

中国工程热物理学会

传热传质学学术会议

论文集（下册）

二〇〇七

广州

中国工程热物理学会编



中国工程热物理学会

传热传质学学术会议

论文集（下册）



Chinese Society of Heat and Mass Transfer

2007 年 广州

传热传质学学术会议论文集(下册) 目录

九. 测量及显示技术

- 073010 冷流比对涡流管内温度分布影响实验研究.....
.....闫立春 周少伟 宋福元 曹 江 张 鹏 陈跃进(1521)
- 073024 振动圆管外的结垢实验研究.....冷学礼 潘继红 田茂诚(1526)
- 073025 渐近线型污垢生长的参数特性及测量方法.....冷学礼 潘继红 范明秀(1531)
- 073027 光管内湍流脉动传热特性的实验研究.....
.....李 华 张雪梅 林海浩 徐 璋 钟英杰(1535)
- 073033 温度依变性对纳米颗粒悬浮液导热系数测量的影响.....
.....周乐平 王补宣 彭晓峰 杜小泽 杨勇平(1542)
- 073047 外窗玻璃传热性能的初步实验研究...张 旭 鹿院卫 戴自祝 马重芳(1546)
- 073048 太阳光导管顶部采光性能的实验研究.....
.....汪会勇 鹿院卫 马重芳 王 伟(1550)
- 073054 湍流等离子体射流引射特性的实验研究.....
.....胡晓亮 王海兴 孟 显 陈 熙 潘文霞 汤海滨(1554)
- 073059 氨制冷涡流管复合制冷轻烃回收系统的现场试验研究.....
.....贾红书 吴玉庭 马重芳 张国庆 葛满初(1558)
- 073060 建筑环境中风能利用的实验研究.....陈宝明 张 涛 冯尧蔚(1562)
- 073081 白激励旋进射流冲击换热的实验研究.....
.....周静伟 耿丽萍 陶 容 王玉刚(1568)
- 073087 一种空间冷凝器的换热特性研究.....
.....丁俊峰 孙西辉 刁向红 郭开华 何振辉 李廷勋(1574)
- 073112 高热流密度均温板的传热特性实验研究.....莫冬传 吕树中 金积德(1578)
- 073121 湍流等离子体射流弧电压及光强波动特性研究.....
.....孟 显 潘文霞 吴承康(1582)
- 073139 金属泡沫流场板质子交换膜燃料电池试验研究.....
.....曲砚彦 赵长颖 卫 星 屈治国(1586)
- 073144 轴流风扇冲击射流的流动和传热特性.....
.....隋 丹 金东范 徐明龙 卢天健(1590)
- 073153 低雷诺数下小槽道散热器性能实验研究.....刘 东 刘明侯 徐 侃(1596)
- 073159 微小通道内液氮流动沸腾的可视化研究.....
.....付 鑫 齐守良 张 鹏 王如竹(1604)
- 073180 圆柱腔内 $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 溶液过共晶生长过程双扩散对流的实验研究.....
.....李 恒 张 磊 陆 军 苏燕兵 白博峰(1609)
- 073183 差示扫描量热法在苹果热物性测量方面的应用研究.....
.....易小红 邹同华 刘 斌(1616)
- 073211 冷凝硅微通道内水蒸汽喷射流频率的实验研究.....
.....全晓军 董丽宁 郑 平 吴慧英(1622)
- 073212 微通道气液同向流动中气泡射流特性试验研究.....
.....全晓军 陈 钢 郑 平(1629)
- 073213 入口有限制的硅微通道沸腾换热特性.....王国栋 郑 平(1635)

- 073220 振荡热虹吸管传热性能试验研究.....恽 超 赵孝保 李奇贺(1640)
- 073244 表面特性和流动特性对结垢诱导期影响的实验研究.....
.....张仲彬 徐志明 邱振波(1645)
- 073245 缩放管混合污垢特性的实验研究.....徐志明 詹海波 张仲彬 邵天成(1650)
- 073246 电化学阻抗法和数字图像法检测微生物.....
.....门 洪 武玉洁 陈延岭 鲁兆伟 杨善让 曹生现(1655)
- 073269 超急速爆发沸腾的瞬态压力测量.....尹铁男 淮秀兰(1661)
- 073286 温度敏感型磁流体冷却回路的实验研究.....
.....连文磊 孙 慧 李 强 宣益民(1665)
- 073292 一种新型透湿膜的传湿性能测量.....张立志 王彩玲 王元元(1670)
- 073315 飞秒激光泵浦—探测系统的建立与调试.....
.....祝 捷 唐大伟 程光华 韩 鹏 赵 卫 张 兴(1674)
- 073318 周期光热反射技术测量纳米薄膜导热系数和界面热阻.....
.....布文峰 唐大伟 程光华(1679)
- 073325 活塞式驱动自耦合射流冲击冷却实验研究.....
.....高 珊 张靖周 谭晓茗 苑 翔(1683)
- 073354 增膜板强化传热的机理分析与实验研究.....
.....陈良才 王 军 冯志力 刘 忠 耿 鑫 曾一彪
.....杨浩声 梁六华 葛 森 艾云慧 朱晓明 路远明(1688)
- 073398 磁致纵向涡的流动可视化.....杨昆仑 宋耀祖 任建勋(1694)
- 073450 水平管内流动蒸发数值模拟及可视化研究.....
.....莫少嘉 吴晓敏 李 辉 吴 越 连红奎 王维城(1698)
- 073461 不同喷口形状自耦合射流流动特性实验研究.....谭晓茗 张靖周(1702)
- ## 十. 工业应用、换热器及其它
- 073006 关于热媒输送流速优化问题的研究.....徐文忠 冯永华(1709)
- 073008 加热强度对液体横掠热柱体旋涡脱落特性的影响.....
.....李永光 张丽华 朱群志 郭振武 吕欣欣 丁家峰(1716)
- 073009 微型双组元推力器燃烧效率探讨.....王爱华 汤建华(1720)
- 073015 基于熵产理论的吹灰优化的研究.....
.....朱予东 阎维平 张 婷 高正阳 李太兴 吴彦坤(1724)
- 073016 换热器中逆流对数平均温差大于顺流的数学分析.....王厚华 韩武松(1731)
- 073017 AMO₂ WAKE 侧主散热板的优化模拟.....曲 燕 程 林 栾 涛(1737)
- 073022 换热器管内插入物强化传热的研究.....陈 岩 栾 涛 程 林 程延海(1742)
- 073031 入口流量分配对矩形窄缝多通道流动交混的影响.....
.....徐建军 王小军 陈炳德(1747)
- 073032 纵向涡发生器攻角布置方式对传热强化影响研究.....
.....黄 军 王海刚 黄彦平 马 建 王秋旺(1752)
- 073038 太空背景中离子推力器栅极部分的传热分析.....
.....王晓慧 张永恒 王良壁 江豪成 顾 佐 徐金灵(1757)
- 073042 建立螺纹管内液体侧的颗粒污垢模型.....李 蔚 李冠球 孙志坚(1762)
- 073043 萃取过程中微波强化扩散的机理分析.....
.....郭平生 刘海力 韩光泽 龙 文(1771)

