性能的影响·····	
	·····	王美芬 靖 巍 杨鲁伟 蔡京辉 梁惊涛(934)
061080	具有轴向密封机构的涡旋压缩机实验研究·····	
	·····	赵远扬 李连生 卜高选 杨启超 束鹏程(939)
061094	数字全息干涉法流体质扩散系数实验研究·····	
	·····	何茂刚 刘 逊 张 颖 刘志刚(944)
061104	运行列车车厢内火灾烟气流动的数值模拟·····	
	·····	彭 岚 刘采峰 刘娟芳 刘 朝(950)
061108	花生壳的干燥热解分析·····	王洪志 刘 朝(957)
061125	零马赫数可压缩流动压力修正算法研究·····	
	·····	李 茹 何雅玲 黄 竞 屈治国 王 勇(963)
061128	零排放燃气轮机的空气动力学特性·····	
	·····	单晓明 S.A.Sjolander S.K.Roberts(968)
061136	天然气管道破裂危险域的定量研究·····	赖建波 杨 昭 韩金丽(978)
061156	贫信息灰色预测模型研究及应用·····	钱 瑾 王培红 楼可炜(984)
061182	液体蒸发率及表面温度测量·····	肖 宁 赵小明 陈 民 刘志刚(991)
061183	蓖麻油与二甲醚临界互溶温度实验测量·····	赵小明 张立胜 刘志刚(996)

燃气和电驱动热声发动机的对比研究

孙大明, 邱利民, 董绍鹏, 郭珊芝, 赵亮
(浙江大学制冷与低温研究所 浙江杭州 310027)

孙大明: sundaming@zju.edu.cn 0571-87952446 (o)

摘要 热声发动机利用热声效应把热能高效转化为声功, 系统中不存在任何机械运动部件, 应用前景光明。热声发动机的一个突出优点是直接采用热能驱动, 可以提高低温位热能的品位。在原有电驱动热声发动机的基础上, 制作了一台燃气驱动行波热声发动机, 以氦气为工质, 充气压力为 1.2MPa 时, 获得了 1.34 的最大压比。对电驱动和燃气驱动两种加热方式作了对比研究, 得到了燃气驱动条件下热声发动机的起振状态、加热功率和直流抑制的规律。

关键字 热声发动机 燃气驱动 Gedeon 直流

1. 引言

热声热机是一种全新的动力机械, 它消除了所有机械运动部件, 采用氦气、惰性气体及其混合物为工质, 具有结构简单、热能驱动、可靠性高、寿命长和工质环保等优点。目前行波热声发动机已经达到 30% 的热功转换效率, 相对卡诺效率约为 42%^[1]。由热声发动机驱动的热声制冷系统, 在电子器件冷却、天然气液化、石油伴生气分离和日常生活制冷方面具有应用前景。

热声发动机的一个突出优点是直接以热能驱动, 直接提升热能的品位, 从而摆脱了对电能的依赖, 可以工作在电力缺乏同时热能丰富的边远地区。这一特点使它在天然气液化和石油伴生气分离方面具有特殊优势。1994 年, 美国 Cryenco 公司与洛斯—阿洛莫斯实验室以及国家标准与技术研究院合作进行以燃烧天然气作为驱动源的热声驱动脉管制冷机液化天然气开发项目。次年, 美国能源部通过国家能源技术实验室参与资助该项目。1997 年, 该热声天然气液化系统建造完成, 系统中的热声发动机在工作压力为 3.0MPa (He), 频率为 40Hz 时, 产生声功 17kW, 效率达 25%。热声发动机将 12 KW 声功传递给脉管制冷机, 在 130 K 温位有 2 KW 左右的制冷量, 相对卡诺效率为 23% (以发动机传入的声功计算), 液化能力为 530 L/d。该样机可以通过燃烧 60% 的天然气液化其余 40% 的天然气^[2, 3]。

浙江大学制冷与低温研究所从 1996 年从事电热驱动热声发动机的研究, 先后成功研制出驻波热声发动机和行波热声发动机^[4-6]。为充分发挥热声发动机的优势, 把热声制冷系统推向实际应用, 从 2005 年我们开始对燃气驱动的热声热机进行了研究, 本文

*受国家自然科学基金重点项目 (50536040), 霍英东基金 (94013) 资助的课题。

将介绍部分研究结果。

2. 试验装置

本文所述燃气驱动行波热声发动机是在原电驱动热声发动机的基础上改制成的，为使两种驱动方式具有可比性，除更换加热器外，其它部件均未作大改动，表 1 给出了两种加热器的比较。电驱动热声发动机的结构在文献[4, 5]中作了介绍。如图 1 所示，位置 6 处为燃气加热器，这是一个交叉流换热器，内流道是工质气体通道，外侧与之在空间上相垂直的是高温烟气通道，高温烟气来自一台燃烧器。图 2 是燃烧器的实物照片，它适用于天然气和液化石油气等。该燃烧器的输入电源为 230 V (50 Hz)，其电机功率为 0.11 kW，重 12 kg。空气和燃气在燃烧头内混合，通过调节燃烧空气和燃烧头，可以获得最佳燃烧参数。该型号燃烧器的功率调节范围为 30-56 kW，这对中小型热声发动机系统来说是充足的。

