M-1型表面热膜鉴定文件

（汇编）

南京航空学院

1982.9.

需要全本请访问 www.ertongbook.com

M－1型表面热膜鉴定文件（汇编）

目　　录

一、M－1型表面热膜的研制和实验
南京航空学院601教研室壁面剪切应力测量课题组　1

二、M－1型表面热膜制作工艺小结　国营第五二一厂技术科　25

三、M－1型表面热膜基本性能测定
南京汽轮电机厂南京燃气轮机研究所　27

四、M－1型表面热膜基本性能测试报告
华东水利学院水利水电科学研究所　34

五、M－1型表面热膜基本性能测定报告
南京航空学院空气动力研究所　37

六、M－1型表面热膜基本性能测定报告
南京航空学院601教研室壁面剪切应力测量课题组　41

七、M－1型表面热膜技术说明书　45

八、M－1型表面热膜——科技成果说明书　46

九、应用M－1型表面热膜测量沿圆柱体表面的壁面
剪切应力分布实验报告　49

十、应用M－1型表面热膜测量沿圆柱体表面的壁面
剪切应力分布实验报告　57

十一、超临界流态下沿圆柱体表面的壁面剪切应力
分布实验报告　70

十二、M－1型表面热膜对壁面剪切应力方向的敏
感性实验报告　76

十三、M－1型表面热膜对壁面剪切应力方向的敏
感性实验报告　81

十四、应用M－1型表面热膜测量平板壁面剪切应力
实验报告 86
十五、应用M－1型表面热膜测量翼型壁面剪切应力 103

M－1型表面热膜的研制和实验

南京航空学院601教研室
壁面剪切应力测量课题组　王铁城　编写

摘　要

M－1型表面热膜，是一种应用于附面层实验研究的新型敏感元件，本文是我们研制这种表面热膜的技术总结。实验证明，M－1型表面热膜的性能是符合设计要求的。与国外同类产品的水平相当，满足了科研和教学的需要。

前　言

在空气动力学实验中，测量壁面剪切应力的方法是很多的。在这些测量方法中，应用表面热膜来测量壁面剪切应力，是科技先进国家都致力于研究的课题。表面热膜具有惯性小、频率响应高、对流动干扰小、适用性广等优点。国际上对它的研究和应用近几年得到迅速发展。

我课题组于１９８０年９月开始工作，首先就遇到了国内没有表面热膜这一困难。如果向国外订货，不仅价格昂贵、耗费外汇，而且时间来不及，影响工作。在这种情况下，我们着手自行研制表面热膜，M－1型是其中的一种。协作单位国营五二一厂对我们的工作大力支持，该厂根据我们的设计图纸和技术要求，在工艺上克服了许多困难，于１９８１年１２月提供出第一批产品，经我们测试，符合设计指标，第二批产品，质量上又有进一步提高。两批产品经全面测试和教学、

科研正式使用，情况良好，性能稳定，满足了教学·科研的需要。本文是这一研制工作的总结，其中工艺部分取材于国营五二一厂的工艺小结。

本课题组的成员是：张佩林（组长）、吴志成、肖人陆、徐信学、沈风祥、沈宏霞和本文编写者王铁城。

本课题组得到了国营五二一厂和院内外许多单位许多同志的帮助和支持，在此深表谢意。

一、简要原理

在M－1型表面热膜片的塑料薄膜基底上，有两条呈V形分布的厚度只有数微米的金属薄膜，称之为发热膜，电流通过发热膜时发出热量。M－1型表面热膜片粘贴于物体表面上，与恒温式热线风速仪配套工作，用来测量空气流经物体表面时的壁面剪切应力τ_w，其基本关系式如下（详见附录）：

$$E^2 = A\tau_w^{1/n} + E_0^2 \qquad (T_w - T_\infty = C\text{时}) \quad (1)$$

式中E是电桥输出电压，E_0是$\tau_w = 0$时的电桥输出电压，A和n是需由校测确定的常数，理论上$n = 3$。

M－1型表面热膜还可测定壁面剪切应力的方向，当τ_w的方向与两个发热膜对称线之间的夹角为α时，测量出两个膜的电桥输出电压E_1、E_2、E_{01}和E_{02}，计算出函数$F(\alpha)$，然后可求得α。函数$F(\alpha)$是：

$$F(\alpha) = \frac{(E_1^2 - E_{01}^2) - (E_2^2 - E_{02}^2)}{(E_1^2 - E_{01}^2) + (E_2^2 - E_{02}^2)} \quad (2)$$