- 073044 萃取过程中微波强化解吸传质机理分析.....刘海力 郭平生(1776)
- 073045 基于统计热力学的湖泊富营养化理论.....柴立和 韦海英(1781)
- 073046 蒸汽—溴化锂水溶液斜板绝热吸收研究.....任晓峰 申 江 孙 欢(1787)
- 073049 高热流壁面局部自适应热流控制研究.....鲍 文 段艳娟 周伟星(1794)
- 073050 超燃冲压发动机再生冷却结构的强化换热优化研究.....
.....鲍 文 周伟星 周有新 于达仁(1800)
- 073055 气象参数对太阳能喷射制冷影响的研究.....何 曙 李 勇 王如竹(1808)
- 073057 R141b 喷射式制冷系统的喷射器热力学模型设计.....
.....季红军 陶乐仁 王金锋(1813)
- 073061 放射形小尺度流道散热器的性能研究.....
.....汲 水 陈宝明 耿文广 徐绍琨(1818)
- 073063 多股流换热器网络的衍生网络法优化研究.....
.....崔国民 高孝忠 郭 佳 吕岩岩 关 欣(1824)
- 073064 换热网络模拟中的迭代发散分析及处理.....
.....崔国民 吕岩岩 高孝忠 郭 佳 关 欣(1829)
- 073065 强化传热技术付诸实用的相关问题探讨及实际意义分析.....
.....崔国民 郭 佳 高孝忠 吕岩岩 关 欣(1834)
- 073066 考虑柔性和控制解耦的换热器网络优化综合.....
.....崔国民 郭 佳 高孝忠 吕岩岩 关 欣(1838)
- 073067 大规模换热网络优化 MC/SA/GA 混合策略.....张 勤 崔国民 郭 佳(1843)
- 073068 基于棋盘模型的换热网络超结构.....张 勤 崔国民 高孝忠 关 欣(1847)
- 073069 空分用多股流换热器的性能分析及优化.....
.....郭 佳 崔国民 高孝忠 吕岩岩 关 欣(1851)
- 073070 多股流换热器通道排列连续性序列的生成方法.....
.....郭 佳 崔国民 高孝忠 吕岩岩 关 欣(1855)
- 073071 凝汽器喉部出口蒸汽湿度分布对冷却管冲击振动的影响研究.....
.....张磊磊 崔国民 高孝忠 关 欣(1859)
- 073072 凝汽器喉部阻力性能的微型模化试验研究.....
.....张磊磊 崔国民 高孝忠 关 欣(1863)
- 073073 随机方法结合坐标轮换法优化换热网络.....
.....吕岩岩 崔国民 高孝忠 郭 佳 关 欣(1867)
- 073074 换热器网络两种优化方法的效率分析.....
.....吕岩岩 崔国民 高孝忠 郭 佳 关 欣(1871)
- 073075 换热器的动态前馈旁通控制.....胡向柏 崔国民 高孝忠 关 欣(1875)
- 073076 耦合动态特性的换热器设计研究.....王方方 关 欣 崔国民 蔡 康(1879)
- 073078 换热网络内流体相关性研究及控制解耦.....关 欣 张 勤 崔国民(1883)
- 073079 基于流体脉动的换热器动态强化研究.....
.....关 欣 王方方 蔡 康 崔国民(1887)
- 073080 多股流换热器等效网络的一种生成方法.....
.....高孝忠 崔国民 吕岩岩 郭 佳(1890)
- 073083 Al_2O_3 微颗粒对脉动热管传热性能的影响.....高洪涛 高相阳(1894)
- 073084 U 形管复合换热器传热和振动特性分析.....
.....杜文静 程 林 田茂诚 朱新军 刘 文(1899)

- 073090 太阳能热气流系统内传热与流动的实验模拟.....
.....明廷臻 刘 伟 潘 垣 熊宴斌 管绪虎 许国良(1904)
- 073100 热交换器表面 Ni-P 镀层工艺对组织性能的影响.....
.....程延海 程 林 张树生 杜文静 陈 岩 刘 文(1909)
- 073101 管束布置方式对凝汽器壳侧蒸汽流动与传热特性的影响.....
.....栾 涛 曲建丽 王学栋 程 林(1914)
- 073104 热交换表面析晶污垢的组成及其界面结合状态(一).....
.....程 林 邹 勇 宋继伟 刘 文(1919)
- 073105 热交换表面析晶污垢的组成及其界面结合状态(二).....
.....程 林 邹 勇 宋继伟 刘 文(1925)
- 073108 热膨胀系数异性轴夹角优化分析.....耿湘人 桂业伟 唐 伟 贺立新(1930)
- 073111 旋转库埃特流的流动结构.....黄为民 李如意 谷传纲(1935)
- 073113 高热流密度高效均温板的启动特性.....莫冬传 吕树中 金积德(1942)
- 073115 两相泵驱动回路储液器进出流量的预测.....
.....莫冬传 黄臻城 吕树中 何振辉 苗建印(1946)
- 073117 新型太阳能吸收式制冷系统发生器特性研究...王 艳 俞 坚 马重芳(1950)
- 073124 数值模拟全寿命周期的住宅节能技术.....谢静超 吉野博 赵耀华(1954)
- 073132 隔热材料起泡现象的物理建模和计算方法研究.....
.....王安龄 桂业伟 唐 伟 刘 磊(1959)
- 073135 吸收式制冷系统换热网络优化.....陈彦霖 崔晓钰 郭广品(1964)
- 073136 膜反转板式降膜吸收过程研究.....崔晓钰 石景祯 徐之平 唐 聪(1968)
- 073137 新型填料倒膜环性能研究.....信石玉 崔晓钰 石景祯(1972)
- 073138 空气/水冷混合冷却吸收器的研究.....郭广品 崔晓钰 唐 聪(1976)
- 073147 螺旋折流板换热器流动与换热特性的试验研究及综合性能比较.....
.....张剑飞 李 斌 黄文江 雷勇刚 楚 攀 李 瑞 何雅玲 陶文铨(1980)
- 073155 汽轮发电机转子通风均匀性研究.....
.....韩家德 路义萍 谈和平 阴文豪 陈朋飞(1984)
- 073160 混合溶液除湿剂 LiCl-CaCl₂ 的配比选择及实验研究.....
.....李秀伟 张小松 王 庚 曹熔泉(1988)
- 073165 Gebhart-Block 模型在预测大空间建筑室内垂直温度分布中的应用.....
.....李俊红 黄 晨 王 昕 罗 行(1995)
- 073166 换热器网络综合优化 10SP1 问题的研究.....温卿云 罗 行 G. Fieg(2000)
- 073169 基于遗传算法的“Ω”形轴向槽道热管优化.....张程宾 施明恒 陈永平(2007)
- 073174 具有前置公用工程的换热器网络的通用解法.....
.....谢荣建 马虎根 罗 行 温卿云(2011)
- 073175 CC 型一次表面换热与阻力特性试验研究.....段 芮 马虎根(2017)
- 073177 二区域 U 型埋管传热模型及其实验验证.....杨卫波 施明恒(2022)
- 073185 玻璃真空管内插热管式集热器的非稳态效率研究.....
.....闫素英 田 瑞 后 尚 张丽娜(2027)
- 073188 水平刻槽管壁面液体升膜非线性特性研究.....
.....于海燕 梅 宁 刘学波 何明珠 司洪宇(2032)
- 073192 对两种不同叶型旋风分离器的性能比较.....
.....王亮亮 王媛媛 闫雪山 杨俊东(2036)

