

內部資料
注意保存

1 9 6 4

全國測試基地年會報告集

(真 空 測 試)

(第一分冊)

國 家 科 委

真 空 測 試 基 地 專 業 組

1 9 6 4 年 9 月

· 几 点 說 明

1. 第四次全国真空測試會議于1964年9月7日到15日在兰州召开。同时也一併召开了第一次真空技术會議。根据會議决定，印发本報告集(分二冊刊印)作为相互交流和参考之用。这些報告論文，虽經編委会各同志分別审閱，又請作者校核修改过。但限于出版時間，还有一些技术問題未来得及請作者重新修改或校核，也有些論点尚待进一步完善或商榷。因此，本報告集內所收論文，只能作为初稿整理。正式報告以各单位自印或公开发表的文本为准。如欲引用时，务必加以注意。

2. 本報告集由中国科学院新技术局負責出版、交流，由兰州物理研究所負責編輯。在出版方面得到兰州八一印刷厂的全力支持，順此致謝。

第四次全國真空測試會議

報告集編輯委員會

金建中 (主任委員) 华中一 (副主任委員)
(以姓名筆划為序)

王芳霖	王欲知	何 煒	李旺奎
陸家和	陳振宇	查良鎮	范垂禎
胡炳森	費渭南	高本輝	郭元恆
崔遂先	程渭綸	楊迺恆	黃振邦

目 录

绝对量具和校准系统

新型标准压缩式真空计的研究.....	李旺奎 陈立仁 高葆杰 胡 伟 (1)
一种新型结构的充油压缩式真空规	华中一 蔡祖泉 姜祥祺 章壮建 杨雅南 翁根森 (34)
新型压缩真空计的设计.....	费渭南 (40)
标准压缩真空计毛细管的精密测量.....	钱 湧 陈有泉 (45)
动态校准系统试制报告.....	华中一 姜祥祺 沈绍清 陈桂宝 (52)
高真空量具的泻流法校准.....	姜祥祺 蔡祖泉 (61)
小孔法校准电离规.....	王芳霖等 (72)
半自动金属膨胀式真空计校验系统.....	刘宝玲 (78)
以麦氏计校准电离计的动态平衡玻璃真空系统建立 (摘要)	李广顺 侯世儒 郝承祥 (90)

相对量具

超高真空热阴极电离规中自发 X 射线效应的消除.....	华中一 (93)
超高真空电离计.....	方厚民 吴润宗 于祖哲 章玉鳞 吴文琦 (100)
针状收集极热阴极电离真空计理论.....	唐政清 陈洪元 陈浩然 (107)
无磁场冷阴极电离真空规.....	袁一鹏 杜元成 (124)
环境温度对皮拉尼真空计读数的影响及其补偿.....	李先忠 孙广生 (139)
宽量程冷阴极电离真空规.....	章壮健 (147)
潘宁式冷规特性的研究 (摘要)	张良震 (154)
具有螺旋形阳极冷规的实验研究 (摘要)	张达明等 (155)
热电阻真空计 (皮拉尼) 在各种因素影响下的工作性能的研究 (摘要)	李培基 张 伟 王仪康 (156)
同轴圆筒形辐射真空规的最佳铝笼结构 (摘要)	姜祥祺 (157)
关于真空测量方面的一些理论工作 (摘要报导)	王欲知 (158)
电阻真空计研究 (摘要)	徐廷伟 (159)
超高真空获得与量测的研究	陆家和 耿完模 赵丕烈 陈修养 周锦宝 王凤翔 (163)
潘宁规在冶金中应用的初步研究.....	张达明等 (187)
对数电离真空计.....	张希雄 (201)

质谱和探漏技术

迴旋质谱計的實驗研究·····	潘慈常 (213)
迴旋共振质谱計特性的研究·····	席光康 刘恩元 宋庆熙 王恩耀 戴文祿 (227)
迴旋质谱計中的离子彈道·····	潘孝仁 楊惠新 (237)
試用迴旋质谱計分析复鋁鉄的放气·····	某厂工艺試驗室 (252)
关于用射頻质谱計进行气体分析的两个問題的討論 (摘要) ·····	張元庆等 (258)
JLH—2 型氮质谱檢漏儀的研究試制 ·····	司鴻楠 呂雲瑜 王南成 姜文斌 (262)
质谱探漏儀的灵敏度及其校准·····	查良鎮 薛祖庆 (274)
石英膜标准漏孔的試制与測定·····	黃心源 蔡祖泉 黃綏和 潘高春 (286)
薄膜渗氮型标准漏孔的研究·····	查良鎮 薛祖庆 杜繼楨 付克信 (297)
热真空計檢漏机理的初步探討·····	金懋昌 (303)
鈦泵多級檢漏·····	王建球 (310)
“气体放大型离子探测裝置”研究总结报告·····	田清平 曾昭勳 范垂禎 (319)
靜电計放大器另点漂移的研究·····	陈长彦 趙世琮 (326)

材料真空性能的研究

有机材料常溫出气研究·····	高本輝 薛大同 張景欽 辛全英 (337)
国产玻璃出气的研究 (吸附、解吸和半无穷型扩散) ·····	陈丕瑾 彭江得 沈洪麟 (363)
金属材料出气的研究——一种非磁性不銹鋼的出气性能 ·····	馬瑞霖 薛大同 曹尔強 (382)
扩散泵油化学組成与热氧化稳定性的关系·····	葛文蔚等 (403)
超高真空技术中的表面吸附問題·····	郭元恆 顧惕人 (414)