在一定的α范围内，$F(\alpha)$与α之间呈线性关系，可由校测来确定。

二、设　计

设计工作的第一步是确定M－1型表面热膜片的性能指标。表面

需要全本请访问 www.ertongbook.com

热膜是在国内首次研制，尚无国家标准作为确定设计指标的依据。国外同类产品的说明书上，除电阻值外没有给出其它性能指标。我们认为，对M－1型表面热膜片的性能指标，应从以下四个方面来衡量：

几何特性：即表面热膜的几何外形和尺寸，这是保证表面热膜的性能是否符合要求的大前提，其中主要尺寸有理论根据，其它尺寸则参照国外同类产品确定。

力学特性：即具有一定的强度，主要指金属膜与基底之间的粘结牢度。这一性能的指标较难确定。表面热膜本身是一种精密的测试元件，如果要求它受到严重机械创伤而不破坏，这是不现实的，也是没有必要的。我们认为，只能要求它在受到轻度擦伤时不致破坏，例如实验中经常要用酒精棉球擦试金属膜上的灰尘，金属膜不应损伤脱落。

热力学特性：热膜发出的热量，一部分向气流方向传导，一部分向基底方向耗散。前者是我们的目的，后者是不可避免而又应力求减小的。如果后者占的比例大，则表面热膜的频率响应必然低。因此，表面热膜热力学性能的好坏，可用频率响应的大小来衡量。根据表面热膜的测量对象——壁面剪切应力的实际情况，其脉动频率一般在5KHz以下，故表面热膜的频率响应不应低于此值。我们的设计指标确定为10kHz。应当说明，不同仪器、不同测量状态下对同一热膜测得的频率响应是不相同的，作为M－1型表面热膜片的性能指标，测量频率响应的具体条件是：应用（美）tsi 1050型热线风速仪及其配套仪器；静态（无风）；表面热膜片粘贴在有机玻璃试件上；过热比为1.5。

电学特性：首先是电阻值的大小，用室温下的冷电阻值来衡量。我们的设计指标确定为3.5～6.0欧，我们认为这是符合壁面剪切应力测量的要求的。国外同类产品有的是5欧±1欧，有的是4.0欧±0.5欧，我们的第一批产品属于前者，第二批产品属于后者，两者都是适用

的，故我们确定为3.5～6.0欧，并且今后可按用户的不同要求供应不同阻值的产品，上述的两种国外的指标都是可以达到的。国外1982年产品说明书上有一项新增加的指标：同一热膜片上的两个发热膜阻值最大偏差2.0%(国外1981年说明书中尚没有这一项指标)实测证明，M－1型表面热膜片半数以上达到了这一要求，但目前尚未列入性能指标。除电阻值外，还应衡量最大允许电流值的大小。使用表面热膜时，取的过热比R_w/R_0值高，则电流值高。如果最大允许电流值过小，当过热比高时，表面热膜会烧坏。因此，可以用静态下最大允许过热比来衡量这一特性。所谓静态，是指没有风吹的状态，这是承受最大电流最不利的状态。通常工作中使用的最大过热比是1.5左右，我们的设计指标确定为1.8。实践证明，过热比取1.5是较适用的。

