

非金属内胆全缠绕气瓶关键技术分析及研究

高智惠, 郭淑芬, 孙福龙, 薛海龙, 刘冬明

未势能源科技有限公司 保定 071000

摘要: 主要介绍了非金属内胆全缠绕气瓶在制备过程中的内胆成形关键技术以及复合材料层成形关键技术, 提出了在产品开发阶段应注意的问题, 为后续企业的研发提供一定的指导意义。

关键词: 非金属内胆全缠绕气瓶; 内胆成形关键技术; 复合材料层成形关键技术

氢能以其高能、可再生及环保等优点成为了21世纪最具发展潜力的新型绿色能源, 但是滞后的氢气存储技术及无法保障的安全性能严重阻碍了其大规模应用, 如何安全高效地提升氢气的存储技术, 是氢能大规模应用的关键。储氢气瓶经过50多年的发展, 从最初的钢瓶到现在碳纤维缠绕气瓶的研制成功, 不仅高效提升了储能密度, 实现了产品结构的飞跃, 也为车载氢能的大规模应用奠定了坚实的基础。

氢燃料电池汽车以环保无污染等特点被认为是人类的终极交通工具。而制约氢能源燃料电池汽车发展的关键因素之一是如何安全、高效地存储氢气^[1]。高压气态储氢技术是指在高压下将氢气压缩, 以高密度气态形式储存, 具有成本较低、能耗低、易脱氢及工作条件较宽等特点, 是发展最成熟、最常用的储氢技术^[2]。然而, 影响储氢密度的主要因素是压力, 而储氢材料的发展又限制着压力的提高。因此, 目前研究热点在于储氢气瓶材质的改进以及复合材料成形技术。

与以汽油或柴油和其他替代燃料存储技术提供动力的常规车辆相比, 燃料电池汽车要提高竞争力, 需在较低成本下将行驶里程扩大到500km以上。然而, 在乘用车领域, 制造商所规定重量限制的影响越来越广泛, 例如每轴的最大负载或惯性重量等级的限制。基于该原因, 最大工作压力为70MPa的高压气瓶就需要更低的重容比。目前只有Ⅲ型瓶和Ⅳ型瓶满足此要求, 而Ⅳ型瓶在降低成本和重量方面具有更大的潜力。目前Ⅲ型瓶是国内市场的主流, 且具有相应的国家标准。Ⅲ型瓶的应用是基于在设计、批量生产、使用寿命和安全等方面长期的经验总结。此类气瓶虽然满足泄漏率和渗透率的规定值, 但与Ⅳ型瓶相比, 其疲劳次数有很大的局限性。Ⅳ型瓶的复合材料层主要由碳纤维和热固性树脂组成, 例如环氧树脂。复合材料层用于承担压力载荷而热塑性内胆用于阻止气体的渗透。根据国外现有标准, 在整个寿命周期内气瓶的渗透率不得超过规定的限值。这就要求内衬材料具有

优异的渗透性能、冲击强度、极限应变、疲劳性能、刚度和导热性能，在国外最先进的应用中，材料的渗透率对材料的冲击性能有很大的影响，所以可供选择的低渗透率同时抗冲击性能好的材料类型屈指可数。然而，为了满足汽车的要求，这种折中是不足的。如果在70MPa非金属内胆全缠绕气瓶设计初期不及时考虑内胆，在后期可能会出现很多问题，例如内胆的屈曲、内胆的起泡问题等。综上所述，目前国内主要以Ⅲ型（金属内胆纤维缠绕气瓶）为主，正向IV型（非金属内胆纤维缠绕气瓶）逐步过渡，IV型瓶与Ⅲ型瓶相比具有成本低、重容比小、轻量化等优势，但伴随而来的是IV型瓶在设计、制造过程中面临新的问题与挑战。