- 073196 换热器设计原理.....黄为民 童正明(2042)
- 073198 单管扁曲型集成热管 CPU 散热器的试验研究.....
.....白敏丽 吕继组 孙志君 徐 哲 喜 娜 李 河 杜进春(2047)
- 073199 CFD 软件在电子设备热设计中的应用.....李 波 李科群 俞丹海(2051)
- 073200 柴油机排气过程流动的多维瞬态数值模拟研究.....
.....吕继组 白敏丽 邵治家 周 剑(2056)
- 073201 燃烧室壁温波动对柴油机性能影响研究.....
.....邵治家 白敏丽 吕继组 刘 宇 周 剑(2061)
- 073202 螺旋肋片换热器强化传热数值与实验研究.....
.....吴金星 曹玉春 付卫东 王海峰(2066)
- 073209 聚光太阳能硅电池输出性能的研究.....孙 健 施明恒(2072)
- 073214 利用海洋温差凝集空气中水分方案设计.....
.....杨怡菲 张欣茹 姜泽毅 张欣欣(2077)
- 073215 仿生表面湿空气冷凝析水实验.....
.....姜泽毅 张欣茹 杨怡菲 柳翠翠 张欣欣(2081)
- 073225 天然气集输管道泄漏 H_2S 扩散动态模拟研究.....
.....罗志云 刘中良 王皆腾 张 建 孙晓春(2086)
- 073228 短时微重力条件下燃料电池性能研究.....
.....郭 航 赵建福 律翠萍 万士昕 吴 峰 叶 芳 马重芳(2090)
- 073229 环境风影响下的空冷岛运行特性.....杨立军 杜小泽 杨勇平(2094)
- 073230 波形斜翅片扁平管束外空气流动传热特性.....
.....张凯峰 杨立军 杜小泽 杨勇平(2099)
- 073231 地铁站物理模型的实验设计.....王静萱 刘万福 葛明慧(2104)
- 073233 质子交换膜燃料电池的优化分析.....张竹茜 张欣欣 贾 力(2110)
- 073242 二氧化碳两相回路热控系统启动热载荷时的压力脉冲现象及其抑制.....
.....黄臻成 肖文佳 孙西辉 潘志文 裴念强
.....丁俊峰 余凯伦 李廷勋 郭开华 何振辉(2114)
- 073243 机械泵驱动的 CO_2 两相热控系统控温性能研究.....孙西辉 肖文佳
.....潘志文 黄臻成 何振辉 丁俊峰 余凯伦 裴念强 李廷勋 郭开华(2118)
- 073247 基于电导滴定法碳酸钙成垢诱导期的实验研究.....
.....杨善让 曹生现 于明乐 陈立军 徐志明(2122)
- 073254 熔融盐 ($LiNO_3$) 强制对流换热实验研究.....
.....叶 猛 刘 斌 吴玉庭 马重芳(2129)
- 073255 混合氯化熔融盐腐蚀性的实验研究...刘 斌 叶 猛 吴玉庭 马重芳(2133)
- 073276 直接膨胀式土壤耦合热泵系统的热力学分析与实验设计.....
.....王晓涛 唐志伟 郑 鹏 马重芳(2137)
- 073303 块状氯化钙和膨胀石墨复合吸附剂的热物性试验研究.....
.....李素玲 吴静怡 陈传涓(2143)
- 073331 水蒸汽辐射宽带 k 分布模型.....尹雪梅 刘林华(2148)
- 073340 光合细菌固定化包埋颗粒产氢特性实验研究.....
.....廖 强 田 鑫 巴淑丽 朱 恂 王永忠(2153)