新型标准压缩式真空计的研究

李旺奎 陈立仁 高葆杰 胡 偉

本文第一部分从理论上探讨了压缩式真空计毛细管中水银不规则运动的机理。从而找到了在毛细管中滴油润滑的方法,较彻底地消除了毛细管中水银的不规则运动。第二部分详尽地叙述了研制成的新型标准压缩式真空计的特点和性能。它具有有油的均匀内径的毛细管,有消除水银蒸汽流效应的装置,在 10^{-5} — 10^{-3} 毛压强范围内的测量误差 $\leq \pm 2.3\%$ 。最后讨论了压缩式真空计与膨胀式系统这两个绝对标准的互校结果,取得了较为满意的一致性。

第一部分: 压缩式真空计毛细管中水银运动状态研究

§ 1 引 言

多年来,一些研究者^[1-5]都曾观察了压缩式真空计毛细管中水银的运动状态,指出了下面许多异常现象:

1. 沿毛细管长度不同点水银的毛细压低值无规则的变化,即所谓“变化的毛细作用”(Variable Capillarity) [1]
2. 测量毛细管中水银面高于比较毛细管中水银面,即所谓的“抓住”(Catch)效应 [2,3]。
3. 提升或下降水银到毛细管某一位置停止后,敲击毛细管可使水银面跳到一新的位置。称这为“水银跳动现象” [4,5]。
4. 当水银在毛细管中下降运动时,发现有放电现象和悬挂在毛细管旁的温度计被吸近的现象 [3],认为这是“静电效应”引起的。

这些现象都将引起严重的误差,尤其是在低压(10^{-4} — 10^{-6} 毛)下测量时,将引起百分之几十或百分之几百的误差,有时甚至于产生“负压”(抓住效应),而使用压缩式真空计进行测量成为不可能。由此可见,克服压缩式真空计毛细管中上述现象所引起的误差,就成了提高压缩式真空计测量精度和扩展测量下限的关键所在,就成了压缩式真空计研究中的核心问题。

一些研究者^[2-4]曾经指出:污染、毛细管表面性能、静电效应等是产生上述异常现象的重要因素。可采用纯净的水银,严格清洗毛细管和压缩式真空计、磨毛毛细管内壁、轻敲毛细管等措施来降低上述异常现象所引起的误差。Rosenberg^[1,6]最先于1939年用磨毛毛细管方法不但获得了一均匀内径的毛细管,同时也降低了上述异常现象引起的误差,使他所制的压缩式真空计获得了较好的精度,因此Rosenberg方法一直沿用到现在。

一些研究者^[4,5]也曾指出:目前所采用的方法还没有彻底地消除上述异常现象引起的误差,也没有探清引起上述异常现象的本质。

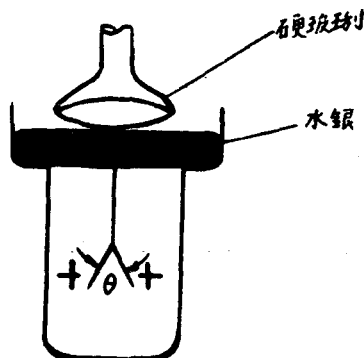
为了提高压缩式真空计在 10^{-4} 毫以下压强测量时的精度，我们的工作首先集中研究了压缩式真空计毛细管中水银运动状态，企图探清引起上述异常现象本质，找出更好的消除方法。

