

总 65068

电 0 1 1

中国电机工程学会高电压测量及試驗技术年会論文报告

# 小尺寸高强度悬式絕緣子

清華大学电工研究室  
大連电瓷厂

1965.9.

## 小尺寸高强度悬式绝缘子

郑健超, 张仁豫\*

## 前 言

随着输电容量的增加, 输电电压的提高, 对悬式绝缘子机电性能的要求也越来越高。但高强度悬式绝缘子若尺寸过大, 不仅成本高, 线路的造价也因此而增加。在生产 and 运行方面也诸多不便。故电力部门迫切要求制造厂能提供小尺寸高强度的悬式绝缘子。近来, 一些国家也要求我国出口小尺寸高强度的悬式绝缘子。因此, 研究试制这种绝缘子有较大的意义。

本校高压专业部份师生参加了大连电瓷厂试制尺寸为146X254毫米, 机电破坏强度不低于12吨的小尺寸高强度悬式绝缘子的工作。经过了反复试验, 于65年5月试制成功。产品暂定名为XP-12。现将其主要性能介绍如下。

## 一. XP-12的机电性能:

我们参考了国际上同类产品的先进指标并考虑到国内的生产情况和习惯规定, 确定了以下的设计指标。

## 尺寸

结构高度	146毫米, 盘径	254毫米,
泄漏距离	310毫米, 干闪距离	190毫米。

## 电性能

干闪电压	不小于75千伏, 湿闪电压	不小于45千伏,
冲击闪络电压	不小于145千伏,	
油中击穿电压	不小于120千伏,	
无线电干扰电压	不大於	50微伏,

## 机械性能

\*共同完成此项工作者尚有65班毕业同学: 车念坚, 王乃庆, 吴庆来, 梅良棟, 陸纪康, 刘铁铮等。

一小时机电负荷 8500公斤，机电破坏负荷 不小于12000公斤，  
 允许使用最大负荷 4000公斤，打击强度 大于 0.58公斤米，  
 厂内按照电(0)188-62 各项试验方法的规定，对几项主要  
 性能进行了鉴定，结果如下

	试验项目	规定	试品数量	试验结果
1	一分钟机械负荷、试验	6600公斤	10只	全部通过
2	一小时机电联合试验	8500公斤	10只	全部通过
3	机电破坏试验	64 件伏 不低于 12000公斤	4只	16.2吨(瓷断) 19.15 (瓷断) 19.88吨(没坏) 19.69吨(没坏)
4	工频乾放电试验	不低于75件伏	3只	79.8件伏 80.4件伏 79.6件伏 平均 79.9件伏
5	工频湿 放电试验	不低于45件伏	3只	57.51件伏, 57.21件伏 60.71件伏 平均 58.5件伏
6	油中击穿电压试验	不低于120件伏	3只	126件伏,130件伏 160件伏 平均 139件伏
7	冷热试验	温差70°C 循 环三次后火 花电压耐压	3只	合格
8	吸红试验	浸于试剂中 24小时后,无 渗透现象	瓷碎片	合格

XP-12产品的重量为5.6公斤。

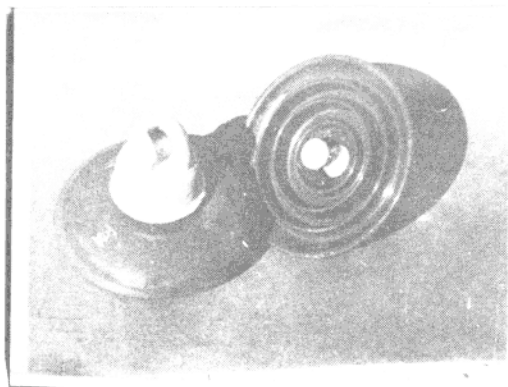


图 1

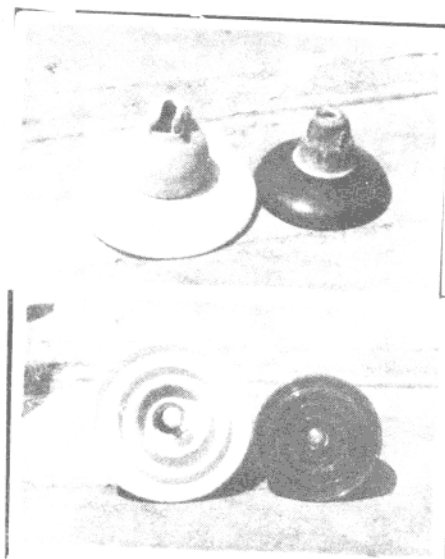


图 2

XP-12的机电破坏强度(经一小时机电负荷试验后)已在16吨~20吨的水平。不经一小时机电负荷试验的产品、机电破坏强度可达20吨以上。因此,大连厂内鉴定委员会认为,产品主要性能已达到设计要求,鉴定合格,可以进行小批试制,提交国家鉴定。