073341 基于传质强化的自呼吸式 DMFC 研究.....	叶丁丁 李俊 朱恂 廖强 黄桂兰 付乾(2157)
073342 自呼吸式 DMFC 电堆构建与电池性能研究.....	李俊 叶丁丁 朱恂 廖强 付乾 黄桂兰(2162)
073344 蛇形流场 DMFC 阳极两相流动特性及对电池性能的影响.....	朱恂 郑雪艳 廖强 丁玉栋 李俊(2166)
073345 生物膜光生物反应器启动及产氢特性.....	田鑫 廖强 张攀 朱恂 王永忠(2170)
073348 微型燃气轮机用 CW 原表面回热器蠕变分析.....	张冬洁 王军伟 曾敏 王秋旺(2174)
073351 多管排大管径翅管式换热器传热与阻力特性的试验研究.....	唐凌虹 谢公南 曾敏 章大海 韩武涛 王秋旺(2178)
073353 粒子群优化算法在管翅式换热器优化设计中的应用.....	韩武涛 王秋旺 陈贵冬 曾敏(2182)
073376 不连续双斜内肋管的管外换热性能.....	李晓伟 孟继安 陈泽敬 李志信(2186)
073387 单气泡电浮力的实验估测及理论计算.....	陈凤 彭耀 宋耀祖 陈民(2191)
073390 太阳能热光伏系统中集中一吸收器装置的研究.....	陈雪 韩玉阁 李强 宣益民(2195)
073395 常压多层绝热材料研制及绝热性能分析.....	孙培杰 吴静怡 徐烈(2200)
073396 螺旋藻流体圆管流动速度与温度场分布.....	吴良柏 李震 宋耀祖(2205)
073415 低压电子抗垢与杀菌综合性能实验研究.....	石成 全贞花 李兵 陈永昌 刘运洁 马重芳(2210)
073416 碳酸钙于换热表面结垢影响因素的模拟分析.....	全贞花 陈永昌 马重芳 石成 刘运洁(2214)
073417 低压电子阻垢性能的实验研究.....	刘运洁 王春明 全贞花 陈永昌 马重芳 李兵 石成(2218)
073420 流道壁面分布丁腈的传热特性研究.....	李瑞 何雅玲 楚攀 雷勇刚(2222)
073439 汽车 LED 前照灯散热结构的设计及评价.....	林梓荣 汪双凤 张今羿(2226)
073444 热管理器的优化分析与设计.....	李胜 吴静怡 王如竹 夏再忠(2230)
073460 热声回热器流动、传热新模型及其性能的实验表征.....	陈燕燕 罗二仓 戴巍(2236)
073464 微波场协同强化溶质扩散的机理.....	陈明东 韩光泽 郭平生 肖祖峰(2244)
073465 特殊环境下织物的导热系数试验研究.....	丁立 雷岩鹏 王超 袁修干(2248)
073466 纵流壳程换热器壳程特性研究.....	董其伍 王永庆 刘敏珊(2252)
073467 一种新型换热管的强化传热研究.....	刘敏珊 董其伍 朱青 王永庆(2260)
073469 热驱动液态金属芯片散热器的功率特性.....	马坤全 刘静 周一欣(2267)
073471 封闭循环小通道内液态碱金属热驱动换热实验研究.....	常国强 常海萍 王宏大(2271)
073477 静子叶片弦中区离散扰流柱强化换热实验研究.....	张镜洋 常海萍 徐磊(2277)

冷流比对涡流管内温度分布影响实验研究

闫立春, 周少伟, 宋福元, 曹江, 张鹏, 陈跃进

(哈尔滨工程大学动力与能源工程学院 341 教研室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(Email: lisayan_1999@163.com, 0451-82519307, 13946012778)

摘要: 鉴于涡流管内的温度分布规律对于揭示其深层的能量分离机理具有十分重要的作用, 本文用实验方法研究了常温下涡流管内的温度分布特性。在入口温度、压力不变的情况下, 对涡流管内部温度场进行了实验测试, 并分别就不同冷流比、轴向、径向位置等因素对涡流管特性的影响进行研究。同时, 结合实验结果, 详细分析了上述诸因素与涡流管内温度分布曲线走向之间的关系。

关键词: 涡流管; 温度分布; 冷流比

1 引言

涡流管, 又称“兰克—赫尔胥(Ranque-Hilsch)”管, 是从上个世纪 30 年代发展起来的一种能量分离装置。由于它具有结构简单, 占用空间小, 无运动部件, 造价低廉, 操作、维修极为简单, 运行可靠, 寿命长, 适应范围广, 可进行连续操作和间歇操作及进气参数变化范围较大等优点, 使世界上许多国家的研究者和公司对其实际应用都产生了浓厚的兴趣, 在制冷、制热、气体和固体干燥, 混合物分离等诸多方面已取得成功应用; 在航空、生物医学、化工等领域有着极为广泛的应用前景^[1, 2]。

虽然涡流管的结构非常简单, 但是发生在其内部的能量分离效应却极其复杂。研究者们对能量分离机理的认识也不尽相同, 至今仍没有一种精确的理论能够从本质上解释其效应; 但是大家普遍认同一个结论: 管内可压缩工质的运动是能量分离的根本原因与驱动力, 因而获得管内压力、速度和温度的分布特性是涡流管能量分离机理研究的关键问题。在国外, Hartnett^[3], Lay^[4], Takahama^[5], Bruun^[6]等人分别对涡流管内速度场和温度场进行了大量的实验研究, 但是他们的实验大都是局限于某一轴向位置处, 从整体上看对涡流管内部温度场进行研究的很少; 在国内, 对涡流管的研究大多集中在结构特性方面^[7], 对内部场的研究几乎没有。为了对整个内部场有一个全面深刻的了解, 本文用实验方法对涡流管内的温度分布特性进行了大量的研究和分析。

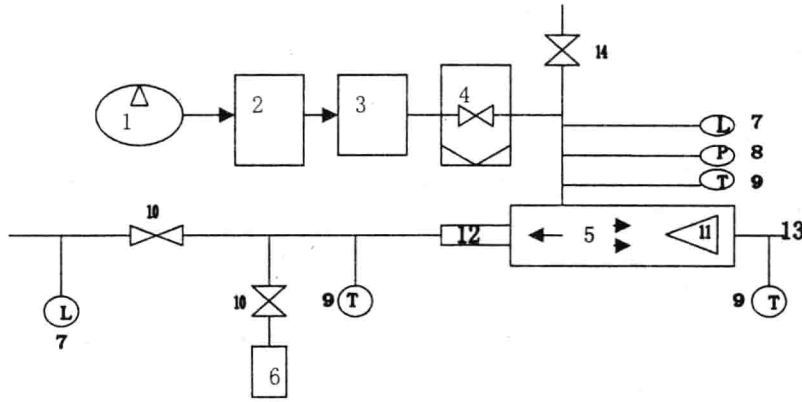
2 实验装置及流程

图 1 给出了实验装置流程简图, 实验采用的工质为空气, 工质首先经过空气压缩机 1 压缩变成高压气体, 然后经过储气罐 2 稳压, 冷干机 3 干燥和油水过滤器 4 除油除尘等一系列处理之后变成洁净干燥的压缩空气, 切向导入涡流管 5, 压缩气体进入涡流室后分离成冷、热两股气流^[8]。冷气流从距离入口喷嘴较近的中心孔口(冷端) 12 流出, 热气流则在壁面附近从距离入口较远的热端出口 13 排出, 14 为放空阀, 用来维持进气流的稳定。冷热气体的出口温度分别由 Testo925K 型热电偶(精度为 0.25 级)测量; 入口气体流量由智能涡街流量计 7 读出, 冷端出口气体流量在大流量情况下由智能涡街流量计 7 读出, 小流量时由玻璃转子流量计 6 测量; 工质入口压力由高精度的压力表 8 (精度为 0.25 级)测量; 实验中采用的压缩机是德士兰螺杆空气压缩机(DSR-25A), 与一台冷干机配合使用; 同时, 为了获得涡流管内的温度分布, 从距离热端管进口 37mm 的轴向端面开始, 在涡流管上每隔 50mm 间距共布置了 10 个测温探针插孔, 通过插孔对