§ 2 压缩式真空计毛细管中水银运动状态的实验观察

污染的坏作用已被他人的许多实验所证实。我们实验中也同样证实了这一点。

我们用了下面两实验充分证实了“静电效应”的存在：

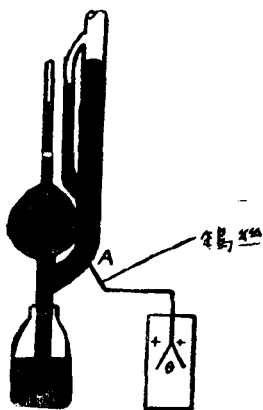
1. 在大气中玻璃面和水银面脱离接触实验。图1是当硬玻璃面和水银面脱离接触时，



(图1) “静电效应”实验装置

下面验电器的两叶片张开一 θ 角，离开距离越大， θ 角越大。这证明了当水银与玻璃面脱离接触时有静电产生，此时水银带正电，玻璃带负电。

2. 在真空中硬玻璃面和水银面脱离接触实验

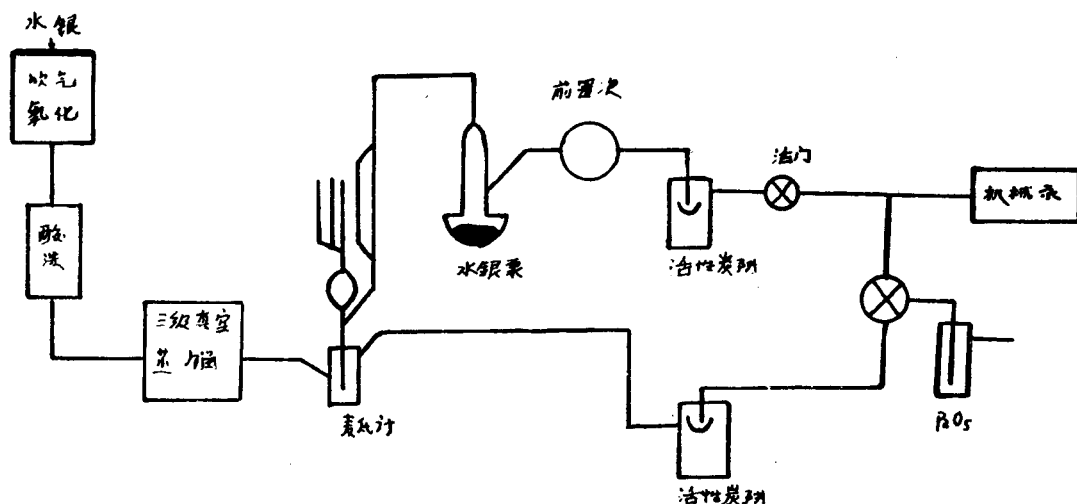


(图2) 麦氏计中的“静电效应”观察装置

图2是一简单的压缩式真空计，在A处封接一根钨丝，其一端可与压缩式真空计中水银接触，另一端与外面验电器连接。当水银从压缩式真空计上部下降时，水银与原先接触的毛细管和粗管表面脱离，此时验电器两叶片也张开一 θ 角，只是由于储存器中水银过多，电容大，所以张开的 θ 角很小。但这同样也证明了“静电效应”的存在。

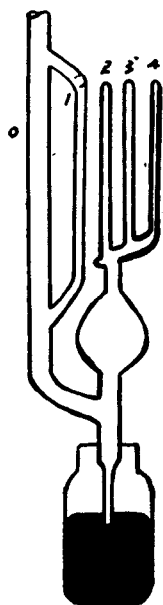
根据文献^[1-5]和我们的实验，最初我们假定污染和“静电效应”是引起上述异常现象的主要原因，并提出了用尽可能地避免污染和毛细管镀透明导电膜(SnO_2)的方法企图根

除上述誤差。



(图3) 試驗裝置

图3是实验装置，压缩式真空计所用的水银是经过吹气氧化、酸洗、三级真空蒸馏后直接蒸进压缩式真空计的储存器的。压缩式真空计经过严格的清洗，机械泵、油活门与系统其它部分之间用活性炭阱隔开；以及压缩式真空计升液管和储存器间的连接磨口用Apiezon W代替油脂，以防止各种油蒸汽对压缩式真空计的污染。提升用的气体经 P_2O_5 瓶干燥。用这些措施来保证清洁。压缩式真空计所用毛细管内壁镀上了一层透明的 SnO_2 导电膜，封接前曾用通表在毛细管两端测量，证明此层电阻很小。



(图4)

毛细管中水银
运动观察的装置

在这些条件下可认为已基本上保证了清洁和消除了“静电效应”，应该得到预期的效果。但多次重复的实验观察和最初的假定相矛盾，也就是在这些条件下依然存在上述一系列异常现象，尤其是存在着“抓住”效应。从这里可以初步结论：在保证清洁的条件下“静电效应”不是引起误差唯一的或主要的原因。

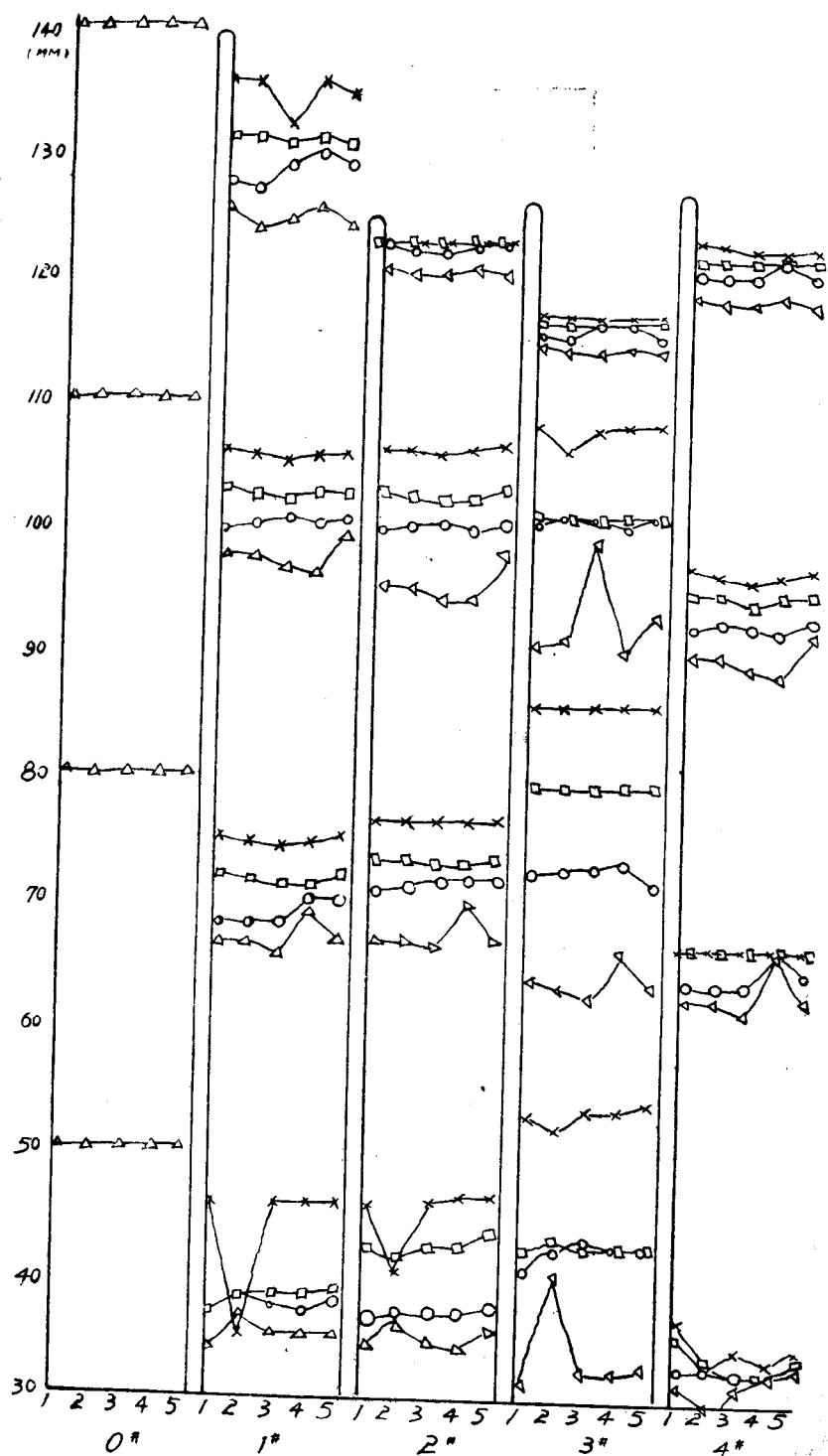
为了进一步证实这一初步论断和探清问题的本质，我们又较定量的进行了不同表面处理的多根毛细管内水银柱运动状态的实验观察。图4是实验的毛细管装置。图5是所测的曲线。