典型内胆原材料介绍及关键问题难点

1. 内胆材料选择的依据

非金属内胆全缠绕气瓶的关键技术是塑料内胆材料的选择和内胆结构的设计。内胆材料选择将直接影响内胆的封头连接形式、介质渗透性和成形工艺方法。

非金属内胆全缠绕气瓶内胆的主要功能如下：

- 1) 与介质相容。
- 2) 充当缠绕时的芯模，并与外部接口连接。
- 3) 贮存气体，防止泄漏^[3]。

基于以上功能，在选择内胆时需要满足以下要求：低氢渗透、低温延展性、热膨胀系数低、工作温度范围广以及具有一定的刚度。

2. 内胆材料关键问题

(1) 渗透率 非金属内胆全缠绕气瓶首先要解决的关键问题是气体的渗透。相比于金属内胆，非金属内胆可以节省成本，高压循环寿命长、防腐蚀，但是由于聚合物材料本身的原因，小气体分子可以在非金属内胆中进行渗透。渗透一方面造成了气体的损失，另一方面当聚集到一定程度后，在快速减压的条件下有可能造成内胆的屈曲，降低内胆的使用寿命。

1) 描述和定义。气体的渗透率指气体或蒸汽通过聚合物的速度，主要由3个过程组成：在热扰动和聚合物大分子链段的布朗运动下，非金属内胆材料内部产生空穴，小分子气体被吸附到空穴中；吸附到空穴中

后，小分子气体进行扩散，直至达到内胆材料的外表面；最后气体分子从聚合物表面脱附并去除。

这个过程的特点是与材料和扩散种类相关的两个热力学性质：扩散率（ D ）和溶解度（ S ）。前者描述了一个物质在介质材料中移动的速度，后者描述了可以包含在材料中的物质的数量。第三个属性是这两个属性的乘积，称为渗透率（ P ）。

以下是基本参数及其关系的简要描述。Fick 第一定律对一维的稳态扩散进行了理想化处理：

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (1)$$

式中， J ——扩散气体氢的流量；

C ——氢的浓度；

x ——扩散方向坐标。

对于与表面平衡的理想气体，氢分子的浓度与氢的分压（ pH ）成正比。

$$C = S pH \quad (2)$$

这是亨利定律的一个特例。一般来说，压力必须被代表真实气体行为的逸度所取代。对于具有恒定厚度（ $t = x_1 - x_2$ ），且存在氢分压差异（ $pH = pH_2 - pH_1$ ）的膜，流量可以表示为：

$$J = -D \frac{S(pH_2 - pH_1)}{(x_1 - x_2)} = DS \frac{\Delta pH}{t} = P \frac{\Delta pH}{t} \quad (3)$$

2) 传输特性。室温下的氢传输性能如图1所示，适用于一系列弹性体。这些数据包括70多年前的测量以及最近的测量（所有数据都是在一个大气压力下获得的）。

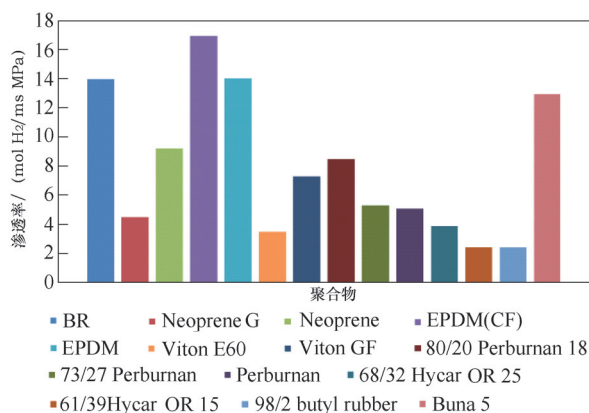


图1 弹性体的渗透性

半结晶热塑性塑料在室温附近的氢传输性能如图2所示。这些材料的传输性能范围比弹性体更广泛，但仍然相对狭窄。氢的扩散率在热塑性塑料中比在弹性体中小约一个数量级，而溶解度相对相似。因此，这两类渗透率的差异也大约是一个数量级。目前几乎没有可用于环氧树脂、玻璃纤维增强和碳纤维增强复合材料的传输数据。