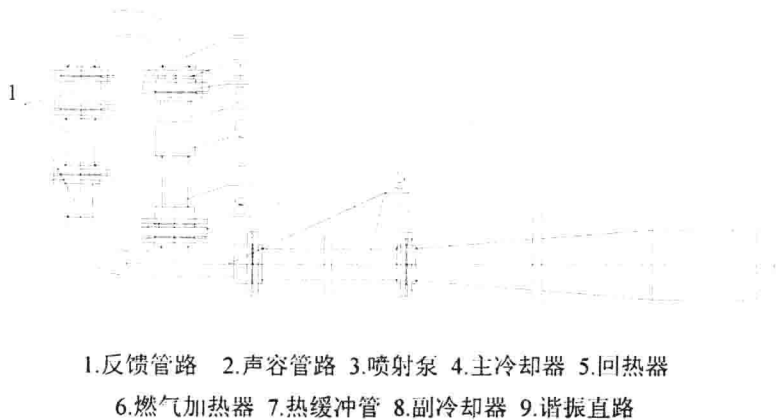


图 1 燃气驱动行波热声发动机结构简图

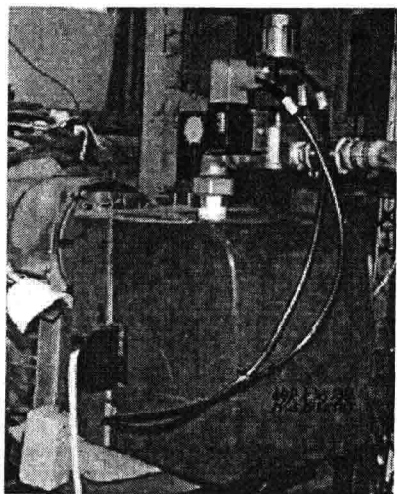


图 2 燃烧器的实物照片

表 1 两种加热器的比较

热源种类	结构型式	材料	加工方式	工质侧换热面积 (m ²)	最大加热功率 (W)
电能	交叉流	黄铜+不锈钢	线切割	0.1018	6000
燃气	交叉流	316L 不锈钢	线切割	0.215	>5600

在进行加热器的设计时,以天然气为标准。但和液化石油气相比,天然气的热值较小。达到相同的加热功率必将消耗更多的天然气。为提高效率,降低成本,我们采用液化石油气代替天然气。本文选用了杭州市燃气集团提供的 50 公斤装液化石油气。在标准状况下,其主要成分为丙烷(C_3H_8)和丁烷(C_4H_{10}),体积含量分别为 75%和 25%。气体燃料的燃烧值有高热值和低热值两种,表 2 给出了天然气与液化石油气的成分及物性参数。

表 2 两种燃气参数对比表(干, 0℃, 101.3kPa) (GB/T13611-92)

燃气种类		成分, %(体积)	高热值 MJ/ m ³	低热值 MJ/ m ³	相对密度 d (空气取 1)
天然气	4T (0)	CH ₄ 41% 空气 59%	16.3	—	0.8175
液化石油气	20Y(0)	C ₃ H ₈ 75% C ₄ H ₁₀ 25%	109.4	100.8	1.686 3

3. 试验结果

振幅的大小标志着压力振动的强弱。在系统结构一定的条件下,振幅与工质种类、充气压力和加热温度等因素有密切关系。如果压比相同,充气压力的大小决定振幅的大小。充气压力越高,平均压力越大,振幅也就越大。图 3 给出不同充气压力下系统中最大压力振幅变化情况,如图所示在充气压力分别为 1.2 MPa, 1.5 MPa, 1.8 MPa, 2.1 MPa 和 2.4 MPa 的情况下,起振压力振幅依次为 0.065 MPa, 0.1 MPa, 0.141 MPa, 0.18 MPa 和 0.226 MPa。与电驱动方式不同的是,由于燃气加热功率较大,因此起振温度较高,相应的起振振幅也远大于前者。另外,也可以看到,在小充气压力下,压力振幅从起振后一直增大,而在大充气压力下,起振后压力振幅先是回落,然后继续增大,这是因为起振时振荡强度过高,热声效应消耗了起振前累积的加热量,其后不足以支撑这么强的压力振荡,直到一段时间后加热温度升高到一定水平,压力振幅再增大。

采用无量纲温度来表示热缓冲管壁面的温度分布。图 4 和图 5 分别给出采用喷射泵和橡胶膜抑制直流时无量纲温度的变化。以起振前的曲线作为基准线,两组曲线在压比同为 1.12 时,采用喷射泵的温度分布曲线比采用弹性膜的温度分布曲线更靠近基准线,几乎与之完全重合。然而,随着压比上升,采用喷射泵的温度分布曲线与基准线的偏离

程度明显大于采用弹性膜的温度曲线与基准线的偏离程度。因此采用现有喷射泵在压比较小时，对 Gedeon 直流的抑制效果较为理想，在压比较大时 Gedeon 直流的影响逐渐显现。由于燃气加热功率大，加热温度高，所以热缓冲管上的温度显著低于加热温度，导致曲线的凸起和下凹不太明显，这一点与电加热时有很大不同，但仍可以看到图 4 中的温度分布线在压比大于 1.12 后上凸，表明存在与声功流同向的 Gedeon 流，而图 5 中不明显^[7]。

