

车用压缩天然气玻纤增强轻型气瓶的应力分析

成都市煤气总公司 安国平

U473

3-8.25

摘要

本文从承压圆筒精确理论出发,对承压玻纤增强气瓶壳壁衬里及缠绕纤维层的应力及不同缠绕工艺下纤维的张力进行了严格的分析并给出了相应计算公式。

关键词: 玻纤增强 壳壁应力 张力 缠绕

1. 概述

压缩天然气(CNG)作为汽车动力燃料的显著经济效益和社会效益愈来愈引起有关部门和广大从事燃气事业的技术工作者的关注。近年来四川车用压缩天然气技术发展很快,已经建成投用的压缩天然气(CNG)汽车燃料充装站就已近十座。由于这项新兴工业在我国尚处于发展初期,许多技术上的难题有待进一步探索 and 解决。

车用压缩天然气技术发展和应用的障碍之一是钢质气瓶质量太重,占用汽车的有效吨位较多,致使压缩天然气替油技术难于在小型车辆上推广应用。

众所周知,四川发展车用压缩天然气的目的有二,一是天然气作为汽车动力燃料,其运行费用可以比汽油降低40%~50%,可以充分利用四川丰富的天然气资源,克服四川富气贫油的供需矛盾,缓解铁路运输的压力。二是解决汽车排放废气对城市空气的污染,而城市内运行的汽车主要是数以万计的各型小汽车。可见,开发轻型车用气瓶对于发展车用压缩天然气的势在必

行。

本文从三维弹性理论出发,对金属衬里玻纤增强气瓶的壳壁应力及缠绕纤维所承受的张力进行了一般性的讨论,通过数学推导给出了复合气瓶壳壁的应力公式及不同缠绕工艺下气瓶增强层纤维张力的计算公式。仅供参考,以此促进新技术的交流和应用。

2. 气瓶圆筒壳壁的应力分析

车用压缩天然气气瓶的工作压力通常为20MPa,压力级别属于高压,对于玻纤增强气瓶的金属内衬而言,其壳壁的强度分析可以按无力矩理论得到的薄壁公式计算。本文为了后面讨论的方便,金属衬里的强度分析按圆筒厚壁理论进行。必须指出,圆筒厚壁理论是承压圆筒壳体的精确理论,而圆筒壳壁的薄壁公式只是厚壁理论在满足工程应用的一定条件下简化得到的。如资料[1]中指出,当圆筒的外径与内径之比大于1.2时,薄壁公式计算出来的应力就会产生较大的误差。

设有一在内压 P_i 及外压 P_o 共同作用下的气瓶,在远离气瓶两端封头的适当位置,用一垂直于气瓶纵向对称轴的假想平面将气瓶截开,其断面如图1,边界条件为

$$\sigma_r \left| \begin{array}{l} r=R_o \\ r=R_i \end{array} \right. = -P_o, -P_i$$

圆筒壳壁任意半径上的径向应力、周向应力及轴向应力见资料[2],数学表达式为

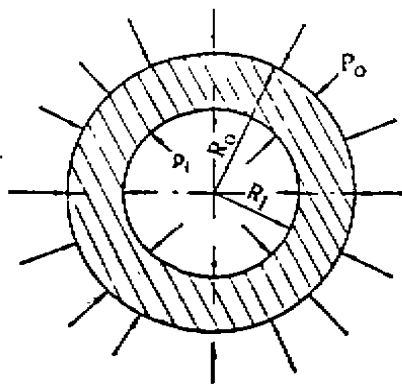


图1 承受内外压气瓶圆筒断面图

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{P_1 R_1^2 - P_0 R_0^2}{R_0^2 - R_1^2} - \frac{R_0^2 R_1^2 (P_1 - P_0)}{(R_0^2 - R_1^2) r^2} \\ \sigma_\theta = \frac{P_1 R_1^2 - P_0 R_0^2}{R_0^2 - R_1^2} + \frac{R_0^2 R_1^2 (P_1 - P_0)}{(R_0^2 - R_1^2) r^2} \\ \sigma_z = \frac{P_1 R_1^2 - P_0 R_0^2}{R_0^2 - R_1^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_1 —圆筒内半径;

R_0 —圆筒外半径;

r —圆筒任意半径;

P_1 —圆筒内压;

P_0 —圆筒外压;

