

复合材料结构设计中的力学问题

中国科学院力学研究所 王震鸣

以碳纤维-环氧为代表的先进复合材料,具有比强度高、比刚度大、抗疲劳性能好和容易加工成复杂的外形等一系列优点,特别适宜于宇航、航空及其他重要国防工程结构中使用。

设计复合材料结构,要求重量轻、性能好、安全可靠和经济。要想设计出复合材料的最佳结构,必须掌握复合材料及其结构的基本特点和特性。它涉及许多学科和重要环节,如材料科学,成型工艺,结构设计,理论研究和实验等。其中与力学有关的有复合材料力学和复合材料结构力学。对于主要受力部件,必须认真研究复合材料及其结构的力学问题,以确保安全。

纤维增强复合材料,具有各向异性、不均匀性和粘弹性,层间剪切强度和剥离强度很低。由于层间剪切模量较低,在某些情况下需要考虑沿厚度方向的剪切变形,以免带来显著的误差。

由于纤维增强复合材料的比强度高、比刚度大,因比常常做成薄壁结构的形式以减轻重量,例如多层板壳、加筋板壳、夹层板壳和薄壁的梁、柱、桁架、刚架等,以充分发挥复合材料和结构形式两方面的优越性。

由于复合材料的制造工艺过程很复杂,影响复合材料力学性能的因素很多,成品质量往往不稳定,分散度大,可靠性差,这给结构设计带来了许多困难,也是影响复合材料广泛应用的一个重要原因。因此应严格控制工艺过程,消除各种不利因素,并进行严格的检测,以保证产品的质量。还需进行大量试验,测定和积累必要的的数据,掌握复合材料在静载、动载和各种使用环境下(高温、低温、潮湿、辐射、自然风化和老化等)的性能,作为设计的依据。

复合材料和复合材料结构,是同时设计同时制造的,材料性能和结构形式都可进行设计,这增加了结构优化的可能性。由于涉及面广,例如采用什么纤维和基体材料,铺层方向如何,是板壳结构还是桁架、刚架结构;采用加筋结构,夹层结构还是多层结构,支承联接条件怎样安排等,都可自由选择,设计参数增多,这也给设计、研究和测试工作带来了许多困难。

在60年代后期,复合材料力学已发展成固体力学的一个独立分支,近十多年来又有了进一步的发展。凡是各向同性材料(如金属材料)及其结构所具有的力学问题,如变形、应力分析、稳定、振动、断裂、疲劳、粘弹性理论、塑性理论、强度理论、应力波和优化设计等,在纤维增强复合材料及其结构中都会遇到。必须指出,纤维增强复合材

• 1981年2月9日收到。

料的各向异性、不均匀性等特点,以及在某些情况下必须考虑沿厚度方向剪切变形的影响(如孔口及自由边界上的应力分析),增加了问题的复杂性。于是,纤维增强复合材料的结构,会出现比较复杂的为各向同性均匀材料的结构所没有的特殊的力学问题。因此,对于应力水平较高或对刚度和承载能力有严格要求的关系重大的主要结构部件,须进行严格而周密的力学计算和实验,以确保安全。积累我国自己的试验数据,作为设计的依据,也是非常重要的。

在纤维增强复合材料中,纤维具有很高的拉伸强度和弹性模量,它是脆性材料;基体具有较低的拉伸强度和弹性模量,但可承受较大的应变,它是韧性材料。单根或单索纤维容易折断、拉断、磨损和腐蚀,因此不能单独作为主要结构材料。基体的作用是把纤维粘结在一起,成为牢固的整体,使纤维保持一定的方向和位置,以充分发挥纤维的承载作用。在受力方面,基体的主要功能是承受剪力和在侧向给纤维以弹性支承。在纤维和基体的界面上,由于结合力的大小,孔隙的多少,纤维截面的不均匀,有无杂质和多余树脂等多方面的因素,影响界面的强度。基体还能保护纤维不受磨损和腐蚀。在纤维方面,由于基体的作用,使各纤维受力均匀,因此纤维增强复合材料具有很高的拉伸强度和刚度。对于沿纤维方向受压的单向复合材料,由于纤维在基体中类似于弹性基础上的梁,纤维在侧向有了连续的支承以后,不易屈曲,因而可发挥出很高的抗压强度,而纤维束却是不能抗压的。纤维束的拉伸载荷,与同样数量的纤维束所做成的单向纤维增强复合材料的拉伸载荷,大不相同,后者要大得多,这两个载荷的差别,远远大于基体截面所能提供的拉伸载荷。这是人工复合后所产生的显著效果。譬如说,3+1变成了6。研究其原因,是由于纤维束中,各纤维所受的力是不均匀的,且薄弱环节较多,容易个别击破,受力大的应力水平高的纤维先发生断裂,然后按应力高低依次产生一系列的断裂,造成破坏。而在复合材料中,因基体的作用,各根纤维在承拉时,邻近纤维的应力和应变水平几乎完全相同,且因基体的支承作用和剪切变形,使纤维中缺陷的影响减小到最低的程度。因此,由两种或两种以上单一材料经人工复合而成的复合材料,可具有组成材料所没有的或未能很好发挥的优良特性。

