

动力工业中的高压蒸汽 论文集

第一輯 水蒸汽的性質

苏联A.C. 郭尔什科夫等主编

电力工业出版社



內 容 提 要

“动力工業中的高压蒸汽”是一部論文集，这些論文詳述了高压設備工作的最主要特征。

本書中譯本分六輯出版，本輯系原書的第一部分，是一篇研究高压高溫蒸汽的热傳导率、粘度及热力学性質的論文。在这篇論文中詳細地介紹了在全苏热工研究院中測定高規范蒸汽导热率、粘度、比热、热焓、比容等参数时所用的設備、方法及測量結果，書中并附有測量結果的圖表及表，这些都是極有价值的數據及參考資料。

本輯可供从事高压設備的研究、設計、制造、調整等方面的工程技術人員及高等学校动力工程各系師生參考。

A. C. ГОРШКОВ Н. Л. ОЙВИН

В. П. РОМАДИН П. Я. ТЮРИН

ПАР ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

СБОРНИК СТАТЕЙ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1950

动力工業中的高压蒸汽

論 文 集

第一輯 水蒸汽的性質

根据苏联国立动力出版社1950年莫斯科版翻譯

顧昌輝譯

793R209

电力工業出版社出版(北京東興隆大街)

北京市書刊出版登記證出字第082号

北京市印刷一厂排印 新华書店發行

787×1092 $\frac{1}{2}$ 开本 * 4印張 * 85千字 * 定价(第10类) 0.60元

1958年4月北京第1版

1958年4月北京第1次印刷(0001—1,250册)

原 序

在衛国战争以后的时期中，苏联的学者和社会主义工業中的工作人員面临着这样的任务：

“要保証苏联国民經济所有各部門进一步地改进技术，借此作为大力增加生产和提高劳动生产率的条件；为此，在最短的时间內，不但必須达到而且必須超过国外的科学水平”^①。

在热能动力电气化的工作部門中，必須：

“在發电厂中广泛运用最新的动力技术——采用高压高温蒸汽、最新的热化汽輪机和最新型的鍋爐……。广泛展开發电厂生产过程自动化的工作……”^①。

有成效地运用高規范的蒸汽、高規范的国产新动力設備以及复杂热力过程的自动化的成果，在战后苏联的地区發电厂中，無論在質或量的指标上，都已經得到非常显著的反映。

由于运用高規范的蒸汽，因而在苏联的發电厂內每年節約了几十万吨的燃料和千百万盧布的资金。

高規范蒸汽在經濟上的优越性，在發电厂中还远未加以利用。然而，完全有信心断言，不久的将来，在苏联的發电厂內这些优越性將充分地予以利用。

苏联的动力工業是以燃用低品質燃料的高汽压發电厂为基础的，就是說主要燃用多灰分和高水分的褐煤、塊狀和錫采泥煤，以及采煤和选煤时所剔出的廢煤。苏联的大型發电厂久已停止燃用高品質的燃料了，而国外的發电厂大多数还用它来进行工作。

苏联的热力工程在直流式鍋爐設備的蒸汽初規范方面超过了国外的动力界。

苏联的热力工程是以第一流的技术为基础的。正在苏联發电厂內运行着的高效率、100 000 瓩、每分鐘 3000 轉的高压汽輪机組和每小时蒸發蒸汽 230 吨的鍋爐机組，是苏联机械制造業值得自豪的产品。汽輪机制造和鍋爐制造的主要設計者都光荣地得到了斯大林獎金获得者的称号。

苏联的热能动力工業在統一計劃的社会主义經濟中正在充分利用着高規范蒸汽的优点。由于热化和电能热能綜合生产供应的發展，在苏联的高压热电中心厂內达到了創记录的技术經濟指标。