M－1型表面热膜片的构造设计情况，可参见图1。M－1型表面热膜片由以下五部分组成：

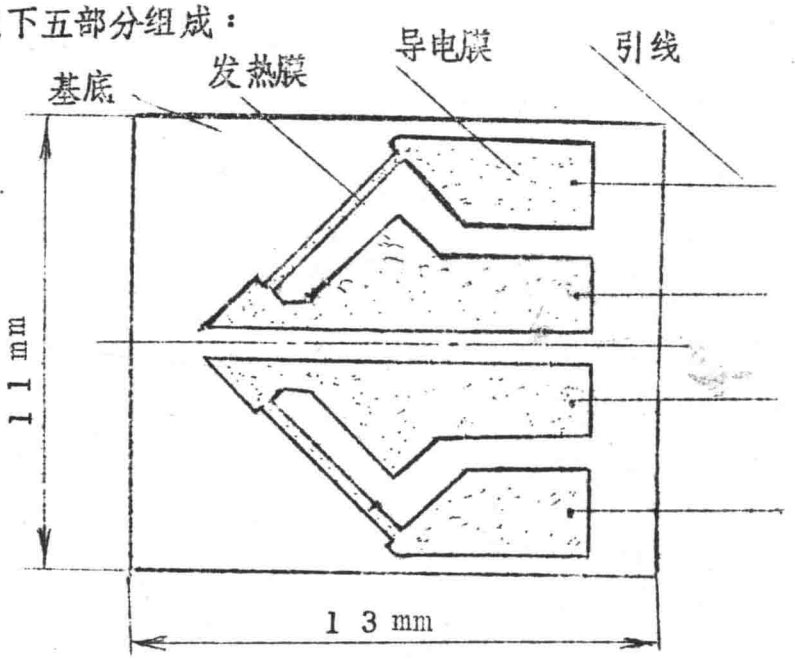


图1　M－1型表面热膜片示意图

1. 基底：要求其绝缘绝热性能好。耐热，薄而柔软。

2. 发热膜：是一段很薄的金属薄膜，要求其耐腐蚀、耐热、电阻温度系数高，几何尺寸应严格符合设计要求。

3. 导电膜：是与发热膜连通的金属薄膜，起导电作用。

4. 引线：焊于导电膜上，起导电作用。

5. 定位线：供粘贴表面热膜片时定位之用。

三 工 艺

M－1型表面热膜片的工艺过程大致如下：

1. 根据设计图纸的要求，绘刻照相制版的红膜图。国营五二一厂备有从日本进口的PR 8－8CT型精密绘图机，可以很好地保证刻图的精度和质量。

2. 经过检验合格的红膜图，放在国产GS－333型制版照相机上完成底版制备工序，制完的底版须经过[illegible]检验后方可投入使用。

3. 在金属箔的一面上涂敷一层薄而均匀的光刻胶，严格控制曝光时间和光的强度，经曝光后转入显影、定影工序。

4. 基底材料涂敷在金属箔的未经光刻的另一面上，厚度为0.01～0.02毫米。涂敷完毕后按一定程序将基底固化。

5. 在特定配制的腐蚀溶液中，将光刻后的图形进行腐蚀处理，根据设计要求可以调节半自动腐蚀机的腐蚀速度，以控制电阻值。

6. 焊接引线。

7. 经腐蚀机腐蚀后的热膜的电阻值只能控制在一定的范围内，为使电阻值严格符合设计要求，并使同一膜片上二发热膜电阻值的相对误差符合设计要求，尚需进行电阻调整工序处理。工艺上一般采用化学细腐蚀调值及机械式调值两种方法。

8. 电阻分选。

9. 包装验收。

四 性 能

M－1型表面热膜片的基本性能，如前所述，包括电阻值、最大过热比和频率响应等三方面，具体指标是：

冷电阻：3.5至6欧

最大过热比：1.8

频率响应不低于10kHz（测量条件见第3页）

南京汽轮电机厂燃气轮机研究所，应用（美）tsi 1050型热线风速仪和（美）5441型记忆示波器，于82年1月对M－1型表面热膜片的基本性能进行了全面测量，并在同样条件下同时对（美）MM－ET－TG－200ZH型表面热膜的基本性能进行了全面测量。测量结果见表1和表2。测量结果表明，M－1型表面热膜片的基本性能符合设计指标要求，并与上述国外同类产品的实测结果相当。

我课题组技术人员，应用（美）tsi 1050型热线风速仪和SBE－7型示波器，于1982年6月对M－1型表面热膜片的基本性能进行了全面测量，测量结果（表3）再次表明，M－1型表面热膜片的基本性能符合设计指标要求。

五 实 验

M－1型表面热膜片，已应用于科研和教学，进行了各种实验。

图3示出了M－1型表面热膜在我院低紊流度风洞中测量沿圆柱体表面壁面剪切应力分布的实验结果。图3a中纵座标E－E。是电桥输出电压（平均值）减去初读数后的数值，图3b中纵座标$\sqrt{e^{2}}-\sqrt{e_{0}^{2}}$

表1　室温下冷电阻值测量结果（单位：欧）

膜号	1	2	3	4	4 1.1	4 1.2	4 2.1	4 2.2	美00-1	美00-2	美00
冷电阻值	4.75	4.34	4.03	4.71	4.83	4.40	4.88	4.5	4.09	3.91	4.34

表2　不同过热比时的频率响应测量结果

过热比 R_w/R_o	频率响应 kHz				
	1#膜	2#膜	3#膜	4#膜	美00#膜
1.2	7.5	40	28	未测	13
1.3	9	50	33	未测	16
1.4	11	50	40	未测	17
1.5	13	50	67	40	22
1.6	16	80	50	58.8	25
1.7	18	80	67	58.8	27
1.8	24	100	67	100	29
1.9	28	100	67	100	31
2.0	30	100	67	100	34