图1表示XP-12的外观。图2为XP-12与П-8.5的对比。

二、悬式绝缘子机电强度与头部结构形状的关系:

制造小尺寸高强度悬式绝缘子的难点在于需要在一定尺寸限制下同时满足较高的机械及电气性能的要求。绝缘子受力部份是头部,头部的结构尺寸不仅对机电强度有直接影响,而且也影响到电性能的要求能否达到。如果头部的尺寸得以减小,电性能也容易满足。故本文着重讨论机电强度与头部尺寸、结构的关系。

盘形绝缘子按头部结构形式可分为圆柱形结构和圆锥形结构两大类。目前,国际上性能优良的小尺寸高强度悬式绝缘子皆为圆柱形结构。但圆柱形结构生产工艺比较复杂,产品性能

不易稳定，根据我国情况在生产圆锥形绝缘子方面经验很丰富，故XP-12采用了圆锥形结构。

### (一) 圆锥头悬式绝缘子机电破坏现象分析。

在试制过程中，我们对近200只圆锥头悬式绝缘子(X-45, Π-4.5, XP-12的试品等)在机电破坏后进行了解剖分析。发现有一些共同的现象。这是了解绝缘子受力破坏规律的第一性资料。现简述如下：

绝缘子破坏一般有以下几种情况：



图 3

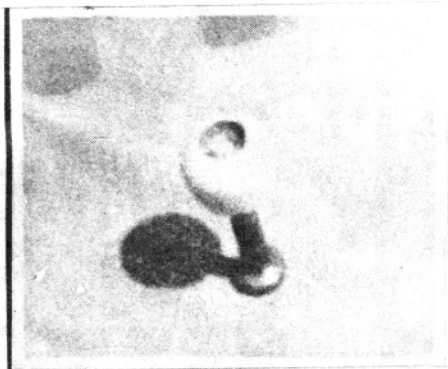


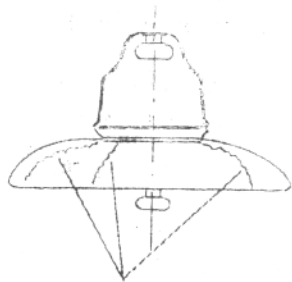
图 4

1. 金具破坏，一种情况是钢脚拉长即钢脚强度不够产生颈缩，负荷不能继续增加。另一种情况是铁帽破坏。它多半发生在帽耳部份和帽的后部(图3)。帽沿的强度若不足也会发生帽沿开裂。

2. 钢脚抽出(抽心)。这是由于水泥强度不足或因水泥抗剪面积过小所致。有时，水泥强度不够，可压缩性很大，以致钢脚头部不断陷入水泥内，负荷不能增加上长(图4)。

3. 脱帽：这是由于水泥强度不够或胶装质量不高，帽沿缺水泥的缘故。

4. 伞盘张裂：伞盘产生径向放射状的开裂(图5)。这是水泥胶基面高出帽沿，使伞盘切向张力过大所致。



径向裂纹

图 5



图 6

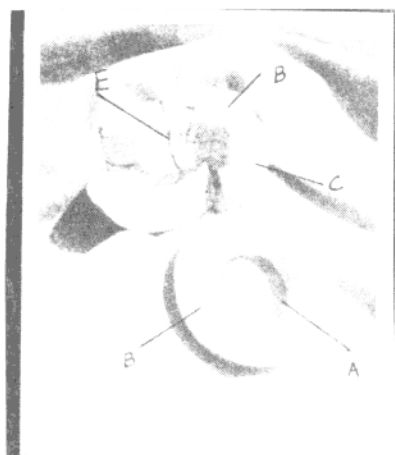


图 7

当缓冲涂层太厚时也容易发生这种破坏。

5. 瓷头颈部断裂 (通称瓷颈断), 当加强金具, 提高水泥强度以后, 绝大部份的绝缘子都是因瓷颈断而破坏。

瓷颈断的外表如图 6 所示。瓷颈断面 A 一般约比帽沿高 1cm 左右。断面基本上是水平的。把铁帽剖开就可以发现, 断面 A 以上, 瓷头通常还有多处发生环状的断裂。这些断面中最典型的是断面 B 和断面 C (图 7 和图 8)。断面 C 位于瓷头承力面上端, 断面基本上是水平的。断面 B 在瓷头中部 B 断面与水泥断裂面一致。断面与水平面成一定的倾斜角 (图 9)。