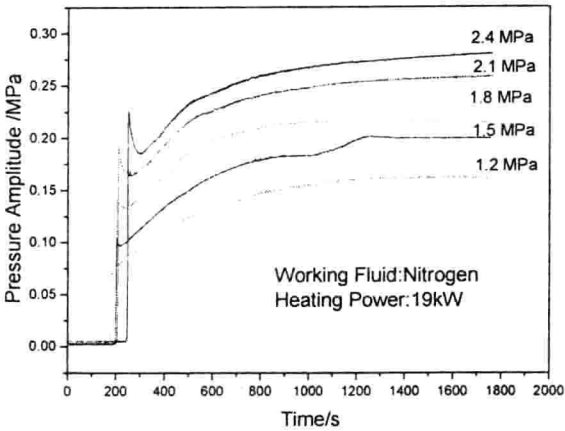


图 3 燃气驱动时不同充气压力下振幅随时间变化图

图 6 给出在工质为氮气，充气压力同为 1.2MPa 时，系统分别采用弹性膜片完全抑制和采用喷射泵部分抑制 Gedeon 直流时压比随时间的变化。在采用弹性膜片后，系统起振压比比采用喷射泵时低。但起振后，由于直流得到更好的抑制，回热器轴向温度分布得到改善，同时有效减小了热损失，所以发动机具有更好的热效率和驱动性能，这一点可以由压比体现出来，最大压比达到 1.34。

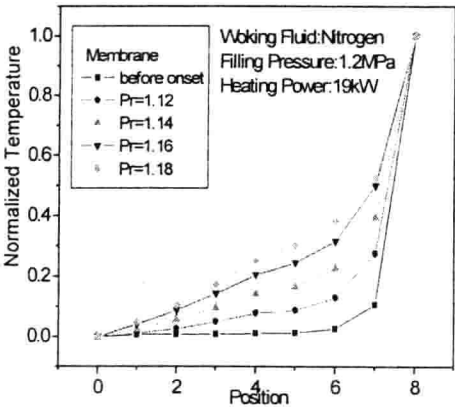
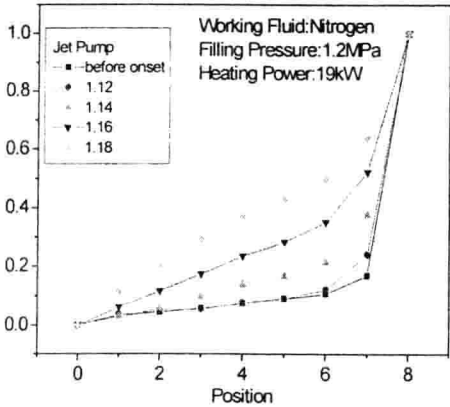


图 4 采用喷射泵抑制直流时热缓冲管轴向温度分布 图 5.采用膜片抑制直流时热缓冲管轴向温度分布

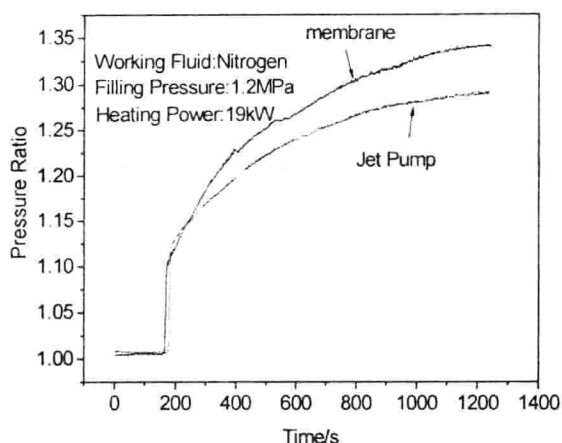


图 6 燃气驱动时采用弹性膜片与喷射泵抑制直流时的压比图

4. 结论

燃气驱动型热声发动机可以充分发挥热声发动机直接以热能驱动的优点。本文在原有电驱动热声发动机的基础上,研制了一台燃气驱动型热声发动机,并进行了初步试验研究。与电驱动型式相比,燃气驱动的外热源热流密度更大,可以提供不小于 30 KW 的总加热功率,因此在加热器材质能够承受的条件下,能够达到更高的加热温度,压比也相应提高,试验中在充气压力为 1.2 MPa 时得到 1.34 的最高压比。此外,对比研究发现,采用不同直流抑制措施时,热缓冲管轴向的无量纲温度分布与电驱动时有一定改变。

需要指出的是,在采用燃气驱动时,特别是加热温度较高时,排气温度相对较高,会造成热量的大量浪费,从而降低系统的热效率,所以在实际应用中要考虑这一点。

参考文献

1. Backhaus, S. and G.W. Swift, *A thermoacoustic Stirling heat engine*. Nature, 1999. **399**: p. 335-338.
2. Wollan, J.J., G.W. Swift, S. Backhaus, et al., *Development of a thermoacoustic natural gas liquefier*, in *AIChE Meeting*. 2002: New Orleans LA.
3. Swift, G.W. *Thermoacoustic natural gas liquefier*. DOE Natural Gas Conference. 1997. Houston.
4. 邱利民, 孙大明, 张武等, *大型多功能热声发动机的研制及初步实验 第一部分 热声发动机的研制*. 低温工程, 2003(2): p. 1-7.
5. Sun, D.M., L.M. Qiu, W. Zhang, et al., *Investigation on A Traveling-wave Thermoacoustic Heat Engine with High Pressure Amplitude*. Energy Conversion and Management, 2005. **46**(2): p. 281-291.
6. Chen, G.B. and T. Jin, *Experimental investigation on the onset and damping behavior of the oscillation in a thermoacoustic prime mover*. Cryogenics, 1999. **39**: p. 843-846.
7. Qiu, L.M., D.M. Sun, Y.X. Tan, et al. *Investigation on Gedeon streaming in a traveling wave thermoacoustic engine*. CEC-ICMC'2005. 2005. Keystone Colorado.