0#粗管

1*、2* Φ 内=0.792 普通毛细管

3* Φ 内=0.71 镀 SnO_2 毛细管

4* Φ 内=0.742 磨毛细管



符号意义: ▲ 上升 ○ 波动 数量, × 下降 □ 下降数量

(图 5) 水銀运动的特征曲线

图 5 曲綫說明:

纵坐标表示各管水銀面停止处的高度, 横坐标表示实验的次数。

0 #、1 #、2 #、3 #、4 #代表图 4 的相应粗管和毛细管。

实验点取法如下: 在某压强 P 下取样进行测量, 使粗管中水銀面提升到和上升后下降到某一相同高度(压缩比不变), 记下在提升停止后敲与不敲毛细管和下降停止后敲与不敲毛细管时各毛细管中水銀面的四个位置。重复此过程五次。可记下各管中水銀面的二十个位置, 用折綫把相同条件下五个点联起, 共得四条折綫。

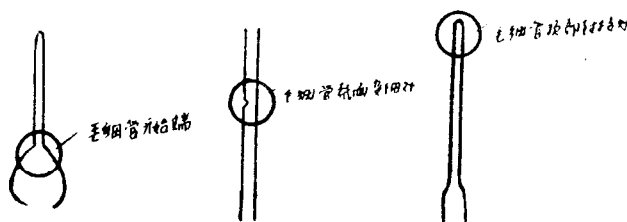
若連綫是一水平綫, 則說明重复性好, 若四折綫重于一水平綫, 則說明不存在异常現象引起的誤差。

可作出沿管不同高度(P =常数, 压缩比改变)的上述特征曲綫, 以說明各管不同高度处异常現象的程度。

从上面曲綫可以看出: “跳动”現象和“抓住”效应与表面的不同处理只有量的区别而没有质的不同。再者, 提升停止后敲击毛细管时水銀柱的跳上現象是无法用“静电效应”来解释的。这就进一步証明了“静电效应”在不同表面处理的毛细管中也不是引起异常現象的唯一原因。

在重复的提升和下降水銀柱而进行的实验观察中, 我們看到了不同表面处理的毛细管中有如下的共同規律:

1. 水銀柱在毛细管内有級跳式地上升或下降运动。
2. 存在着最佳提升速度, 即在此速度下提升停止后敲击毛细管基本沒有“跳动”現象(过快跳下, 过慢跳上)。
3. 截面突变处(图 6), 水銀柱运动时有显著級跳現象, 如在此处停住水銀柱后敲击毛细管有明显的跳上(提升时)或跳下(下降时)現象, 在下降水銀柱时还能看到明显的“抓住”效应。