由于謹慎操作和对設備及时进行品質良好的快速檢修，在苏联高汽压發电厂

^① 苏联 1946—1950 年恢复和發展国民經济的五年計劃的規定。

內所裝設備的利用率也達到創記錄的指標。

在偉大的蘇聯共產黨的領導下，蘇聯億萬勞動羣眾都懷着同一個愛國的願望——向着光明的未來（共產主義）加速前進。

響應了偉大的蘇聯共產黨的號召，先進的蘇聯學者和生產革新者們在這個偉大的革新運動和掌握高度科學技術運動中起着帶頭作用。

蘇聯的學者們和社會主義工業中的工作人員的創造性合作，使得工作成果加倍地提高。在掌握高規範蒸汽這個例子上，也使我们確信了這一點。

發電廠的工作人員在運用高規範蒸汽的道路上最初是遇到很多困難的。

學者們也幫助做實際工作。在科學研究機構的試驗室裏和在發電廠本部，進行了無數次的試驗，對設備也進行了長時期的觀察。

由於這樣的結果，在很多方面查明了過程的本質，並找到了保證高規範蒸汽動力設備運行得更可靠和更經濟的措施。

在動力工程中運用高規範蒸汽是個重大的創造性工作，但在工作中所取得的經驗只是在分散的雜誌論文中、會議和討論會的資料中闡明。

當高壓設備的數量高速增加的時候，深深感覺到缺乏一種有系統地敘述高壓設備工作特征的技术文獻。

國立動力出版社考慮到，要在短期中對於一個發展得很快的、廣大的新技術部門，由一個專家寫成一本水準足夠高的書是不可能的，因此就採取了由很多作者集體創作這本書的方法。為了這個目的，國立動力出版社委託全蘇熱工研究院（ВТИ）的小組編輯一部論文集，在這裏面要把能夠有系統地敘述高壓設備工作特征的論文選入。所以委託這個小組來進行編輯，是由於全蘇熱工研究院曾對高壓發電廠進行了為數很多的研究和調整工作，因此已積累了足夠多的經驗。

在編輯本論文集時，編者力求把與高壓設備工作特征所有問題有關的資料尽可能全部選入，因此，這部論文集的篇幅是很大的。

整個論文集是由六輯所組成的。在第一輯中敘述的是：高規範和壓力達300絕對大氣壓、溫度達 600°C 的超高規範水蒸汽的性質。這一輯是根據榮獲斯大林獎金的全蘇熱工研究院的物理-技術試驗所所進行的試驗寫成的。

在第二輯中討論的是：高壓鍋爐水質管理的特征、高壓設備的化學處理系統、直流式鍋爐的水質條件及熱力設備中的金屬腐蝕等。

在第三輯中列入的是：關於製造鍋爐所用材料的必要知識，以及按試驗室研究及運行監察所得、金屬在高溫條件下性能方面的知識。

在第四輯中敘述的是：高壓鍋爐機組的系統、它們的溫度條件以及高壓過熱器的工作情況等問題。在這一輯中列入了很多關於爐內過程及流體動力過程等問題的資料，也列入了高壓鍋爐機組運行方式特征的有關資料。

在第五輯中討論的是：關於蘇聯所產高壓配件的知識、這種配件用於高壓設

备中时的特征以及修理它們方面的必要指示。

在第六輯中只列入了高压发电厂热力系統的某些特征，高压汽輪机的調节和它們的啓动問題等。

本論文集是供科学研究、設計、調整等机构的工作人員以及与高规范蒸汽动力設備有关的所有工程师及热力工作人員应用的。本論文集中各文的作者都希望讀者对書中內容提出意見以供將來参考。

編者

目 录

原序

第一輯 水蒸汽的性質

高规范蒸汽的热傳导率、粘度和热力学性質.....Д. Л.吉姆罗脫著.....	5
緒論	5
在高压和高温下水蒸汽和水的熱傳导率	6
水的熱傳导率的确定	15
高温和高压下蒸汽和水的粘度的确定	21
高规范蒸汽热力学性質的研究	35
等压下水蒸汽的比热的实验确定	48

高规范蒸汽的热传导率、粘度和热力学性质

斯大林獎金获得者、技术科学博士 Д. Л. 吉姆罗脱 教授著

緒 論

世界各国从事于研究水蒸汽的热力学性质已有 100 多年。最近几十年来，对于研究水蒸汽的粘度和热传导率等性质给予极大的注意。虽然如此，直到最近还不能认为在热动力方面水蒸汽已研究的十分透徹了。研究所涉及的水蒸汽热力学参数范围还不超过 450°C 。在高温和高压下所进行的研究还不是十分可靠的，而且研究的人极少。在捷尔仁斯基全苏热工研究院的技术物理实验室中，对于所有在热动力方面重要的水蒸汽状态参数范围（也就是达到 600°C 和 300 公斤/公分²）进行了有系统的热力学性质研究。由于党和政府关于在苏联动力工业中广泛运用高压的决议，研究高参数蒸汽的性质变得特别迫切。

1932 年在全苏热工研究院的技术物理实验室中开始对在增高压力下的水蒸汽（苏茄也夫和索洛金共同研究）进行研究。

关于粘度的研究工作是由本文作者在全苏热工研究院中完成的，这些研究是作者用一种独创的工作法在广大的压力和温度间隔内进行的。

本文作者和 H. B. 华尔加伏契克一起在全苏热工研究院内进行了一系列的工作，研究在高压和高温下蒸汽和水的热传导率。根据我们的工作法确定出水蒸汽的比热。在进行实验中，有 С. Л. 利夫金、М. И. 恰世多海和全苏热工研究院技术物理实验室的其他工作人员参加。

实验装置是在全苏热工研究院的中央机械工厂的工作人员参加下制成的。

本文作者在研究水蒸汽比容时也完成了水蒸汽热力学性质的研究工作。

因此全苏热工研究院首先在一个实验室内，在直到现在谁也没有去研究过的状态参数范围内，也就是在超临界范围内和在压力达 300 大气压温度达 600°C 的范围内，以实验来综合地研究了水蒸汽的热力学性质。