习惯上用圆筒外半径与内半径比 k

($k = R_0 / R_1$) 来简化壳壁应力公式, 于是式(1)可表示为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{P_1}{k^2 - 1} \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right) + \frac{P_0}{k^2 - 1} \left(\frac{R_0^2}{r^2} - k^2 \right) \\ \sigma_\theta = \frac{P_1}{k^2 - 1} \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right) - \frac{P_0}{k^2 - 1} \left(\frac{R_0^2}{r^2} + k^2 \right) \\ \sigma_z = \frac{P_1 - k^2 P_0}{k^2 - 1} \end{cases} \quad (2)$$

圆筒壳壁任意半径剪应力的极值, 根据资料[3]有

$$\left. \begin{matrix} \tau_{\max} \\ \tau_{\min} \end{matrix} \right\} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

对于承受内外压作用的圆筒, $\sigma_1 = \sigma_\theta$,

$\sigma_2 = \sigma_r$, 于是得到

$$\tau = \frac{P_1}{K^2 - 1} \left(\frac{R_0^2}{r^2} - \frac{P_0}{K^2 - 1} \right) \cdot \frac{R_0^2}{r^2} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可以得到

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{P_1}{K^2 - 1} \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right) + \frac{P_0}{k^2 - 1} \left(\frac{R_0^2}{r^2} - k^2 \right) \\ \sigma_\theta = \frac{P_1}{K^2 - 1} \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right) - \frac{P_0}{k^2 - 1} \left(\frac{R_0^2}{r^2} + k^2 \right) \\ \tau = \frac{P_1}{K^2 - 1} \cdot \frac{R_0^2}{r^2} - \frac{P_0}{K^2 - 1} \cdot \frac{R_0^2}{r^2} \end{cases} \quad (4)$$

圆筒仅承受内压时的径向应力、周向应力及极值剪应力为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{P_1}{K^2 - 1} \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta = \frac{P_1}{K^2 - 1} \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right) \\ \tau = \frac{P_1}{K^2 - 1} \cdot \frac{R_0^2}{r^2} \end{cases} \quad (5)$$

圆筒仅承受外压时的径向应力、周向应力及极值剪应力为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{P_0}{K^2 - 1} \left(\frac{R_0^2}{r^2} - K^2 \right) \\ \sigma_\theta = -\frac{P_0}{K^2 - 1} \left(\frac{R_0^2}{r^2} + K^2 \right) \\ \tau = -\frac{P_0}{K^2 - 1} \cdot \frac{R_0^2}{r^2} \end{cases} \quad (6)$$

3. 气瓶玻纤增强层壳壁的应力分析

玻纤增强气瓶是在气瓶金属衬里的外表面用树脂浸渍过的玻纤在一定张力的控制之下均匀连续缠绕直到达到规定设计厚度制造而成的。

3.1 玻纤增强层的应力分析

本文讨论的气瓶玻纤增强基于以下几点简化条件:

①玻纤缠绕时螺旋升角很小, 因此忽略缠绕纤维的轴向分力, 缠绕仅在气瓶筒身上进行, 不包括气瓶两端封头。

②缠绕纤维层的厚度 t 远远小于气瓶壳壁厚度 $(R_0 - R_1)$, 因此忽略每层缠绕纤维沿气瓶壳壁厚度方向的应力变化。

③全部分析, 仅限于弹性范围。

上述简化条件是本文讨论气瓶玻纤增强层任意半径壳壁应力与缠绕纤维自身张力的重要依据, 如图 2, 当玻纤缠绕至第 j 层时, 则第 j 层与第 $j-1$ 层之间产生的层间接触压力 P_{j-1} 由平衡关系得到, 即

$$P_{j-1} = \sigma_{pj} \frac{t}{R_{j+1}} \quad (7)$$

式中, σ_{pj} 为缠绕纤维的周向应力。由 P_{j-1} 产生的第 $j-1$ 层以内筒体任何点应力可由式(6)以 P_{j-1} 代 p_0 , R_{j+1} 代 R_0 , R_{j+1}/R_1 代 K 得到, 即

$$\begin{cases} j\sigma_r' = \frac{\sigma_{pj} t R_1^2 R_{j+1}}{(R_{j+1}^2 - R_1^2)} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R_1^2} \right) \\ j\sigma_\theta' = -\frac{\sigma_{pj} t R_1^2 R_{j+1}}{(R_{j+1}^2 - R_1^2)} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{R_1^2} \right) \\ j\tau' = -\frac{\sigma_{pj} t R_1^2}{(R_{j+1}^2 - R_1^2)} \cdot \frac{R_{j+1}}{r^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $j\sigma_r'$ 、 $j\sigma_\theta'$ 、 $j\tau'$ 分别代表玻纤缠绕增强层第 j 层纤维所承受的径向应力, 周向应力及极值剪应力。

