

拱形塑料大棚强度设计中 一个急需解决的问题

张自恺

(西北农业大学农机系)

本文指出：由于塑料大棚的钢拱架采取冷弯成形工艺，从而一方面使拱架在承受载荷之前就具有自应力，另一方面使拱架材料的屈服极限发生变化，最后导致强度发生严重的畸形：负弯矩处过份安全，正弯矩处强度则严重不足。这一畸形必须设法克服。

关键词 拱形塑料大棚；冷弯成形；应力畸形

一、大棚拱架自应力的计算

图1表示大棚拱架成形的办法。从理论上讲，只需要在直杆两端各作用一力偶使之冷弯至虚线A-A位置，然后撤去力偶，拱架就可回弹到设计位置B-B。这一成形工艺必然引起拱架中的自应力。因为，这种拱架常为圆弧形，其矢高与跨度之比不能太小，因此在拱架截面的上下边缘附近一定不会出现塑性变形，而该截面中性层两边的一定范围内则仍只有弹性变形，回弹后，上下边缘处的永久变形必然阻止拱杆恢复到原来的直线状态，因而在任一截面中产生自成平衡的自应力。这种自应力的计算方法如下。

设该拱管材料为经过冷拔的电焊钢管，其 σ - ϵ 图见图2。为计算简便，我们将此曲



图 1

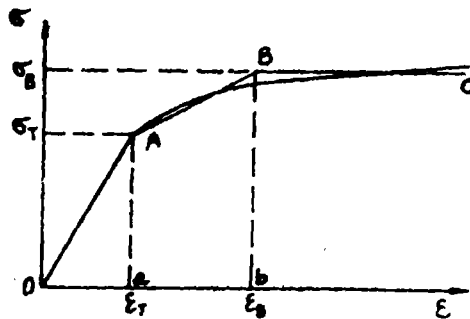


图 2

本文于1985年10月28日收到。

线简化为由OA、AB和BC三条直线所组成的折线。A点对应的应力可以规定取为屈服极 σ_T ，A点对应的应变取为 ε_T 。BC为与 ε 轴平行的直线。B点对应的应力和应变分别为 σ_B 和 ε_B 。为方便计，我们取A、B两点在 ε 轴上投影连线ab等于 $K\varepsilon_T$ ，其中常数K由简化的 σ - ε 曲线确定。

设拱架的矢高为f（图3a），其圆弧形半径为 ρ ，那末，显然有

$$\rho(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) = f \quad (1)$$

此时，拱架截面最外纤维的应变

$$\varepsilon_0 = \frac{r}{\rho} \quad (2)$$

式中 r ——拱架截面的外半径（图3b）。

为达到拱架的最后成型B-B（图1），冷弯时就要达到A-A状态。A-A状态下圆拱截面的上下最外纤维的应变 ε 可用下式求得：

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma_x}{E} \quad (3)$$

图 3

式中 σ ——A-A状态下拱架截面上下最外纤维的应力，当拱的 $\varepsilon \geq \varepsilon_B$ 时等于 σ_B ，

σ_x ——拱架截面上下最外纤维的自应力，

E —— σ - ε 图中OA段的弹性模量，

ε_0 ——B-B状态下拱架截面上下最外纤维的应变，由（2）式确定。

为求得 ε ，我们可以先设定 σ_x 。下面将看到，如果一开始 σ_x 设定不妥也不要紧，它可以通过迭代而最后确定其准确值。

为了求得自应力的应力值，我们作如下设想，先设拱架受M外力偶（图4a）作用达到A-A状态。然后在拱架的A-A状态上去掉M，再在两端作用大小与M相等、但方向相反的力偶M'（图4b）。最后将上述两种状态叠加起来就得到无外力作用状态，亦即图1的B-B状态。这样，我们就只需做这两种状态下的应力计算。显然，图4a所示状态的应力分布就是图2（在图5中即图5c）。为求得图4b所示状态的应力分布，就必须先求出该状态的力偶矩M。为此，应用图5。该图中，为计算简便，我们将采用

