

连载讲座**复合材料结构设计的基本观念**

张汝光
(上海玻璃钢研究所)

摘 要

复合材料有着和常规材料完全不同的材料观念,它本质上是结构物。因此复合材料的结构设计也应该有着与常规材料结构设计不同的观念,使之更符合复合材料的特点。只有这样才有利于复合材料的应用和发展。

1 要正确认识复合材料

朱颐龄教授在60年代就提出“认识复合材料”的问题,70年代明确指出“复合材料是结构物”,80年代他感叹“我们有些搞了20多年复合材料的同志,实际上还不认识复合材料”。1989年美国国会新技术评价局组织专家撰写的一份研究报告“设计的先进材料”(Advanced Materials by Design,总页数335页,研究工作从1985年到1987年)中恰恰提出了同样的观点。在“影响先进材料更广泛应用的原因”一节中认为,“这一问题不仅仅是技术问题,还要改变人们,包括研究人员和使用者的态度,他们总是习惯于用更适合于常规材料的观念来思考问题”,接着指出“先进复合材料确实更应该看作是结构物,与其看作是材料”。

复合材料的更广泛应用,更快的发展,有赖于对复合材料有正确的认识,正确的使用。

1.1 复合材料的材料观念和常规的材料观念,有着根本的区别。

下面从4个方面说明:

(1)从常规的材料概念看

常规的材料概念是指:可以直接制造成品的物质。用一种物质直接制造一个成品,就称该物质为这一成品的材料。但复合材料成品不是由复合材料直接制造的,市场上也没有可以直接用来制造成品的复合材料。事实上复合材料制品是由纤维增强材料和基体材料直接制造出来的。

(2)从常规的材料分类看

常规的材料分类主要是根据物质的成份,把具有一定成份范围的物质,归为某一种材料,而复合材料是按其制造方法来归类的,凡是由两种或两种以上物质以物理结合的方式(各自保持原物质属性)组成的物质,就归为复合材料。因此,复合材料没有任何特定的成份。

(3)从常规材料的性能看

常规的材料由于有一定的物质成份,因此就有一定的性能特性和性能范围。而复合材料因为没有特定的物质成份,因此没有既定的性能特性和性能范围,然而又正因为如此,它又具有几乎是任何的性能特性,具有几乎是无限的性能范围。复合材料的性能是“一张白纸”(由于作为原材料的复合材料本身都不存在,自然不存在什么材料性能),然而又正因为是“一张白纸”,就可以画出“最新最美的图画”(由于可以随意选择组分材料,可以随意设计细观结构,复合材料可以经设计而具有各种各样的产品所需要的性能)。

(4)从材料的应用看

常规的材料由于有一定的性能特性和性能范围,因此也有发挥其性能长处的一定的应用范围。而复合材料正是由于它可以具有几乎是任意的性能特性,具有几乎无限的性能范围,它的应用领域也将几乎是无限的。

1.2 复合材料是结构物

除了认识到复合材料和常规材料有着根本的区别之外,还需进一步看到:复合材料是结构物。这对正确使用复合材料同样是非常重要的。可以从三个方面来说明复合材料是结构物的本质。

(1)复合材料和复合材料结构物是一一对应,分不开的。

前面已提到没有离开结构物的、作为原材料的复合材料。同时我们还可以注意到,任意两种不同的结构物,它们的复合材料(本文主要指长纤维增强复合材料)也必然不同。也就是说每一种复合材料都是针对特定的一种结构物,根据特定结构物的特定性能要求而设计制造出来的。

(2)复合材料和复合材料结构物是同时成型制造的一个物体。

我们在制造复合材料时就是在制造复合材料结构物;反过来说,我们在制造复合材料结构物时,也就是在造复合材料。复合材料和复合材料结构物是一个物体,自然是同时制造出来的。

(3)复合材料的性能特征符合结构物的规律

复合材料是由两种或两种以上物质,以物理结合的方式组成的,各自保持自己原有的性能。这一特点就使得它的性能行为和特征像结构物一样,可以根据其组分性能和组分的组合情况(即细观结构、组分含量等等),进行分析和预测。反过来说,我们可以像设计结构物一样,通过选择组分以及其组合情况,来设计具有我们所需要性能的复合材料。