10 个轴向端面的温度进行测量，如图 2（数据采集系统图）所示，实验中所测量的温度均通过自制的裸露式热电偶探针来测量，并被记录在一个数据采集仪上，数据采集仪的另一端连接在一台计算机上，这样所测温度值就被记录下来。其中，热电偶的电极材料为铜和康铜丝（直径为 0.12mm），保护套管为 12 号医用注射针头（外径为 1.2mm，内径 1.1mm，总长度为 50mm），保护套管与热电偶电极之间的用树胶填料进行绝缘。

为了获得尽量低的冷气温度，实验中采用的涡流管是经过参数优化的自行设计的涡流管，涡流管的几何结构参数如下所示：

涡流管长 502mm，内径为 40mm，喷嘴为 3 流道矩形喷嘴，矩形截面长和宽均为 4mm；冷气出口孔径为 16mm；热端调节阀为带锥度的调节阀。



1-空气压缩机 2-储气罐 3-冷干机 4-油水过滤器 5-涡流管 6-转子流量计 7-智能涡肩流量计
8-压力表 9-铠装热电偶 10-阀门 11-热端调节阀 12-冷端 13-热端 14- 放空阀

图 1 实验装置流程简图

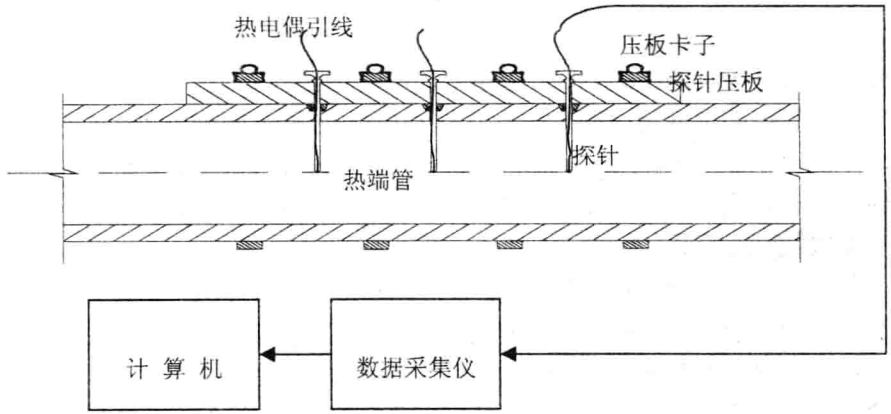


图 2 数据采集系统示意图

3 实验结果及分析

3.1 冷流比对涡流管制冷、制热效应的影响

冷流比的定义为冷气流质量流量 $\dot{m}_c$ 与总质量流量 $\dot{m}_i$ 的比值：
$$\mu = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_i}$$

制冷效应 ΔT_c 定义为入口气流与冷端气流温度之差: $\Delta T_c = T_i - T_c$

制热效应 ΔT_h 定义为热端气流与入口气流温度之差: $\Delta T_h = T_h - T_i$

在入口压力为 0.3MPa, 入口温度恒定的工况下, 以冷流比为自变量, 通过调节热端管出口处的调节阀, 获得了不同冷气流率下涡流管的冷、热端温度, 进而得出一组制冷、制热效应的实验数据。通过分析得出冷流比对制冷、制热效应的影响曲线 (见图 3)。图 3 表明: 随着冷流比的增加, 涡流管的制冷效应增大, 当冷流比到达 0.15 附近时出现制冷效应的最大值, 之后随着冷流比的增大, 制冷效应迅速减少。制热效应也具有同冷端温差类似的趋势, 只是达到最大制热效应时的冷流比要比达到最大制冷效应时的冷流比的值要大, 在冷流比为 0.72 左右达到最大值, 即最大制热效应, 然后减小。出现这样的分布趋势是由于管壁的热损失使管内的旋涡流的强度被削弱了, 结果导致能量分离的驱动力也减弱了, 导致冷气温度有所升高, 热气温度有所降低。因此在涡流管的实际应用时, 应根据用途来平衡制冷效应和制热效应^[9]。

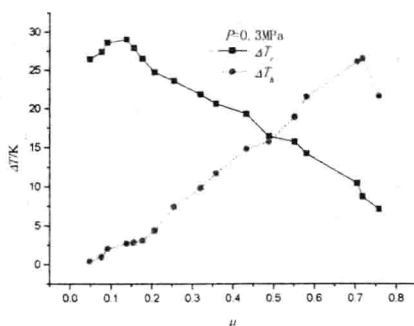


图 3 冷流比对制冷、制热效应的影响

3.2 冷流比对涡流管内温度分布特性的影响

为了研究冷流比对涡流管内温度分布特性的影响, 在入口温度和压力保持不变的条件下, 以冷流比为参数, 以径向位置 r 为自变量, 分别就 $L = 87\text{ mm}$ 和 $L = 287\text{ mm}$ (其中 $L = 87\text{ mm}$ 处的轴向端面代表了距离热端进口较近的端面, $L = 287\text{ mm}$ 处的轴向端面代表了距离热端出口较近的端面) 两个典型的轴向端面的温度分布进行了实验测试, 并得出了冷流比对不同径向位置处温度分布的影响曲线如图 4、5。实验中涡流管入口温度恒定为 28.3°C , 入口压力保持 0.3MPa; 数据分析所采用的四个冷流比分别为:

$\mu_1 = 0.1563$ 、 $\mu_2 = 0.3211$ 、 $\mu_3 = 0.5765$ $\mu_4 = 0.7158$; 图中 r 代表距离轴心的径向距离, $L = 287$ 表示距离热端入口的轴向距离。

通过分析图 4、图 5 可知:

(1) 随着冷流比的增加, 同一轴向断面上同一径向位置处温度的值增大; 只是图 4 中的温度曲线表现为冷流比越大, 越不平滑, 出现了一定的波动, 且随着冷流比的增大, 轴心与壁面之间的温差也越来越小; 图 5 中的温度曲线比较平滑, 除轴心附近及近壁处个别点外各条曲线之间近乎平行线。

(2) 不同冷流比下, 各轴向端面不同径向位置处的温度均表现为距离壁面越近温

度越高,并在壁面附近达到最大值;这是因为压缩空气进入涡流室发生涡流效应以后,形成高、低温两股旋流,内旋低温气流在轴心附近从冷端出口流出,外旋高温气流在壁面附近从热端出口流出,从而形成了这样的分布趋势,这也验证实验结果的准确性。

