

高等学校试用教材

长安大学道路交通运输工程实验教学中心

实验教学指导丛书

工程热力学与发动机原理实验分册

刘生全 骆雨 王平福 马志义 李跟宝 主编

Gongcheng Relixue Yu Fadongji Yuanli
Shiyan Fence



人民交通出版社

China Communications Press

高等学校试用教材

长安大学道路交通运输工程实验教学中心实验教学指导丛书

Gongcheng Relixue Yu Fadongji Yuanli Shiyan Fence
工程热力学与发动机原理实验分册

刘生全 骆 雨 王平福 马志义 李跟宝 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为“工程热力学”(含“传热学”)与“发动机原理”专业课程的实验教学指导书,主要介绍了“工程热力学”、“传热学”、“发动机原理”实验教学环节中所开设基本实验所用的设备仪器、规程、方法和数据处理等。

本书适用于热能与动力工程、车辆工程及相关专业,也可供其他相近专业或从事发动机实验的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

长安大学道路交通运输工程实验教学中心实验教学指导丛书. 工程热力学与发动机原理实验分册 / 刘生全等编.
—北京:人民交通出版社,2010.9

ISBN 978-7-114-07848-4

I. ①长… II. ①刘… III. ①公路运输—交通工程—高等学校—教学参考资料②工程热力学—高等学校—教学参考资料③汽车—发动机—高等学校—教学参考资料
IV. ①U4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 109118 号

长安大学道路交通运输工程实验教学中心实验教学指导丛书
书 名:工程热力学与发动机原理实验分册

著 作 者:刘生全 骆 雨 王平福 马志义 李跟宝

责任编辑:顾燊鲁 范 坤

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010) 59757969, 59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:7.25

字 数:162千

版 次:2010年9月第1版

印 次:2010年9月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07848-4

印 数:0001—1000册

定 价:60.00元(全7册)

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

本书为“工程热力学”(含“传热学”)与“发动机原理”专业课程的实验教学指导书,适用于热能与动力工程、车辆工程及相关专业。

工程热力学教学实验课程的任务是使学生掌握工程热力学、传热学等领域的主要实验测量原理、技术和测试方法,加深对各门学科基础课程理论的理解,培养学生实验操作能力、理论联系实际的能力,以及分析问题和解决问题的能力。通过实验教学,使学生了解和掌握工程热力学、传热学等领域现代实验技术和检测仪表的性能、原理和使用方法,掌握实验技能与数据处理方法,提高实验教学的质量和水平,培养学生实践动手能力和对综合知识的运用能力,以适应市场经济条件下对工科人才培养的要求。

发动机实验是发动机原理课程的实践教学环节,是学生掌握发动机基本工作原理必不可少的一部分。它既是对理论知识的验证,也是对专业理论知识的巩固。通过发动机实验,可培养学生基本操作技能,增强学生独立思考和解决实际问题的能力。

本指导书除了对发动机实验规程、实验准备和主要设备等作一般性介绍之外,着重阐述了发动机各种性能实验的方法,并尽量结合本校的实验条件和实验设备,力求达到举一反三的效果。

发动机原理实验教学指导书由刘生全、王平福、马志义编写;工程热力学部分由骆雨、李跟宝编写,蹇小平主审。曹银波、赵蒙生参加了数据处理的具体工作与实验验证。由于编者经验不足,水平有限,错漏之处在所难免,请提出宝贵意见。

刘生全

2009年6月8日

目 录

第一部分 工程热力学实验

实验一	喷管特性实验	3
实验二	制冷制热装置认识实验	11
实验三	气体比定压热容测定实验	14
实验四	饱和水蒸气压力和温度关系实验	18
实验五	稳态平板法测定绝热材料导热系数实验	21
实验六	圆球法测粒状材料的导热系数实验	27
实验七	空气横掠圆柱体时局部换热系数的测定实验	30
附录	工程热力学实验教学大纲	34