(图 6) 毛细管截面突变示意图

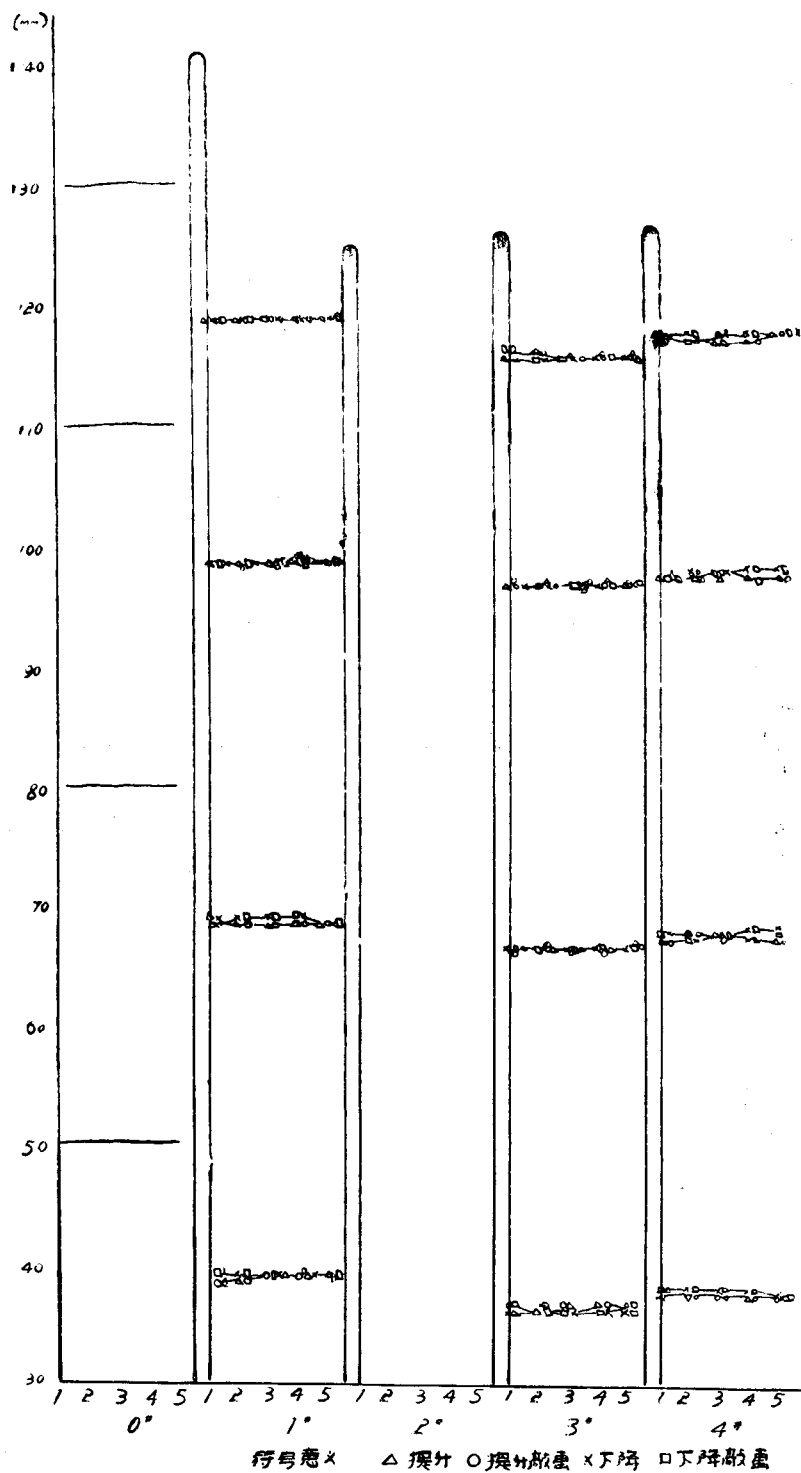
4. 直径越細, 异常現象越严重。

从这些共同規律中經過初步分析, 我們认为摩擦阻力可能是引起异常現象的重要原因。

§ 3 滴油潤滑及其实驗結果

基于摩擦阻力可能是引起异常現象的重要原因的新假設, 采取了在毛细管中滴油潤滑的方法企图消除异常現象。

实验仍用图 4 所示同一装置, 打开各毛细管顶部各滴一小滴 DC-704 硅油, 同样作类似图 5 之实验, 所得相应曲綫示于图 7。



(图 7) 有油毛细管中水銀运动的特征曲线

从图 7 曲线可以明显看出，在有油的毛细管中：

1. 无论提升水银柱停止后或下降停止后，敲击毛细管时水银柱基本上没有“跳动”现象。
2. 当粗管中水银面提升和下降在同一位置时（压缩比相同），各毛细管中水银面提升和下降时也基本重合于相同位置。
3. 当粗管中水银面多次被提升（或下降）在同一位置时，各毛细管中水银面各次也重合于同一位置，即重复性极好。
4. 粗管与比较毛细管水银面高度差（近似等于毛细管压低值）与高度、提升、下降基本无关，近于一常数。

比较图 5 和图 7 曲线明显地看出，同一毛细管中有油与无油时性能差别很大，表 1 把观察到的有油和无油毛细管中水银柱运动状态仔细的作一比较。

表 1. 有油和無油毛细管中水銀柱运动状态的观察结果

	无 油 毛 细 管 中 水 银 柱	有 油 毛 细 管 中 水 银 柱
运 动 状 态	级跳式上升或下降。	基本平稳而匀速上升或下降。
	截面突变处级跳很大。	仍平稳运动。
	下降时顶部或截面缩小处常出现“抓住”效应。	无此现象。
靜 止 状 态	突然停止提升或下降时，不随粗管水银柱上下振动很久，而很快静止，阻尼大。	随粗管水银柱一起上下振动很久，阻尼很小。
	静止后敲击毛细管，有“跳动”现象。	无“跳动”现象，敲击时水银面围绕原先平衡位置很活跃的上下振动。
	静止后轻敲毛细管有“跳动”现象。再轻敲，水银面不跳动。但再十分严重的重敲时仍有“跳动”现象。	无此现象。
	在毛细管某一位置存在一最佳提升速度，在此速度下提升，无“跳动”现象。	与提升或下降速度无关。
	当粗管水银面提升和下降到同一位置时，毛细管中水银面提升和下降的位置不重合。	基本重合，与提升、下降和不同次数无关（只要压缩比相同）。
接 触 角	水银面与毛细管壁接触线在上升、下降运动时不整齐，在下降时凸月面有时变成平面、凹面和不规则面。	接触线很整齐，保持很好的凸月面。
	水银在毛细管不同位置静止，其接触角不相同，各处毛细管压低值不同。	各处接触角大体相同，压低值也近于一常数。
其 它	测量毛细管中异常现象比比较毛细管中严重得多。	无此现象。

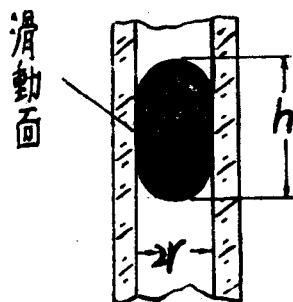
从以上曲线的比较可以看出：滴油毛细管内不问其原先表面如何处理（鍍 SnO_2 、磨毛、光），基本上消除了上述异常现象，这似乎已从实验上证明了新假定的正确性。为了更好地