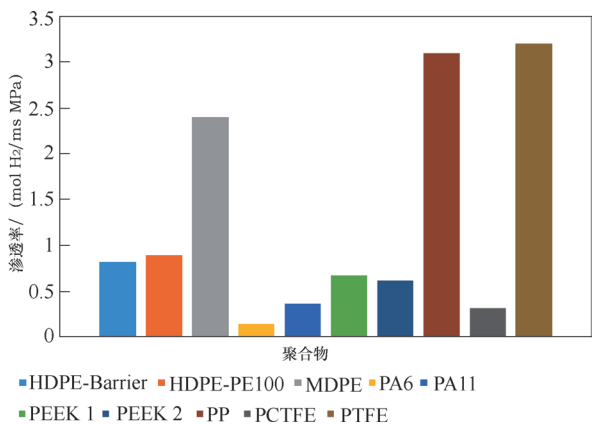


图2 半结晶聚合物的渗透性

如上所述，氢传输特性从一个聚合物到另一个聚合物的变化相对较小（特别是考虑到观察到的金属数量级差异）。对于同一材料，从一个研究到另一个研究运输性能的许多小差异可能归因于微观结构的差异（包括添加剂和填料的差异）。虽然添加剂和微观结构对弹性体中气体传输的作用还没有被广泛研究，但一些研究人员最近已经开始研究填料在暴露于高压氢气的弹性体中的作用。

(2) 物理性质 在氢基础设施和车辆燃料存储系统应用中，温度为 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$ 。聚合物的一般热特性在概念上与物理性质相关。玻璃化转变在相关温度范围内影响聚合物的非晶态部分。聚合物的熔化、软化和热稳定性在高温下非常重要。

1) 玻璃化转变温度。玻璃化转变是一个重要的特性，它为理解聚合物行为提供了基础。它是无定形材料中的一种可逆的物理变化，与自由体积（聚合物链之间的空置空间）的概念和聚合物链段的流动性有关。在玻璃化转变中经历相对突变的特性包括剪切模量或弹性模量、热膨胀系数和热容量，其中任何一个都可以用于实验表征 T_g 。当低分子量的材料与聚合物混合时，会发生塑化，即降低 T_g 。这是PVC 提高其灵活

性时极其常见的。静水压力压缩聚合物的非晶相，将玻璃化转变温度提高到更高的值。作为一个粗略的参考点，所选聚合物的 T_g 值见表1。

表1 选定的聚合物和弹性体的玻璃化转变温度
(单位： $^{\circ}\text{C}$)

材料	T_g
HDPE	-110
PA6	64
PCTFE	100
PEEK	150
PP	-10
PTFE	115
CPVC	135
PVC	75
Viton	-20

这里给出的值被认为是大概的数字，因为 T_g 可能受到分子量、聚合物历史（包括固化条件）、用于表征玻璃化转变的技术和加热/冷却速度的很大影响。当设计氢气系统时，必须考虑操作温度和压力范围。弹性体的重要特性来自橡胶特性，弹性体变脆使 T_g 以下的密封不良。如果增大特定O形圈材料的 T_g ，使得材料在最低工作温度范围内变得坚硬，弹性材料可能作为O形圈密封材料表现不佳。

2) 熔化、软化和热稳定性。结晶材料会发生熔融，在半结晶聚合物中，熔化温度 T_m 是指结晶（固体）通过一级相变变为无定形（液体）的温度。许多常用的热塑性塑料熔化温度低于 200°C ，但是 PEEK 和许多氟聚合物的熔化温度高于 200°C ，使得它们适合在高温压缩机环境中使用。

聚合物的熔融温度预计会随着静水压力的增加而增加。HDPE在这方面已经被广泛研究； T_m 在大气压下约为 130°C ，但在100 MPa下增加约 20°C 。已发现PCTFE大气环境下的 T_m 为 215°C ，压力每升高100MPa， T_m 增加 65°C 。

虽然聚合物非晶部分不熔化，但在 T_g 以上，它们会随着温度的升高而逐渐降低强度和粘度，并且在足够高的温度下，它们会在相对较短的时间范围内软化和流动。因此，一个任意但严格定义的“软化点”有时被用来表征一种材料，而不是熔点。两种常用的软化点测试是维卡软化温度（在ASTM D1525中规定）和热变形温度（在ASTM D648 中规定）。维卡软化温度是

1mm²横截面积的扁平圆形探针穿透样品至1mm深度时的温度。热变形温度是标准试样变形一定量的温度。交联聚合物（热固性）在高温下分解而不是流动。尽管许多热重分析测量的弹性体的分解温度可能在300~400℃，但在低得多的温度下，随着时间的推移会发生实质性的降解。对于大多数弹性体，建议长期使用操作温度远低于200℃。一般来说，氟弹性体的热稳定性比传统的碳氢化合物弹性体高，有些可能适用于200℃的连续工作温度。全氟弹性体（FFKM），如全氟醚橡胶具有非常高的热稳定性，并且在高于200℃的连续工作温度下是稳定的。