在纤维增强复合材料中,裂纹扩展的规律与金属材料不同,当裂纹在基体中扩展时,裂纹尖端的塑性区能减缓裂纹的扩展速度,此外,裂纹扩展到下一根纤维时,常常受阻而改变方向,沿着纤维和基体的界面扩展,只有遇到下一根纤维的薄弱环节(损伤或直径变化等),裂纹才再一次穿越纤维,因此裂纹的扩展轨迹是曲折的不规则的,这增加了材料的断裂韧性,也大大提高了复合材料的疲劳强度。

对于碳纤维-环氧和玻璃纤维-环氧复合材料,如制作叶片,可显著减小离心力。如分别在单周应力的50%和25%以下运转,则疲劳寿命可趋于无限。金属材料的疲劳破坏,是由里向外突然发展的,事先没有明显的预兆,而在纤维复合材料中,疲劳破坏总是从纤维的薄弱环节开始,逐渐扩展到界面上,破坏前有明显的征兆,即使有了裂纹,一般地也能使用较长的时间,因而比较安全。大多数金属材料的疲劳极限是其拉伸强度的40—50%,而碳纤维-环氧复合材料则可达70—80%。此外,纤维复合材料抗声振疲劳

的性能也很好，由于内阻尼和内耗较大，因而减振性能好。

纤维增强复合材料的层间剪切强度要比基体材料的剪切强度低得多，在垂直于纤维方向的拉伸强度，由于界面强度较低和界面上缺陷的存在，也比基体材料的拉伸强度低得多。这表明，复合材料的复合效果，并不能同时改善所有的性能指标，既可产生一些卓越的为组成材料所没有的优良性能，也能降低某些性能，因此需要进行充分的研究试验，扬长避短，合理使用，才能设计出很好的复合材料结构来。

对于纤维增强复合材料，在知道纤维和基体的性能和体积比以后，用混合定律预计单向增强复合材料的模量和泊桑比，是相当精确的，和实验结果基本一致。建立在宏观力学和实验基础上的强度准则，例如蔡-Hill理论和蔡-吴的张量理论等，和实验结果符合得也相当好。它们所体现的是统计平均规律。由于纤维中的缺陷和界面上的多种缺陷，都是随机分布的，纤维在基体中的方向和间距是不均匀的，因此具体的破坏形式和裂纹扩展的规律，也具有随机性，只能大体上作出判断，难于精确地预计。

二

在纤维增强复合材料中，纤维是承受拉压应力的主要成分，因此随意打孔切断纤维是不允许的，力求避免。在制造过程中，也要尽量避免纤维的损伤与断裂。在纤维增强复合材料中，孔洞和缺口处的应力集中问题很突出，应力集中系数很大（比各向同性材料大2—3倍，因所用纤维和基体的不同而不同）。要在这些部位采取适当的加强措施（如增厚）或采用高强度低模量的另一种复合材料。例如在碳纤维增强复合材料中，在孔洞或缺口处沿主要受力方向采用一部分玻璃纤维或Kevlar纤维复合材料，由于这二种纤维的弹性模量比碳纤维低得多，而拉伸强度差不多，因此在相同的应变时，孔洞和缺口处的最大应力可显著降低，不会引起破坏。