根据所得到的实验材料编制了达 600°C 和 300 大气压的水蒸汽表，在水蒸汽表所包括到的整个状态参数范围内，它是完全根据了实验并且根本不用外插法。

在本文中叙述了测量的方法和所得到的结果，以及列出了粘度、热传导率和比热的表格。

在高压和高温下水蒸汽和水的熱傳導率

研究气体和蒸汽的熱傳導率以及它們跟温度和压力間的关系，有着巨大的实际意义。能否把相似理論有效地应用到热交换过程的研究上和具体的热交换器計算上，在頗大程度上和測定参加热交换的热媒的物理参数数值时的精确度有关。可惜，这些資料極為缺乏和不一致，特别是当談到比較高的压力和温度时。

除了全苏热工研究院技术物理實驗室的工作外，在蒸汽的熱傳導率方面仅仅知道兩項工作，这两項工作是在低于一个大气压的压力下和在不高的温度下进行的。虽然在确定水蒸汽的粘度上稍为多做了一点工作，但是这些工作引起了激烈的爭論，因为它們的結果彼此間相差三倍以上。

在全苏热工研究院中，对于精确地以實驗来确定水蒸汽的粘度和熱傳導率的方法給予特别注意。

确定熱傳導率的工作法。当确定气体、蒸汽和液体的熱傳導率时，消除自然对流是最复杂的問題，而自然对流可能大大地歪曲測量結果，在拟定工作法时，應該主要地注意到这一点。看起来，“平面層的方法”是在这方面最完善的方法，这时被研究的物質位于兩塊水平板之間的狭小間隙內，其中上面一塊板具有較高的温度。

但是平面層的方法是非常复杂的，因而沒有得到广泛应用。側面的热量損失必須用專門的保护加热器加以消除。調整几个独立的加热器使得實驗的进行复杂和迟緩起来。此外，在这种方法中消除自然对流的影响在頗大程度上是不可靠的。

由于这样，在全苏热工研究院的工作中，当确定水蒸汽和水的熱傳導率时利用了加热导綫的方法。当确定水蒸汽的熱傳導率时，由于研究出制造測量仪器和檢查了測量导綫沿着管子軸綫的对中心的新方法，在对整个系統的直接測量結果引入修正值的条件下，利用这种方法作为絕對的方法將是可能的。

加热导綫的方法在于确定位于两个同軸的圓柱間的气体的熱傳導率。內部圓柱是一根被电流加热的鉑絲，它同时又作为电阻溫度計。导綫沿着其軸綫拉紧的管子，放在恆温的槽中。为了計算气体的熱傳導率，必須知道导綫中通过电流时所放出的热量、导綫和管壁之間的温度差以及它們的几何尺寸。熱傳導率根据下式計算

$$\lambda = \frac{Q \ln R/r}{2\pi l \Delta t_{\text{gas}}}, \quad (1)$$

式中 Q ——从导綫穿过气体層至管壁的热流；

l ——导綫的長度；

Δt_{gas} ——在气体層中的温度降。

因为导綫具有有限的長度并且和較粗电綫焊牢的兩端有着較低的温度，所以必須用某种方法不使热量沿着导綫导出，并引入由于沿导綫長度温度不均匀的修正值。

这个問題曾由許多研究者們从理論上加以研究。

由电流加热的鉑絲(热量从它的兩端傳給粗的引入电綫)的温度場可用微分方程式来表示：

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - ut + v = 0, \quad (2)$$

$$u = \frac{2\lambda}{l_m r^2 \pi} \frac{R}{r} - \frac{c J^2 \rho_0 \alpha}{l_m (\pi r^2)^2}, \quad (3)$$

$$v = \frac{c J^2 \rho_0}{l (\pi r^2)^2}; \quad (4)$$

式中 t ——导綫的瞬时温度；

r 和 R ——导綫和管子的半徑；

l_m ——导綫金屬的热傳导率；

λ ——气体的热傳导率；

J ——电流强度；

ρ ——温度为 t 时导綫的比电阻；

c ——电單位变为热單位的变换系数；

x ——离开导綫一端的距离。

如果認為导綫兩端的温度不等于恆温槽的温度，而稍为比它高，那末以 t_0 来表示这个温度后，不难証明方程式(2)的全解將具有下列形式：

$$t = \frac{v}{u} - \left[\frac{v}{u} - t_0 \right] \frac{e^{-(l-x)\sqrt{u}} + e^{-x\sqrt{u}}}{1 + e^{-l\sqrt{u}}}. \quad (5)$$

随着导綫兩端的远离，由于导綫和管子之間的温度差增大，經過气体的热流也就增長，而沿着导綫的热量导出迅速降低，最后，变成这样微小，以致和經過气体層的热量損失相比可以忽略不計。从这个观点着手，导綫的温度將由透過气体層的热交换来确定，所以当导綫兩端繼續远离时，它在实际上成为定值。因此，在被电流加热而处于所述条件下的任何足够長的导綫中，可以划出一定的中段来，其温度足够精确地保持为定值并且和导綫的長度無關。