一种新型冰浆生成器的性能研究

张学军 邱利民 张鹏

浙江大学制冷与低温工程研究所, 杭州, 310027

联系电话: 0571-87952446; E-mail: xuejzhang@zju.edu.cn

摘要: 本文提出了一种带有鼓气装置的竖立的壳管式冰浆生成器, 搭建了溶液动态制冰实验台, 通过实验, 分析了各种因素 (包括鼓气量、载冷剂进口温度、乙二醇制冰溶液浓度及其流量等) 对动态制冰过程的影响, 得到了制冰量随各种参数变化的关系。

关键词: 动态制冰 冰浆生成器 鼓气装置

0 引言

与静态制冰系统相比, 在动态制冰系统中, 冰的形成和储存不在同一位置, 所以在制冰过程中自始至终没有冰层粘附在换热面上, 从而传热热阻小、制冰效率高; 生成的冰浆具有良好的流动性, 可以直接作为载冷剂送至空调用户, 因而传热温差和载冷量同时增大, 使得泵和风机功率以及输运管道、换热器、风管、风阀等结构尺寸可进一步减小。然而, 目前动态制冷所生成的冰晶普遍存在颗粒聚结的现象, 使得系统无法达到较高的含冰率, 也使得冰浆流动阻力大为增加, 从而使其本来在输运和释冷等方面的优点无法得以充分体现。因此如何生成高含冰率的冰浆又不破坏其流动性引起了人们极大的兴趣和关注, 也是动态制冰系统从实验室走向大规模应用的关键。

Inaba 等⁽¹⁾发现, 在水中加入少量抗冻蛋白、表面活性剂或乙烯醇, 可以在不大幅降低溶液冰点温度的情况下, 有效抑制溶液中冰晶的生长和凝聚。特别地, 有些表面活性剂在低浓度情况下可以分散溶液中生成的冰晶, 降低冰浆的沿程阻力。Hong⁽²⁾、Matsumoto⁽²⁾等通过实验证明了乙二醇溶液可以很好地抑制冰晶在换热面上的粘附, 对连续制取冰浆有显著的作用。Tsuchida⁽⁴⁾、Chibana⁽⁵⁾等发现在生成冰浆的换热面上喷涂一层氟塑料 (PFA 或 PTFE), 可以降低冰在换热面上的粘附力, 同时延长连续制取冰浆的时间。为此, 本文在利用乙二醇和氟塑料的基础上, 设计制造了一种带有鼓气装置的竖立的壳管式冰浆生成器, 并实验研究了各种参数对其制冰量的影响。

1 实验装置

动态制冰循环包括制冷剂循环、载冷剂循环和制冰溶液循环。其中, 制冷剂循环为系统提供冷源; 载冷剂循环把冷量传输到制冰循环中的冰浆生成器; 制冰循环则连续制取和储存冰浆, 其核心部件是一个竖直放置的壳管式换热器用作冰浆生成器, 如图 1 所示。竖直放置的目的在于使生成的冰晶可以通过浮力作用上升到冰浆生成器顶部出口,

便于泵送。在冰浆生成器管程侧流动的是 30% 的乙二醇载冷剂溶液，壳程侧流动的是乙二醇制冰溶液。冰浆在壳程侧生成，并由制冰溶液输送至蓄冰槽储存。壳程管束的外表面喷涂有 PTFE，如图 2 所示，用于抑制冰晶在管束换热面上的粘附。

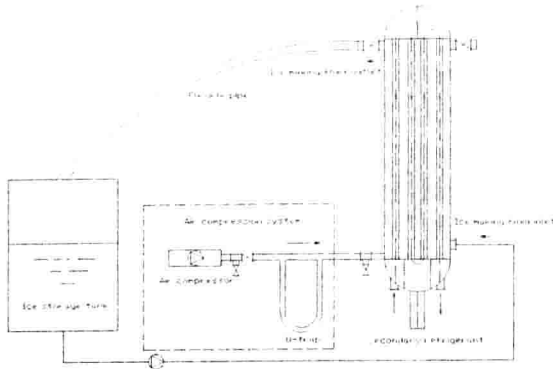


图 1 制冰溶液循环

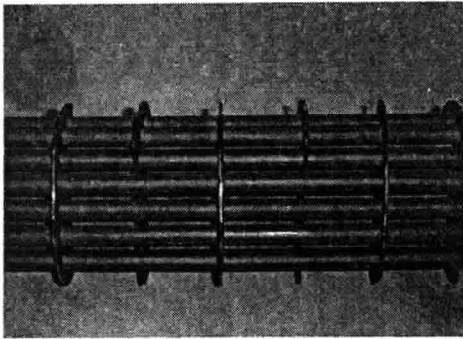


图 2 PTFE 喷涂效果图

图 1 虚线框所示为压缩空气系统，主要由一台空气压缩机，一些阀门组和一个 U 型管压差计组成。压缩空气通过空气压缩机鼓入冰浆生成器的壳程侧用于抑制冰晶粘附在换热面上。鼓气量可以通过 U 型管上显示的沿程压降来计算。