表3　冷电阻值和频率响应测量结果

膜号	R_o (Ω)	$\frac{\Delta R_o}{\overline{R_o}}$	频率响应 kHz $\frac{R_w}{R_o}=1.4$	$\frac{R_w}{R_o}=1.5$	$\frac{R_w}{R_o}=1.6$	$\frac{R_w}{R_o}=1.7$	$\frac{R_w}{R_o}=1.8$
5# —1	4.02	1.97%	33	40	40	50	50
5# —2	4.10		33	40	50	50	50
6# —1	3.99	0.25%	40	40	50	50	50
6# —2	4.00		33	33	50	50	50
8# —1	3.90	3.77%	40	50	50	55	67
8# —2	4.05		45	50	55	67	67
9# —1	3.89	1.28%	33	40	40	45	50
9# —2	3.94		33	33	40	45	50
8267 —1	4.15	1.94%	45	67	83	100	40
8267 —2	4.07		33	36	36	40	50
8269 —1	3.95	2.00%	33	36	40	40	45
8269 —2	4.03		33	33	40	40	45
8261 —1	3.96	4.92%	28	33	36	40	50
8261 —2	3.77		33	40	40	45	50
82610 —1	3.93	5.45%	33	40	45	45	45
82610 —2	4.15		36	40	45	45	45

〔注〕同一个热膜片上的两个发热膜的冷电阻分别是R_{o1}和R_{o2}，表中的ΔR_o和$\overline{R}_o$是：$\Delta R_o = |R_{o1} - R_{o2}|$，$\overline{R}_o = (R_{o1} + R_{o2})/2$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

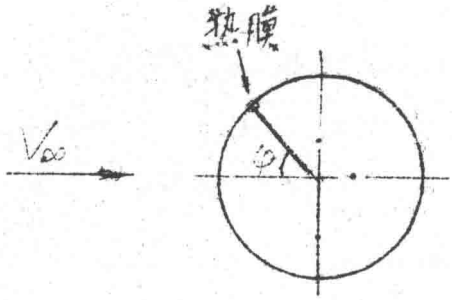
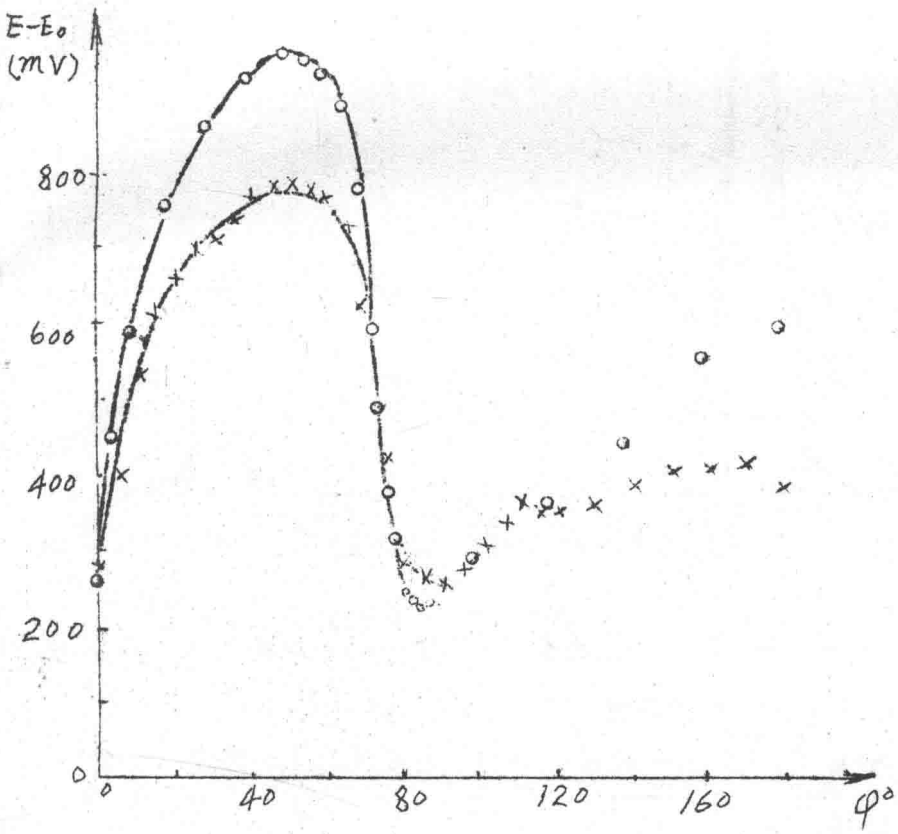


