

# 复合材料天然气气瓶设计的几个问题

陈汝训

( 陕西动力机械研究所 西安 710025 )

**文 摘** 讨论了汽车用复合材料天然气气瓶的使用条件。推导出气瓶圆筒段、封头、接头和内衬的设计计算公式。在不增加气瓶总质量的情况下,得到了提高封头疲劳强度的设计方法。讨论了缠绕张力控制对提高纤维发挥强度的重要性。文中提出的设计计算方法可供复合材料天然气气瓶初步设计参考。

**关键词** 复合材料,气瓶,内衬,缠绕张力

## Some Problems with Natural Gas Composite Cylinder Design

Chen Ruxun

( Shaanxi Institute of Power Machineries Xi'an 710025 )

**Abstract** Service conditions of natural gas composite cylinders for automobiles are discussed. Calculating formulae for design of cylinder, dome, joint and liner of natural gas cylinder are derived. Design method to enhance fatigue strength of a dome is given without increase of total cylinder mass. The importance of winding tension control to increase the developed fiber strength is discussed. These design calculating methods may be provided for the preliminary design of the natural gas composite cylinders.

**Key words** Composite, Natural gas cylinder, Liner, Winding tension

### 1 引言

汽车尾气对城市环境的污染越来越引起人们的重视,将燃烧汽油的汽车改装成燃烧压缩天然气的工程已在全国逐渐展开。压缩天然气气瓶一般为钢制圆筒压力容器,但由于钢气瓶质量大,且气瓶发生爆炸性事故所造成的后果极为严重,国外已由复合材料气瓶取代钢气瓶。近年来,我国有关单位也对复合材料气瓶进行研制和开发,并已有少量投放市场。

复合材料天然气气瓶的工作压强为 20 MPa,使用环境温度为  $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ,寿命为 10 y,常温疲劳试验(循环内压为 2 MPa $\rightarrow$ 25 MPa $\rightarrow$ 2 MPa)7 500 次后的爆破压强不小于 73 MPa。另外,气瓶还要经受气密、高温蠕变、坠落、火烧、弹击等环境试验考核。

由于气瓶的使用要求非常高,这就给气瓶的设计和生 产带来很大难度。本文仅对复合材料气瓶设计中的几个问题加以讨论。

### 2 圆筒段设计

复合材料天然气气瓶为纤维增强树脂基复合材料筒形压力容器,纤维体积分数较高(65%左右),初步设计可采用网络理论。

气瓶圆筒段设计主要是确定其壁厚。当圆筒半径、最大压强和纤维的抗拉强度给定后,纵向加环向缠绕圆筒的纤维壁厚可由下式给出<sup>[1]</sup>

$$\begin{cases} h_{\alpha} = \frac{RP_b}{2\sigma_b \cos^2 \alpha_0} \\ h_{\theta} = \frac{RP_b}{2\sigma_b} (2 - \lg^2 \alpha_0) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2000-04-18

陈汝训,1936 年出生,研究员,主要从事复合材料结构分析与优化设计的研究工作

式中:  $h_{1a}$  为纵向纤维总厚度;  $h_{1\theta}$  为环向纤维总厚度;  $R$  为圆筒半径;  $P_b$  为设计要求的爆破压强;  $\sigma_b$  为纤维发挥强度;  $\alpha_0$  为纵向缠绕角。

### 3 封头设计

气瓶的封头不仅是气瓶承压需要,也是气瓶成型所必需的。气瓶缠绕时,封头与圆筒的纵向缠绕同时成型。在封头与圆筒连接处,封头的壁厚就是圆筒纵向层厚度。按网格理论,纤维缠绕气瓶的封头以等张力封头最合理,这不仅因为等张力封头是按测地线缠绕,纤维不易“打滑”,而且在整个封头上,纤维所受应力相等,且等于圆筒段纵向纤维的应力。

等张力封头的纤维缠绕角  $\alpha$  满足测地线方程

$$\sin\alpha = \frac{r_0}{r} \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为封头缠绕角;  $r_0$  为极孔挂线圆半径;  $r$  为与  $\alpha$  对应的封头平行圆半径。