在一般情况下瓷头上部及下部都有断裂面。但在多数情况下, 只是在下部断裂, 即在 A 处或 B 处断裂 (图 10)。

在断裂面上有时可以发现击穿槽道 (图 11)。我们认为, 击穿总是发生在最先破坏的断面上。因此

根据槽道所在的部位可以推断哪一个断面最先破坏。其余的断面则认为是由破坏发生后，负荷来不及立刻卸去而产生的二次破坏现象。在A, B, C三种断面上，我们都发现过有击穿槽道。这说明A, B, C三处皆可能最先发生破坏。瓷颈断也可能发生在瓷头上部破坏之后。当水泥强度不够时，水泥先于瓷件断裂的情况较多。由于水泥断裂后承力面往下移，击穿多半发生在断面A上或断面B上。瓷头除了发生上述沿纬线的环状断裂以外，有时还有经线的裂纹（图中断裂纹E）。当水泥强度较低或帽与瓷件间水泥层比较厚，帽的刚度较小时，容易产

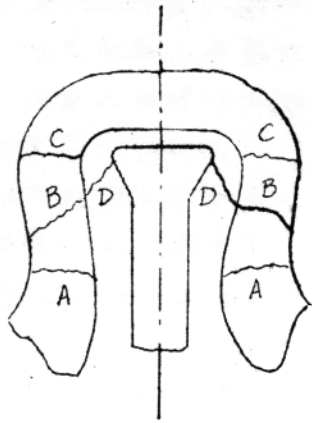


图 8

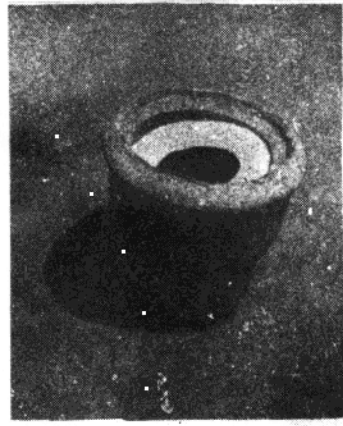


图 10

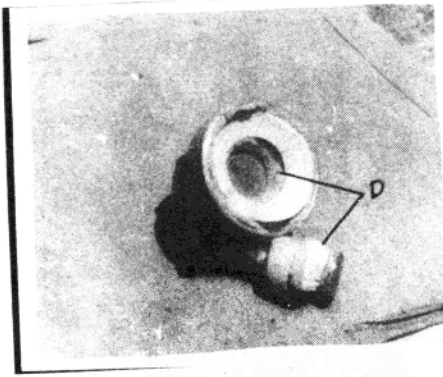


图 9

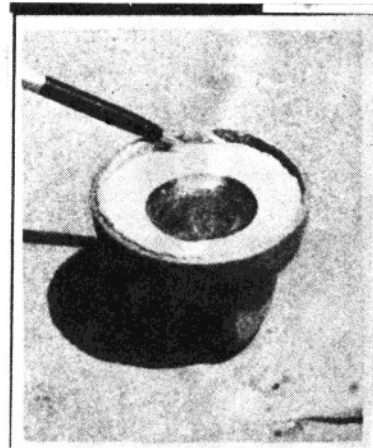


图 11

生经线裂纹(瓷头张裂)。断面的状况也有一定的特点。以断面 C 为例, 断面总是内圈比较粗糙, 外圈比较光滑(图 12)。与抗折试条的断面(图中右)相比可以初步推断, 瓷体内表面附近的部份是受拉, 而外表面附近则受压。

内孔水泥块通常都有断裂面。水泥断裂的部位与脚型有关。但断裂面总是大致与脚承力面的法线成  $45^\circ$  (图 8 中断面 D)。断面的状况与水泥试块受压破坏的断面颇为相似。因此, 据

此已可初步判断水泥块是受压而被剪坏的。

我们还发现, 当瓷件尚未破坏时, 有时内腔水泥块已经断裂成两部份, 水泥块表面有滑移和受挤压而产生的深色痕迹。(图 13)。这说明水泥强度不足时, 有可能比瓷件先破坏。水泥断裂后, 承力面往下滑移。