图 2 圆周角



—O— M—1型热膜（$R_{e\,d}=1.7\times10^5$）

—×— 美国热膜（$R_{e\,d}=1.5\times10^5$）

图 3a

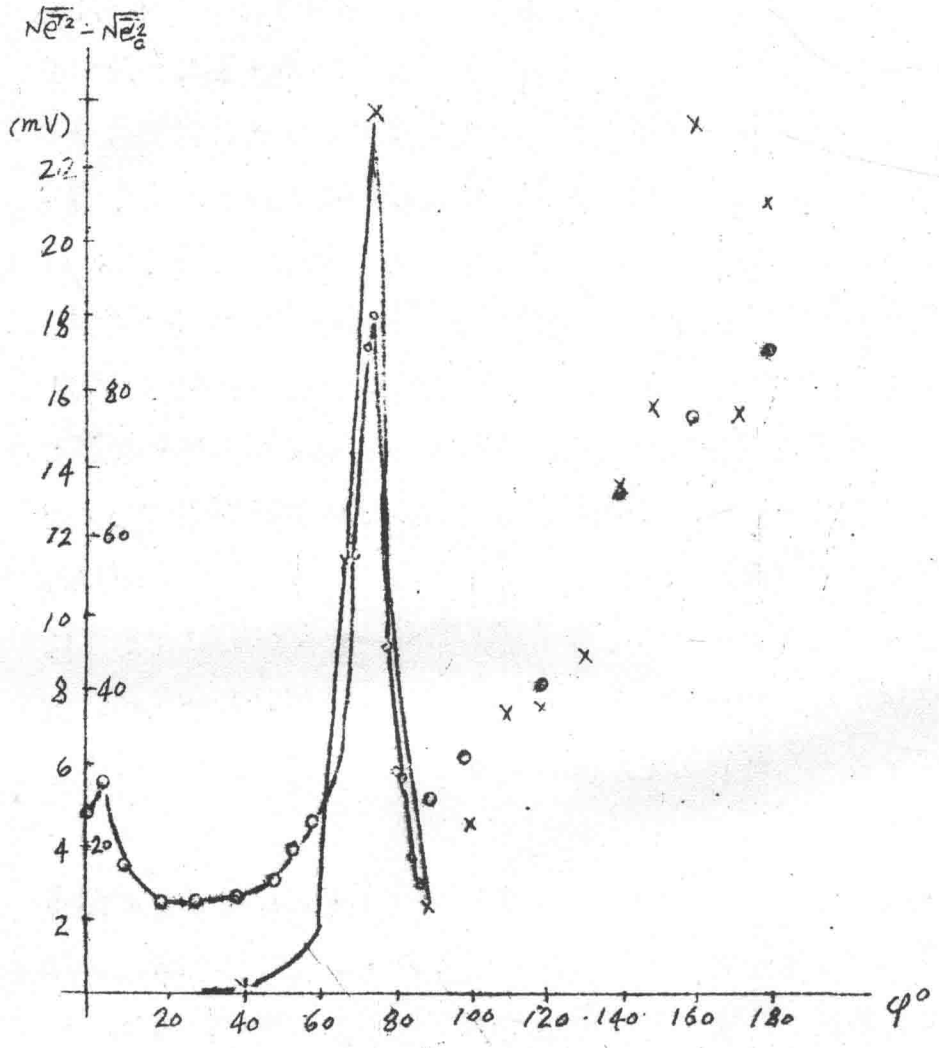


图 3 b

—o— M—1 型热膜（$R_{ed}=1.7\times10^5$）

—×— 美国热膜（$R_{ed}=9.4\times10^4$）

图 3　沿圆柱体表面的亚临界流态壁面剪切应力分布实验结果

—M—1 型和（美）MM—ET—TG—200ZH型表面热膜的实验结果比较

是脉动电压的均方根值减去初读数后的数值。图3a和3b中的横座标是由驻点计起的圆周角（图2）。由于所研究的是壁面剪切应力分布的规律，故采用〔5〕中的方法，用电压值表示壁面剪切应力分布的相对状况。气流沿圆柱体横向流动，驻点和分离点处的壁面剪切应力理论上应为零。而在实际流动中驻点和分离点本身都是振荡的，实验结果中壁面剪切应力在$\varphi=0°$左右时出现最小值，即驻点的标志。在$\varphi=80°$左右时壁面剪切应力又一次出现最小值，是层流附面层发生分离的标志。由图3可以看到，应用M－1型表面热膜和美国MM－ET－TG－200ZH型表面热膜所测得的壁面剪切应力分布规律，基本上是一致的，与国外的实验结果〔2，3，5〕和理论计算结果〔4〕相比较也是基本上相符的，这是一种典型的二维圆亚临界流态，证明了应用M－1型表面热膜测得的实验结果是合理的。我们曾应用许多M－1型表面热膜多次重复了这一实验，结果都是合理的。