在全部缠绕完毕后, 气瓶圆筒壁厚内任一点由缠绕力引起的应力为

$$\sigma_r' = \sum_{k=j}^m \frac{\sigma_{pk} t R_1^2 R_{k+1}}{(R_{k+1}^2 - R_1^2)} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R_1^2} \right)$$

$$\sigma_\theta' = -\sum_{k=j}^m \frac{\sigma_{pk} t R_1^2 R_{k+1}}{(R_{k+1}^2 - R_1^2)} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{R_1^2} \right)$$

$$\tau' = -\sum_{k=j}^m \frac{\sigma_{pk} t R_1^2 R_{k+1}}{(R_{k+1}^2 - R_1^2) r^2} \quad (9)$$

对于内筒内表面, $r = R_1$, $j = 1$ 有

$$\begin{cases} \sigma_{r,1}' = 0 \\ \sigma_{\theta,1}' = -\sum_{k=1}^m \frac{2 \sigma_{pk} t R_{k+1}}{(R_{k+1}^2 - R_1^2)} \\ \tau_{,1}' = -\sum_{k=1}^m \frac{\sigma_{pk} t R_{k+1}}{(R_{k+1}^2 - R_1^2)} \end{cases} \quad (10)$$

式中 m 为缠绕纤维的总层数, 符号 $(')$ 表示由于玻纤缠绕引起的应力, 右下角 j 表示由于缠绕第 j 层所引起的 j 层以内各点的应力。

3.2 工作状态下的合成应力

玻纤增强气瓶工作状态下的应力由三部分叠加得到。

①工作内压 p 引起的应力, 由式(5) 确定;

②玻纤缠绕时的拉应力 σ_{pj} ;

③由该层以上玻纤缠绕时在该层产生的应力, 由式(9) 确定。

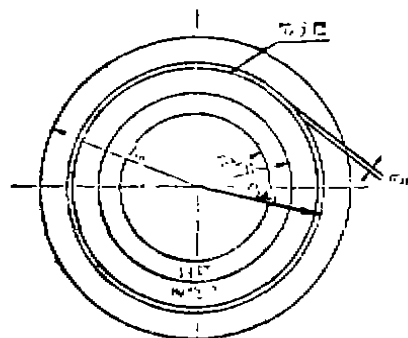


图2 气瓶玻纤增强层应力分析

于是, 工作状态下, 金属衬里玻纤增强气瓶壳壁的合成应力为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{p_i}{k^2-1} \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2}\right) + \sum_{k=j}^m \frac{\sigma_{p,k} t R_{k+1}}{(R_{k+1}^2 - R_1^2)} \left(\frac{R_1^2}{r^2} - 1\right) \\ \sigma_\theta = \frac{p_i}{k^2-1} \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2}\right) + \sigma_{p,i} - \sum_{k=j}^m \frac{\sigma_{p,k} t R_{k+1}}{(R_{k+1}^2 - R_1^2)} \left(\frac{R_1^2}{r^2} + 1\right) \\ \tau = \frac{p_i}{k^2-1} \cdot \frac{R_0^2}{r^2} + \frac{1}{2} \sigma_{p,i} - \sum_{k=j}^m \frac{\sigma_{p,k} t R_{k+1}}{(R_{k+1}^2 - R_1^2)} \cdot \frac{R_1^2}{r^2} \end{cases} \quad (11)$$