正确认识复合材料归结起来主要有两点:(a)认识到复合材料有着和常规材料根本不同的概念。常规材料包含一种特定物质成份的概念,而复合材料则包含用复合方法巧妙使用常规材料的概念。(b)认识到复合材料本质上是结构物。

2 复合材料结构设计的基本观念

正确认识复合材料的唯一目的就在于用好材料(当然还应该包含发展材料)。既然复合材料和常规材料有着根本的区别,复合材料结构设计也就不能按照常规材料的习惯观念来进行。根据复合材料的本质和特点,复合材料结构设计的基本观念主要应该反映在如何充分利用它的三大优越性和注意它性能的各向异性特征上。

2.1 复合材料应该设计,复合材料可以设计

按常规材料的观念设计结构物,设计人员只能根据结构物的使用条件选择材料。然而候选的材料种类是有限的,同时所有常规材料都有自己的性能范围,不可能对各种各样的结构物都能找到最合适的常规材料——因为常规材料不是为某一特定结构物而制造的,有些性能常规材料甚至完全不可能具有。例如,找不到既是良导体又是良绝缘体的常规材料,而这是输送电所需要用的材料。

按照复合材料的观念设计结构物,设计人员无法选复合材料,因为复合材料的性能是“一张白纸”,复合材料没有特定性能的概念,复合材料是巧妙组合使用(常规)材料的概念,因此设计人员要最巧妙地去设计材料,去“画出最新最美的图画”——设计出具有最理想性能的复合材料。例如,采用绝缘性能很好的塑料,去包裹导电性能很好的金属丝,一种既是良导体又是良绝缘体的复合材料就十分巧妙地设计出来了。

设计人员可以随意选择纤维(如玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等等)。随意选择增强材料形式(如:单向纤维片材、纤维织物、纤维毡等等),随意选择细观结构形式(由于是

结构物可以几乎是无穷多种形式),随意选择基体(如热固性树脂、热塑性树脂、碳基、金属基、陶瓷基等等),随意选择纤维含量、随意采用混杂增强材料或是选择各种填料,以改变增强材料或基体的性能等等,复合材料给了设计人员进行材料设计的极大的自由度,这是复合材料结构设计的第一大优越性。复合材料结构设计应该有充分使用这一优越性的深刻观念,复合材料应该设计,复合材料可以设计。下面举几个材料设计的例子:

(1)一般各向异性材料的设计

一般各向异性材料的设计是根据受力状态设计纤维的铺设。例如,材料承受的平面应力为 $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$,可以根据三个应力分量的比例 $\sigma_x : \sigma_y : \tau_{xy}$,来分配X方向,Y方向和 $\pm 45^\circ$ 方向的纤维量,即 $V_{fx} : V_{fy} : V_{f\pm 45^\circ} = \sigma_x : \sigma_y : 2\tau_{xy}$,其中 $V_{fx}, V_{fy}, V_{f\pm 45^\circ}$ 分别为X、Y、 $\pm 45^\circ$ 方向的纤维体积含量,三者之和为总的纤维含量,即

$$V_f = V_{fx} + V_{fy} + V_{f\pm 45^\circ}$$

也可以将X-Y坐标转换到主应力方向1-2坐标,应力状态变为 $(\sigma_1, \sigma_2, 0)$ 。这样纤维的铺设只在1和2方向上, $V_{f1} : V_{f2} = \sigma_1 : \sigma_2$, $V_f = V_{f1} + V_{f2}$,其中, V_{f1}, V_{f2} 分别为1、2方向的纤维体积含量。

当然在具体结构物设计中,由于各部位应力不均匀,我们不可能完全按照各部位的应力状态来铺设纤维,只能在工艺许可的条件下,尽可能做到让纤维来承担外载。

(2)层合板耦合效应的利用

复合材料层合板结构中,由于各层中纤维的铺设方向不同,会发生一些耦合现象。层板受拉时会产生剪切变形或者弯曲变形;层板在温度变化时,也有可能发生扭曲等等。复合材料层合板的这一特性,可以是一件坏事,也可以是一件好事,问题就在于是否掌握和善于运用它的规律。