为了进一步了解瓷件和水泥破坏的原因, 为了寻求合理的结构, 必须了解瓷件和水泥内的应力分布。但由于绝缘子是多种材料组成的复杂的弹

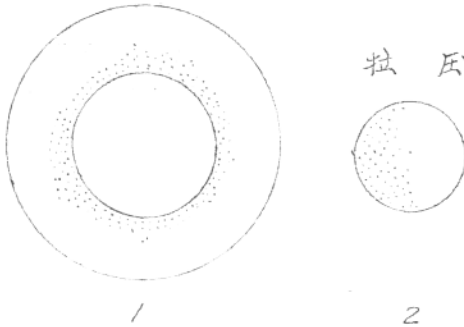


图 12

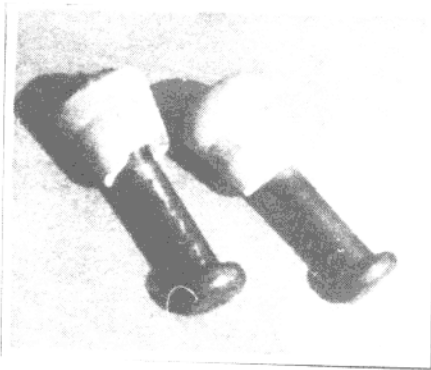


图 13

性系统, 至今尚无计算绝缘子的公式。通常是用实验应力分析的方法来研究其应力分布的。我们采用了光测弹性力学的方法。

(二) 用光测弹性力学方法研究圆锥头悬式绝缘子应力分布:



绝缘子是一迴转体，理应用三維的模型研究其应力分佈。惟目前在三維的光彈实验技术方面尚有困难，只能权且採用平面模型代替立体模型，研究绝缘子子午面内的应力分佈。从立体模型过渡到平面模型，首先需要解决如何在平面模型上考虑平行圆切向力  $T_2$  的作用的问题。

以铁帽为例，铁帽可看成壳壳。平行圆々周的切向力  $T_2$  对於平衡外力起很大作用。(图14) 若按其子午面的形状做一平面模型，则铁帽变成了一悬臂的曲桿。模型在受方后很容易变形，不起约束作用。因而模型内的应力已不及映实际情况了。但根据壳体的近似计算法壳体可以简化为弹性地基上的曲桿来计算。其原理如下：

壳体某一平行圆々周的相对伸长为

$$\epsilon_2 = \frac{\omega}{r} \text{----- (1)}$$

$\omega$  — 挠度，  $r$  — 平行圆的半径。

$$\text{但 } \epsilon_2 = \frac{1}{Eh} (T_2 - \mu T_1) \approx \frac{T_2}{Eh} \text{--- (2)}$$

由(1)，(2) 得

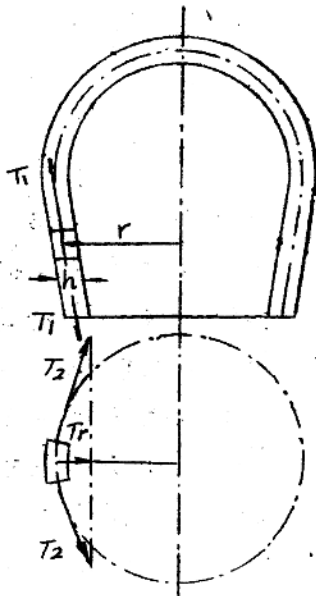


图 14

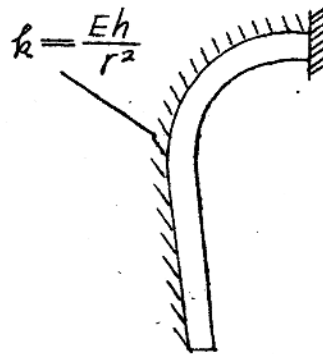


图 15

$$T_2 = \frac{Eh}{\gamma} \omega$$

$T_2$  在  $\gamma$  方向的投影为

$$T_Y = \frac{Eh}{\gamma^2} \omega \text{ --- (3)}$$

与弹性地基的反力  $f = k\omega$  的表达式相比可知，若把壳体简化为弹性地基上的平面曲棒，地基系数  $k = \frac{Eh}{\gamma^2}$ ，则地基的反力可以近似地反映壳体平行圆筒内力的作用。于是壳体的壳体简化为图15所示的弹性地基上的曲棒。