由于玻纤缠绕层的厚度相对于半径

R_{k+1} 很小, 式(11)中的求和项可以写成积分形式, 即,

$$\begin{aligned} \sum_{k=j}^m \frac{\sigma_{p,k} t R_{k+1}}{(R_{k+1}^2 - R_1^2)} &\approx \int \frac{R_0 \sigma_{p,i} r}{r (r^2 - R_1^2)} dr \\ \begin{cases} \sigma_r = \frac{p_i}{k^2-1} \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2}\right) + \left(\frac{R_1^2}{r^2} - 1\right) \int \frac{R_0 \sigma_{p,i} r}{r (r^2 - R_1^2)} dr \\ \sigma_\theta = \frac{p_i}{k^2-1} \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2}\right) + \sigma_{p,i} - \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2}\right) \int \frac{R_0 \sigma_{p,i} r}{r (r^2 - R_1^2)} dr \\ \tau = \frac{R_0^2}{r^2} \cdot \frac{p_i}{k^2-1} + \frac{1}{2} \sigma_{p,i} - \frac{R_1^2}{r^2} \int \frac{R_0 \sigma_{p,i} r}{r (r^2 - R_1^2)} dr \end{cases} \quad (12) \end{aligned}$$

4. 玻纤缠绕的张力分析

玻纤缠绕增强气瓶技术上的难点主要是缠绕玻纤张力大小的确定及控制。缠绕张力如[4]中介绍是缠绕工艺的重要参数, 张力大小和各束纤维间张力的均匀性, 对气瓶质量影响极大。张力过小, 气瓶的强度偏低, 衬里金属受到的压缩应力较小, 在充压时变形较大, 疲劳性能就差; 缠绕时张力过大, 则纤维磨损增大, 使纤维的强度损失加大, 进而使气瓶的强度下降, 此外过大的缠绕张力还可能造成衬里失稳。各束纤维之间的张力不均匀, 气瓶承压时,

这里 $r = R_{k+1}$, $R_0 = R_{m+1}$, $dr = t$, 近似相等的含义是, 尽管玻纤缠绕层每一层的厚度很薄, 但绝不是为零。于是式(11)可以改写成,

纤维不能同时承受壳壁应力, 可能引起纤维增强层各个击破使气瓶招致破坏。可见, 要开发玻纤增强轻型车用压缩气瓶, 首先必须弄清玻纤增强层纤维所承受的张力的大小及其内在规律。为此, 在前一节分析的基础上, 本文对工程中可能用到几种纤维缠绕张力作进一步的讨论。

4.1 等张力缠绕

等张力缠绕是在缠绕过程中始终保持玻纤的张力不变, 即 σ_p 为常数, 因此式(12)可以通过积分简化为,

对于内筒, $R_1 \leq r \leq R_2$

$$\sigma_r = \frac{p_i}{k^2-1} \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_p}{2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} - 1\right) \ln \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2 - R_1^2}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_i}{k^2-1} \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_p}{2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} + 1\right) \ln \frac{R_0^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{R_0^2}{r^2} \cdot \frac{P_i}{k^2-1} - \frac{\sigma_p}{2} \cdot \frac{R_1^2}{r^2} \ln \frac{R_0^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2}$$

对于玻纤增强层: $R_1 \leq r \leq R_0$

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{P_i}{k^2-1} \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_p}{2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} - 1\right) \ln \frac{R_0^2 - R_1^2}{r^2 - R_1^2} \\ \sigma_{\theta} = \frac{P_i}{k^2-1} \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2}\right) + \sigma_p \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2}\right) \ln \frac{R_0^2 - R_1^2}{r^2 - R_1^2}\right] \\ \tau = \frac{P_i}{k^2-1} \cdot \frac{R_0^2}{r^2} + \frac{1}{2} \sigma_p - \frac{1}{2} \sigma_p \frac{R_1^2}{r^2} \ln \frac{R_0^2 - R_1^2}{r^2 - R_1^2} \end{cases} \quad (14)$$

需指出, 等张力缠绕引起玻纤增强层应力分布不均匀, 但是等张力缠绕工艺简单, 张力大小控制方便, 因此可以在玻纤预应力不需要严格控制的情况下应用。

等周向应力缠绕的依据是最大主应力强度理论, 根据这一强度理论, 玻纤缠绕张力的最佳状态是保持工作状态下周向应力为常数并等于缠绕纤维的许用应力, 即

4.2 等周向应力缠绕

式(12)中 $\sigma_{\theta} = [\sigma]$ 可改写成

$$[\sigma] = \frac{P_i}{k^2-1} \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2}\right) + \sigma_{p,i} - \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2}\right) \int \frac{R_0 \sigma_{p,i} r}{r^2 - R_1^2} dr \quad (15)$$