我们曾经开发一种类似槽形的斜板梁型材,由于模具加工的问题,拉挤工艺拉出

的型材开口间距偏小。为解决这一问题,采用了增强材料的不对称铺设设计,使得型材在固化温度变化时,开口自然外张变形,从而解决了开口偏小的问题。

利用拉剪的耦合效应,我们还实验制造过具有负泊松比(即受拉伸时,不单受拉方向有伸长,横向也有伸长,如图1)的玻璃纤维层合板,虽然泊松比的绝对值很小,但已呈现了负值,如果采用碳纤维(其单向板的耦合效应更强)效果会更好。

(3)可变拉伸刚度材料的设计

曾见到一位美国教授设计一种可变拉伸刚度的材料,原理十分简单,他用排列成锯齿正弦曲线形的碳纤维来增强刚度低、韧性好的橡胶。完全可以想像得出,在碳纤维拉直后,刚度就会突然剧烈上升(图2)。通过改变正弦曲线的幅值,就可以调整材料刚度从很弱到很强转折时的临界变形值。

(4)机敏复合材料的设计

机敏复合材料是最新发展的,将复合材料技术和电脑结合起来的高技术复合材料。在复合材料层合板中,预埋了传感器、光纤纤维、形状记忆合金等基本元件,再配上电脑,就制成一种崭新材料:它有“感觉”和“神经”(传感器能够感受外界情况如温度、压力、应变等的变化;光纤纤维能将感受到的信息传送给电脑);有“脑子”(电脑能对收到的外界情况变化的信息,进行分析、判断并做出处理决定);有“肌肉”(形状记忆合金通过温度的变化可以改变它的形状或性能)。因此这种材料可以根据外界条件的变化,随时调整自己的材料性能或者形状以适应新的环境条件。

复合材料就是这样让设计人员能够通过复合使用材料,设计出具有各种各样特殊性能的高技术新材料。

2.2 复合材料结构设计要和材料设计相结合

常规材料的结构设计在选好材料后,采用同一材料设计制造结构物,结构物的各个

部位有着同样的性能。然而,在使用中,结构物的各个部位受着不同、甚至差别很大的应力状态。对此,常规材料的结构物设计一般只能对不同受力状态的部位,调整不同的尺寸,但往往还是不可避免地要造成材料的浪费。

复合材料本质上是结构物,材料和结构是一体,同时进行成型制造(没有先后),这就使得复合材料的材料设计可以跟着结构设计而变化,根据结构各部位不同受力状态,不同性能要求,做出不同的材料设计。反之,设计人员在进行结构设计时,可以根据材料性能可以随意调整的特点,来考虑更加合理的结构形式。这种结构设计和材料设计相结合的特点是复合材料的第二大优越性。在进行复合材料结构设计时,同样应该充分加以利用。下面结合一些典型产品的设计考虑来说明。

(1) 复合材料叶片的设计考虑

叶片在使用时,主要受离心力和气动力的作用,可看作一悬臂梁受轴向拉伸、弯曲和扭转问题(图3)。如何设计这样一种复合材料结构物,设计人员可以根据具体条件,作出自己的最优选择。

对于一般不太长,受力条件不是很大的风机叶片,可以采用如图4的剖面结构和铺层形式。外层是层合板薄壁结构,腹腔内填充硬质泡沫塑料(也可以空腹)。层合板主要由单向层和 $\pm 45^\circ$ 层组成,单向层可采用单向纤维铺设,也可选用单向织物(叶片横向也有较小的应力),以承受由离心力和弯矩产生的轴向应力; $\pm 45^\circ$ 层可采用1:1平衡型纤维布(即经、纬纤维量相等)的 $\pm 45^\circ$ 铺设,以承受主要由扭矩产生的剪切应力。单向层和 $\pm 45^\circ$ 层纤维用量比例可按轴向应力和剪切应力比例来确定。由于弯矩力不是很大,一般选用玻璃纤维作为增强材料就可满足刚度和强度的要求。在一定的范围内,还可通过选择较厚翼型以提高叶片刚度。