内胆成型关键技术研究

1.典型内胆成形工艺对比分析

非金属内胆常见的成形工艺有吹塑、滚塑、注塑等，表2列出了各种成形工艺的优缺点。

表2 常见内胆结构成形工艺对比

项目	优点	缺点
吹塑	生产效率高、制品成本低	壁厚均匀性差、尺寸受限、制品需修整清除毛刺和飞边
滚塑	适合复杂件和大型件、节约原材料、壁厚均匀、无接缝	内表面不光滑、致密性较差，生产效率低、能耗大
注塑+焊接	尺寸精度高、表面粗糙度值低、生产效率高	模具和设备成本高，焊接质量管控难度大

2.内胆机理研究

(1) 内胆起泡 塑料内胆的作用是作为一道不可渗透的屏障，阻止氢气的损失。基于该作用，可供选择的内胆材料很多。当快速泄压时，内胆材料可能会起泡，这是选择塑料内胆不得不面临的问题。氢气在高压条件下渗透到内胆材料内部，当储罐快速泄压时，如果材料内部已吸收氢气的扩散速率低于泄压速率，就会在内胆上形成气泡。塑料内胆起泡的表征是材料的开裂或变白。内胆变白主要是由于在快速降压时，在内胆材料上主要出现2种形式的空穴，一种称为主要空穴，另一种空穴像卫星一样围绕着主要空穴成辐射状。结构示意图如图3所示。塑料内胆的起泡和断裂会引起氢气的泄漏。国外对塑料内胆起泡的机理和影响因素做了很多年的研究，最初起泡的研究主要是针对油气输送管道^[4]。起泡取决于内胆材料特性、内胆厚

度、减压速率、温度、氢浸泡时间、储氢气瓶初始压力以及最终储氢气瓶的压力^[5]。考虑到储氢密度，目前IV型气瓶是燃料电池汽车的首选，因此如何降低材料起泡是后续研究的一个主要方向。当通过型式试验后，塑料内胆起泡是气瓶在使用过程中发生的一种复杂的现象。

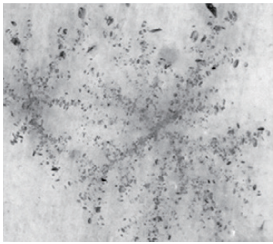


图3 微孔成核示意

(2) 内胆屈曲 塑料内胆的另一个复杂的现象是内胆的屈曲，内胆屈曲是在几年前汽车的系列开发过程中首次出现的。在特定的操作条件下，塑料内胆可能会在内部塌陷，如图4所示。这种内部塌陷或内胆屈曲会降低储氢气瓶的疲劳强度，降低其使用寿命。在试验条件下可以检测到，当内胆发生屈曲时，气瓶释放出大量的氢气，并产生一个清晰的氢气释放高峰。氢气通过渗透在塑料内胆和纤维层之间进行聚集，聚集到一定压力后，当氢气快速泄压时，由于压力差的存在，会使内胆产生屈曲^[6]。内胆屈曲的产生取决于内胆材料的性能、复合材料层和内胆层的连接技术、内胆厚度、减压速率、温度、氢气浸泡时间、储氢气瓶的初始压力和最终压力^[7, 8]。

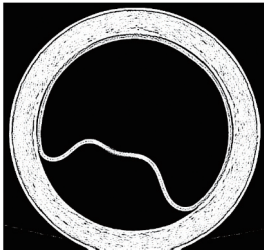


图4 内胆屈曲示意

3.非金属内胆与阀座连接关键性研究

非金属内胆全缠绕气瓶的瓶口的作用是提供与外部连接的接口，通常外部连接件多为金属，考虑到连接强度的影响，瓶口阀座一般采用金属材料设计，而如何将金属阀座与非金属内胆有效的结合是其设计的难点，需要通过合理的设计金属阀座的结构、形状以

及采用合理的工艺将金属阀座与非金属内胆进行很好的结合。金属阀座通常以预埋等方式与非金属内胆熔合到一起，一体成形或者是分体成形，再结合在一起。但在塑料内胆复合气瓶的使用过程中，由于内胆与阀座连接强度不足，两种材料的模量和热膨胀率差异较大，且刚度不连续，在循环载荷的作用下，两种材料的连接部位会出现裂缝；同时在反复充装以及使用过程中出现的漏气现象也是由于热应力的存在，在环境温度的影响下，热处理的产生会导致结合部位出现裂纹。虽然国内外的技术人员对金属瓶口与塑料内胆的结合进行了大量的研究试验，但是金属部分与塑料内胆之间如何进行密封依然是亟待解决的问题。