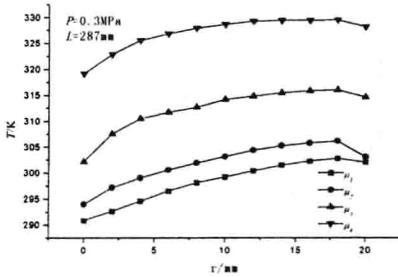


图4 径向位置对温度分布的影响曲线

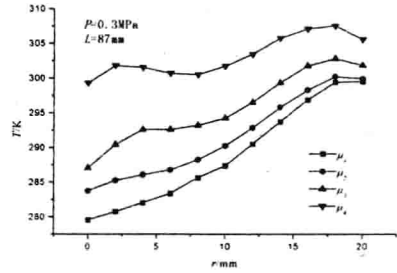


图5 径向位置对温度分布的影响曲线

在上述实验条件下,分别对 $r=2\text{ mm}$ 、 $r=16\text{ mm}$ 及 $r=20\text{ mm}$ 三个径向位置的轴端面上的温度进行测量,得到了如下的分布曲线:

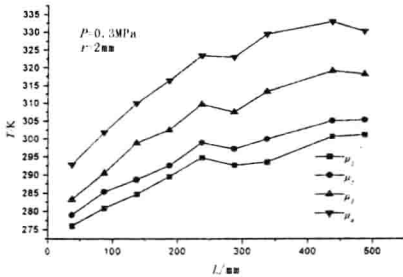


图7 不同冷流率时温度沿轴向的分布

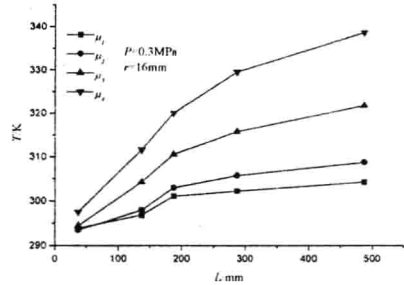


图8 不同冷流率时温度沿轴向的分布

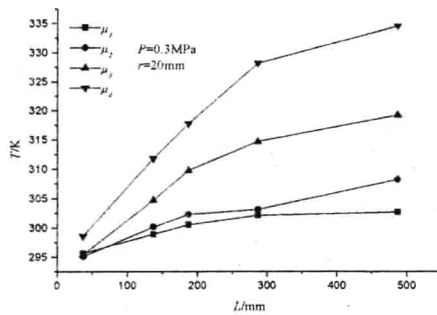


图9 不同冷流率时壁面温度的分布曲线

由7、8、9图可知:随着冷流比的增加,同一径向位置的同一轴向端面处温度的值增大;随着轴向位置的增大同一条温度曲线上温度分布曲线呈现上升的趋势;不同温度曲线上表现为:冷流比的增加,轴向截面温度朝热端出口方向逐渐升高,在热端出口处测得的温度最高。出现这一现象的原因高压气体在涡流室中形成的三维强旋可压缩流在运动过程中分离为内外两股旋流,外旋流在向热端出口运动的过程中一方面与壁面发生摩擦使壁面温度升高,另一方面两股旋流在分离的过程中强烈的传热传质及内摩擦使得

外旋流温度进一步提高,内旋流温度进一步降低,从而便形成了冷端温度低,热端温度高的分布趋势^[10]。

图9显示了壁面温度分布情况:理论上壁面温度应该最大,但由于本实验中采用的是接触式热电偶探针要保证壁面的完全绝热是不可能的,必然有热量通过管壁散失到周围环境;另外,由于热电偶探针的定位也不可能严格的精确,也会导致探头所在位置不能恰好在壁面处,而使测得的管内壁面温度存在一定的误差,比理论值偏小。

4 结论

本文在入口温度和入口压力恒定的条件下,对涡流管的温度特性进行实验研究和数据分析,得出以下结论:

(1) 涡流管的制冷、制热效应随冷流比的增大均出现先增大后减少的趋势,在冷流比为0.15附近存在制冷效应的最大值;在冷流比0.72左右出现制热效应的最大值。

(2) 在不同冷流比的情况下分别改变轴向截面位置和径向距离得到了涡流管内温度分布的大致规律:涡流管内任意点的温度与冷流比存在一定的关系即温度随着冷流比增大而增大,这一关系同时也印证了制热效应、制冷效应与冷流比之间的关系。

(3) 在本文实验条件下,涡流管内的温度无论沿轴向或径向均出现了从冷端到热端,从轴心到壁面增大的分布趋势。这样的分布规律进一步揭示了涡流管内部发生能量分离效应后形成冷热两股旋流,内旋流温度低,外旋流温度高,内旋流在冷端出口区域的轴心处具有最低的温度、外旋流在热端出口区域的壁面具有最高的温度,这也充分体现了涡流管具有制冷、制热效应的性能。

参考文献

- [1]曹勇,吴建锋,罗二仓等.涡流管研究的进展与评述[J].低温工程,2001(6):1-5.
- [2]Thomas T Bruno. Laboratory Application of the Vortex Tube. Journal of Chemical Education, 1987, 64(11):987-988
- [3]J. P. Hartnett. Experimental study of the velocity and temperature distribution in a high-velocity vortex-type flow. Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer, 1957, May: 751-758
- [4]J. E. Lay. An experimental and analytical study of vortex-flow temperature separation by superposition of spiral and Axial Flows(part1, part2). Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer, 1959, August:202-222
- [5]Heishichiro Takahama. Studies on vortex tube. Bulletin of JSME, 1965, 8(31):433-440
- [6]H. H. Bruun. Experimental investigation of the energy separation in vortex tube. Journal Mechanical Engineering science, 1969, 11(6): 567-582
- [7]马廷全. 涡流管能量分离过程的实验研究. 北京工业大学硕士学位论文, 2002年5月.
- [8]曹勇,刘加水,公茂琼,罗二仓,吴剑峰,陈光明等.小流量涡流管特性的实验研究[J].工程热物理学报,2005年1月第26卷第1期
- [9]宋福元,姜任秋,张鹏,王朋涛,周少伟等.涡流板能量分离特性实验研究.哈尔滨工程大学学报,2007年2月第28卷第2期.
- [10]周少伟,姜任秋,王朋涛,宋福元,张鹏等.基于涡流管能量分离效应的数值模拟.化工学报,2007年3月第58卷第3期.