兩端的長度，因而也是中段的長度，和影响到透過气体的热交换的許多因素有关。这种热交换愈坏，則为了形成这样的中段所必需的导綫應該愈長。在高度真空中測量的条件下当涉及确定輻射的修正值时(当然首先是对于短的管子)，这一点是特別重要的。

低压下水蒸汽热传导率的确定。在加热导线的办法中，只能根据适当地选择导线和管子的几何尺寸以及温度差来消除对流。当气体足够稀薄时，这个问题就方便得多，但是这时在新的方面又出现了歪曲观察结果的新因素，这就是在导线和气体之间的温度突变。

可翁特和华尔布格研究了属于气体粘度理论的滑移现象后，预先指出了在热传导现象中管壁和气体间温度存在着突变。这个突变的数值可以下列式子表示：

$$\Delta t = -\gamma \frac{dt}{dn}, \quad (6)$$

也就是在固体和气体的边界处的温度突变 Δt ，正比于沿着法线和表面的温度梯度 $\frac{dt}{dn}$ 。

斯莫罗霍夫斯基、基米略瑞夫、拉若来夫和其他等人研究了温度突变的现象。

利用圆柱形气体层中温度场的方程式，很容易证明导线温度 (t_{np}) 和管壁温度 (t_{cm}) 间的温度差具有下列形式：

$$t_{np} - t_{cm} = \frac{Q}{2\pi\lambda r(l_0 - l_k)} \left\{ \frac{\gamma}{r} + \frac{\gamma'}{R} + \ln \frac{R}{r} \right\}. \quad (7)$$

式中比例系数 γ 和 γ' 是对于导线和管子的表面而言的。

斯莫罗霍夫斯基指出， γ 的数值正比于分子的平均自由路程，因而反比于气体的压力。若假设 $\gamma = \frac{A}{P}$ ，式中 A ——比例系数，而 P ——气体的压力，而且 $\frac{\gamma'}{R}$ 这一项和 $\frac{\gamma}{r}$ 相比较可以忽略，因为 R 大于 r 很多倍，那么可以写成：

$$t_{np} - t_{cm} = \frac{Q}{2\pi\lambda r(l_0 - l_k)} \left\{ \frac{A}{P} + r \ln \frac{R}{r} \right\}. \quad (8)$$

П. П. 拉若来夫在其解释温度突变的著作中，对于平面的气体层利用了类似的关系

$$t_1 - t_2 = \frac{Q}{\lambda F} \left\{ \frac{2A}{P} + \delta \right\}. \quad (9)$$

式中 δ ——气体层的厚度。如果保持穿过气体层的热流 Q 不变，那末按照公式 (8)，导线和管壁间的温度差将和 $\frac{1}{P}$ 值成直线变化。对于 $\frac{1}{P} = 0$ 的情况，这个温度差的极限数值是和没有温度突变的情况相符合的，也就是和在气体层中真正的温度差相符合。因为 Q 保持为定值，所以当 $\frac{1}{P}$ 改变时，很明显，改变的只是温度突变的数值和极限值之间的差 ($t_{np} - t_{cm}$)。保持 Q 不变并不困难。

为了求得外插的数值，可方便地利用下面所示公式的略为改变的形式：

$$\lim_{\frac{1}{P} \rightarrow 0} (t_{np} - t_{cm}) = \Delta t_{\text{нас}}. \quad (10)$$

考虑到

$$\lim_{\frac{1}{P} \rightarrow 0} (t_{np} - t_{cm}) = \frac{Q \ln \frac{R}{r}}{2\pi\lambda l} = \Delta t_{\text{cas}}, \quad (11)$$

并采用下列代号:

$$A \frac{Q}{2\pi r \lambda l} = B,$$

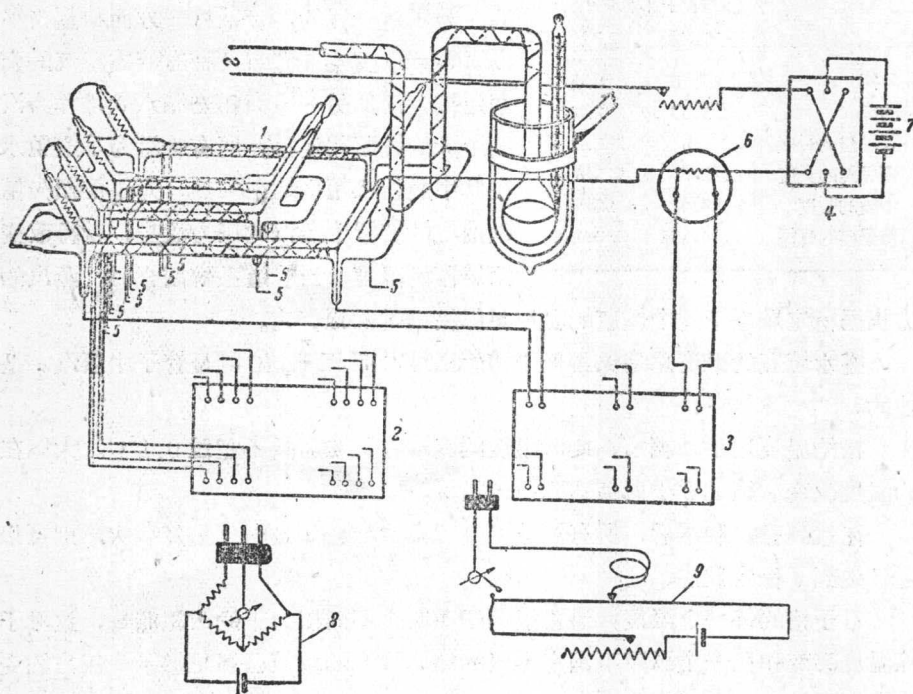


圖 1 实验装置简图

1—测量管; 2, 3, 4—开关; 5—通往相应切换开关的导线; 6—标准电阻; 7—电源; 8—惠斯登电桥; 9—电位差计。

可以把公式(10)改写成下列形式:

$$t_{np} - t_{cm} = B \left(\frac{1}{P} \right) + \Delta t_{\text{cas}}. \quad (12)$$

当試驗时, 在恆温槽的同一温度下, B 保持为定值, 因为按条件 Q 是定值; A, r, l 是仪器的常数; 既然在测量过程中气体层的温度保持为定值而改变的只是温度突变, λ 也应保持为定值。

实验装置的說明。为了确定低压下水蒸汽的热傳导率而在测量中所采用的实验装置(圖 1), 是由不同直径的兩对玻璃管組成的, 这样就能够判断是否可靠地

消除对流的影响。同一直徑但長度不同的每一对管子有可能消除兩端的影响。

四根測量管子水平地放置在帶有攪拌器的油槽中。管子的尺寸列于表 1 中。

在管子的表面上双綫地繞上鉑电阻溫度計。这些溫度計的电阻是利用可以完全消除引入电綫影响的四綫制等臂电桥来測量的。槽利用在它底部的电爐加热。槽要精密地絕緣并裝有絕热的盖子。槽的溫度場曾經加以研究过并且是足够均匀的。根据測量管壁溫度的均匀性也可以判断出同一情况。

表 1

	細的管子 公厘	粗的管子 公厘
外徑	5.80	10.00
內徑	3.53	7.85
長導綫的長度	210.6	207.2
短導綫的長度	112.2	113.6
中段的長度	98.4	93.6
鉑導綫的直徑	0.152	0.152

为了消除溫度突变，蒸汽热傳導率的測量是在不超过 100 公厘水銀柱的不同压力下进行的。为了这一目的，管系从一方面和蘭格牟尔 (Ленгмюр) 真空裝置以及帶有液态空气的套圈相連接，而从另一方面和充滿水的并作为汽源的不大的燒瓶相連接。所有管道为了避免水分在其中凝結都用电爐来加热。为了使預先精細地抽空的裝置中蒸汽的压力改变，就得改变盛水燒瓶的溫度。当管道系統閉合时，蒸汽的压力

根据穩定状态下这个燒瓶的溫度足够精确地加以确定。

盛水燒瓶的溫度总是保持低于槽的溫度，而因此在測量管子中蒸汽总是过热的。

槽的溫度用手动調节。此时溫度的变动在試驗时不要超过 0.1°C 。大概在槽的溫度改变后經過 2 小时便达到穩定情况。

在达到穩定状态后，所有測量要进行几次。若測量結果重复多次，則可以断定已达到了穩定状态。

对于槽的每一个溫度，通常限制于在四个不同压力下的四組測量，这对于消除溫度突变和在一个溫度下确定蒸汽的热傳導率的数值已經足够了。压力的变化从 5 至 90 公厘水銀柱。

从導綫到管壁的輻射热量根据史蒂芬-波尔兹曼公式来确定

$$q' = C_{\text{Pt}}[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]F,$$

式中 C_{Pt} ——鉑的輻射系数； T_1 ——導綫的絕對溫度；

T_2 ——管壁的絕對溫度； F ——導綫的表面積，

和導綫的溫度、它的表面状态以及鉑的純粹度等等有关的系数 C_{Pt} ，已被我們在專門的一組試驗中确定。为此，要把盛水燒瓶分开，而把裝置精細地抽空到馬克-列涅特(Мак-Леод)压力表中的水銀附着为止。

試驗是在裝置連續抽水的情况下进行的。槽的溫度变化从室温至 200°C ，而導綫的溫度变化从 50 至 400°C 。

确定輻射系数的精确度約为 15%，这在我們測量中是完全足够了，因为在

我們的試驗条件下輻射本身的修正不超过 2 %。

公式(1)中的热量 Q 是由导綫的中段所放出的热量, 和由測量导綫的同一中段輻射出的热量之差来确定。

長度 l 是由長的和短的測量导綫的長度之間的差来确定, 也就是

$$l = l_0 - l_k.$$

測量部分長度由于溫度变化而加的修正, 尤其是測量导綫直徑变化的修正, 可以忽略不計, 因为这种修正位在測量精确度的范围以外。

为了計算 Δt_{as} , 必須对測量管壁中的溫度降作出修正, 因为繞在管子上的电阻溫度計能測量出它的外部溫度。对于管壁中溫度降的修正用計算方法来进行。因为在我們的試驗中, 这个溫度降和总的溫度差相比較是不大的, 所以为了作出修正而必須知道的玻璃热傳导率按表上对于精制玻璃的数据来选取, 并且認為它等于 0.60 个工程單位。