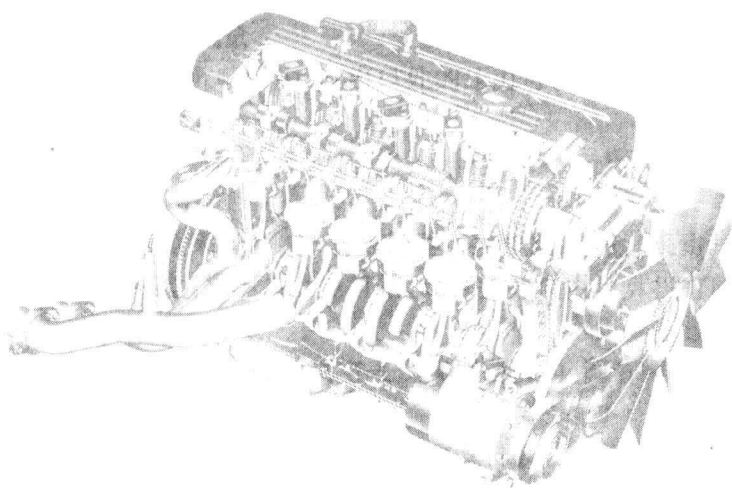
第二部分 发动机原理实验

第一章	发动机实验设备与仪器	41
第一节	电涡流测功机	41
第二节	发动机测试仪器	45
第二章	发动机实验规程	48
第一节	发动机实验分类	48
第二节	发动机实验误差	49
第三节	发动机实验准备工作	50
第四节	实验发动机的检查	51
第五节	发动机实验规程	53
第三章	发动机实验	57
第一节	汽油发动机点火提前角调整特性实验	57
第二节	汽油发动机速度特性实验	60
第三节	汽油发动机负荷特性实验	63
第四节	汽油机排污特性实验	65
第五节	柴油机的负荷特性实验	67
第六节	柴油机速度特性实验	69
第七节	柴油机调速特性实验	72
第八节	汽油机机械效率测定实验	75
第九节	汽油机燃料调整特性实验	77
第十节	汽油机热平衡实验	80

第十一节 柴油机充气特性实验	83
第四章 发动机实验数据处理	86
第一节 汽油发动机实验数据处理方法	86
第二节 柴油发动机实验数据处理方法	89
第三节 实验数据分析	93
附录 1 实验教学大纲	100
附录 2 实验报告	104
参考文献	107

第一部分

工程热力学实验



实验一 喷管特性实验

一、实验内容

(1) 测定不同工况(初压 p_1 不变, 改变背压 p_b) 时气流在喷管中的流量 q_m , 绘制 q_m-p_b 曲线, 比较最大流量 $q_{m\max}$ 的计算值和实测值, 确定临界压力 p_c 。

(2) 测定不同工况下气流沿喷管各截面(喷管轴线位置 x) 压力 p 的变化, 绘制出一组 $p-x$ 曲线, 分析比较临界压力 p_c 的计算值和实验值, 观察和记录临界压力出现在喷管中的位置。

二、实验要求

(1) 验证并进一步加深对喷管中气流基本规律的理解, 牢固树立临界压力、临界流速和最大流量等喷管临界参数的概念。

(2) 比较熟练地掌握用热工仪表测量压力(负压)、压差及流量的方法。

(3) 重要概念 1 的理解: 应明确在渐缩喷管中, 其出口处的压力不可能低于临界压力, 流速不可能高于声速, 流量不可能大于最大流量。

(4) 重要概念 2 的理解: 应明确在缩放喷管中, 其出口处的压力可以低于临界压力, 流速可高于声速, 而流量不可能大于最大流量。

三、实验仪器与设备

本系统由实验台本体、真空泵、数据采集系统(电测仪器、传感器集线盒、采集与程控机箱)、计算机等组成, 其中, 传感器集线盒、采集与程控机箱、计算机并口由计算机打印共享线连接。