振动圆管外的结垢实验研究

冷学礼 潘继红 田茂诚

山东大学能源与动力工程学院, 山东济南 (250061)

E-mail: lengxl@sdu.edu.cn 电话: 0531 88395592

摘要: 对振动条件下的换热管污垢生长过程进行了实验研究, 实验表明换热面振动能够有效降低污垢热阻渐近值, 污垢热阻渐近值随振动 Re_v 数的升高呈指数递减。作者认为振动管外流场导致的剪应力增加, 剪应力方向的交替变化, 振动强化传热引起的换热表面温度降低, 振动造成的附加惯性力是导致污垢热阻渐近值降低的主要原因。

关键词: 污垢 振动 强化传热

中图分类号: TK

1. 引言

换热表面上的积垢现象总是难以避免地发生, 而积垢会阻碍传热过程, 降低过程总的传热系数和换热设备的功率。因此抑制与消除污垢一直是换热设备开发和运行中需要解决的实际问题。国内外的学者已对此进行了很多探讨, K. Bode^[1]等实验研究了脉动流对换热面上蛋白质污垢清除的效果, 指出频率和最大流速的影响最为重要。徐志明^[2]等对 $CaCO_3$ 结晶和 Al_2O_3 或 MgO 颗粒组成的混合污垢研究表明混合污垢热阻值比纯粹的析晶污垢的热阻值大, 介质流速增大, 其污垢热阻渐近值减小, 颗粒浓度增大, 混合污垢渐近值增大, 但当浓度达到某一值后再增加时, 混合污垢渐近值基本维持常数。Won Tae Kim^[3]等对碳酸钙在换热表面上的结晶过程用显微镜进行了观察研究, 展示了污垢的起始并形成厚层, 以及微小结晶的生长并最终与毗邻的结晶接触的整个过程。鉴于污垢生长过程的复杂性和影响因素的不确定性, 各界学者对污垢的研究大多侧重于某一方面, 很难对结垢的整个过程进行全面的考察。本文利用换热面振动造成不同于静止换热面上污垢生长和清除的条件, 利用热阻法测量污垢热阻, 对碳酸钙结晶垢在振动表面上的生长进行了实验研究, 探讨表面振动条件下污垢的生长规律和可能的抑垢措施。

2. 实验系统及测量方法

2.1 实验系统

实验系统如图 1-1 所示, 蓄水箱 1 内安装了加热设备, 通过 PID 调节器将水箱温度控制在 $40 \pm 1^\circ C$ 范围内; 实验段 5 为 $\Phi 12mm \times 300mm$ 的紫

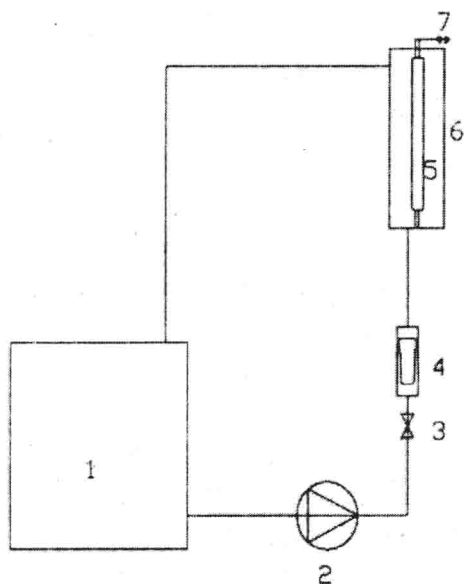


图 1 实验系统简图

- 1. 蓄水箱 2. 循环水泵 3. 流量调节阀门
- 4. 玻璃转子流量计 5. 实验段 6. 溢流水箱
- 7. 振动发生器。

铜管, 竖直安装于溢流水箱 6 内, 实验段上部连接振动发生器, 下部用弹性构件固定, 可实现振幅为 0.5mm 和 1.0mm 的简谐振动, 实验段采用恒热流加热, 并通过玻璃转子流量计与阀门, 使流过溢流水箱的工质流量稳定在 $3.0\text{m}^3/\text{h}$, 流体介质采用 Na_2CO_3 浓度为 1.18g/L 和 CaCl_2 浓度为 1.68g/L 的人工硬水, 然后加入适量的 NaOH 将人工硬水的 Ph 值调整到 10。通过布置在实验段以及溢流水箱中的铜—康铜热电偶, 测量实验段的壁温以及流体介质温度。

2.2 污垢测量方法^[3]

污垢的形成阻碍了传热的进行, 使传热过程的热阻升高, 热阻法测量污垢的热阻是直观有效的, 热阻法又分为稳态测量方法和非稳态测量方法, 对于在线检测稳态测量法更方便, 基本原理如下:

换热表面结垢前后的温度分布如图 2 所示, 图中虚线表示换热面洁净时的传热过程和温度分布曲线, 假设传热过程中通过管壁的热流密度恒为 q , t_f 与 t_{w1} 分别为流体温度和壁面温度, 结垢后壁面温度升高, 以 t_{w2} 表示, 污垢与流体介质接触面的温度以 t_s 表示。则对于洁净状态与污垢状态下的传热过程, 管壁与工质间的传热系数 K_c 和 K_f 分别表示为:

$$K_c = q / (t_{w1} - t_f)$$

$$K_f = q / (t_{w2} - t_f)$$

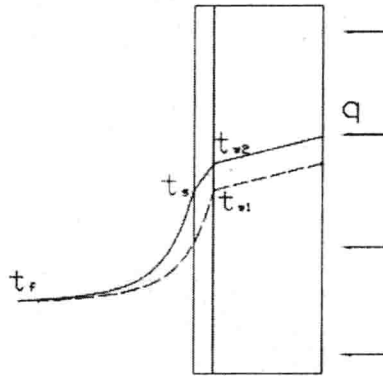


图 2 清洁和污垢情况下换热表面的温度分布示意图

对于污垢状态下的传热过程, 有:

$$\frac{1}{K_f} = \frac{1}{K_c} + R_f$$

其中 R_f 为污垢热阻, 对以上三个公式联立, 得到 R_f 的表达式为:

$$R_f = \frac{t_{w2} - t_{w1}}{q}$$

因此可以在实验过程中通过监测到的壁面温度升高表示出污垢热阻值。实验过程中观测到壁面温度不再持续升高或升高缓慢后, 可以认为污垢生长已经达到了污垢热阻渐近值。

3. 实验结果及分析

图 3、图 4 分别为通过实验得到的振动频率为 10.0, 15.0Hz, 振幅为 0.5mm 或 1.0mm 时的污垢热阻发展曲线, 其中测点为实际测量到的污垢热阻值, 从趋势上看是典型的渐近型污垢生长曲线, 实线为使用最小二乘法拟和得到的渐近型污垢生长曲线, 拟和使用的公式如下:

$$R_f(\theta) = R_f^* (1 - \exp(-\theta / \theta_c))$$

其中, R_f^* —污垢热阻渐近值, $m^2 \cdot k / w$ 。

θ —污垢生长的时间, h ;