在孔洞和缺口处产生的应力集中，对于各向同性的金属材料，尤其是韧性材料，在静力问题中，由于应力超过弹性范围，进入塑性状态，产生塑性变形，可以使应力的分布趋于均匀。金属材料的应力集中，对于疲劳强度的影响很大。

对于同一种类的纤维增强复合材料，应力集中系数与纤维取向关系极大。碳纤维-环氧树脂材料单向受拉时，当纤维方向与受拉方向一致（成 0° ）时，在孔口 $\theta = \pm 90^\circ$ 处，平行于纤维的应力集中系数约为9，而 $\pm 45^\circ$ 的交叉铺层，在孔口 $\theta = \pm 45^\circ$ 处，平行于纤维的应力集中系数约为1.5。因此改变纤维取向可使应力集中系数大幅度下降。此外，纤维增强复合材料的不均匀性和各向异性、界面强度和微观缺陷等，使裂缝扩展的规律与金属不同，它在孔洞和缺口处出现开裂、分层后，反而使应力集中问题有所缓和，使严重性减小。所以不能只看到在纤维方向受拉时，孔口的最大应力集中系数是9，远远大于各向同性材料单向受拉时小孔周围的应力集中系数是3这一点，而片面地把问题看得过于严重。不论从有孔洞和缺口的试件的静力试验或是疲劳试验来看，如果合理地进行设计，采取一些措施（如在螺孔两边放上垫圈，施加一定压紧力以避免层间开裂等），妥善安排纤维取向、层数和层次，那么应力集中问题就可得到适当的解决，并不如想象的那么严重。

由于孔洞和缺口的数目、形状、间距、端距和边距等，在各种工程问题中往往变化

很大,复合材料的增强纤维、基体和体积百分比亦有变化,为了使结构安全可靠,需要对各种具体情况的应力集中问题,进行系统的理论和实验研究。

三

对于纤维增强复合材料的结构,联接问题非常重要。由于纤维被切断,在联接部位主要靠层间剪切来传递载荷。板壳结构在面内的剪切强度,可采用安排适当层次的斜交铺层来解决。而对于碳纤维增强环氧复合材料,其层间剪切强度约在400—1000公斤/厘米²的量级,它仅为纤维方向的拉伸和压缩强度的百分之几。对纤维进行表面处理,可提高纤维复合材料的界面强度和层间剪切强度。但提高的幅度不大,有时会降低纤维复合材料的拉伸强度,这也是值得研究的问题。拉伸载荷要通过接头处的层间剪应力来传递,就使得在结构的广大面积上超过金属性能的高比强度比刚度复合材料,在接头部位变得远不如金属,因此在联接部位,复合材料的接头要比金属接头笨重,在减轻结构重量方面,产生不利影响。这就要求在设计复合材料结构时,尽可能地减少部件的数量,以减少接头的数目,由此可减轻复合材料结构的重量,提高结构的效能。

在结构部件之间联接时,尤其是承拉部件,在联接处要采取种种合理措施,以减小胶接部件、机械联接(螺接与铆接)部件的应力集中。

对于胶接接头,当两片等厚的单向纤维增强复合材料搭接时,在胶接区端部会产生严重的剪应力集中,如将搭接片的端部在厚度方向加工成斜面或阶梯状,则剪应力集中问题就能基本解决。对于等厚的两搭接片的搭接长度,从弹性力学的分析结果来看,搭接长度较小时,剪应力分布可比较均匀,因此搭接长度小一些好。可是胶接接头中的胶,是有一定厚度的,当剪应力较大时会产生塑性变形,在室温或温度升高时会产生蠕变,使应力分布与弹性力学的解不一致,问题变得复杂一些。因此,为了提高胶接接头的强度和延长疲劳寿命,还是以适当增大搭接长度为好。在搭接长度的中部是低应力区,不论外界环境如何,载荷持续多久,有了低应力区就可基本上消除蠕变,且增大了破坏时所能承受的总应变能,因此适当增大搭接长度是合理的有益的。