在考虑非金属内胆与金属阀座连接时，主要考虑以下4个方面：

- 1) 金属阀座要选择适当强度与刚度的金属材料。
- 2) 金属阀座与非金属内胆在结构上设计合理，能够有效防止金属阀座移动。
- 3) 非金属内胆与金属阀座连接处密封合理，无泄漏。
- 4) 金属阀座在承受轴向力时，避免将轴向力传递给非金属内胆。

复合材料层关键成形技术研究

1. 纤维缠绕关键技术分析

(1) 非金属全缠绕储氢气瓶树脂体系研究 树脂基体的主要作用是在纤维缠绕复合材料中保持结构的稳定。由于树脂可以均匀地分布在纤维之间，从而保证了纤维与纤维之间的应力均匀，与此同时，树脂的存在也能吸收一部分由于应变的变化而产生的应力。当复合材料的树脂含量太低时，复合材料之间出现空隙，纤维与纤维之间直接接触，产生摩擦损伤，从而降低复合材料的强度。当复合材料的树脂含量太高时，在缠绕过程中容易滑线，同时固化后气瓶表面的气泡比较多，最重要的一点是会降低产品的储氢密度。

经过大量的试验研究，结果表明，不同的树脂体系制造的储氢气瓶，在最终产品的性能上会相差35%以上。而影响产品性能的主要指标是拉伸强度、弹性模量、断裂韧性、延伸率。例如常用的判断复合层失

效的最大应变准则是以断裂伸长率为指标的。研究表明，环向复合层的断裂应变约为纯纤维的85%，纯纤维的断裂应变为2%，螺旋复合层的断裂应变约为纯纤维应变的75%，即1.5%^[9]。

在缠绕工艺设计时，选择树脂体系的原则主要分为3方面：

- 1) 合适的模量、拉伸强度以及断裂延伸率。
- 2) 与纤维有良好的结合力。
- 3) 工艺性好，具有适当的黏度、适用期，适于缠绕成形。

(2) 缠绕张力的研究 纤维缠绕张力一般取纤维束拉断力的5%~8%。缠绕张力的控制一方面是为了将树脂含量控制在合适的范围，另一方面是为了使纤维能够在芯模上按照预定的程序进行排布。

1) 保证纤维在缠绕过程中处于伸直状态，不会出现蜷曲的情况，从而有效发挥纤维的拉伸性能。

2) 对于内压容器，由于纤维成形过程中会使每层的纤维具有一定的预应力，而这种预应力可以在一定程度上抵消由于内压产生的拉应力，从而在一定程度上使爆破压力值得到提高。

3) 复合材料产生环向预应力，可以增加复合材料的刚性和可变形性。从而保证当受到内部压力时，复合材料的径向变形可以有效地减小。

之所以设置纤维张力，目的是使每层的预应力相等。达到一个均匀的应力状态。简单来说，就是使每层纤维的初始应力相等。由于极限强度相等，所以剩余的应力也就相当，相当于一个在壁厚方向强度相等的材料。但是在实际缠绕过程中，每一层纤维都会对内层产生压应力，由于力的传递，使得内层的压缩应力越来越大，为了使每层的预应力相等，在缠绕时，缠绕张力越来越小^[10]。

实际上，虽然预应力相等，但是当承受内压时，根据厚壁圆筒理论，外层的强度富余，所以以后缠绕设计的一个研究方向可考虑外层采用低强度的材料。

(3) 纤维缠绕连续铺层厚度 关于铺层顺序，相关的理论研究比较多。在实际生产过程中，企业为了减少连接层的层数，连续铺层的厚度一般比较厚。为了减小微裂纹的形成，采用同一铺设角度的连续铺层的数量应该得到限制。经过相关研究表明，同一角度的最大连续铺层数应小于4，并且同角度铺层厚度小于