同样，瓷件也可简化为弹性地基上的曲棒。由于瓷体与铁帽之间已有一层水泥，即已经有一“弹性地基”，故总的地基系数为：

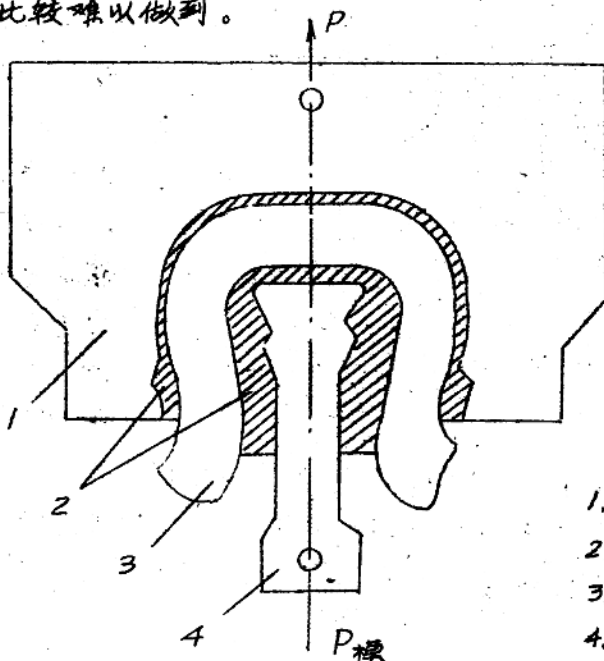
$$k = E_{水泥} + \frac{E_{瓷} h_{瓷}}{\gamma^2}$$

拿瓷部份的地基系数为

$$k = \frac{E_{瓷} h_{瓷}}{\gamma^2}$$

$E$  为弹性模量。

但是，制作这样的模型比较困难。因为地基系数需要逐点改变。这比较难以做到。



- 1. 钢板
- 2. 填充剂
- 3. 光弹材料
- 4. 胶木

图 16

我们采用另一种简化的办法来模拟切向力的约束作用。用一整块钢板代替铁帽(图16),钢板的宽度较大,这样可以保证其刚度。钢板的外形为阶梯形,使得在模型的载荷 $P$ 模作用下,其挠度比较接近于铁帽在实际试验载荷 $P$ 作用下的挠度。铁帽的挠度是按壳在一定的分佈力的作用下用计算求得的。

在我们的模型中没有考虑伞盘的作用。

其次,需要解决圆锥头绝缘子如何模拟的问题。

圆锥形结构中,瓷件,水泥两者有相对滑动的可能。各部份靠接触面传递应力。这与圆锥头结构中,水泥和瓷件依靠上砷面连成一体的情况是不同的。因此,模型应反映这种差别。不能把水泥与瓷体当作一整体。

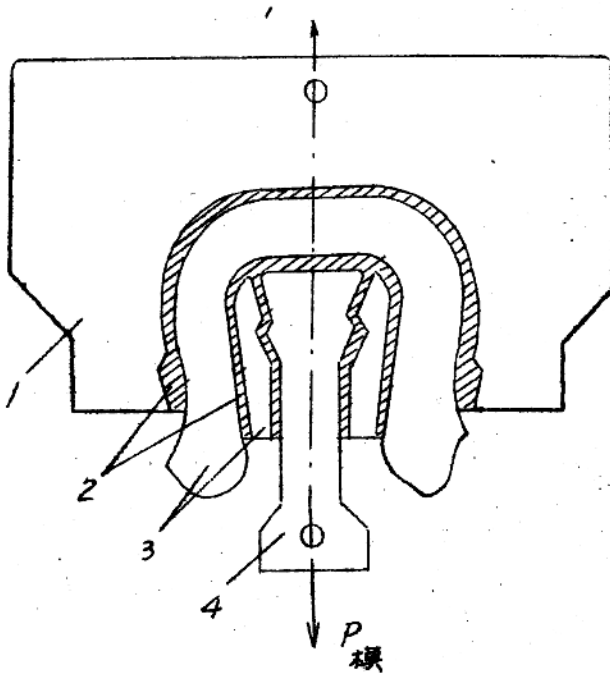


图 17

起初,试图用装配的办法制作模型,但由于配合面很多,即使精心加工也难以保证各部份良好地接触。这时应力场完全被几处点接触造成的应力所扰乱。

现在采用浇灌填充剂的办法消除点接触应力。在研究瓷体中的应力时,瓷用光弹材料(环氧树脂37)制成。

水泥用氧化铅甘油浇入模型内来模拟。这样可以达到良好的面接触。氧化铅甘油质地与水泥颇为相似,可以较好地反映水泥受力后发生弹-塑性变形的情况。在研究水泥中的应力时,水

泥也用光弹材料制成。在水泥与瓷件间薄层填一层填充剂(图17)。此外,在脚的承力面及瓷头涂一层凡士林,以模拟沥青涂层。

模型各部份的弹性模量应与实物对应部份的弹性模量成比例。故钢脚用胶木制成,其弹性模量为  $7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ , 光弹材料的弹性模量为  $3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 。两者之比与钢与瓷的弹性模量之比较为接近。氧化铝的弹性模量不好测量,根据硬度判断,比光弹材料稍软。