实验台由进气管、孔板流量计、喷管、测压探针真空表及其移动机构、调节阀、真空罐等几部分组成, 见图 1-1。

进气管 1 为 $\phi 57\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 无缝钢管, 内径 $\phi 50\text{mm}$ 。空气自吸气口 2 进入进气管 1, 通过孔板流量计 3(孔板孔径 $\phi 7\text{mm}$, 采用角接环室取压) 进入 U 形管压差计 4, 流量的大小可从 U 形管压差计读出。喷管 5 用有机玻璃制成, 配渐缩喷管和缩放喷管各一只, 见图 1-2 和图 1-3。根据实验要求, 可松开夹持喷管 5 的紧固螺钉, 向左推开进气管的三轮支架 6, 更换所需的喷管 5。喷管各截面上的压力由插入喷管内的测压探针 7(外径 $\phi 1.2\text{mm}$) 连至可移动真空表 8 测得, 它们的移动通过手轮-螺杆机构 9 实现。由于喷管 5 是透明的, 测压探针上 7 的测压孔($\phi 0.5\text{mm}$) 在喷管内的位置可从喷管外部看到, 也可从装在可移动真空表 8 下方的针在喷管轴向坐标板(在图中未画出)上所指的位置来确定。喷管 5 的排气管上还装有背压真空表 10, 背压用调节阀 11 调节。真空罐 12 直径 $\phi 400\text{mm}$, 体积 0.118m^3 , 起稳定背压的作用。罐的底部有排污口, 供必要时排除积水和污物之用。为减小振动, 真空罐 12 与真空泵之间用软管 13

连接。

在实验中必须测量 4 个变量,即测压孔在喷管内不同截面的位置 x 、气流在该截面上的压力 p 、背压 p_b 、流量 q_m ,这些量可分别用位移指针的位置、可移动真空表、背压真空表以及 U 形管压差计的读数来显示。

本实验台配套的仪器设备选型如下。

真空泵: 1401 型,排气量 3 200L/min。

电测仪器:包括负压传感器、压差传感器、位移传感器,它们分别将可移动式真空表、U 形管压差计、测压探针在喷管内不同截面上的压力转换为电信号输入传感器集线盒,然后在计算机上直接得出实验曲线。

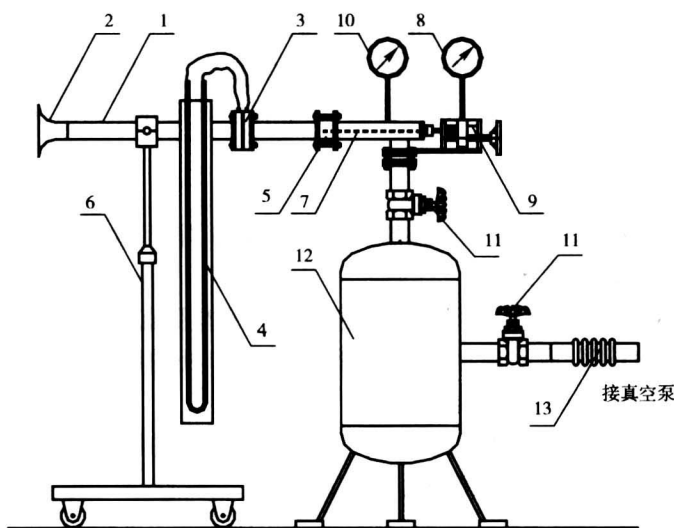


图 1-1 喷管实验台

1-进气管;2-空气吸气口;3-孔板流量计;4-U 形管压差计;5-喷管;6-三轮支架;7-测压探针;8-可移动真空表;9-手轮螺杆机构;10-背压真空表;11-背压用调节阀;12-真空罐;13-软管

四、实验准备

学生应预先阅读并掌握以下实验原理。

1. 喷管中气流的基本规律

(1) 由能量方程:

$$\delta q = dh + \frac{1}{2}dc_f^2$$

及

$$\delta q = dh - \nu dp$$

可得

$$-\nu dp = c_f dc_f \quad (1-1)$$

可见,当气体流经喷管速度增加时,压力必然下降。

(2) 由连续性方程:

$$\frac{A_1 \cdot c_{f1}}{\nu_1} = \frac{A_2 \cdot c_{f2}}{\nu_2} = \dots = \frac{A \cdot c_f}{\nu} = \text{常数}$$