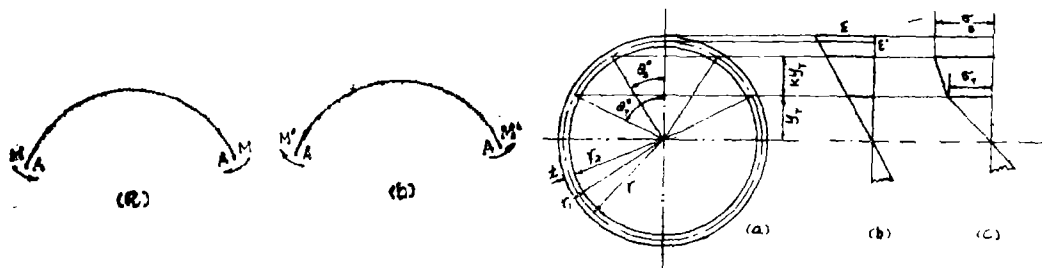
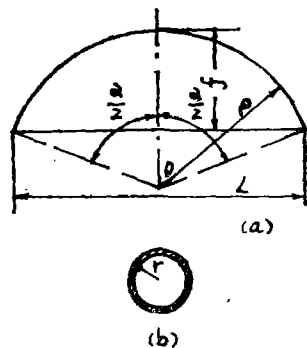


图 4

图 5

平均半径 $r = \frac{1}{2}(r_1 + r_2) = r_2 + \frac{t}{2}$ (图 5 a)。图 5 b 是沿拱轴垂直方向的应变图, 据许多资料报道, 可足够准确地认为应变沿半径的方向是线性分布的。图 5 c 是截面的正应力分布图。我们首先确定 y_T 值如下。

$$y_T = \frac{r\sigma_T}{E\varepsilon'} \quad (4)$$

式中 ε' ——图 4 a 所示状态中, 半径 r 处的上下纤维的应变。

现在我们可以计算出截面所受弯矩 M :

$$\begin{aligned} M = & 4 \int_0^{\theta_s^0} r d\theta \sigma_s r \cos\theta + 4 \int_{\theta_s^0}^{\theta_T^0} r d\theta t \left[\frac{\sigma_s - \sigma_T}{ky_T} (r \cos\theta - y_T) + \sigma_T \right] r \cos\theta \\ & + 4 \int_{\theta_T^0}^{\pi/2} r d\theta t \frac{\sigma_T}{y_T} r^2 \cos^2\theta = 4 \left\{ \frac{r^3 t}{ky_T} \left[(\sigma_s - \sigma_T) \left(\frac{\theta_T^0 - \theta_s^0}{2} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + \frac{\sin 2\theta_T^0 + \sin 2\theta_s^0}{4} \right) + k\sigma_T \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_T^0}{2} - \frac{\sin\theta_T^0}{4} \right) \right] \right. \\ & \left. + \left[(\sin\theta_T^0 - \sin\theta_s^0) \frac{(1+K)\sigma_T - \sigma_s}{K} + \sigma_s \sin\theta_s^0 \right] \times r^2 t \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \cos\theta_T^0 &= y_T/r \\ \cos\theta_s^0 &= \frac{y_T(1+K)}{r} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

用 (5) 式求得 M 后就可利用材料力学中的有关公式求得图 4 b 所示状态的应力分布。这里, 应特别注意该状态是卸载过程, 根据卸载规律, 不难得到最远上下纤维处的应力为

$$\sigma = M/W_x$$

式中 W_x ——拱杆截面对水平轴的抗弯截面模量。

不难看出, 此应力分布是线性的。现在将这两种状态的应力图叠加起来 (图 6), 图中阴影线部分就是自应力的分布情况。由图看出, 最外上下纤维处的自应力 σ_s :

$$\sigma_s = \sigma - \sigma_b \quad (7)$$

还看出, 当拱架承受负弯矩时, 截面的上半部受拉, 而自应力则为压应力, 即自应力与弯曲正应力异号。因此, 这时必定是先使自应力值逐渐减小, 直到等于零, 然后才开始上半部受拉, 下半部受压, 这就使设计屈服极限提高了。相反, 当拱架承受正弯矩时, 截面的上半部受压, 而自应力亦为压应力, 也就是说, 自应力与弯曲正应力同号, 因此必然降低设计屈服极限。下面我们列举一实例来说明自应力的计算方法。

〔例题〕设圆形拱架的跨度为 8 m, 矢高为 2.36 m, 曲率半径 $\rho = 457$ cm, 材料为冷拉过的电焊钢管, 弹性模量 $E = 2.04 \cdot (10^4)$ kg/cm²,

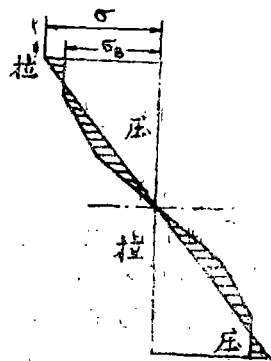


图 6

外径 $d_1 = 2.22\text{cm}$ ，管壁厚 $t = 0.118\text{cm}$ ，平均半径 $r = 1.05\text{cm}$ ， $\sigma_T = 2600\text{kg/cm}^2$ ， $\sigma_s = 3540\text{kg/cm}^2$ ， $K = 1.2$ ，截面的抗弯截面模量 $W_x = 0.39\text{cm}^3$ ，需求自应力分布规律。

