超高气压放电灯泡壳的应力计算

超高气压放电灯的工作气压高达几十个大气压，泡壳承受着极大的张应力。同时，它们的功率负载也很高，泡壳的内外壁之间存在着很大温差，因此泡壳还承受着很大的热应力，特别对于强迫冷却的灯管，热应力更大。在这些应力的作用下，如果泡壳的机械强度不够高，就有可能发生爆炸。为此必须对泡壳的应力进行计算，估计泡壳能否忍受这些应力。

泡壳上的张应力和热应力分布

泡壳上的张应力和热应力分布已由材料的弹性和强度理论得出。泡壳上的张应力与充气压力P 成正比，在放电管外壳为圆筒形时，其张应力的法向分量σ_{Pr}，角向分量$\sigma_{P\theta}$，和轴向分量σ_{Pz}可按下式计算：

$$\sigma_{Pr}=p\frac{r_i^2}{r_0^2-r_i^2}(1-\frac{r_0^2}{r^2}) \qquad (C-1)$$

$$\sigma_{P\theta}=p\frac{r_i^2}{r_0^2-r_i^2}(1+\frac{r_0^2}{r^2}) \qquad (C-2)$$

$$\sigma_{Pz}=p\frac{r_i^2}{r_0^2-r_i^2} \qquad (C-3)$$

在放电管外壳为球形时，其张应力的径向分量σ_{Pr}和角向分量$\sigma_{P\theta}$可按可按下式计算：

$$\sigma_{Pr}=p\frac{r_i^3}{r_0^3-r_i^3}(1-\frac{r_0^3}{r^3}) \qquad (C-4)$$

$$\sigma_{P\theta}=p\frac{r_i^3}{2(r_0^3-r_i^3)}(2+\frac{r_0^3}{r^3}) \qquad (C-5)$$

当泡壳的厚度 t 很小时，有 ri≌ro,于是式（C1~5）式为：

院筒形

$$\sigma_{Pr}=0 \qquad (C-6)$$

$$\sigma_{P\theta}=p\frac{r}{t} \qquad (C-7)$$

$$\sigma_{Pz}=p\frac{r}{2t} \qquad (C-8)$$

球形

$$\sigma_{Pr}=0 \qquad (C-9)$$

$$\sigma_{P\theta}=p\frac{r}{2t} \qquad (C-10)$$

可见，在泡壳的厚度很小时，张力的径向分量消失，而其切向分量与气体压强 p 和径向位置 r 成正比，与泡壳厚度 t 成正比。因此，直径小、厚度大的泡壳，其机械强度也较高。比较（C-8）和（C-10）式可知，在泡壳的直径、厚度相同，充气压强也相同时，球形泡壳上的切向张力只是筒形泡壳，热应力的三饿分量可用下面的公式计算：

$\sigma_{Pr}=W_c\frac{C}{2}[r_i\ln\frac{r}{r_i}+\frac{r_0^2 r_i}{r_0^2-r_i^2}(\frac{r_i^2}{r^2}-1)\ln\frac{r_0}{r_i}]$ （C-11）

$\sigma_{P\theta}=W_c\frac{C}{2}[r_i+r_i\ln\frac{r}{r_i}-\frac{r_0^2 r_i}{r_0^2-r_i^2}(\frac{r_i^2}{r^2}+1)\ln\frac{r_0}{r_i}]$ （C-12）

$\sigma_{Pz}=W_cC\mu[\frac{r_i}{2}+\frac{r_i}{r}\ln\frac{r}{r_i}-\frac{r_0^2 r_i}{r_0^2-r_i^2}\ln\frac{r_0}{r_i}]$ （C-13）

对球形泡壳，热应力为：

$\sigma_{Pr}=W_c\frac{C}{2}[r_i-\frac{r_i^2}{r_i}+\frac{(r_0-r_i)r_i^4r_o^2}{r_0^3-r_i^3}(\frac{1}{r^3}-\frac{1}{r_i^3})]$ （C-14）

$\sigma_{P\theta}=W_c\frac{C}{2}[r_i-\frac{r_i^2}{2r}-\frac{(r_0-r_i)r_i^4r_o^2}{r_0^3-r_i^3}(\frac{1}{2r^3}+\frac{1}{r_i^3})]$ （C-15）

（C-11~15）式中 C 为与材料性质有关的常数：

$C=\frac{aE}{k(1-\mu)}$ （C-16）

其中 a 为线性热膨胀系数，k 为热导数，E 为弹性模量，μ为泊松比。
泡壳单位面积所传导的热量 Wc 与表面负载 Ws 成正比，其比例系数与充气压强、放电参量有关，在大多数超高压气压放电条件下，Wc/Ws 近似数 0.3。
利用上述公式，可以方便地计算泡壳上的应力分布。

C-2 计算实例

现在我们以 75W 超高气压汞蒸气放电灯为例，计算泡壳上的应力分布，并进一步确定其机械强度。

75W 球形超高压汞灯的主要参数如下：功率 Pt=75W,工作气压 p=60atm≌60kg/㎝^{2}，泡壳的外半径 ro=0.7cm,壁厚 t=1.8mm，泡壳材料为熔凝石英玻璃。已知石英玻璃的线膨胀系数 a≌5.9×10^{-7}/℃，弹性模量 E≌7×10^{5}kg/㎝^{2},在 0~600℃范围内，导热系数 k≌0.017W/cm,泊松比μ=0.16，将这些材料特性参量代入（C-14）、得常数 C=29kg/(W.cm)。将这些数据代入（C-4）、(C-5)、(C-14)、(C-15）式，得到泡壳上的应力分布。

热应力和张应力的径向分量σ_{Tr}和σ_{Pr}都是负的，即是压应力。因石英玻璃的抗压强度远比抗张强度高，所以可不予考虑这两个分量。泡壳上的切向张应力和热应力$\sigma_{P\theta}$、$\sigma_{T\theta}$之和在整个泡壁中近似均匀分布，其最大的总应力$\sigma_m=\sigma_{P\theta}+\sigma_{T\theta}$=77kg/㎝^{2}。

计算得到泡壳中的应力后，我们来检验他的机械强度。为此我们定义材料所能承受的最大极限应力为σ_v与实际所受到的最大应力σ_m之比为安全系数：

$Gs=\sigma v/\sigma m$ （C-17）

安全系数Gs用来定量地描述泡壳的机械强度，Gs愈大，机械强度愈高。由于材料不可避免地存在着缺陷，在泡壳的加工过程中会造成损伤和残余应力，泡壳的安全系数一般应在 9 以上，否则泡壳就有爆炸的危险。

已知石英玻璃在工作温度为 800℃时的极限强度为σv=980kg/㎝^{2},在上述例子中 Gs=12.5,泡壳的机械强度认为是足够的。