在冰浆生成器的管程和壳程进出口安装有精度为 0.1℃ 的配对热电偶传感器来测量进出口溶液的温度和温差。在制冰溶液的进出口处还安装了压差传感器以监测冰浆生成器是否发生“冻堵”现象。

2 参数分析

影响溶液动态制冰系统性能的因素有很多，包括鼓气量、载冷剂进口温度、乙二醇制冰溶液浓度及其流量等。本文着重研究了这些参数对制冰量的影响。

(1) 乙二醇制冰溶液浓度对制冰量的影响

由于不同浓度的乙二醇溶液其冰点温度各不相同，载冷剂进口温度值也要求有所不同。为了分析乙二醇制冰溶液浓度对制冰量的影响，为此需要将冰浆生成器中载冷剂进口温度和制冰溶液的冰点温度的差值固定，本文设定为 1.7℃，如图 3 所示。

从图 3 可以看出，制冰量随着乙二醇制冰溶液浓度增大而增大。尽管乙二醇制冰溶液浓度变大有利于提高系统的制冰量，并获得相对细腻的冰浆，但是，所对应的冰点温度却降低了，因而要求系统蒸发温度随之降低，从而致使系统 COP 变小，同时乙二醇含量的增加也将提高动态制冰系统成本。所以从经济性看，乙二醇制冰溶液浓度应该折衷考虑。

(2) 鼓气量对制冰性量的影响

鼓气量对制冰量有非常大的影响。由图 4 可以看出，随着鼓气量的上升，制冰量首先变大，而后又逐渐变小。一方面，鼓气量对冰浆生成器壳程的换热性能有较大影响，鼓气量越大，扰动越大，换热管束壁面的热流密度越高，但也消耗更多的冷量。另一方面，鼓气量变大，气流对冰晶冲刷作用增强，使得冰晶更容易脱离管束。实验发现，当鼓气量为 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，系统制冰量最大。

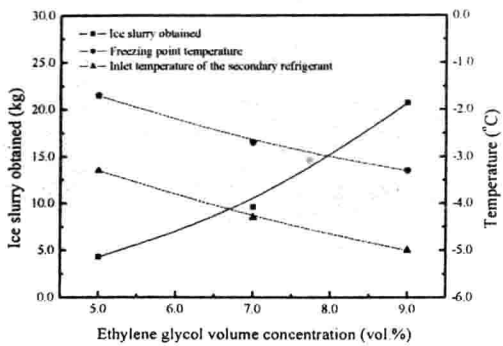


图 3 乙二醇制冰溶液浓度对冰点温度及其制冰量的影响

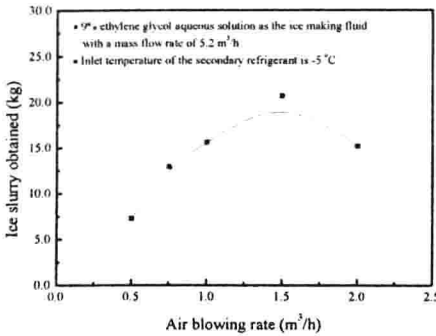


图 4 制冰量与鼓气量的关系

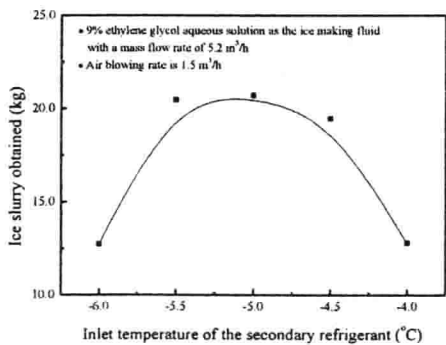


图 5 制冰量与载冷剂进口温度的关系

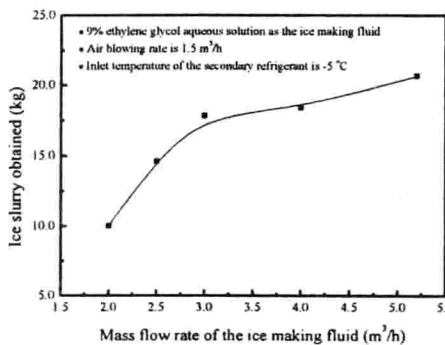


图 6 制冰量与制冰溶液流量的关系

(3) 载冷剂进口温度对制冰量的影响

载冷剂进口温度和制冰量的关系如图 5 所示，系统制冰量随着载冷剂进口温度升高而升高，当进口温度为 -5°C 时，制冰量达到最大；之后，随着进口温度继续升高，制冰量开始下降。