模型的厚度为  $8 \text{ mm}$ , 比例为  $1:1$ 。

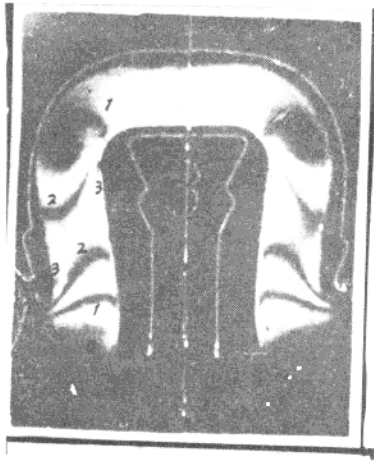


图 18

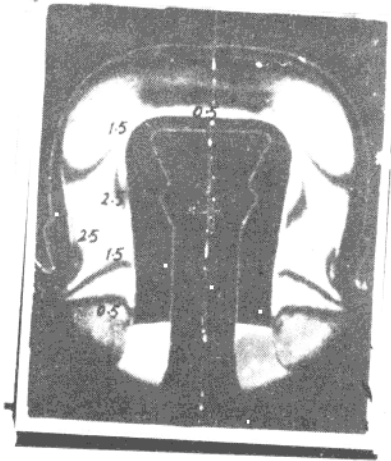


图 19

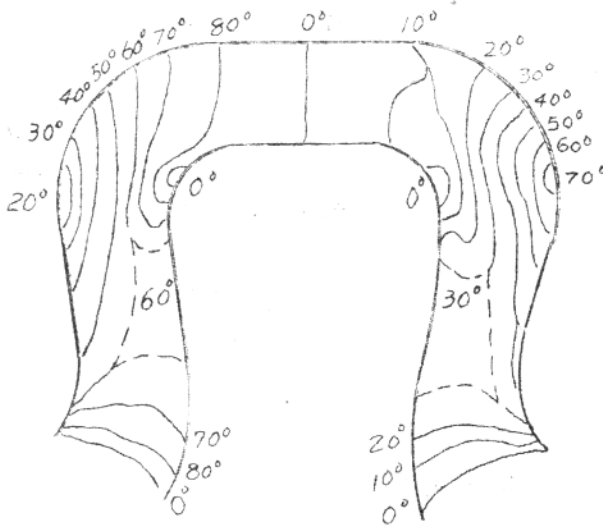


图 20

将上述模型置於偏光场内,按一定的方法可以求得清晰对称的应力光图。图18,19表示XP-12第一次设计的试品模型受载109 KG时的等色线条纹。图18为整级条纹,图19为半级条纹。

图20表示相应

的等倾线族。

有了等色线和等倾线，就掌握了确定弹性体内各点应力状态的全部资料。通过一定的计算，即可求得各点的应力分布。

我们采用剪应力差法[6]计算了应力分布。根据静力平衡条件进行了校核，说明计算误差小于10%。

以下以XP-12第一次设计为例，说明圆锥头结构绝缘子头部应力分布规律。

(三). 圆锥头绝缘子应力分布规律:

图21表示瓷件承力部份主应力迹线的分布。

图22表示沿瓷件内外表面(AA, BB)及断面CC, DD的第一主应力的分布，纵坐标是以条纹级数为单位的。

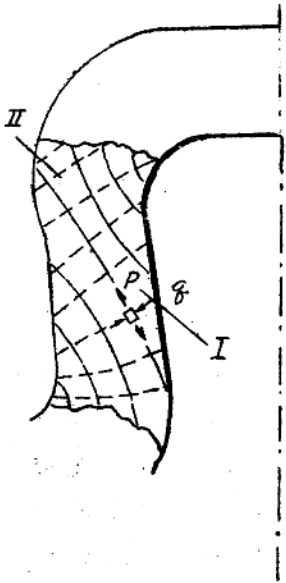
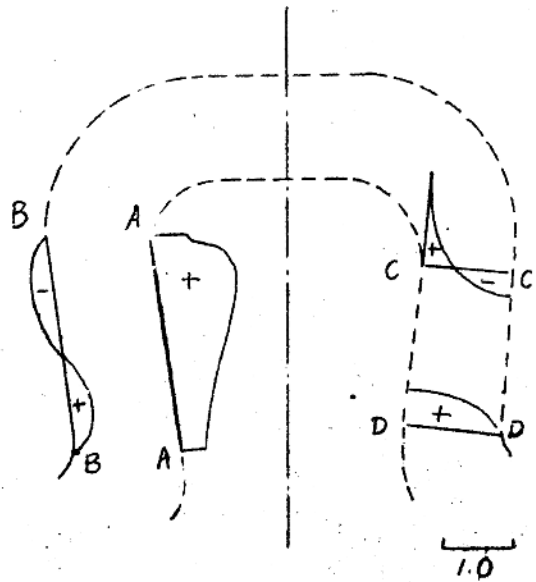