对于受力条件比较严峻的叶片,如大型

风力叶片和螺旋桨叶片等,采用图4剖面结构形式已达不到应用要求,可以采用图5或图6一类剖面结构形式,这两种剖面结构形式虽然不同,但都有一个基本特点,即叶片内增加了一个由单向纤维铺设的主梁,以承受叶片更大的弯矩。主梁用增强材料,可以根据需要采用碳纤维或碳、玻璃混杂纤维。外层的薄壁结构采用 $\pm 45^\circ$ 纤维铺设,以承受剪切应力,仍然可采用玻璃纤维或者芳纶纤维。也有将层板薄壁结构改成夹层结构(图5),以提高抗失稳性能。不同剖面形式的选择,除了根据以最优形式承受外载外,成型工艺是否容易实施也是一个重要考虑因素。

叶片最外层一般还采用一层表面毡以形成富树脂层,以得到光洁表面,并提高耐腐蚀和耐磨能力,对于更恶劣的冲刷环境条件,还可以在叶片前缘部位包覆一层抗冲刷金属薄片(如图6)。

(2) 复合材料容器的设计考虑

高压容器和防腐容器的容器壁结构一般分为三层,即内衬层、承力层和保护层。

承力层多采用纤维缠绕工艺成型。按容器所承受压力大小,确定纤维缠绕角度和纤维用量,最有效发挥纤维的拉伸性能,承担全部结构承受的载荷。

内衬层:对高压容器,主要用于充装各种高压气体,要求有很好的防渗漏性能,常用金属内衬。金属材料的选用应考虑能满足脉冲疲劳性能要求,以防止使用中产生疲劳裂纹,造成气体的泄漏;对于防腐容器,内衬主要起防腐蚀作用,材料设计主要考虑选择耐蚀性能强的树脂,再辅以玻璃纤维毡形成富树脂层。对于更高防腐要求,也可以直接采用相应的(根据容器内物质的腐蚀性质)塑料层。

保护层是最外表面层,用于抗自然老化和防止承力层受到机械损伤。保护层多用表面毡形成富树脂层,也可用环氧腻子 and 油漆刮在外表面作为保护层。

(3)大型复合材料型材的设计考虑

大型复合材料型材的设计考虑应包括两个方面:截面形状、尺寸的设计,和最合理的材料性能设计。两者密切相关,又各有不同的考虑方面。这里先讨论后者,前者将在后面“要注意复合材料的各向异性特征”,一节中讨论。

和常规材料不同,复合材料结构设计可以、而且应该根据结构物各个部位不同的应力状态,进行不同的材料性能设计,以达到最有效地使用材料。大型型材的设计是一个典型例子。以工字型材为例,工字型材主要作梁用,其截面各个部位的受力状态大不相同,上、下翼缘主要分别受压缩和拉伸应力,腹板主要受剪切应力。从材料来看,单向纤维铺设具有很高的拉压性能(单向玻璃纤维

复合材料也可达到 1000MPa 的强度),但剪切性能很差(一般剪切强度仅在 50MPa 左右);纤维毡铺设则恰恰相反,具有较好的剪切性能(玻璃纤维毡复合材料的剪切强度也可达到 150MPa 左右),但拉伸性能较差(一般强度在 100MPa 左右)。因此,复合材料工字型材的合理材料设计应该是:上、下翼缘采用以单向纤维为主的铺设,而腹板则采用以纤维毡为主的铺设(图 7)。若以常规材料的观念设计,对整个截面都采用单向层和毡层相同厚度的同样铺设,则其上、下翼缘的拉、压强度将下降将近一半,而腹板的剪切强度将下降近 35%,显然是很不合理的。(下期待续)

(收稿日期:97-03)