当载冷剂进口温度较低时，尽管制冰溶液与载冷剂之间的传热平均温差 Δt_m 较大，但是实验发现在制冰溶液的过冷状态解除时，冰晶先从管壁换热面上生成，从而导致管壁换热系数降低，因此换热量可能减少，制冰量降低；而当载冷剂温度较高时，尽管制冰溶液与载冷剂之间的传热温差 Δt_m 较小，但是实验发现在制冰溶液的过冷状态解除时，冰晶却先从制冰溶液内部生成，对管壁换热系数影响较小。所以，系统存在一个最佳载冷剂进口温度，可使相应的换热量最大，致使制冰量最大。该最佳载冷剂进口温度应该

是在制冰溶液的过冷状态解除时，冰晶可以从溶液内部生成的最低载冷剂进口温度。

(4) 制冰溶液流量对制冰量的影响

制冰溶液流量的大小一方面决定着溶液对管束冲刷力的大小，另一方面对管束换热性能也有非常大的影响。当溶液流量变大时，溶液对管束的冲刷力变大；同时，由于溶液流量变大，鼓入的压缩空气的相对速度变小，其对溶液的搅动作用相对变弱，从而抑制了换热系数的增长梯度。实验结果与上述分析一致，随着制冰溶液流量增大，制冰量增大，但是其增长梯度有所减小，如图 10 所示。

3 结 论

本文提出了一种竖立的壳管式冰浆生成器，同时为增加制冰溶液扰动和冲刷能力，引入了压缩空气系统。通过制冰实验，得到以下结论：

- (1) 考虑到经济性，乙二醇制冰溶液浓度应该折衷。
- (2) 鼓气扰动对抑制冰晶在换热面上粘附非常有效，但也存在最优值。
- (3) 最佳载冷剂进口温度应该满足在制冰溶液的过冷状态解除时冰晶可以从溶液内部生成的条件。
- (4) 随着制冰溶液流量增大，制冰量增大，但是其增长梯度有所减小。

参考文献

- (1) H Inaba, T Inada, A Horibe, H Suzuki, H Usui. Preventing agglomeration and growth of ice particles in water with suitable additives. *International Journal of Refrigeration*, 2005, 28: 20-36.
- (2) H Hong, J H Peck, C Kang. Ice adhesion of an aqueous solution including a surfactant with stirring on cooling wall: ethylene glycol - a silane coupling agent aqueous solution. *International Journal of Refrigeration*, 2004, 27: 985-992.
- (3) K Matsumoto, M Okada, T Kawagoe, C Kang. Ice storage system with water-oil mixture formation of suspension with high IPF. *International Journal of Refrigeration*, 2000, 23: 336-344.
- (4) D Tsuchida, C Kang, M Okada, K Matsumoto, T Kawagoe. Ice formation process by cooling water-oil emulsion with stirring in a vessel. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25: 250-258.
- (5) K Chibana, C Kang, M Okada, K Matsumoto, T Kawagoe. Continuous formation of slurry ice by cooling water-oil emulsion in a tube. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25: 259-266.

高精度混合物汽液相平衡实验系统研究

韩晓红¹ 陈光明¹ 乔晓刚² 崔晓龙¹ 王勤¹

(1. 浙江大学玉泉校区制冷与低温研究所, 杭州 310027; 2. 百脑汇电子信息有限公司, 杭州 310000)

Tel:13116758849 E-mail:hanxh66@zju.edu.cn

摘要: 自行研制了一套高精度测试混合物汽液相平衡的实验系统。其中包括高精度温度测量系统(在 $-40\sim 95^{\circ}\text{C}$ 范围内, 测量的不确定度小于 $\pm 10\text{mK}$), 高精度压力测量系统(测量范围为 $0\sim 3.5\text{MPa}$, 测量的不确定性 1.4kPa), 高精度控温水槽(室温 $+5\sim 95^{\circ}\text{C}$), 高精度控温的酒精槽($-40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 温度区间), 真空及配气系统等。此外以Visual BASIC为开发平台, 为实验台设计并开发了一套集实时数据采集、自动控制、存盘记录和数据分析处理于一体的测控软件。通过实际运行表明, 该软件方便实用, 大大提高了实验测试的自动化水平, 有力保障了混合工质相平衡各项实验工作的顺利进行。

关键词: 汽液相平衡; 恒温浴; 温度测量; 压力测量

Study on experimental system of vapor-liquid equilibrium with high accuracy

Han Xiaohong Chen Guangming Qiao Xiaogang Cui Xiaohong Wang Qin
(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou China)

Abstract: A high accuracy experimental apparatus of vapor-liquid equilibrium is developed. It consists of a temperature measurement (range: $-40\sim 95^{\circ}\text{C}$, temperature uncertainty less than $\pm 10\text{mK}$), a pressure measure system (range: $0\sim 3.5\text{MPa}$, the accuracy better than 1.4kPa), water thermostat bath (range: $5\sim 95^{\circ}\text{C}$), alcohol thermostat bath (range: $-40\sim 50^{\circ}\text{C}$), vacuum system, mixture make-up system etc. Based on the Visual BASIC, testing and controlling software is developed by the data logger, coupled with automatic control, saving and logging, and data analysis etc. The actual operation shows that it can be used conveniently and ensure to test the saturated vapor pressure and vapor-liquid equilibrium (VLE) data.