解：冷弯成形时最外上下纤维的应变由式（2）求得为

$$\varepsilon_0 = \frac{r}{\rho} = \frac{d_1/2}{\rho} = \frac{1.11}{457} = 2429 (10^{-6})。$$

由式（3）得

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\sigma_s}{E} + \frac{\sigma_x}{E} = 2429 (10^{-6}) + \frac{3540}{2.04(10^6)} + \frac{\sigma_x}{2.04(10^6)} = 4165 (10^{-6}) + \frac{\sigma_x}{2.04(10^6)}，$$

设 $\sigma_x = 400\text{kg/cm}^2$ ，则 $\varepsilon = 4361 (10^{-6})$ 。

半径 r 处的

$$\varepsilon = \frac{4361(10^{-6})1.05}{1.11} = 4126 (10^{-6})。$$

由式（4）得

$$y_T = \frac{1.05 (2600)}{2.04(10^6)(4126)(10^{-6})} = 0.3243\text{cm}，$$

$$ky_T = 1.2 (0.3243) = 0.3892\text{cm}。$$

再由式（6）得

$$\theta_s = 0.8237\text{Rad}，\theta_T = 1.2568\text{Rad}，$$

上列数据代入式（5），得

$$M = 1752.12 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = 4492.6\text{kg/cm}^2。$$

由式（7）得

$$\sigma_x = \sigma - \sigma_s = 4492.6 - 3540 = 952.6\text{kg/cm}^2 \gg 400。$$

再设 $\sigma_x = 981\text{kg/cm}^2$ ，重复以上计算，最后得 $\sigma_x = 982\text{kg/cm}^2$ ，此与原设 $\sigma_x = 981$ 相差不多。这样，我们就求得了上下最远纤维处的自应力，整个自应力的分布规律与图6相似。

二、大棚拱架强度及自应力的实验方法

上面我们研究了自应力对强度的影响，但这还不是问题的全部。下面的实验同时考虑自应力的影响才全面地说明本文开始时指出的问题。

图7a为实验装置，乃一纯弯曲系统。在试件中央截面上贴有8块电阻片（图7b），另外在两边还可贴电阻片（图7a的7处），用以检验试件弯曲是否为圆弧形。每一试件共作三次试验，第一次为成形试验，即加载至某一值，卸载后达到设计要求（图8a）。第二次为负弯矩加载试验，即使全拱只承受负弯矩（图8b）。第三次为正弯矩

加载试验,即使全拱只承受正弯矩(图8c)。当然,我们也可以用一根试件做其中的一个或两个试验。

我们用上述装置共做8个试件的实验,所得规律是一样的。现将其中之一的结果列后。

图9为该试件的测试结果。该试件的有关基本资料同前面的例题。即

弹性模量 $E = 2.04 (10^6) \text{ kg/cm}^2$;

屈服极限 $\sigma_T = 2600 \text{ kg/cm}^2$;

$\sigma_s = 3540 \text{ kg/cm}^2$;

外径 $d_i = 2.22 \text{ cm}$;

壁厚 $t = 0.118 \text{ cm}$;

平均半径 $r = 1.05 \text{ cm}$;