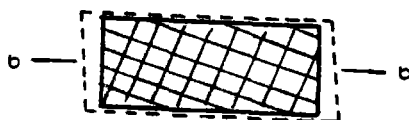


图 1 负泊松比复合材料

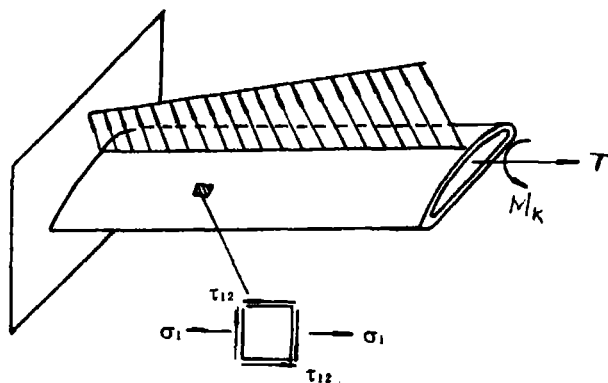


图 3 叶片荷载图

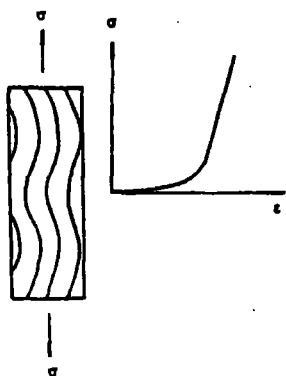


图 2 变拉伸刚度复合材料



图 4 一般风机叶片剖面设计

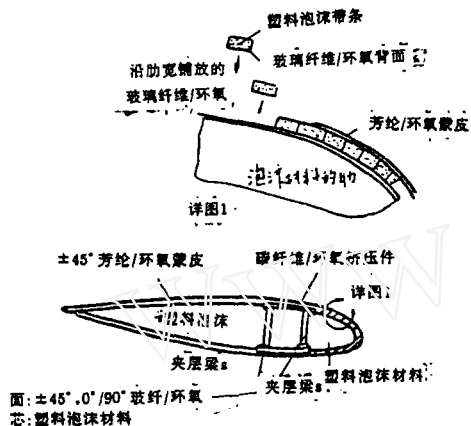


图5 风力叶片剖面设计

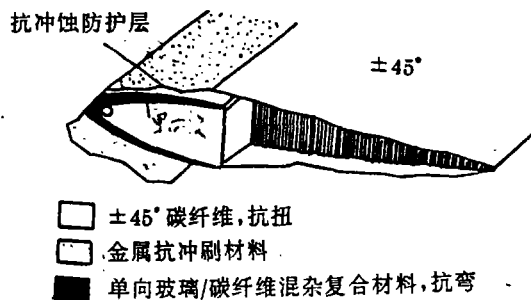


图6 直升机主旋翼桨叶剖面设计

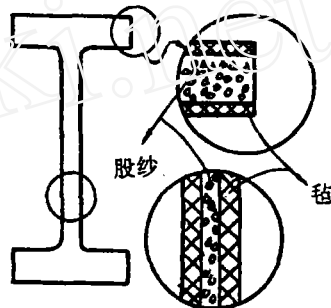


图7 受弯复合材料型材

玻璃钢管道耐高温

荷兰 Geldermalsen 的 Ameron 玻璃钢管集团,一个 Ameron 国际公司的操作机构正提出 Bondstrand PSX 玻璃钢管道用于海上消防水系统;这种管道的树脂体系据说具有耐火性。

Bondstrand 管道和配件采用聚硅氧烷酚醛 (PSX) 树脂体系,它是硅氧烷改性酚醛树脂,据说它有酚醛的一些优点,如耐火、低烟和低毒性,但克服的弱点如脆性和粘结不够足。该公司宣称,作为玻璃钢管的特征,此 PSX 产品耐腐蚀及耐大量侵蚀性化学药品。

Bondstrand PSX-L3 已通过按 IMO 等级 3 技术要求的严格试验程序,而 Bond-

strand PSX-JF 已通过根据 UK Offshore Operators Association (UKOOS) 准则的喷火试验要求。

该公司报道,在试验时,50mm 及 150mm 管子曾可经受温度超过 1000℃,而且,在温度超过 800℃时 PSX-L3 比酚醛产品显示改进的耐热性。PSX-JF 曾可经受火焰暴露而在管壁,配件或接头上未用膨胀涂层 (intumescent coating)。

Ameron 也已研制出应用 PSX 生产工艺的胶粘剂,据说在管子和部件之间形成可靠粘结,在胶接接头上未用膨胀涂层。

(《RP》·1996,11:7)