进行等张力封头设计,即确定封头的母线坐标并不困难<sup>[1]</sup>,但在封头上实现等张力的测地线缠绕,缠绕角  $\alpha$  按式(2)变化在工艺上有一定难度,人们往往将封头设计成半椭球形的,封头沿轴向的缠绕角与圆筒段的缠绕角相同,这给缠绕工艺带来很大方便。

在内压作用下,封头与圆筒连接处存在较高的弯曲应力,此弯曲应力取决于连接处的内力:

$$Q_0 = \frac{Pm^2 \sqrt{Rh}}{8 \sqrt[4]{3(1-\nu_\phi\nu_\theta)}} \quad (3)$$

式中:  $P$  为内压强;  $h$  为圆筒壁厚;  $m$  为封头椭球比;  $\nu_\phi$  为封头径向泊松比;  $\nu_\theta$  为封头纬向泊松比。

在疲劳载荷作用下,这里往往成为薄弱环节。由式(3)可见,为了减小弯曲应力,应减小椭球比  $m$ ,即封头应当深一点,当然太深的封头可能给工艺成型带来了困难。在工艺允许的情况下,尽可能采

用较深的封头。一般取封头的深度为气瓶半径的 0.65 倍,即

$$D = 0.65R \quad (4)$$

式中,  $D$  为封头深度。

为了使封头具有较高的承压能力,增加封头的壁厚也是一条有效途径。但由于封头与圆筒纵向缠绕同时成型,增加封头的壁厚也将使圆筒的纵向层增厚,这对圆筒的纵向受力是多余的,且使气瓶的总重增加。盲目增加纵向层的方法不可取。

将式(1)的两式相加,得圆筒段纤维总厚度为

$$h_f = h_{1a} + h_{1\theta} = \frac{3RP_b}{\sigma_b} \quad (5)$$

将式(1)的两式相除,得圆筒段环向与纵向纤维厚度之比为

$$\lambda_{\alpha_0} = h_{1\theta}/h_{1a} = 3\cos^2\alpha_0 - 1 \quad (6)$$

由式(5)可见,当圆筒半径  $R$  和纤维发挥强度  $\sigma_b$  一定时,其爆破压强与圆筒纤维总厚度有关,与纵向层和环向层的厚度分配无关。但由式(6)可见,环向层和纵向层的厚度比只与缠绕角  $\alpha_0$  有关,当增大  $\alpha_0$  时,  $\lambda_{\alpha_0}$  减小,即环向层厚度减小、纵向层厚度增加。因此,适当增大缠绕角  $\alpha_0$ ,可以使封头的壁厚增加,但圆筒的总厚度不变。这样做,既可提高封头的承压能力,又不使圆筒的质量增加。

### 4 接头设计

气瓶封头极孔上的金属接头是重要的受力件,它是连接输气管路和缠绕挂线所必需的。决定接头的主要结构参数是肩宽比和肩部厚度。

肩宽比为接头边缘半径  $a$  与接头肩根部半径  $b$  之比。肩宽比太大对肩根部受力不利;肩宽比太小,在很高的内压作用下,有可能使整个接头脱出。对气瓶的接头,一般取肩宽比为  $a/b = 1.3 \sim 1.5$ 。

接头肩根部厚度  $h$  可用下式确定

$$h = b \sqrt{\frac{-3[1+3\nu+(1-\nu)\xi^2 + \frac{4(1+\nu)}{1-\xi^2} \ln\xi]P_b}{4[1+\nu+(1-\nu)\xi^2][\sigma]}} \quad (7)$$

式中:  $\nu$  为接头材料泊松比;  $\xi$  为  $b/a$ ;  $[\sigma] = \sigma_b/k$ ;  $\sigma_b$  为接头材料拉伸强度;  $k$  为安全系数。