图 21



第一主应力的分布

图 22

註：按图20中顺針增加角度绘出。

由图可见

瓷件子午面内可以分为两个区域，在I区内，第一主应力 $P$ 为拉应力，第二主应力 $q$ 为压应力。在II区内，两个主应力均为压应力。

瓷件的破坏是由于拉应力达到瓷的抗拉极限所致。由图可知，瓷件应沿第二主应力线( $q$ 线)断裂。这与实物破坏断裂的情况是相当符合的。

最大拉应力出现在瓷件内表面上，故瓷件内表面为危险面。从实物破坏后断面上击穿通道的形状和方向可以判断，断裂是从内表面开始的。

以下根据求得的最大拉应力估算绝缘子的破坏负荷。

模型中某一点的应力与原型中对应点的应力有如下的关系：

$$\sigma_{原} = \frac{P_{原}}{P_{模}} \cdot \frac{2d}{\pi \bar{D}} \sigma_{模} \quad (4)$$

$$\sigma_{模} = \pi F$$

式中： $P_{原}$ ——加于绝缘子上的载荷，

$P_{模}$ ——加于模型上的载荷，

$\bar{D}$ ——绝缘子内腔平均直径

$d$ ——模型的厚度

$n$ ——条纹级数

$F$ ——条纹值。

上述几个量数值为  $P_{模} = 109 \text{ KG}$

$F = 15.3 \text{ KG/cm}^2$  (标准拉棒测得)。

$\bar{D} = 4.6 \text{ cm}$ ,  $d = 0.8 \text{ cm}$ 。

$n = 1.0$

绝缘子的破坏负荷应为

$$P_{破} = \frac{[\sigma] P_{模} \pi \bar{D}}{2d n F} \quad (5)$$

$[\sigma]$  为瓷的抗拉极限。G47号高强度料试条的抗拉强度 $F$ 均为  $58.3 \text{ KG/cm}^2$ ，试条的截面积为  $A_1 = 3.76 \text{ cm}^2$ 。

绝缘子危险断面的面积为  $A_2 = \pi(4.5^2 - 2.5^2) = 44 \text{ cm}^2$ 。

众所周知，瓷的抗拉强度随截面积的增加而减小。据[5]给的曲线查得，上釉硬质瓷平均强度当面积从  $3.76 \text{ cm}^2$  增大至  $44 \text{ cm}^2$  时，抗拉强度下降至原来的 0.63。故用 G47 号料生产的瓷件的抗拉强度  $[\sigma] = 0.63 \times 583 = 366 \text{ kg/cm}^2$ 。

据[5]式求得：

$$P_{\text{破}} = \frac{366 \times 109 \times \pi \times 4.6}{2 \times 0.8 \times 1 \times 15.3} = 23.5 \times 10^3 \text{ kg} = 23.5 \text{ 吨}$$

若采用普通 G40 料(试条抗拉强度平均为  $443 \text{ kg/cm}^2$ )。

$$P_{\text{破}} = \frac{0.63 \times 443 \times 109 \times \pi \times 4.6}{2 \times 0.8 \times 1 \times 15.3} = 17.1 \times 10^3 \text{ kg} = 17.1 \text{ 吨}$$

图 23 表示瓷件内外表面上正压力及剪应力(在此为摩擦力)的分佈情况。从破坏以后瓷缘子水泥被挤压的痕迹来看，图 23 表示的分佈规律大体上是符合实际情况的。因此，如果把瓷头当作孤立体来致考查，瓷件内外表面上作用着两组分佈的外力。

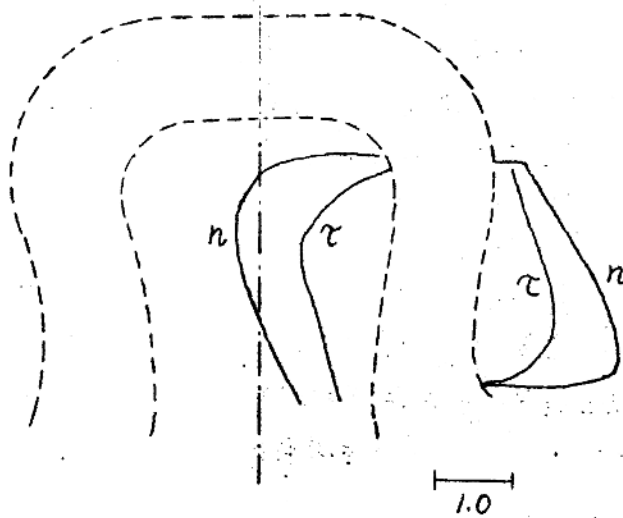


图 23.