Keywords: Vapor-liquid equilibrium; thermostat bath; temperature measurement; pressure measurement

在制冷系统中, 制冷剂在蒸发器中的蒸发和在冷凝器中的冷凝都是相变过程, 都可以被认为是近似汽液相平衡过程。此过程中制冷剂热力学参数的预测对实际制冷工程设计具有重要的参考价值。特别是近年来为保护环境要求, 提出许多替代 HCFCs 的新型混合工质, 这对制冷循环及制冷机的设计、运行及性能有着重要影响。例如新型替代工质要注意热力参数压力、温度、比容、焓、熵、比热和绝热指数等之间的关系。因为这一关系将决定制冷循环的特性, 包括冷凝、蒸发温度和压力、单位质量制冷量、单位容积制冷量、单位耗功量、COP 等等, 而热力参数的计算都需要依靠各混合工质的 VLE 数据。因此实测混合工质的 VLE 数据成为研究混合工质替代问题的一项迫切需要。而 VLE 的测量需要高精度的汽液相平衡测试实验系统。目前, 国外的许多大学与研究所^[1-5]和国内一些科研单位如西安交通大学^[6]、中科院理化所^[7]等都建有针对不同混合物研制的 VLE 数据测量的测试系统, 但是这些实验系统还是各有差别, 如采用的测量方法, 测温的范围不同, 实验装置的研制也会有所区别。本文的主要目的是通过研制温度范围为 $-40\sim 95^{\circ}\text{C}$ 的汽液相平衡实验系统, 为实现更高精度和更高自动化的汽液相平衡测试系统建立

一个基础平台。

1. 实验装置

1 实验装置流程图

实验装置主要由两大部分组成：（1）恒温控制部分；（2）测量部分。装置原理图见图 1。

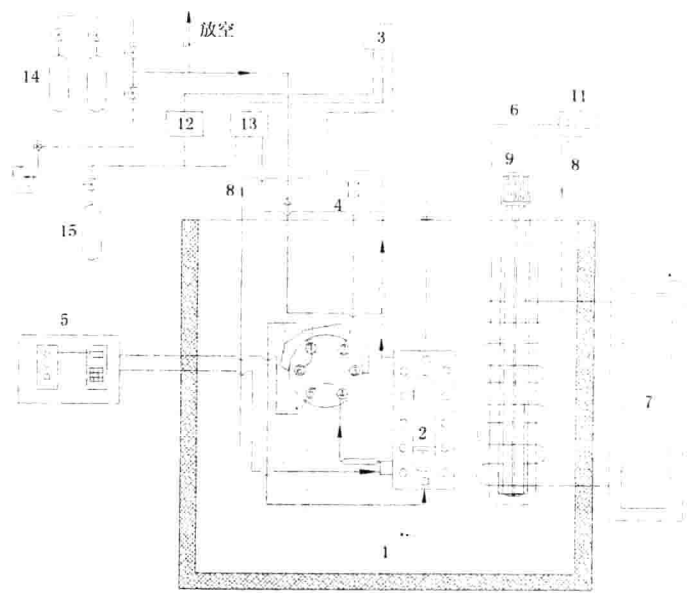
本实验装置主要特点是：

（1）汽相循环，并可在线分析两相的组成；（2）使用无泄漏磁力循环泵作为循环动力；（3）使用六通阀取样可承受较高的压力与温度；（4）使用高精度温控仪来控制恒温浴温度、使恒温浴能长时间、高精度地恒定在预设温度；（5）使用高精度的铂电阻温度计来测量温度，测量不确定性为 $\pm 0.01\text{K}$ ；（6）使用高精度的压力传感器与差压式变送器来测量压力，测量不确定性控制在 $\pm 1.4\text{kPa}$ 以内。

1.2 恒温控制部分

1.2.1 恒温浴

相平衡研究中所用的恒温浴要求恒温精度高，控温范围大，而且在广泛的温控范围内，每一控温点上恒温时间长，以便建立汽液相平衡。恒温浴设计时要考虑到以下几个方面：1）满足控制调节的温度范围；2）满足恒温精度和每一温度点稳定时间；3）恒温器要满足冷（或热）负荷，包括实验本身需要冷量（或热量）消耗，以及装置本身各种因素造成的冷损（或热损）；4）容积要求大，能够把加热、制冷、平衡釜、温度计等放入。实验装置所采用的恒温浴为一杜瓦瓶，见图 2，容积约为 19L。在杜瓦瓶的外面用一层毡垫与聚胺脂保温材料进行保温。在保温层的中部留有大约 $5\times 15\text{mm}$ 两个相对位置的视液镜来观察平衡釜里的情况。另外通过搅拌器将恒温浴中的液体强制对流，使恒温浴中液体较快的达到恒温均匀状态。



1. 恒温浴 2. 平衡釜 3. 万用表 4. 循环泵 5. 汽相色谱仪
6. 加热器 7. 制冷系统 8. 铂电阻温度计 9. 搅拌器 10. 真空泵
11. 温控仪 12. 压力传感器 13. 差压式变送器 14. 被测样
15. 高压氮气