說明引起上述非常現象的本質原因，我們還必須從理論上分析引起上述現象的具體機構。

§ 4 理 論 分 析

(一) 从“塞流”状态来分析

統觀的看，可認為在很細的毛細管中表面張力很強的水銀的流動狀態是一種“塞流”。它符合干摩擦規律，象固體之間滑動一樣，滑動面在兩者之間（圖 8）。由于動靜摩擦作用之結果而產生級跳式運動（在專門論摩擦的書中兩固體間這種現象稱“粘滑”——Stick—Slip）。這裡的摩擦力是由于水銀和玻璃間的分子引力而引起的。



（圖 8）“塞流”示意图

為了較定量的論述這一問題，下面引出一簡單公式。在一豎直的毛細管內（圖 8）有長度為 h 的一段水銀柱，其兩端氣體壓強相等（例如都是大氣壓）。此水銀柱如能開始向下運動，就需要在本身重力作用下克服水銀與玻璃之間的分子引力作用。其關係式如下：

$$mgh = \sigma \cdot 2\pi r \cdot h \quad (1)$$

其中 m 是水銀的質量， g 是重力加速度， σ 是水銀與玻璃界面的張力系數， r 是毛細管半徑， h 是水銀柱長度。

$$\therefore m = \pi r^2 h \cdot \rho \quad (2)$$

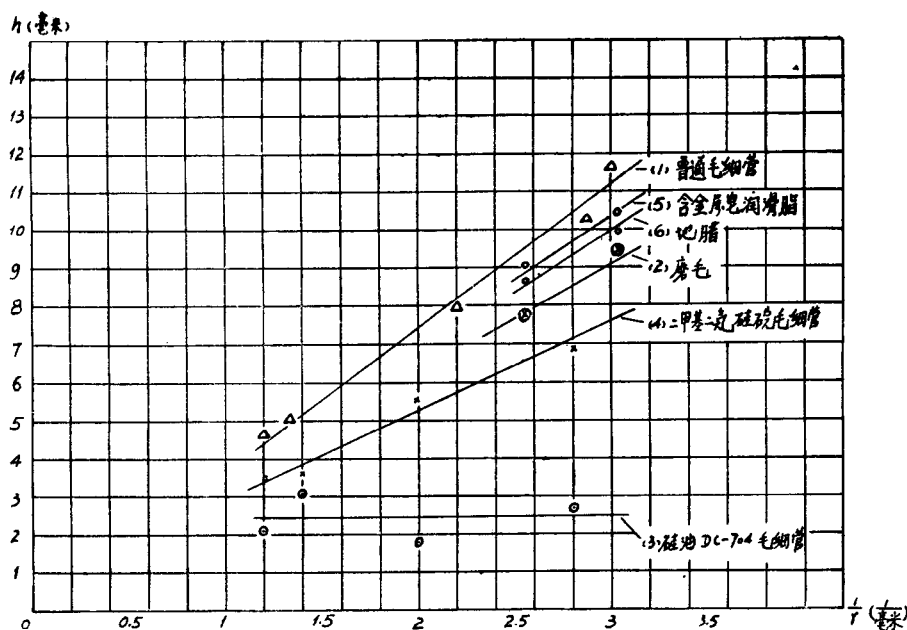
ρ 是水銀密度。

$$\therefore h = \frac{2\sigma}{\rho g r} \quad (3)$$

上式說明，毛細管中水銀柱開始能下滑的長度 h 與 $\frac{1}{r}$ 成正比。 $h < \frac{2\sigma}{\rho g r}$ 時水銀柱靜止，

$h > \frac{2\sigma}{\rho g r}$ 時水銀柱就滑動。

我們作了不同直徑的普通毛細管內水銀柱開始滑動時的長度 h 的實驗測定，其結果圖于圖 9 曲綫 1。从 $h = f\left(\frac{1}{r}\right)$ 近于一直綫可以結論：實驗也証實了毛細管中水銀柱的運動狀態是屬於上面分析的“塞流”狀態。滑動面在水銀柱和玻璃之間。摩擦力取決于兩者之分子引力的作用。水銀柱象塞子一樣在毛細管中運動而符合干摩擦規律。



(图9) $h = f\left(\frac{1}{r}\right)$ 的实验曲线



(图10)

磨毛表面与水银接触的示意图

从这统观的理论和所引出的公式以及毛细管中各处表面性能不尽相同的条件，我们就可以来解释如下现象：

1. 级跳式运动，“跳动”现象和“抓住”效应。

2. 直径越细和截面突然收缩处异常现象严重（因 $h \propto \frac{1}{r}$ ）。

3. 磨毛内壁毛细管性能优于普通毛细管，这是因为磨毛使玻璃壁面变得粗糙，水银表面张力很大，因此不能钻入这细微的凹凸不平的面中（如图10），因而增大了水银与玻璃间的距离，导致分子引力作用（或摩擦力）减小。图9曲线2也说明了这一点。