一组为沿表面的剪应力  $\tau$ ，另一组为垂直于表面的正压力  $n$ 。这两组力在瓷头内引起了图 21, 22 所表示的应力分佈。当然，不应该忘记，在立体的情况下，还有沿平行圆切向拉应力  $T$  存在。当  $T$  达到瓷的抗拉极限时就产生瓷头张裂。以下说明水泥块中的应力分佈。

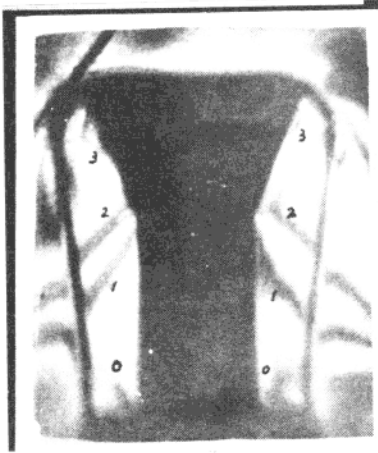


图 24.

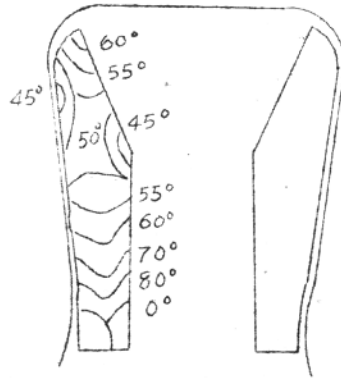


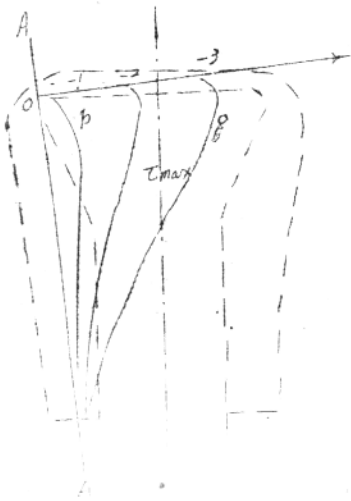
图 25

图 24 表示 XP-12 第一次设计方案的模型受力 109 KG 时水泥块的等色线条纹，图 25 为对应的等倾线族。

我们用剪应力差法计算了水泥块中的应力分佈。计算表明，水泥块于午平面内各点的两个主应力皆是负的。即皆为压应力。水泥中没有拉应力存在。

图 26 表示沿 AA 断面上两个主应力及最大剪应力的分佈。

因此水泥是由於受压而破坏，即由於最大剪应力超过水泥抗剪强度所致。水泥的断裂面应与压应力迹线成  $45^\circ$  角，实际情况正是如此。



综上所述，平面模型求得的应力分佈规律在许多方面能反映实际情况，但是，由於模型作了很大的简化，也有其局限性。

1. 虽然用加大钢板刚度的办法近似地考虑了切向力的约束作用，但是，这种模型本质上仍然是一组合的梁，求出的



最大拉应力总是在瓷头上部，但实际上，有时瓷颈断裂而瓷头上部仍保持完整。这说明模型还不能充分反映切向力的约束作用。

2. 瓷体是厚壳体。切向力沿径向是逐点变化的。切向力的分佈对子午平面的应力分佈是有影响的。切向力的分佈情况在平面模型中是无法反映的。

3. 模型没有考虑伞盘的约束作用。在试验中发现伞中也存在很大的应力。忽略了伞之后，瓷头颈部成了自由端。这与实际情况有出入。

#### (四) 瓷头结构形状与机电强度的关系：

我们用上述方法分析了几种结构方案的应力分佈，并进行了实物试验。在此基础上提出改进瓷头结构的措施。

1. 瓷头内腔水泥有可能比瓷件先断裂。水泥断裂后引起瓷体内应力分佈的恶化，因而导致瓷件过早破坏。实物试验也说明，水泥的强度对整个绝缘子的强度影响很大。它是提高机电强度的必要条件。下表说明 XP-12 第一次方案用二种不同水泥配方时机电破坏负荷的数值，其他条件均相同。

表 I.

水泥 配方	600号水泥 0.3~0.75mm瓷砂					600号水泥 40μ高细度瓷粉				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
破坏负荷 吨	>12.9	18.4	13.5	17.4		11.9	13.7	11.4	11.7	12.2
破坏现象	击穿	没坏	瓷断	瓷断		瓷断	瓷断	瓷断	瓷断	瓷断
平均 负荷	>15.6 吨					12.2 吨				

在结构设计方面，不仅要使瓷件中应力分佈合理，也应该力求使水泥中应力分佈合理。在两者有矛盾时，应根据瓷件和水泥的强度统一处理。

#### 2. 脚帽形状对绝缘子强度的影响：