为了找得 Δt_{as} , 利用关系式(12)。

如果把 $\frac{1}{P}$ 放在橫座标軸上, 而把 $t_{np} - t_{cm}$ 放在縱座标軸上, 那末对于在槽的一个溫度下但在管內所充的蒸汽压力不同时所进行的一組測量, 可得到在縱座标軸上截出 Δt_{as} 数值的直綫来, Δt_{as} 也就是在气体層中的真正溫度差。

用这种方法計算出来的热傳导率是对于下列平均溫度而言的:

$$\bar{t}_{npa} = t_{cm} + \frac{\Delta t_{as}}{2}.$$

高压和高温下水蒸汽热傳导率的确定。当过渡到高压时, 上面所說的測量方法已經不能以像在低压下那样簡單的形式来应用了。

消除对流热交換的必要性引起了很大的困难, 因为在大的蒸汽密度下必須使得裝置的几何尺寸極其微小。

另一困难为必須从高压和高温范围内引出測量导綫。

当过渡到高压时还是可以保留絕對的測量方法, 而不管由此引起的附加困难, 这些困难是与測量导綫在小尺寸的測量管中对中心有关的。

測量管的几何尺寸基本上是根据消除自然对流热交換的必要性来确定的。

从相似理論得出, 在自然对流的情况下, 热量的傳遞强度决定于無因次的准则数 Gr 与 Pr 的乘积:

$$Gr = \frac{\beta \delta^3 g \Delta t}{\nu^2}, \quad Pr = \frac{\nu}{a},$$

式中 g ——重力加速度; β ——容积膨脹系数;

Δt ——气体層中的溫度降; δ ——气体層的厚度;

ν ——运动粘度; a ——溫度傳导系数。

在 M. A. 米海耶夫的“傳热学教程”一書中指出, 当 $Gr \cdot Pr$ 乘积的数值 < 1000

时, 对流的热量傳遞实际上不会存在。

应该这样来选择裝置的尺寸, 使得在导綫和管壁間的温度差不太小, 这个不等式就能够滿足。

在技术物理實驗室在高压下的測量中, 利用了內徑为 0.511 公厘、外徑为 1.71 公厘的石英毛細管。

在不同的热力負荷下, 也就是在流經測量导綫的不同电流强度下, 进行几次試驗后, 在測量过程中随时有可能确信沒有自然对流的影响。

对流传热的强度跟导綫和管壁間的温度差有关, 因此当有自然对流存在时, 热傳导系数的測量数值將随流經測量导綫的电流强度而定。这种測量指出, 在所有被研究的压力范围內不会發生自然对流。

当制造裝置时, 由于毛細管的尺寸小, 最大的困难是測量导綫沿着管子軸綫的正确对中心。

石英管子和測量导綫安裝在允許导綫精确对中心的銀質架子上。

每一根測量的鉑导綫兩端焊接在較粗的鉑导綫的中心。其中一根粗导綫坚固地固定在銀質架子上, 并且用云母垫片使它和架子絕緣。在焊接于測量导綫的另一端的第二根粗鉑导綫上焊上鎢絲彈簧, 鎢絲彈簧的第二端同样固定在架子上并且用云母使它和架子絕緣。这样, 鉑导綫在毛細管的內部而被拉紧在銀架上, 同时和架子並沒有电气接触。

毛細管本身借助于調整螺釘和彈簧这样地固定在架子上, 使得它的兩端可以在两个垂直于毛細管軸綫的方向移动。在对中心时不是导綫在毛細管內移动, 而是毛細管相对于測量导綫移动。