不论是机械联接接头、胶接接头还是结构件本身,在静载、交变载荷或冲击载荷作用下,都必须充分注意破坏形式的多样性,例如可因层间剪切(包括胶接层和复合材料中的界面)而破坏,可因截面削弱或截面突然变化(会产生应力或应变集中)而拉断,可因挤压强度不足而破坏,可因板件过薄因挤压产生侧向失稳而破坏,可因载荷偏心所产生的剥离应力而破坏,可因上述多种原因的组合而引起的破坏等。

采用以胶接为主机械联接为辅的方案是合理的。在胶接接头剪应力大和有剥离倾向的部位(通常在接头端部),用螺钉或铆钉加固,在接头的中间部位,靠胶层来传递剪应力,则可显著提高接头的强度和可靠性。这种接头性能优越,既轻又安全。也可在以机械联接为主的接头中,合理地涂上胶层,则能适当减少螺钉或铆钉数目,还可使机械接头更为可靠,延长疲劳寿命。

在机械联接接头中,适当采用一些斜交铺层(例如安排30—40%的 $\pm 45^\circ$ 铺层)或金属(主要是钛箔)镶片,可使应力传递更为有效;并提高局部的挤压强度。垂直于纤维的剪切强度总是高于层间剪切强度,如能巧妙地利用,就可设计出性能较好的接头

来。只要认真地加以研究,掌握复合材料的一系列基本特性,采取合理的措施,就能作出很好的设计,带来巨大的好处。

对于重要的接头,必须进行一定数量的(不能太少)静力和疲劳试验,以确保安全。

四

对于复合材料的力学问题,其平衡方程和位移应变关系,与均匀各向同性材料的力学问题相同,而本构关系(广义的应力应变关系)则变得复杂了,边界条件也会变得复杂些。只有较为简单的问题,才能用解析方法求解,绝大多数问题需要用数值方法求解,其中包括有限差分法、数值积分法与有限元法。

要充分发挥和利用纤维增强复合材料的各向异性这一特点。材料的各向异性,给分析计算和实验都带来了一定的困难;如能合理铺层,也可使结构的应力分布更为均匀和合理,充分利用和发挥复合材料的潜力,减轻结构重量,这却是一大优点。纤维增强复合材料的比强度高、比刚度大,是指单向增强复合材料的拉伸情况而言的,对于非单向铺层的情况,与单向铺层的情况相比,从综合效果看,比强度和比刚度都要大幅度下降,对于准各向同性的铺层,比强度和比刚度将下降到单向铺层复合材料的 $3/8-1/3$,综合弹性模量可能比铝和钛的模量还要低。因此在主要受力方向上,一定要安排较大百分比的纤维,在次要受力方向上,则可安排较小百分比的纤维,使能满足各方向受力的需要。对于承受轴向拉伸或压缩的杆件来说,当然以单向增强为好。对于受压杆件,如能在周向缠绕或螺旋式缠绕二、三圈纤维,则可减少开裂,提高纤维受压时在基体内的微观屈曲载荷。对于单向受拉、受压或受弯的板壳或组合工字梁,在主要安排纵向纤维的同时,在横向还要安排少量的纤维或 $\pm 45^\circ$ 的纤维,以免产生沿纤维方向的裂纹。对于以承剪为主的板壳,当然以 $\pm 45^\circ$ 交叉铺层为好。对于其他受力复杂的情况,关于铺层方向、铺层次序和铺层厚度的问题,要按结构的受力情况、几何形状、边界条件和所用材料,先作出若干种按结构设计的力学原则来看是较优的方案,分别计算出拉伸刚度、弯曲刚度、弯曲拉伸间的耦合刚度和剪切刚度,再计算结构的挠度、应力分布、临界载荷和固有频率等,经过严格的反复的分析计算,以寻求最佳的铺层方案。这属于复合材料结构设计优化的问题。关于优化设计问题,无约束的优化问题已基本解决,对于复杂的复合材料结构,由于变量多,约束条件也多,当约束条件相当复杂时,这种优化设计的课题相当困难,对计算机的容量、速度要求很高,计算工作量很大。这种问题还需进一步研究、探索。