1mm, 连续铺层的厚度过大会增大与其他层之间的剪切耦合力度, 最终导致断面出现明显的层状失效^[11]。

2. 树脂固化关键技术分析

环氧树脂未固化之前是粘性液体或脆性固体, 缺乏实用价值, 只有加入胺类或酸酐类等固化剂或者与各类纤维制成预浸料再进行固化反应生成恰当的三维交联网络结构才能最终体现其优异的综合性能。环氧树脂与固化剂配比将直接影响固化产物三维网络结构的完善程度, 从而影响固化产物的性能, 因此如何保证最佳的配合比例就成为环氧树脂使用过程中的一个重要问题。固化剂本质是含有胺基、羟基等官能团的亲核试剂, 其固化机理就是亲核试剂进攻环氧基团发生亲核反应, 环氧基开环形成三维网络结构, 其配比主要由环氧树脂中的环氧当量、羟基值所决定, 所以预制得性能优异的固化产物, 必须正确分析环氧基团和羟基的含量^[12]。

树脂固化就是高分子材料的交联反应, 即树脂由线形分子结构变成网状大分子结构。同样的树脂体系在加热固化时, 因固化时间、固化温度、固化压力的不同形成的三维交联网络结构也有所差异, 导致其物理力学性能也随之不同。时间短温度低, 树脂无法完全固化, 而时间过长或温度过高则造成不必要的能源浪费, 甚至会损伤其性能^[13]。其纤维材料的种类和铺层结构也将影响固化反应制度和固化产物的性能。由此保证环氧树脂基体性能的质量和稳定合理的工艺制度是获得固化产物优异性能的必要条件。

3. 复合材料层结构安全及一致性

高压气瓶设计必须考虑高可靠性, 以承受持续载荷和循环载荷。提高复合材料在可持续载荷作用下的可靠性, 需要考虑蠕变破裂对复合材料静强度的影响, 这一性质主要涉及安全系数的定义。此外, 纤维使用量及相应的成本支出也与安全系数同等重要。为了将高压储存技术成功运用于对成本控制要求较高的汽车工业中, 以下两点必须考虑: 第一, 必须对有关汽车行业法规进行调整, 但不能影响安全; 第二, 复合材料大量生产后的纤维材料固有的离散性必须降至最低。

目前国外标准中安全系数的定义来源于纤维材料

的强度性能。虽然这种定义方法可在一定程度上保证安全, 但这种方法不能直接覆盖复合材料气瓶的安全系数定义。通过对复合材料气瓶爆破数据的概率性分析可提高气瓶的安全性。通过采用标准偏差或变异系数的评价方法对气瓶爆破数据进行分析, 可以得到对气瓶爆破强度的一致性进行评价。这种分析评价方法优势很少。优势之一是可以增加气瓶的安全性。此外, 还可以降低气瓶的开发成本。良好的设计和可重复的制造过程可有效增加气瓶的安全系数。良好的设计与可重复的制造过程相结合, 在实现降低标准差异及变异系数方面有很大的潜力。相比较而言, 不好的设计和不能稳定可控的制造过程会增加爆破数据的分散性, 也可能导致量产气瓶出现偶然性或者低压爆破行为。在新标准中的替代方法可以显著提高气瓶的安全性, 同时降低昂贵的碳纤维的使用量以节约成本。这种方法的评估方案可根据要求提供。

为了实现第二点, 需要创新性的生产技术以保证低成本、高效益的大规模生产。采用热固性树脂湿法缠绕工艺, 然后采用固化炉固化的工艺是现阶段最先进的制造工艺。这项生产技术的进一步发展是必要的, 同时也适应了新的技术要求。这意味着通过提高生产线的自动化大大降低了气瓶成形的时间及工作量, 且提供了连续的高质量纤维浸渍, 提高了纤维丝束的在内胆上的布纱精度。纤维丝束的浸渍质量对制造工艺的稳定性和爆破压力的一致性具有重大影响。

结语

我国非金属内胆全缠绕气瓶技术现处萌芽阶段, 尚未规模化、商业化, 还需要不断研究和探索, 不断克服其技术难点, 使其结构更加优化、性能更加稳定可靠。本文主要研究了非金属内衬碳纤维增强复合材料气瓶, 其结构与力学性能十分复杂。且现有文献对非金属内衬碳纤维增强复合材料气瓶的研究尚不充分, 大都是通过三维模拟的方法进行研究, 解析的方法很少见而且也不完善, 尤其是对其非金属内衬材料及非金属内胆与金属阀座连接技术研究稀少。