式(15)是一积分方程, 简单处理可以改写成:

$$\frac{P_i}{k^2-1} \cdot \frac{r^2 + R_0^2}{r^2 + R_1^2} + \sigma_{p,i} \frac{r^2}{r^2 + R_1^2} + \int \frac{r \sigma_{p,i} r}{R_0 r^2 - R_1^2} dr = [\sigma] \frac{r^2}{r^2 + R_0^2} \quad (16)$$

对上式进行微分, 即

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr} \left(\frac{P_i}{k^2-1} \cdot \frac{r^2 + R_0^2}{r^2 + R_1^2} \right) &= - \frac{r^2}{(r^2 + R_1^2)} \cdot \frac{2 R_1^2 P_i}{r (r^2 + R_1^2)} \\ \frac{d}{dr} \left(\sigma_{p,i} \frac{r^2}{r^2 + R_1^2} \right) &= \frac{r^2}{r^2 + R_1^2} \cdot \frac{d \sigma_{p,i}}{dr} + \frac{r^2}{r^2 + R_1^2} \left(\frac{2}{r} - \frac{2r}{r^2 + R_1^2} \right) \sigma_{p,i} \\ \frac{d}{dr} \int \frac{r \sigma_{p,i} r}{R_0 r^2 - R_1^2} dr &= \frac{\sigma_{p,i} r}{r^2 - R_1^2} \quad (\text{积分上限的微分}) \\ \frac{d}{dr} \left([\sigma] \frac{r^2}{r^2 + R_1^2} \right) &= \frac{r^2}{r^2 + R_1^2} \cdot \frac{2 R_1^2}{r (r^2 + R_1^2)} [\sigma] \end{aligned}$$

将上述微分代入式(16)化简得到关于玻纤缠绕应力 $\sigma_{p,i}$ 的一阶线性微分方程, 即

$$\frac{d\sigma_{\theta,1}}{dr} + \left[\frac{1}{r} + \frac{2r}{r^2 - R_1^2} - \frac{2r}{r^2 + R_1^2} \right] \sigma_{\theta,1} = \frac{2R_1^2}{r(r^2 + R_1^2)} ([\sigma] + P_1) \quad (17)$$

$$\text{若令 } p = \frac{1}{r} + \frac{2r}{r^2 - R_1^2} - \frac{2r}{r^2 + R_1^2}$$

$$Q = \frac{2R_1^2}{r(r^2 + R_1^2)} ([\sigma] + P_1)$$

其通解的一般形式为

$$\sigma_{\theta,1} = e^{-\int p dr} \left(\int Q e^{\int p dr} dr + C \right) \quad (18)$$

式中, C 为积分常数, 可由 $r = R_0$ 时式(15)应满足的边界条件确定, 即

$$\sigma_{\theta,1} \Big|_{r=R_0} = [\sigma] - \frac{2P_1}{k^2 - 1} \quad (19)$$

解微分方程式(17)得到其通解为

$$\sigma_{\theta,1} = C \frac{r^2 + R_1^2}{r(r^2 - R_1^2)} - \frac{2R_1^2}{r^2 - R_1^2} ([\sigma] + P_1) \quad (20)$$

由式(19)的边界条件得到 $C = R_0 [\sigma]$, 于是得到玻纤增强层任意半径缠绕纤维的应力计算公式

$$\sigma_{\theta,1} = [\sigma] \frac{R_0 (r^2 + R_1^2) - 2rR_1^2}{r(r^2 - R_1^2)} - \frac{2R_1^2 P_1}{r^2 - R_1^2} \quad (21)$$

4.3 最佳剪应力缠绕

最佳剪应力缠绕的依据是最大剪应力强度理论。根据这一强度理论, 玻纤缠绕的最佳状态是保持工作状态下剪应力为常数并等于缠绕纤维的许用剪应力, 即式(12)中 $\tau = [\tau]$ 可改写成

$$[\tau] = \frac{P_1}{k^2 - 1} + \frac{R_0^2}{r^2} + \frac{1}{2} \sigma_{\theta,1} - \frac{R_1^2 R_0 \sigma_{\theta,1}}{r^2 - R_1^2} \int_r \frac{dr}{r^2 - R_1^2} \quad (22)$$