$$\text{有} \quad \frac{dA}{A} = \frac{d\nu}{\nu} - \frac{dc_f}{c_f}$$

$$\text{由过程方程} \quad p\nu^k = \text{常数}$$

$$\text{有} \quad \frac{k d\nu}{\nu} = - \frac{dp}{p}$$

$$\text{根据} \quad -\nu dp = c_f dc_f$$

$$\text{马赫数 } M = \frac{c_f}{c}, \text{ 而 } c = \sqrt{k p \nu}$$

$$\text{得:} \quad \frac{dA}{A} = (Ma^2 - 1) \frac{dc_f}{c_f} \quad (1-2)$$

显然,当来流速度 $Ma < 1$ 时,喷管应为渐缩型 ($dA < 0$); 当来流速度 $Ma > 1$ 时,喷管应为渐放型 ($dA > 0$)。

本实验所涉及的喷管结构分别如图 1-2 和图 1-3 所示。

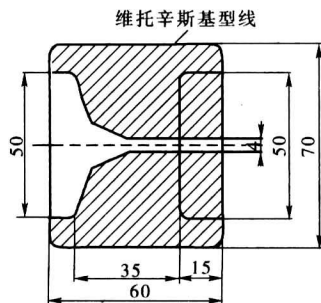


图 1-2 渐缩喷管(尺寸单位:mm)

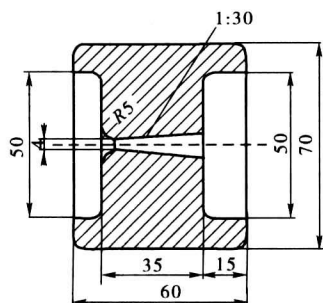


图 1-3 缩放喷管(尺寸单位:mm)

2. 气体流动的临界概念

喷管气流的特征是 $dp < 0$, $dc_f > 0$, $d\nu > 0$, 三者之间互相制约。当某一截面的流速达到当地声速(亦称临界速度)时,该截面上的压力称为临界压力(p_c)。临界压力与喷管初压(p_1)之比称为临界压力比,有:

$$\gamma = \frac{p_c}{p_1}$$

经推导可得:

$$\gamma = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (1-3)$$

对于空气, $\gamma = 0.528$ 。

当渐缩喷管出口处气流速度达到声速,或缩放喷管喉部气流速度达到声速时,通过喷管的气体流量便达到了最大值($q_{m \max}$),或称为临界流量,可由下式确定:

$$q_{m \max} = A_{\min} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot \frac{p_1}{\nu_1}} \quad (1-4)$$

式中: $A_{\min}$ ——最小截面积,对于渐缩喷管即为出口处的流道截面积,对于缩放喷管即为喉部处的流道截面积,本实验台的两种最小流道截面积均为 19.625 mm^2 。

3. 气体在喷管中的流动

1) 渐缩喷管

渐缩喷管因受几何条件 ($dA < 0$) 的限制,由式(1-2)可知:气体流速只能等于或小于声速 ($c_f \leq c$);出口截面的压力只能高于或等于临界压力 ($p_2 \geq p_c$);通过喷管的流量只能等于或小于最大流量 ($q_{m\max}$)。根据不同的背压 (p_b), 渐缩喷管可分为三种工况,如图 1-4、图1-5 所示。