图4是应用M－型表面热膜在南航1米低速风洞加扰流栅后测得的实验结果，图4a是壁面剪切应力（平均值）沿圆柱体表面的分布规律，图4b是脉动壁面剪切应力的均方根值的分布规律。由图4a可以看到，在有效雷诺数为1.18×10^6时，层流附面层在$\varphi=100°$分离，并出现气泡，在$\varphi=110°$时紊流附面层再附着，在$\varphi=140°$时紊流附面层分离。由图4b可以看到，脉动壁面剪切应力的均方根值在$\varphi=100°$达到最大值，是层流附面层发生分离的标志，与图4a中层流附面层分离的实验结果是一致的。图4所示的上述实验结果，与国外的同类实验结果〔2，5〕基本相符，是一种典型的二维圆超临界流态，证明了应用M－1型表面热膜测得的实验结果是合理的。此外，应用M－1型表面热膜在其它雷诺数下测得的实

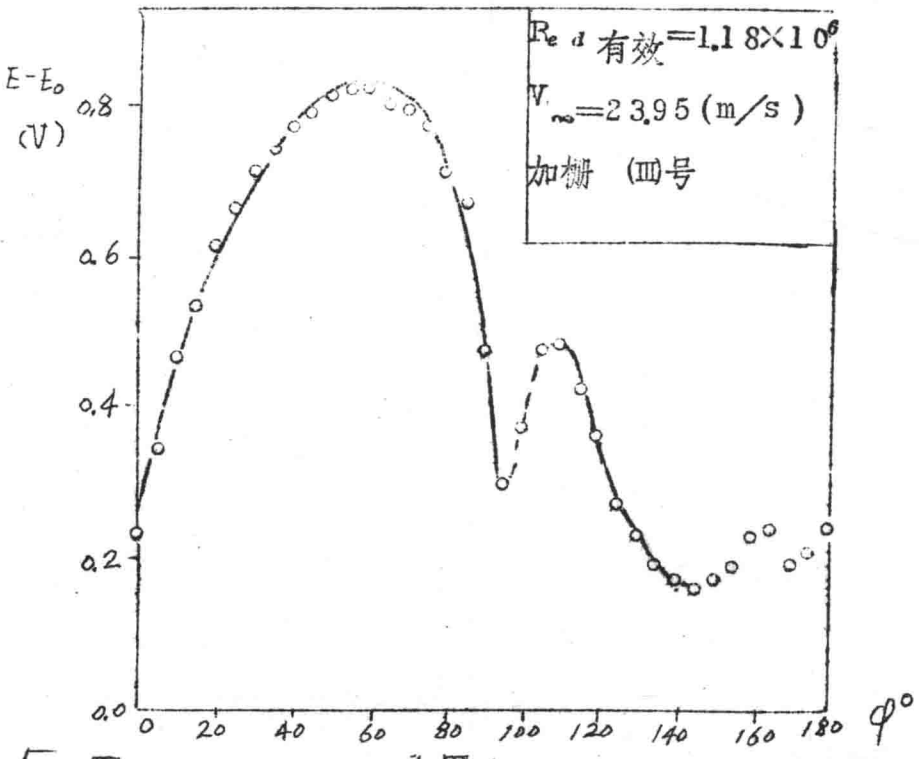


图 4 a

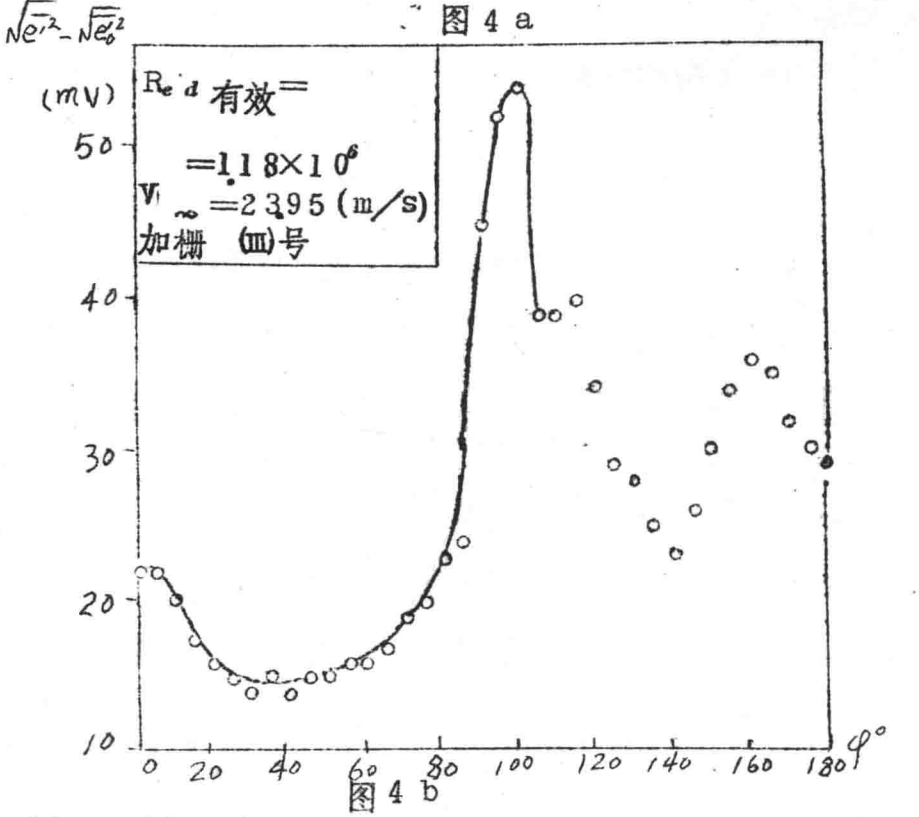


图 4 b

图 4　沿圆柱体表面的超临界流态壁面剪切应力分布实验结果

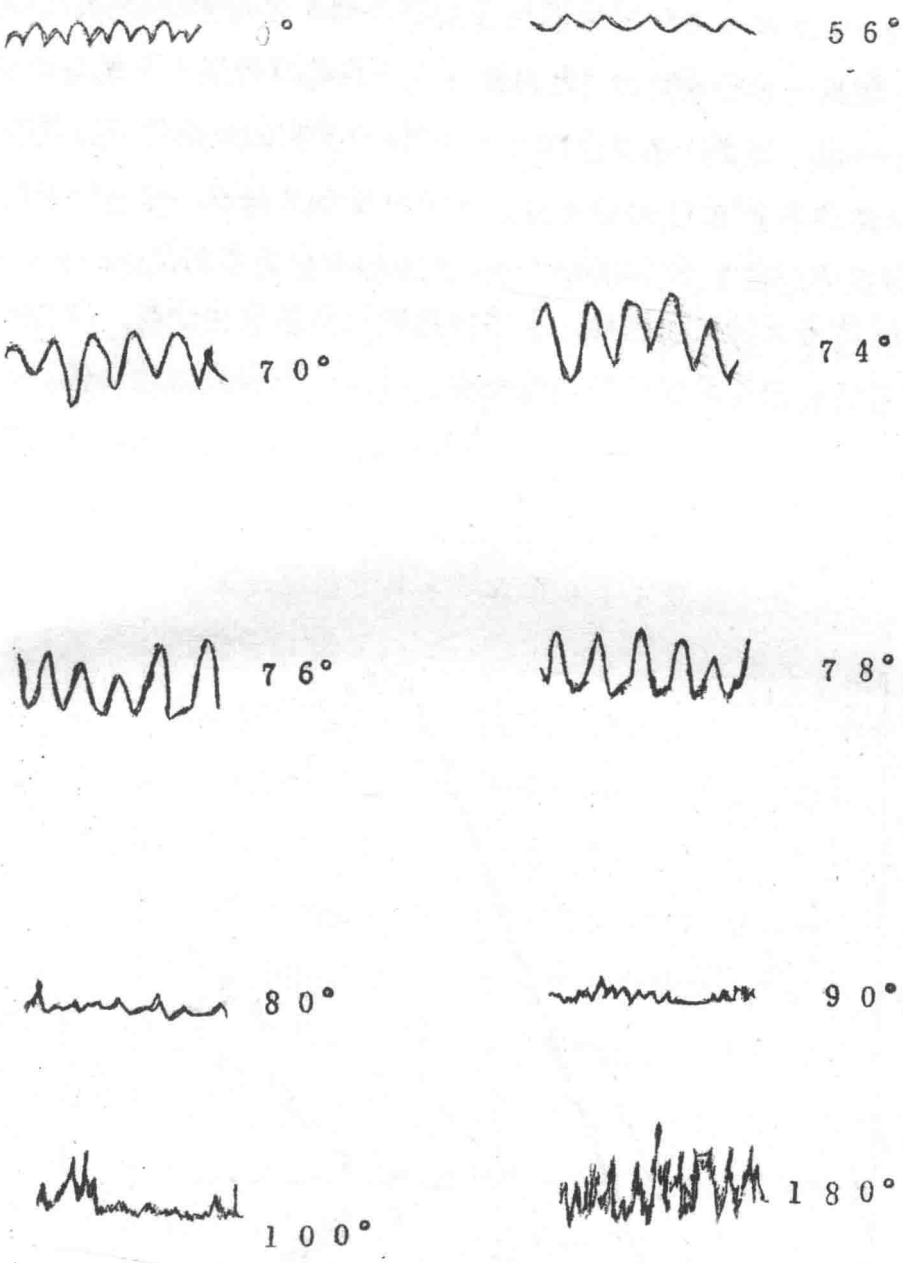


图 5　圆柱体亚临界流态实验M－1型表面热膜的输出电压信号

验结果，也都是符合规律的。