但是，用上述统观理论还不能去解释以下问题，例如：

1. 水银柱下降运动时比上升运动时产生的异常现象严重。

2. 上升时水银弯月面更凸，下降时弯月面变成平面、凹面或不规则面。

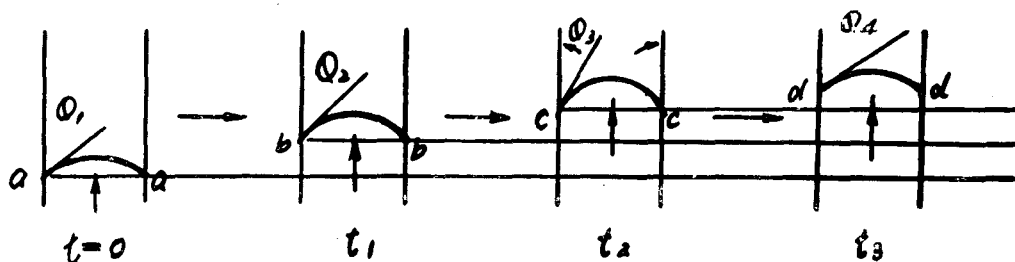
这是因为上述“塞流”状态只是一近似的解释。更细致的观察和分析使我们认为毛细管中的水银运动仍不能在任何情况下完全看作是两固体间的滑动，只是在一定条件下才呈现出某些干摩擦的规律。从下面更进一步的“流动”状态就可以完全解释“塞流”所不能解释的现象。

(二) 从“流动”状态来分析

内摩擦理论指出^[7]：在不润湿情况下液流边界层相对于固体壁面有一滑动速度存在。又知含杂质极少的水银与清洁的玻璃表面是不润湿的^[8]。于是，当含杂质极少的水银沿着十分清洁的毛细管上升或下降运动时，和毛细管壁接触的一层水银有滑动速度。由于管壁对

水銀流的作用使其沿半径有一速度陡度，軸心流速最大，边界流速最小。上升和下降的具体流动过程图示如下：

A. 上升 (图11)



从此提升， θ_1 决定于水銀內聚力及其与毛細管的附着
力。
接触綫a—a。

因軸心流速大， $\theta_2 < \theta_1$ ，接触綫上升到b—b。

因軸心流速大， θ 继续变小，当 $\theta_3 = \theta_{\text{臨}}$ 时，凸月面将被中間快速水銀层突破而向两边崩溃。

在突破后之一瞬，产生小跳动，又得一新的接触綫 d—d 和接触角 θ_4 。

(图11) 不润湿情况下的上升过程示意图

上升流动过程就是上面图示的循环，当流到某处停止提升时有如下两种情况：

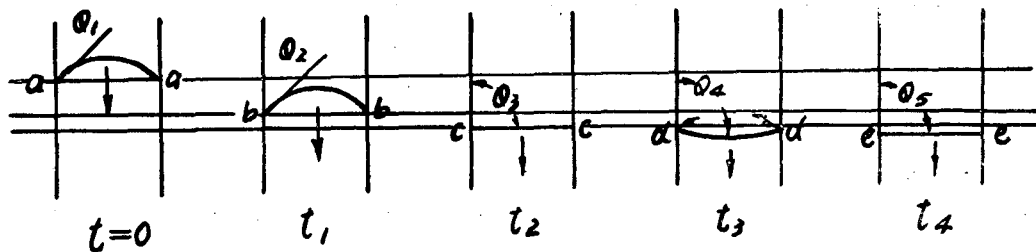
① $\theta_{\text{靜}} = \theta_1$ ，那就在此处稳定 (图12)。

② $\theta_{\text{臨}} < \theta_{\text{靜}} < \theta_1$ ，此时边界层要继续滑动一短时，使 $\theta_{\text{靜}} = \theta_1$ 后稳定。



(图12) 不润湿上升的静止状态

B. 下降 (图13)



从此下降， θ_1 取决于水銀的內聚力及其与毛細管壁的附着力。

軸心流速大， $\theta_2 > \theta_1$ 。

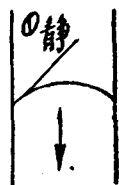
θ 逐渐变大， $\theta_3 = 90^\circ$ 。

当 $\theta_4 > 90^\circ$ 时，边界向内崩溃。

在崩溃后的一瞬间产生小跳动，而 $\theta_5 = 90^\circ$ 。

(图13) 不润湿情况下的下降过程示意图

接下去将維持近于 $\theta = 90^\circ$ 之动平衡下降, 到某处停止下降只有如下一种情况(图14):



(图14)

不润湿下降的静止状态

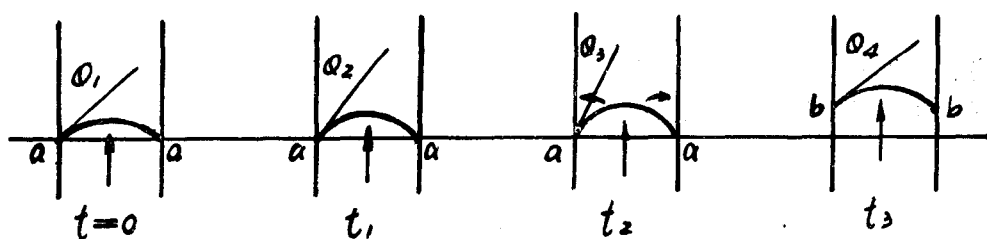
$\theta_1 < \theta_{静} \leq 90^\circ$ 此时边界层要继续下降到 $\theta_{静} = \theta_1$ 时稳定。

从图示流动过程可以結論: 在绝对不润湿条件下, 无论水銀柱上升或下降到某一位置停止后, 只要经过一短暂的慢动过程就能达到稳定, 保持接触角 $\theta = \text{常数}$, 不会出现敲击毛细管而引起的水銀柱“跳动”现象。

但是要获得如此绝对不润湿的条件是十分困难的。这是因为, 即使含少量杂质的水銀, 在空气中放置一些时间后就开始粘附玻璃^[8]。另一方面, 毛细管内壁略有不清潔也会增加与水銀的粘附, 而要永远保持水銀和毛细管内壁的清潔不是件容易的事。