图 1 汽液相平衡实验装置流程图

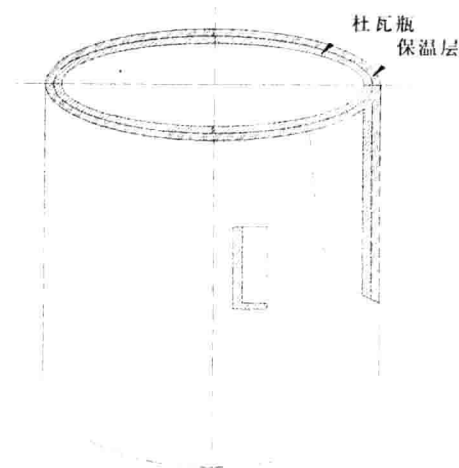


图 2 恒温浴示意图

1.2.2 平衡釜

平衡釜为一带有 110mm×30mm×20mm 视镜的不锈钢容器，耐压 0-5MPa，容积约 80ml，其原理图见图 3^[8]。平衡釜共有两套管路相通，一路为气相管路，接六通阀，可用六通阀控制汽相的取样；另一路为液相管路，在平衡釜的液相管路一侧有取样（液相）装置，取样装置的设计对于可靠的取样、最终测量数据的准确分析关系很大。液相取样探头直径 5mm，上有直径为 0.5mm 的细孔，探头伸入液相层后，细孔中可贮积 2 微升的液体，拔出后进入气相色谱回路中，分析液相组成。

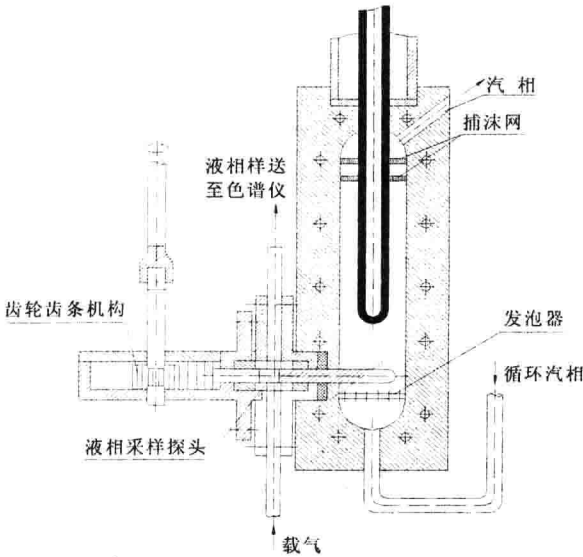


图 3 平衡釜装置示意图

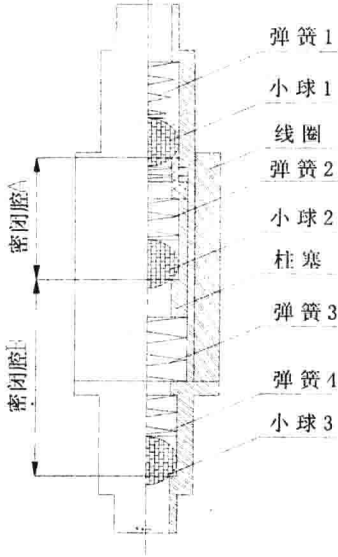


图 4 循环泵原理图

1.2.4 循环泵

循环泵采用自制的微循环泵，其主要特点是流量非常小，其原理图见图 4。其主要工作原理是：（循环泵所加的电流为经二极管滤波后的半波电流，见图 5）当循环泵通电后，在正弦半波时，柱塞被线圈形成的电磁场向下吸引，密闭腔 B 体积压缩，压力增大，压力顶开弹簧 2 所压的小球 2，部分气体由密闭腔 B 进入密闭腔 A，待弹力与压力平衡后，密闭腔 A 被小球 2 密封；当电流在波底时，线圈没有电流通过，没有电磁场作用，柱塞被弹簧 3 向上弹起，密闭腔 A 体积压缩，压力增大，压力顶开弹簧 1 所压的小球 1，气体从循环泵出口流出；同时密闭腔 B 体积扩大，压力减小，循环泵入口处气体压力顶开弹簧 4 所压的小球 3，气体从循环泵入口进入密闭腔 B；如此反复，形成气流。

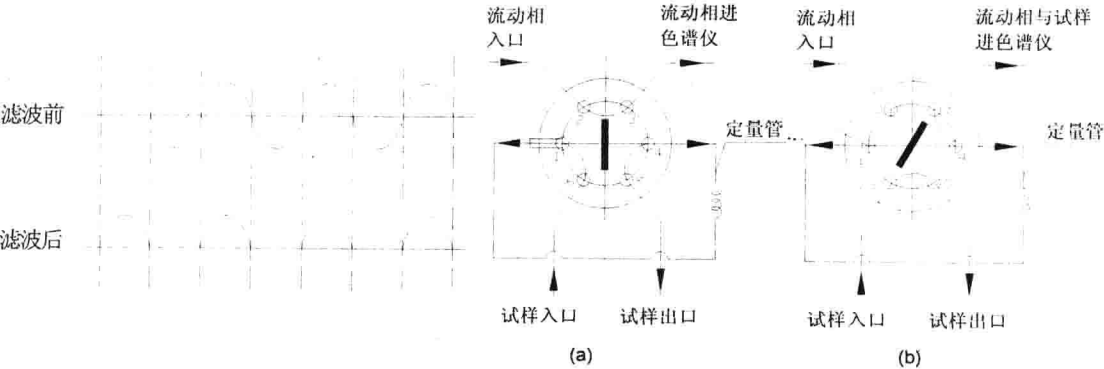


图 5 电流滤波前后

图 6 六通阀原理图