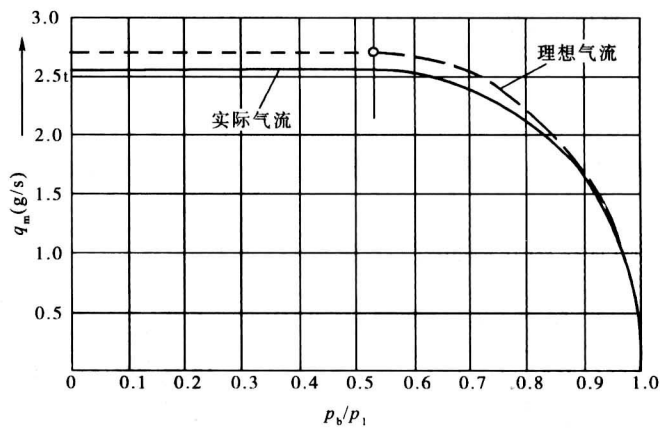


图 1-4 渐缩喷管流量曲线

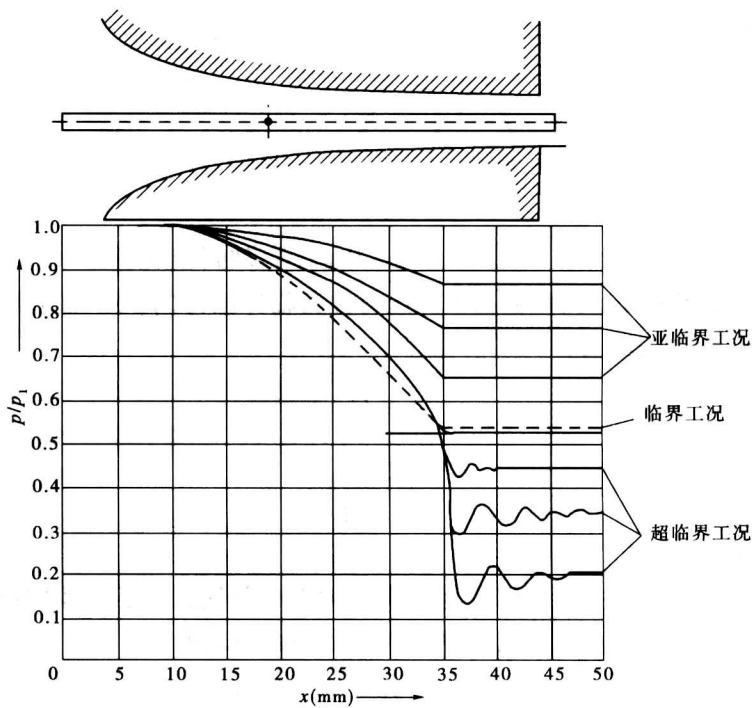


图 1-5 渐缩喷管压力曲线

A. 亚临界工况 ($p_b > p_c$), 此时 $q_m < q_{m\max}$

$$p_2 = p_b > p_c$$

B. 临界工况 ($p_b = p_c$), 此时 $q_m = q_{m \max}$

$$p_2 = p_b = p_c$$

C. 超临界工况 ($p_b < p_c$), 此时 $q_m = q_{m \max}$

$$p_2 = p_c > p_b$$

图 1-4 中虚线表示理想气流, 实线表示实际气流。由于气流有黏性摩擦, 在壁面附近形成边界层。随着流程 x 的延长 (图 1-5), 边界层厚度加厚, 减小了实际流通面积。所以, 实际流量总是小于理论流量。同时, 边界层的存在还使管内气体压力的分布发生一些变化。

2) 缩放喷管

缩放喷管的喉部 $dA = 0$, 因此气流可以达到声速 ($c_f = c$); 扩大段 ($dA > 0$), 出口截面的流速可超声速 ($c_f > c$), 其压力可低于临界压力 ($p_2 < p_c$), 但因喉部几何尺寸的限制, 其流量的最大值仍为最大流量 ($q_{m \max}$)。

气流在扩大段能完全膨胀, 这时出口截面处的压力称为设计压力 (p_d)。缩放喷管随工作背压不同, 亦可分为三种工况:

A. 背压等于设计背压 ($p_b = p_d$) 时, 称为设计工况。此时气流在喷管中能完全膨胀, 流量达到最大流量。在喷管喉部, 压力达到临界压力, 速度达到声速。在扩大段转入超声速流动, 出口截面的压力与背压相等 ($p_2 = p_b = p_d$)。

B. 背压低于设计背压 ($p_b < p_d$) 时, 气流在喷管内仍膨胀到设计压力。当气流一离开出口截面便与周围介质汇合, 其压力立即降至实际背压值, 流量仍为最大流量。

C. 背压高于设计背压 ($p_b > p_d$) 时, 气流在喷管内膨胀过度, 其压力低于背压, 以至于气流在未达到出口截面处便被压缩, 导致压力突然升跃 (即产生激波), 在出口截面处, 其压力达到背压。激波产生的位置随着背压的升高而向喷管入口方向移动, 激波在未达到喉部之前, 其喉部的压力仍保持临界压力, 流量仍为最大流量。当背压升高到某一值时, 将脱离临界状态, 缩放管便与文丘里管的特性相同了, 其流量低于最大流量。