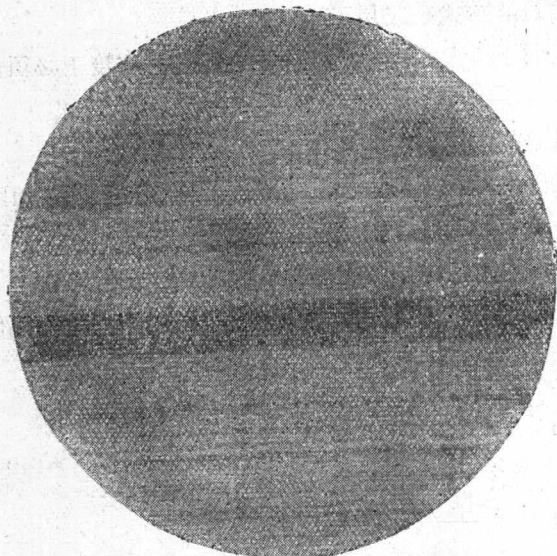


圖 2 測量管的显微照相。导綫沿着毛細管軸綫的对中心

在对中心的时候, 毛細管中导綫的位置借助于足够放大倍数的显微鏡在两个垂直方向观察。

銀架和毛細管一起放在酒精和苯的混合物中, 混合物应该这样来选择, 使得它的折射系数对于光谱的某些部分接近于石英的折射系数。

在毛細管的內部倒入預先染色的同样混合物。当在显微鏡下观察毛細管时, 它的管壁实际上已消失不見, 而鉑导綫

在充滿酒精和苯的染色混合物的毛細管中能清楚地、毫無歪曲地看到。

为了引入由于每一根管子对中心时所产生某种輕微偏心度的修正值，在三点上沿两个垂直方向攝取六張显微照相。在圖2上表示出这种显微照相。即使是小的毛細管直徑，由于导綫的良好对中心，偏心度的修正仅为百分之零点几。

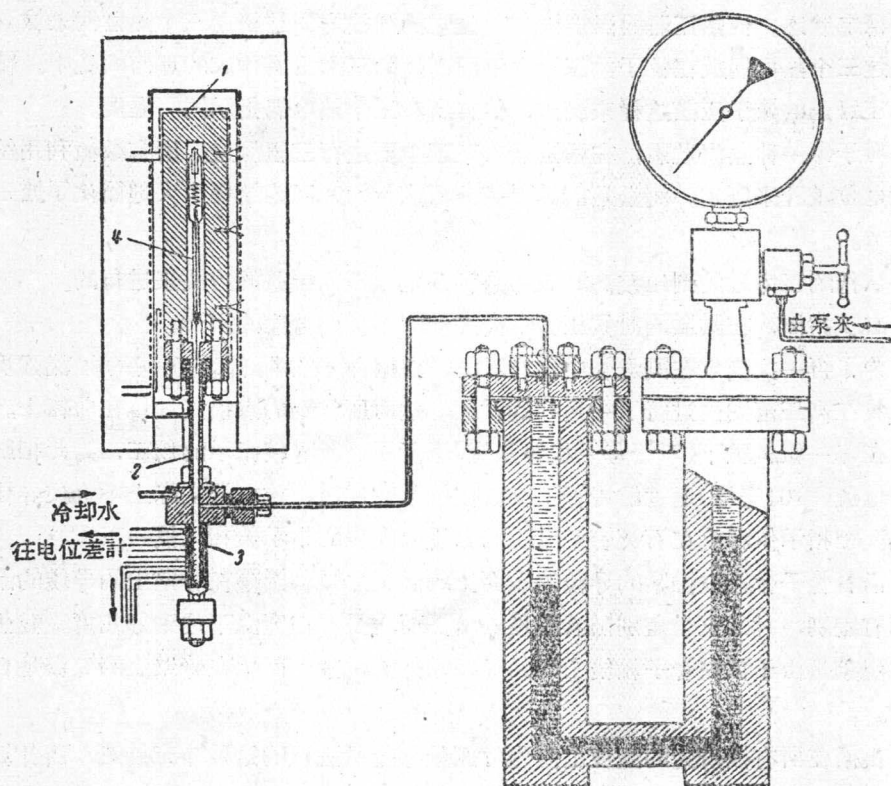


圖 3 实验装置簡圖

1—热压器；2—連接管；3—圓环；4—測量管。

在热压器(圖3)1的下部連接有長的厚壁管子2，厚壁管子的一端有水冷却。这根管子是用来向試驗裝置供水的。利用長的石英毛細管来彼此絕緣的引入电綫，通过这些管子的內部，引到鋼环3上并从內部焊接在鋼环上。圓环用橡皮墊片彼此絕緣，在鋼环的外部焊上通向切换开关的电綫。由鋼环和橡皮环組成的整个圆柱用螺釘压紧在管子的下端。为了避免通过充滿在管子2下部水中引入电綫相互接触，管子的下端和使导綫彼此絕緣并一直达到圓环本身的長石英毛細管的兩端，灌入适量的絕緣焦油。因为毛細管的上端終止在蒸汽范圍內，因此就保證了导綫彼此間很好的电絕緣。

向試驗裝置供水是用高压泵經過中間室来實現的。中間室的下部注滿了水

銀。

在热压器上繞有由三个部分組成的爐子，这三个部分可以利用变阻器独立地調节。爐子的調节利用手来进行。爐子可以使沿着热压器的温度均匀。

进行試驗的順序如下。

把預先精細抽空的裝置完全充滿了水，然后把爐子接通。大約經過了2小时达到穩定状态。使热压器的温度固定和使它的加热均匀是根据三个热电偶来檢查的，这三个热电偶放在位于热压器上不同高度的三点上所作成的專門的孔中。繞在热压器上的爐子應該这样来調节，使得所有三个热电偶指示同一温度。