现在我们再来研究另一极端情况: 假设由于某种原因水銀与毛细管内壁完全粘附。内摩擦理論指出^[7]: 在润湿(或粘附)的情况下, 液流边界层流速与固体壁面相同, 即两者間沒有相对滑动, 流体仍有一速度梯度, 軸心流速最大。此情况下毛细管中水銀柱具体流动过程图示如下:

A, 慢速上升(图15):



从此提升, θ_1 决定于水銀的内聚力及其与毛细管内壁的附着。接触綫 a—a。

軸心流速大边界静止, $\theta_2 < \theta_1$ 和接触綫不变, 仍为 a—a。

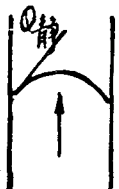
θ 继续变小, 当 $\theta_3 = \theta_{临}$ 时, 凸月面被中間快速水銀层突破而向两边崩溃。

在突破后的一瞬间产生跳动, 得到一新的接触角 θ_4 , 接触綫跳到 b—b。

(图15) 润湿情况下的上升过程示意图

上升流动过程就是上述图示的循环, 当流到某处停止提升有如下两种情况:

①, $\theta_{静} = \theta_1$ 在此处稳定(这就是最佳提升速度状态时)(图16)。



(图16)

润湿上升的静止状态

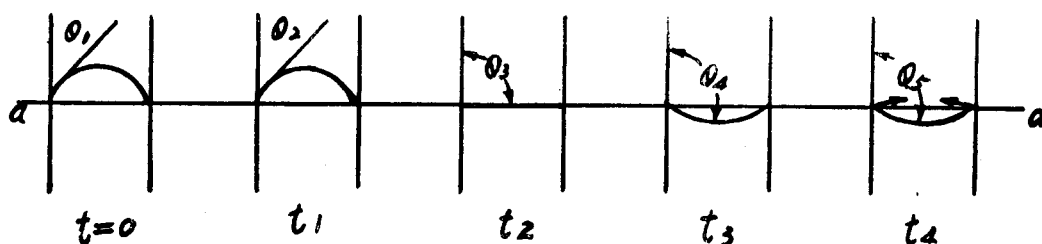
②, $\theta_{临} < \theta_{静} < \theta_1$, 也在此处稳定, 因为边界层静止和中间层在上升压力作用下还不能突破凸月面的束縛, 所以提升压力被此凸月面所平衡, 而使水銀柱处在一应力状态。

这时如果敲击毛细管, 就促使弯月面被突破或使边界层与管壁脱离接触, 而在提升压力作用下使水銀面跳上到另一平衡位置。

B, 快速上升运动中的流动过程和慢速提升一样, 只是

在停止提升后，由于中間快速水銀层之慣性力作用，不但能突破凸月面，而且有可能使水銀面冲过提升压力所应提升到的平衡位置。这样接下去象水銀下降运动了，这时如敲击毛細管，水銀面跳下（見下面分析）。

c, 下降 (图17) :



从此下降， θ_1 中間流速大 $\theta_3 = 90^\circ$ 。 $\theta_4 > 90^\circ$ ， 当 $\theta_5 = \theta_{\text{静}}$ 时由
决定水銀的 $\theta_2 > \theta_1$ 接触 但由于粘着 于拉边界层的力
內聚力及其 綫不变。 边界不但 增大而克服了粘
与毛細管壁 滑动也可不 着力，使边界向
的附着力。 向內崩潰。 內崩潰。

(图17) 润湿情况下的下降过程示意图

接下去的下降过程将是中間下降→边界崩潰→中間下降的循环往复。到某处停止下降只有如下一种可能情况 (图18)。



(图18)

润湿下降的靜止状态

$90^\circ < \theta_{\text{静}} < \theta_{\text{粘}}$ 在此处稳定，因拉力 还不足以克服粘着力。这一凹月面就抵消了一部分下降压力而使水銀柱处在一应力状态。如这时敲击毛細管，可帮助水銀与玻璃脱离接触，而在下降压力作用下使水銀面跳下到另一位置。不断的敲击有可能使 $\theta_{\text{静}} \rightarrow \theta_1$ 而消除了粘着力束縛。

从 $\theta_{\text{静}}$ 与 θ_1 比較 看出：下降时 $\theta_{\text{静}}$ 相对 θ_1 的变化比上升时 $\theta_{\text{静}}$ 相对 θ_1 的变化大很多。因此，下降靜止后凹月面所能抵消的下降压力要大的多。这就导致下降停止后敲击毛細管使水銀面跳下的距离大于上升停止后敲击毛細管使水銀面跳

上的距离。

从上分析也可看出：敲击毛細管只是促进由于粘着而产生的束縛力的解除。但是，能否完全解除还很难判定。有时在輕敲后再重敲仍有跳动，这說明輕敲不可靠，就是重敲后不再跳动也不能說完全解除了束縛。因为在相同压縮比下，上升和下降停止后，即使重敲，水銀面也并不重合。

上面我們仅就水銀和玻璃接触的两个极端情况——完全不潤湿和完全粘附研究了毛細管中水銀流动过程，从而 闡述了引起异常現象 的机构。但是，实际情况多半是介乎于两者之間，而在同一毛細管不同位置和同一位置不同方位，其不潤湿和粘附性能也不尽相同，因此就造成了毛細管中水銀柱运动的无一定規則的异常現象。

这一“流动过程”图象的真实性，不但与我們实际观察的图象相一致（尤其是在粗管中