缩放喷管的流通特性如图 1-6 和图 1-7 所示。

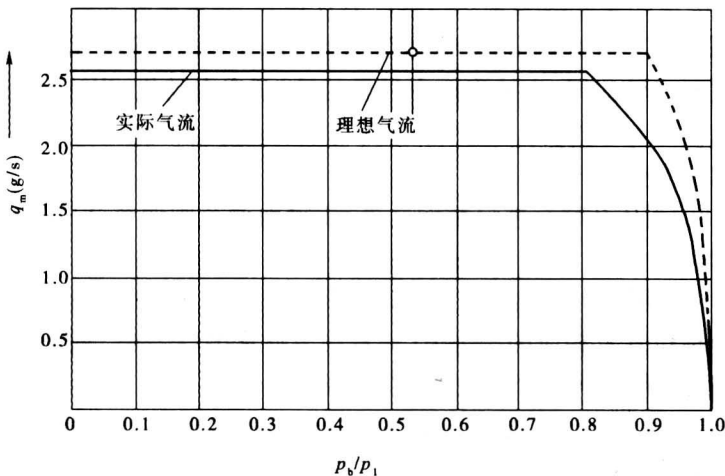


图 1-6 缩放喷管流量曲线

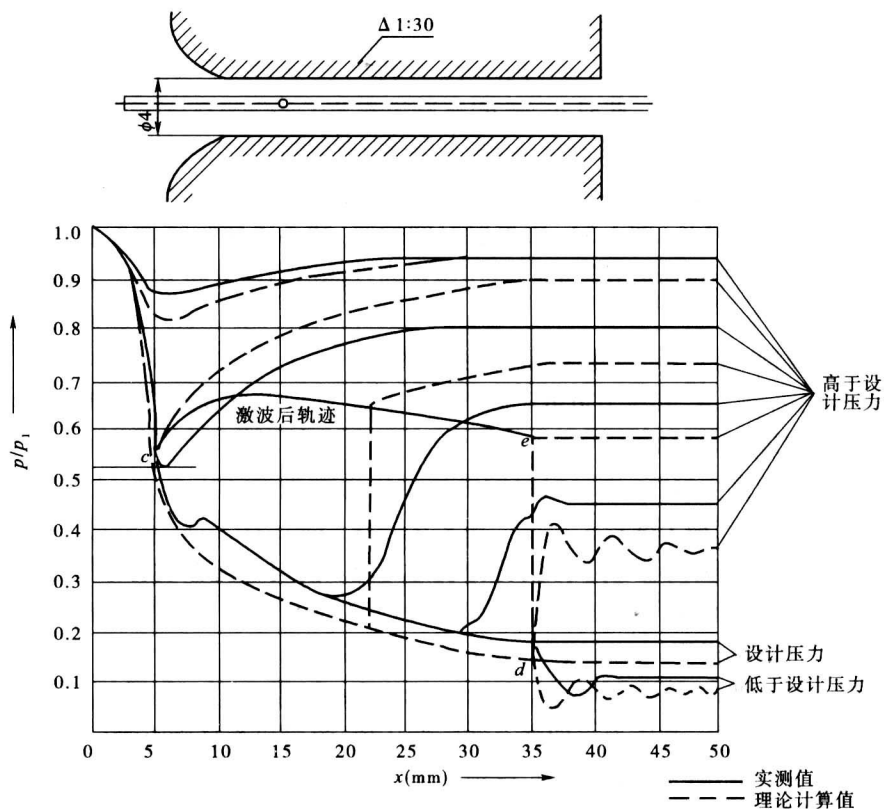


图 1-7 缩放喷管压力曲线

五、实验步骤

分别对渐缩喷管和缩放喷管进行如下相同实验步骤。

(1) 装好喷管。

(2) 对真空泵作开车前检查(检查传动系统、油路、水路)。检查无问题后打开背压调节阀,用手转动真空泵飞轮几周,去掉汽缸中过量的油,开启电动机,当达到正常转速后可开始实验。