利用4.2节中完全相同的方法, 将式(22)中的积分方程化为等价的微分方程

$$\frac{d\sigma_{\theta,1}}{dr} + \frac{2r}{r^2 - R_1^2} \sigma_{\theta,1} = \frac{4[\tau]}{r} \quad (23)$$

微分方程式(23)的边界条件由 $r = R_0$ 时式(15)应满足的条件确定, 即

$$\sigma_{\theta,1} \Big|_{r=R_0} = 2[\tau] - \frac{2P_1}{k^2 - 1} \quad (24)$$

微分方程式(23)的通解为

$$\sigma_{\theta,1} = \frac{1}{r^2 - R_1^2} [C + 2[\tau]r^2 - 2[\tau]R_1^2 \ln r^2] \quad (25)$$

代入式(24)的边界条件解得积分常数

$$C = 2[\tau]R_1^2 \ln R_0^2 - 2[\tau]R_1^2 - \frac{2P_1(R_0^2 - R_1^2)}{k^2 - 1} \quad (26)$$

式(26)代入式(25)得到

$$\sigma_{\theta,1} = 2[\tau] - \frac{2R_1^2}{r^2 - R_1^2} (P_1 - [\tau] \ln \frac{R_0^2}{r^2}) \quad (27)$$

式(27)即为最佳剪应力缠绕玻纤增强层任意半径缠绕纤维的应力计算公式。

由于气瓶圆筒壳壁任意半径 $r = R_1 + t_0 + (n-1/2)t$, (t_0 为衬里金属圆筒壁厚), 将任意半径 r 的表示式代入式(21)和式(27)就可以求得玻纤增强层中不同缠绕情况下任意一层的玻纤拉应力, 再乘上玻纤的截面积就可以确定相应的缠绕张力。

(下转25页)

5、安全生产委员会（设在德阳）：

主任委员：李富荣 德阳市天然气总公司总经理

副主任委员：周元龙 重庆天然气总公司副总经理

委员：卢运康 自贡市天然气公司副经理

李云华 乐山市煤气公司副经理

魏 明 江油市天然气总公司副总经理

秘书组长：龙坤梁 德阳市天然气总公司安质科科长

副组长：罗德全 重庆天然气总公司安全处处长

6、产品管理部（设在泸州）：

主任：胡辉融 高工 泸州市天然气公司副经理

副主任：唐振钰 经济师 成都市煤气总公司供应公司经理

成员：周发祥 高工 重庆天然气总公司科协秘书长

郑道基 工程师 泸州市天然气公司技术科科长

汪建国 内江市天然气总公司供销公司经理

秘书组长：郑道基 泸州市天然气公司技术科科长

四川省城市煤气协会秘书处

（上接4页）

5、结束语

本文虽然从力学一般原理导出了金属衬里玻纤增强高压轻型气瓶的壳壁应力及

玻纤增强层纤维缠绕张力的计算公式，但是，开发高压轻型气瓶，气瓶的壳壁应力分析仅仅是诸多重要因素之一。文中给出的计算公式是否符合实际情况，涉及到的技术是多方面的，这些技术如资料[5]介绍主要有以下几方面。

①树脂的选择；

②玻纤的机械性能及玻纤选择；

③树脂与玻纤的粘结性能；

④玻纤缠绕张力及速度的控制；

⑤树脂固化技术；

⑥金属衬里的选材及加工。

如果上述涉及的技术能够得到很好的解决，本文给出的公式就能与计算结果很好吻合。上述任何环节失控都将使公式计算结果与气瓶的性能试验数据产生较大的误差。所以，目前为止，玻纤增强高压气瓶的设计与制造在理论分析的基础上，必须进行破坏性试验加以论证，再通过严格控制制造工艺来确保产品的质量。资料[6]，美国ASME标准玻璃纤维增强塑料压力容器中也未给出强制性的玻纤缠绕容器壁厚的计算公式，只给出建议性的计算方法。计算壁厚是否满足强度要求，还要通过模型容器的破坏性试验来验证。

开发玻纤增强高压轻型车用气瓶对于缓解我国能源供需矛盾及减轻汽车排放废气对城市的污染势在必行。有关技术上的难题还有待于广大从事燃气事业的技术工作者和有关制造厂家共同努力加以解决。

（下转23页）