非金属内衬碳纤维增强复合材料气瓶由非金属内衬、金属阀座及复合材料纤维层组成。本文讨论了非金属内衬材料选型依据, 及材料本身特性与其物理性能, 在此基础上进行非金属内胆机理的研究, 从本质

上分析了非金属内胆起泡与屈曲现象，从材料级别指出了非金属内胆选型的关键参数。并从气瓶的整体结构出发，研究了非金属内胆典型成形工艺与关键的非金属内胆与阀座连接技术以及复合材料层关键成形技术研究，与为后续的研发提供了一定的支撑。

参考文献：

[1] 杨文刚，李文斌，林松，等. 碳纤维缠绕复合材料储氢气瓶的研制与应用进展 [J] . 玻璃钢/复合材料，2015（12）：99-104.

[2] 李璐伶，樊栓狮，陈秋雄，等.储氢技术研究现状及展望[J].储能科学与技术，2018（7）：586-594.

[3] 赫晓东.先进复合材料压力容器[M].北京：科学出版社，2014.

[4] O.Lorgea, B.J.Briscoea. Gas induced damage in poly（vinylidene fluoride）[J].Journal of polymer testing, 1999, 40：2981-2991.

[5] Julien Jaravel, Sylvie Castagnet. On key parameters influencing cavitation damage upon fast decompression in a hydrogen saturated elastomer[J].Journal of polymer testing, 2011, 30：811-818.

[6] Julien Pepin. Replication of liner collapse phenomenon observed in hyperbaric type IV hydrogen storage vessel

by explosive decompression experiments[J].Journal of hydrogen energy, 2018, 43：4671-4680.

[7] Yamabe J, Nishimura. Influence of fillers on hydrogen penetration properties and blister fracture of rubber composites for O-ring exposed to high-pressure hydrogen gas[J].Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34：1977-1989.

[8] Castagnet S, Grandidier J-C, Comyn M, et al. Effect of long-term hydrogen exposure on the mechanical properties of polymers used for pipes and tested in pressurized hydrogen[J]. Journal of Press Vessel Pip, 2012, 89：203-209.

[9] 汪准，邓京兰，王继辉，等.纤维缠绕复合材料石油套管结构设计与优化[J].玻璃钢/复合材料，2015（2）：5-10.

[10]郑传祥.复合材料压力容器[M].北京：化学工业出版社，2006.

[11]成强.复合材料结构铺层细节设计探讨[J].科技创新与应用，2013（27）：106.

[12]赵娟.双酚A环氧树脂体系主要性能表征技术研究[D].青岛：青岛科技大学，2016.

[13]王晓洁.环氧树脂基体固化研究[J].玻璃钢/复合材料，2001（2）：10-12. **AUTO1950**

（上接第20页）

表2 带微量润滑系统机床的清理工作安排	
机床内部污染物及堆积物的清理	
目的	根据保养和清理周期的要求清理机床内部（金属粉尘和沉积油污）
应用	使用微量润滑的机床
轻度污染	利用生产间隔（更换工艺或其他工序末端）执行 清洁剂：布或刷子 清理工作： 1）清除堆积在水平位置和突出部分的切屑和小金属粉尘； 2）清除机床内壁的湿的残渣和沉积物，让排屑器带走； 3）检查机床的抽取口，清理切屑网（以防阻塞）
中度污染	中断生产来执行 清洁剂：利用低压装备来清理，压力30～70N 清理工作：利用水枪清理机床表面沉积物，如果可能，在水中加一些清洁剂和防腐剂（阅读供应商的信息）

重度污染（顽固的结块的污物）	中断生产来执行 清洁剂：干冰 清理工作：利用压缩空气喷射干冰，干冰颗粒喷射到表面进行清理，逐步把表面易碎的污物清理掉，用排屑器请走污物 要注意：噪声大，带好耳朵的防护；穿防护服工作；不要在狭小的空间工作以防CO ₂ 堆积
----------------	--

结语

微量润滑作为机加工的辅助技术，虽然不是十全十美的，但这个技术在解决很多机加工问题、提高刀具寿命以及节能环保方面，提供了好的思路，也越来越地被用户接受。同时微量润滑技术也与超临界二氧化碳、低温冷风结合，进一步拓展了微量润滑的使用范围。 **AUTO1950**