θ_c —污垢生长的时间常数, h 。

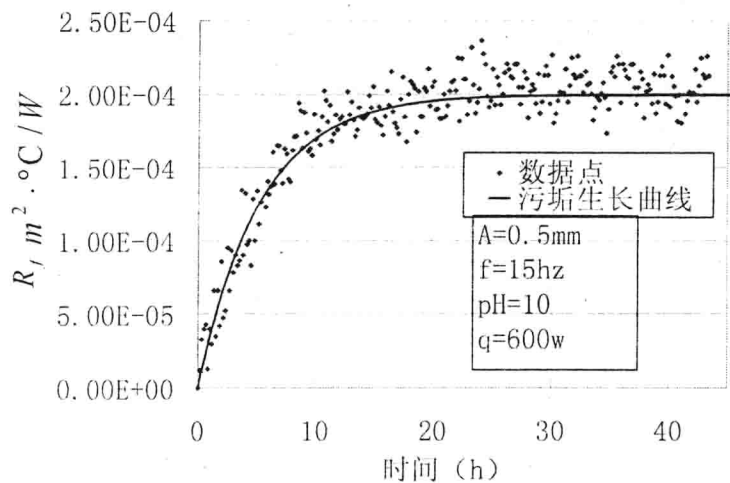


图 3 A=0.5mm, f=15Hz 时得到的污垢生长曲线

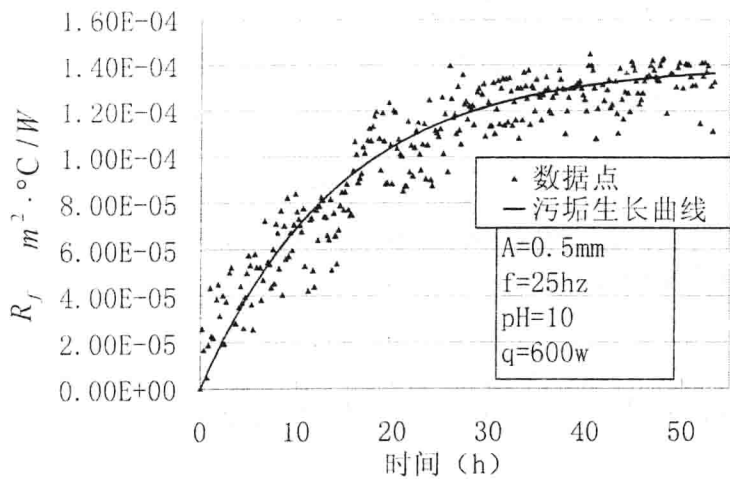


图 4 A=0.5mm, f=25Hz 时得到的污垢生长曲线

从上图可以看出, 相同振幅下, 25Hz 时的污垢热阻渐近值比 15Hz 时降低了大约 30%, 表明高频率振动比低频率振动更能抑制污垢的生长。

换热面在不同频率、振幅参数下的污垢热阻渐近值列在表 1 中: 其中振动雷诺数 Re_f

的定义为： $Re_v = \frac{2\pi f A d_o}{\nu}$ ，其中 d_o 为换热表面外径， ν 为流体介质的运动粘度。

表 1：不同的振动参数下得到的污垢生长渐近值和时间常数值

振幅A (mm)	频率f (Hz)	振动雷诺数 Re_v	污垢热阻渐近值 $R_f^* (m^2 \cdot ^\circ C / W)$	时间常数 $\theta_c (h)$
0	0	0	0.00036	26.09
0.5	15	1093.8	0.0002	5.26
1	10	1458.4	0.00016	10.39
0.5	25	1823.0	0.00014	14.56
0.5	35	2552.2	0.00011	1.12
1	20	2916.8	0.000065	3.04

对以上实验数据，从振动 Re_v 数对污垢热阻渐近值进行比较，发现随 Re_v 数的增加，污垢热阻渐近值基本以指数关系递减：

$$R_f = 0.0004e^{-0.0007 Re_v} \quad (0 < Re_v < 2500, \text{ 本实验条件下})$$

在 $Re_v = 2916$ 时的污垢热阻渐近值仅为静止条件下该值的 18%，为 $Re_v = 1000$ 时该值的 32%，表明换热面振动对污垢热阻降低有影响。而结垢时间常数未表现出明显的规律。

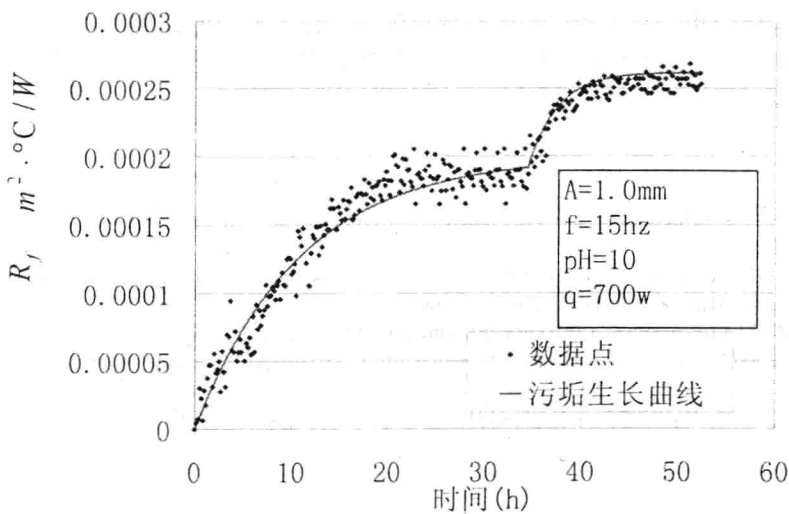


图 6 换热面先振动后静止得到的污垢生长曲线

在溶液 pH 值为 10，实验段加热功率为 700w，氯化钙的浓度为 1.11g/L，碳酸氢钠的浓度为 1.68g/L 实验条件下，先使圆管作振幅为 1.0mm 频率为 15Hz 的振动，当圆管表面污垢热阻达到渐近值后，使圆管停止振动后在静止状态下继续实验，换热表面上继续结垢，此时污垢的生长仍然是一个渐近线趋势，最终得到的污垢生长曲线如图 6 所示，振动时换热面的污垢热阻渐近值约为 $1.77 \times 10^{-4} m^2 \cdot ^\circ C / W$ ，静止后得到的污垢热阻渐近值约为 $2.54 \times 10^{-4} m^2 \cdot ^\circ C / W$ ，说明换热面振动能够有效的抑制污垢生长。