抗弯截面模量 $W_x = 0.39 \text{ cm}^3$ 。

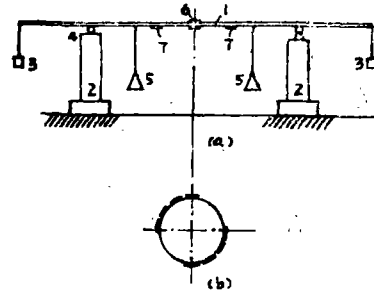


图 7

1—试件 2—支架 3—平衡重,用以消除自重影响 4—活动支座 5—载荷 6—电阻应变片

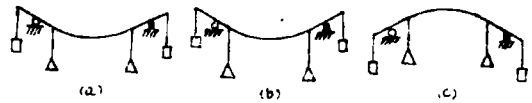


图 8

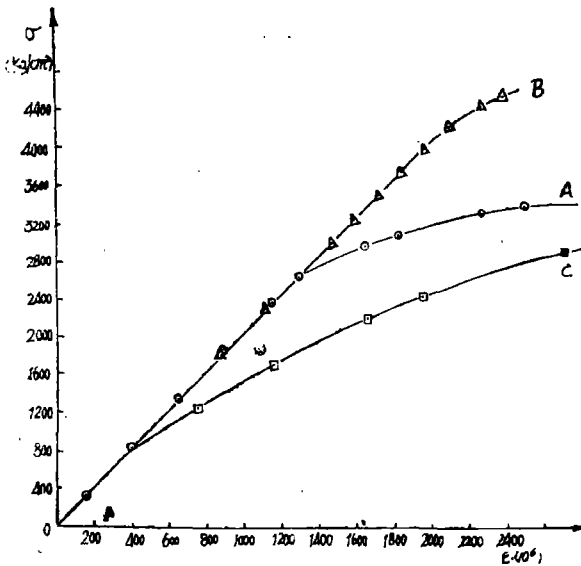


图 9

图9中

曲线OA——冷弯成形的 $\sigma - \epsilon$ 图;

曲线OB——成形后使杆承受负弯矩加载的 $\sigma - \epsilon$ 图;

曲线OC——成形后使杆承受正弯矩加载的 $\sigma - \epsilon$ 图;

由曲线OB可见,使杆承受负弯矩时,屈服极限约为 4000 kg/cm^2 ,此值减去自应力值 981 kg/cm^2 应为无自应力影响时的屈服极限 σ_s^* , $\sigma_s^* = 4000 - 981 = 3019 \text{ kg/cm}^2$,但

无自应力影响的屈服限实测为 2600kg/cm^2 。由此可见,在此种情况下,屈服极限提高了约 400kg/cm^2 。

再看曲线OC,由图可见,使杆承受正弯矩时,屈服极限约为 700kg/cm^2 ,此值加上自应力981应为无自应力影响时的屈服限 σ_s' , $\sigma_s' = 981 + 700 = 1700\text{kg/cm}^2$,但无自应力影响的屈服极限的实测值为 2600kg/cm^2 。由此可见,在此种情况下,屈服限降低了约 $2600 - 1700 = 900\text{kg/cm}^2$ 。总之,具有自应力的曲杆的屈服极限的提高与降低是造成大棚应力畸形的另一个重要原因。

最后,我们把自应力的实验结果与理论值的对比表示在图10中。由图及对比值可知,它们是吻合的。

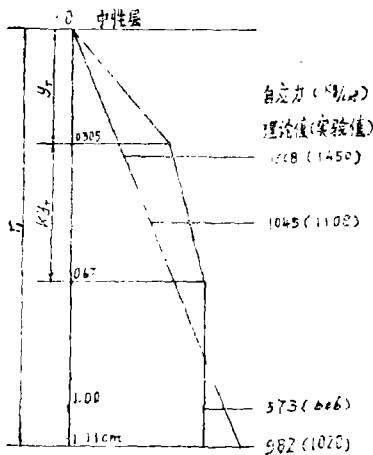


图 10

三、结 论

由前面的实验及理论分析,我们看出:冷弯成形工艺大大影响了大棚拱架的强度,在负弯矩处过份安全,而在正弯矩处强度变得太低。从列举的带有典型性的一个试件的情况来看,承受负弯矩处,承载能力从 $\frac{2600}{K}$ 提高到 $\frac{4000}{K}$ (K为安全系数,可取为1.6),即提高了约54%,而承受正弯矩处,承载能力

从 $\frac{2600}{K}$ 降低到约 $\frac{700}{K}$,即降低了约70%。这是一个严重的问题,应该予以解决。

参 考 文 献

- [1] 冶金工业部主编:薄壁型钢结构技术规范TJ18—75(试行),中国建筑工业出版社,1975年。
- [2] 龙驭球、包世华主编,清华大学结构力学教研组编:《结构力学》下册,人民教育出版社,1979年。
- [3] C.H尼基伏罗夫著:《强性与塑性理论》,高等教育出版社,1957年。

An Urgent Problem to be Solved in Design Strength of Arched Frame Plastic Tent

Zhang Zikai

(*Northwestern Agricultural University*)

Abstract

This paper points out that since the cold-bending technology is adopted in working the arched steel frame of plastic tent, on the one hand, arched frame has been made to have its own stress before its being subject to load, on the other, the limit of yielding of materials of arched frame has changed, eventually leading to the occurrence of serious strength malformation, thus, there is much allowable strength in the negative bend, being over safe, but there is serious shortage of allowable strength in the positive bend. Hence, this malformation must be overcome.

Key Words arched frame plastic tent, cold bending technology, strength malformation