对于每一种蒸汽状态，在穩定状态下至少要进行三組測量。所有数值利用拉潑斯电位差計来測定。測量是沿等温綫分組进行的，因为这样大大地簡化了爐子的調节。

从低的压力过渡到比較高的压力是利用把水压入裝置的方法来进行的。

必須指出，在試驗的时候压力不会变动，不需要补充的調节。

为了再一次确定在測量管中沒有对流，在兩种彼此間显著不同的电流强度下，曾在高压范圍内进行了一系列的試驗，这时所得到的点很好地地位在曲綫上。

在每一組試驗下(对于每一根等温綫)进行了測量导綫指示的校正，为此把微弱的电流(0.01安培)通过沿着管子軸綫被拉紧的导綫，这电流实际上不会使导綫加热。把指示值和繞在石英管子壁上的电阻温度表的指示值相比較一下。

沿着管子軸綫被拉紧的导綫的表面的温度总是和圍繞在管壁上的导綫的温度稍有差別，并且这个差別随着温度的增長而增長，在高温下达到好几度。發生这种現象是由于位在管子軸綫上的鉑导綫用彈簧拉紧，而位在管壁上的导綫是自由的。

根据在所有被研究的温度范圍內对測量导綫所进行的这种补充校正，当計算測量导綫的温度时应引入相应的修正值。

在高温下，由于热压器金屬的氧化，在热压器中的水就有形成氫的危險性。虽然热压器是由特殊的不銹耐热鋼制成的，但仍要进行确定热压器中氫的含量的專門測量。为此，在蒸汽热傳导率的試驗停止后，使裝置中的压力降低到一个大气压，这时有一部分蒸汽凝結下来。当在一个大气压的压力下确定残余水蒸汽的热傳导率时，留在仪器中的氫，由于它比蒸汽有着大得很多的热傳导率而可以显示出来。但是，这种測量的結果和以前在一个大气压下在玻璃制的实验裝置中所进行的測量能很好地符合一致。这样就証实了沒有氫存在。

如同前面一样，在石英管壁中的温度降之修正是采用茄埃的数据用計算方法来进行。

对于輻射的修正約为2%，这是根据了前面所提到的鉑导綫的輻射系数的測量而作出的。

水的热傳导率的确定

当确定水的热傳导率时，消除自然对流对于測量結果的影响比起高压蒸汽更为困难，特别是在高温时。

在这种情况下，为了消除对流，間隙应该是很小。此外，如同計算所指出的那样，水的温度愈高，則許可的温度降愈小，而在高温下是比較小的。

应用加热导綫的方法除了碰到必須消除对流的困难外，还必须使得裝置内部的測量导綫極其精密地絕緣，因为甚至在良好净化和專門准备的水中，在高温下也必须注意它的导电性。因此必須建立完全由石英管組成的、且除了导綫本身外沒有金屬部分的裝置。这就使得导綫沿着管子軸綫的对中心特別困难，但同时却可以避免寄生电流对于測量結果的影响。在这种裝置中所有导綫利用整根的石英管彼此間完全絕緣。在裝置内部的液体中，任何地方都沒有多大的电位梯度，因而不必考虑在充滿裝置前已精細净化的水的極小导电性的影响。

导綫从高压范圍內引出如同在上述裝置中那样来实现。

在圖4.上示出了內徑为 0.598 公厘和長度为 90.6 公厘的石英測量管 1。在它的上部焊上了比較粗的石英管，粗的石英管中放有鍍絲彈簧，以拉紧沿着毛細管軸綫放置的鉑測量导綫。

管子 2 的上部是开啓的，并在它的上面焊接上帶有不大的石英毛細管 4 的石英叉 3，通入电流的导綫通过石英毛細管。在測量管 1 的下部焊接上比較粗的管子 6，管子 6 的内部插入管子 7。用来通入电流的导綫在管子 6 的内部通过，而細的下部測量导綫在管子 6 和 7 之間通过。

上部和下部的測量导綫焊接在鉑导綫粗的兩端上，粗的兩端稍許进入到毛細管內，并且也焊接在沿着毛細管 1 的軸綫放置的細的鉑測量导綫上。这些粗的鉑导綫按其直徑只是和毛細管的內徑少許差一些，并且用以使其中的鉑測量导綫对中心。細的測量鉑导綫應該准确地焊接在这兩端的中心。为此，在粗的鉑导綫端头上的中心准确地鑽一个孔。虽然采用了所有这些方法，但仍然不能达到像在測量高压下蒸汽的热傳导性之裝置中所具有的那样良好对中心，在这一种裝置中，为了良好对中心，曾采用了專門的調整螺釘。

这就迫使利用相对的方法来进行測量，根据測量室温下水的热傳导率和不同温度下空气的热傳导率确定导綫的偏心率，因为这些物質有着極其可靠的实验数据。

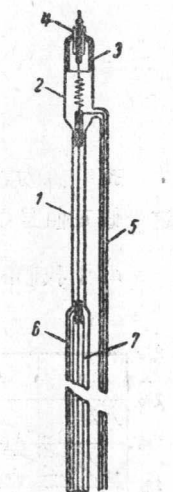


圖 4 測量的石英管
1—測量管；2—管子；3—石英叉；4—石英毛細管；5、6、7—石英管。