(3) 测量轴向压力分布:

① 把测压探针的引压孔移至进口截面之外,用罐前调节阀调节背压至一定值(见真空表读数),并记录下该值。

② 转动手轮,使测压探针向出口方向移动。每移动一定距离(一般约 2~3mm)便停顿下来,记录该点的坐标位置及相应的压力值,一直测至喷管出口之外。把各个点描绘到坐标纸上,便得到一条在这一背压下喷管的压力分布曲线。

③ 若要作若干条压力分布曲线,只要改变其背压值并重复①、②步骤即可。

(4) 流量曲线的测绘:

① 把测压探针的引压孔移至出口截面之外,打开罐后调节阀,关闭罐前调节阀,启动真

空泵。

②用罐前调节阀调节背压,每次改变 20 ~ 30mmHg^①,稳定后记录背压值和 U 形管压差计的读数。当背压升高到某一值时,U 形管压差计的液柱便不再变化(即流量已达到了最大值)。此后尽管不断提高背压,但 U 形管压差计的液柱仍保持不变,这时测 2 ~ 3 点。至此,流量测量即可完成。

(5)接通电测仪器,分别记录 q_m-p_b 曲线和 $p-x$ 曲线。

(6)停车。实验结束后的设备操作:打开罐前调节阀,关闭罐后调节阀,让真空罐充气;3min 后停真空泵并立即打开罐后调节阀,让真空泵充气(目的是防止回油);最后关闭冷却水阀门。

(7)认真做好原始记录。

①设备数据记录:设备名称、型号、规格等。

②常规数据记录:当地大气压力、室温、实验环境状况。

③技术数据及绘制的图形等记入附表内。

六、实验注意事项

真空泵在停机前,先关闭真空罐出口的调节阀,让真空罐充气。关停真空泵后,立即打开此阀(真空泵上装有充气阀的还可打开充气阀),让真空泵充气。这样做,一方面防止真空泵回抽,以免损坏用非耐油橡胶制成的减振软管;另一方面有利于真空泵下次的启动。

七、实验记录及报告

1. 数据处理

1) 压力值的确定

(1)本实验装置采用的是负压系统,表上读数均为真空度,为此,须换算成绝对压力值 p :

$$p = p_a - p_v \quad (1-5)$$

式中: p_a ——大气压力, mbar^②;

p_v ——真空度。

(2)由于喷管前装有孔板流量计,气流有压力损失。本实验装置的压力损失为 U 形管压差计读数 Δp 的 97%。因此,喷管入口压力为:

$$p_1 = p_a - 0.97\Delta p \quad (1-6)$$

(3)由式(1-5)和式(1-6)可得到临界压力 $p_c = 0.528p_1$,在真空表上的读数(即用真空度表示)为:

$$p_{c(v)} = 0.0472p_a + 0.51\Delta p \quad (1-7)$$

计算时,式中各项必须用相同的压力单位(大致判断, $p_{c(v)}$ 约为 380mmHg)。

2) 喷管实际流量测定

由于管内气流的摩擦而形成边界层,从而减少了流通面积。因此,实际流量必然小于理论值。其实际流量为:

① 1mmHg = 133.322Pa。

② 1 bar = 10^5 Pa。

$$q_m = 1.373 \times 10^{-4} \sqrt{\Delta p} \cdot \varepsilon \cdot \beta \cdot \gamma \quad (\text{kg/s})$$

式中: ε ——流速膨胀系数;

$$\varepsilon = 1 - 2.873 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{\Delta p}{p_a}}$$

β ——气态修正系数;

$$\beta = 0.538 \sqrt{\frac{p_a}{t_a + 273}}$$

γ ——几何修正系数,约等于 1.0;