固体火箭发动机壳体接头材料一般为铝合金。

由于压缩天然气气瓶承受较高的内压,其接头材料一般选为强度和韧性较高的低碳钢。

### 5 内衬设计

宇航材料工艺 2001 年 第 5 期

纤维缠绕气瓶在高压作用下除了有足够的强度外,还应有良好的气密性。但纤维增强树脂基复合材料气密性较差,压缩天然气气瓶必须设有能够密封的内衬。内衬有非金属材料 and 金属材料两种。

非金属内衬一般选聚乙烯材料,这种材料成本低、耐腐蚀、疲劳性能好。但接头与内衬之间的气密性不易解决,主要是其粘接性能随反复加压/卸压及温度的变化而变差;由于加压时温度升高、卸压时温度下降,非金属内衬材料容易老化,使其力学性能下降;另外,在高速卸压时,温度急剧下降,使非金属内衬失稳或变脆而破裂。

金属内衬一般选铝合金材料。铝内衬的气密性好;大张力缠绕使内衬产生预压应力,有利于其承受内压;由于铝内衬的刚度较非金属内衬的刚度大,卸压时不会使内衬失稳或破裂;铝内衬在较大的温度范围内是稳定的,不会在反复加压/卸压时引起材料性能的明显改变。但是铝合金焊缝的抗疲劳性能差,所以铝内衬宜采用旋压成型,这给成型工艺带来困难,因而成本也将提高。

聚乙烯非金属内衬材料的抗拉强度较低,在气瓶承受内压作用时,内衬的贡献可忽略不计。铝合金内衬材料具有一定的拉伸强度,它对纤维缠绕气瓶承受内压会有贡献。考虑内衬作用时的纤维缠绕压力容器设计可参考文献[2]。

## 6 缠绕张力控制

对薄壁纤维缠绕压力容器,如固体火箭发动机壳体,玻璃纤维强度发挥系数一般为 0.8 左右。而对厚壁纤维缠绕气瓶,玻璃纤维的强度发挥系数一般只有 0.5,甚至还低。影响纤维强度发挥的重要原因是沿气瓶厚度方向各层纤维受力不均匀,而缠绕张力又是纤维受力不均匀的重要因素,对壁厚较厚的气瓶尤其如此。因此,如何合理控制缠绕张力,是提高气瓶纤维强度发挥的重要环节。

由于实现缠绕张力的最佳控制涉及到复杂的结构力学和工艺问题,目前并未得到合理解决。可能出于保密的原因,国外对此没有任何报道。因此需要对缠绕张力控制做进一步探讨和研究,包括对国外有关信息的收集和分析研究。

## 7 结束语

汽车用复合材料天然气气瓶承受很高的内压,气瓶应具有足够的强度和气密可靠性,使用过程中还要经受反复地充/放气、高低温循环、冲击、振动和腐蚀等环境条件考验,这就给气瓶设计和加工提出很高的要求。本文仅就气瓶初步设计的若干问题进行了讨论,可供气瓶设计者参考,并在实施过程中加以验证、改进和逐步完善。

### 参考文献

- 1 陈汝训主编. 固体火箭发动机设计与研究(下). 北京:宇航出版社,1992:84
- 2 陈汝训. 具有衬里的纤维缠绕压力容器设计分析. 固体火箭技术,1999;(4):54~56

# 新材料类金刚石膜

长期以来各国科技界努力探索在常温常压下制造与金刚石相类似性能的新物质和新材料,以适应军工、机械、光学镜头、电子元器件、钟表、首饰、化工、医疗、航空、航天等行业的广泛需求。

本成果研制出类金刚石膜生产设备与生产工艺。类金刚石膜是一种人造的新物质新材料,碳原子是该物质的主要成分。以原子键构成的正四面体原子晶体结构为存在形式。本成果在工艺上采用奇特的碳原子晶体沉积法,能在常温常压于玻璃、金属、塑料等材料表面生成致密、牢固而且光滑的类金刚石膜,其结构和性能与金刚石相似,具有硬度高、耐腐蚀性强、电绝缘性能好,导热性能与透光性能优良,生物亲和性好,表面粗糙度低等特点,已获中国发明专利,具有广泛的应用前景和很大的经济效益与社会效益。

· 李连清 ·