$R_{e_d}=1.7\times10^5$ 时沿圆柱体表面不同φ值时热膜信号，如图5所示。驻点一般是在±3°之内振荡的，热膜的位置不可能与来流方向完全一致，因此在名义上的φ＝0°处检测到的波形信号，是合理的。当φ达到70°前壁面剪切应力显示出周期性函数，相当于卡门涡街的脱落频率，在70°到80°之间热膜信号出现高频波动，在φ＝78°热膜信号开始出现扰动，显示出层流附面层发生分离。而φ＝80°以后的波形是尾迹区流动的特征。由M－1型表面热膜得到的这

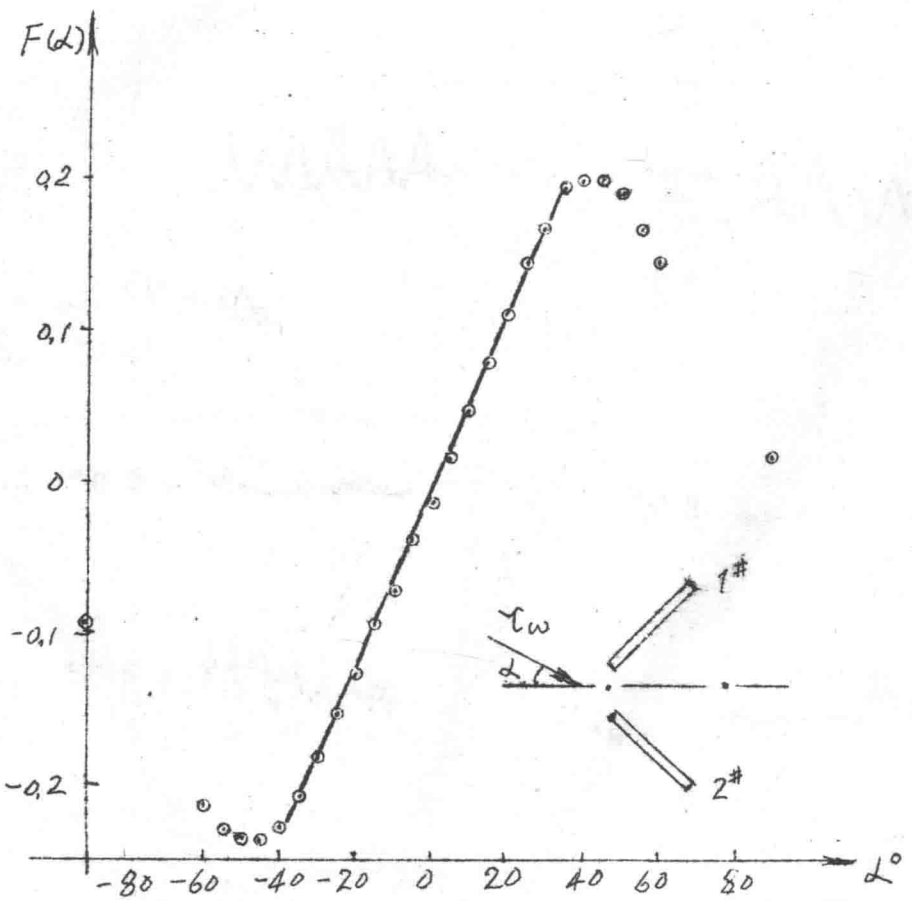


图6　M－1型表面热膜对壁面剪切应力方向的敏感性实验结果

需要全本请访问 www.ertongbook.com