Δp ——U 形管压差计的读数, mmH₂O^①;

t_a ——大气温度, °C;

p_a ——大气压力, mbar。

2. 实验报告要求

实验报告应包括实验内容、实验要求、实验仪器与设备简介、实验原理、实验步骤以及实验结果处理等内容。实验原始数据应以表格形式汇总整理,必要时绘制实验结果曲线。

实验报告要求条理清晰,要求统一用 A4 打印纸,主要内容应用黑色笔手写完成,严禁打印。

本实验结果处理的具体要求为:

(1) 以测压探针孔在喷管中的位置(x)为横坐标,以 $\frac{p}{p_1}$ 为纵坐标,绘制不同工况下的压力分布曲线。

(2) 以压力比 $\frac{p_b}{p_1}$ 为横坐标,流量 q_m 为纵坐标,绘制流量曲线。

(3) 根据条件,计算喷管最大流量的理论值,并与实验值比较。

思 考 题

1. 分析、比较用实验和计算值分别绘出的渐缩喷管的压力分布曲线以及流量分布曲线的差异。
2. 分析、比较用实验和计算值分别绘出的缩放喷管的压力分布曲线以及流量分布曲线的差异。

① 1 mmH₂O = 9.806 65 Pa。

实验二 制冷制热装置认识实验

一、实验内容

(1)掌握单级蒸气压缩制冷循环的基本构成,熟悉各个部件的基本结构和制冷装置连接方式。

(2)熟悉空调制冷、制热过程以及电冰箱的制冷过程,了解制冷、制热过程中各个部件的运行相关参数。

二、实验要求

(1)了解分体式空气调节器、电冰箱的构成和基本原理。

(2)掌握单级蒸气压缩制冷循环的原理和过程。

三、实验仪器与设备

单级蒸气压缩式制冷系统由压缩机1、冷凝器2、膨胀阀3和蒸发器4组成,如图2-1所示。其工作过程如下:制冷剂在低于被冷却物体或流体的温度下在蒸发器中沸腾,压缩机不断地抽吸蒸发器中产生的蒸气,并将它压缩到冷凝压力,然后送往冷凝器,在一定压力下等压冷却和冷凝成液体,制冷剂冷却和冷凝时放出的热量传给冷却介质(通常是水或空气),冷凝后的液体通过膨胀阀或其他节流元件进入蒸发器。

在整个循环过程中,压缩机起着压缩和输送制冷剂蒸气、降低蒸发器中的压力以及提高冷凝器中制冷剂压力的作用,是整个系统的“心脏”;节流阀对制冷剂起节流降压作用并调节进入蒸发器的制冷剂流量;蒸发器是输出冷量的设备,制冷剂在蒸发器中吸收被冷却物体的热量,从而达到制取冷量的目的;冷凝器是输出热量的设备,从蒸发器中吸取的热量连同压缩机消耗的功转化的热量在冷凝器中被冷却介质带走。

电冰箱实验设备工作原理如图2-2所示。

四、实验准备

学生应预先阅读并掌握本实验的实验原理。

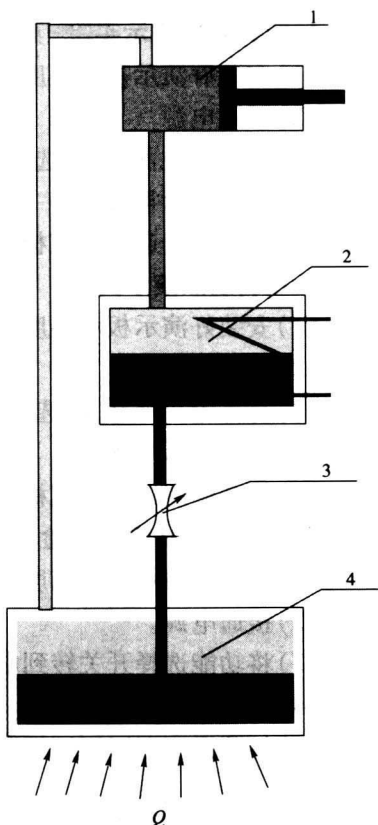


图2-1 单级蒸气压缩式制冷系统
1-压缩机;2-冷凝器;3-膨胀阀;4-蒸发器