五

在复合材料结构设计时,一定要弄清载荷和环境的全部情况。载荷如何分布?加载过程如何?是静力学问题还是动力学问题?有无疲劳问题?是高频疲劳还是低频疲劳?载荷谱的情况如何?是先小后大还是先大后小?会不会引起材料在横向开裂或层间剪切破坏?复合材料及其结构的抗冲击性能和阻尼特性如何?使用环境下的温度、湿度、辐射、腐蚀等情况如何?固化温度和固化应力如何?热应力的情况如何?结构的空气动力

学要求如何?采用什么增强纤维和基体材料?采用什么结构形式为好?这些问题都应有清楚的了解。

一定要弄清楚该结构或部件是受刚度控制的还是强度控制的。如为强度控制的,是受静力强度、疲劳强度还是冲击强度控制的?如为刚度控制的,是刚度不足影响变形过大呢?还是刚度不足影响结构的临界载荷与承载能力?刚度变化对产生共振问题的影响又如何?在达到一定的温度以后,复合材料结构又会产生蠕变和应力松弛问题,承压结构又可能产生热屈曲和蠕变屈曲问题。问题是错综复杂的,刚度问题和强度问题是既有联系又有区别的。在某些情况下,增强结构的刚度有利于减小应力解决强度问题,有时增强结构的局部或整体刚度不一定有助于强度问题的解决。

对于纤维增强复合材料结构,由于材料的比强度和比刚度大,因此结构做得很薄以减轻重量,这时结构的稳定问题显得很突出很重要。对于一个较为复杂的结构,主要是指加筋结构,必须分别计算局部失稳和整体失稳的临界载荷。要考虑局部失稳波形与整体失稳波形之间的非线性耦合影响。从前的设计原则认为整体失稳与局部失稳的临界载荷相等是最佳的。近若干年来,国外新的研究进展表明,这个原则只适用于没有缺陷(主要指几何缺陷)的理想结构。而对于实际结构,即使加工得最好也是有原始缺陷的,仅不过是大小而已。对于有缺陷的结构,局部失稳的临界载荷略大于(譬如说1.5—2.0倍)整体失稳的临界载荷,才是最佳的设计原则。此外还要计算结构的局部应力、变形和固有频率与结构整体的应力、变形和固有频率,作出相应的判断,是否满足设计要求。结构在达到整体失稳的临界载荷以后,有的结构(例如壳体结构)就发生崩塌和破坏,丧失承载能力;有的结构(例如四边支承的加筋平板和微曲板)在达到整体失稳的临界载荷以后,还有一定的继续增长的承载能力。这要看结构屈曲后的性状如何,是稳态的还是非稳态的而定。整体失稳与结构的安危有关。发生局部失稳有时并不影响结构的使用。但在高速飞行器中,局部失稳所产生的变形可增大气动阻力,有时引起颤振,带来新的问题。在此情况下,采用刚度大表面光滑的夹层板壳,就比加筋板壳来得优越,虽然两者的结构效率差不多,但空气动力性能却要好得多。在不断增加载荷的过程中,复合材料板壳结构中的层次会产生横向开裂,已开裂的第 K 层中, $E_2^{(K)} \approx G_{12}^{(K)} \approx \nu_{21}^{(K)} \approx 0$, (但仍能承受层间剪应力), $E_1^{(K)} \neq 0$,需要重新计算,有时能算得在一定范围内结构的承载能力继续增大,最后达到一个极大值。在正常设计时,如何确定安全的承载能力问题,值得深入研究。在这里谈到的结构在超临界状态下承载能力的增长,和某些层次横向开裂后所具有的较高承载能力,与飞行器在风暴、恶劣环境或受敌人攻击时等非常情况下的承载能力有关,虽不是正常设计载荷的依据,但对飞行员和飞行器等重大结构的安危大有关系,这也是应该注意到的。

有裂纹的复合材料板壳结构,和有裂纹的各向同性材料的板壳结构一样,它的承载能力问题,是一个新的值得研究的课题。

六

复合材料结构,由于工艺因素、使用环境和载荷条件等都相当复杂,具有不确切性,为了安全可靠,需要一定的安全系数和强度储备。安全系数取得过大,则把复合材

料的优越性和潜在能力一笔勾销了,因而不合理的。应对制造过程进行严格的质量控制,加强检测工作,使产品性能稳定,并对使用环境和载荷条件下材料和结构的性能,进行充分的研究和实验,然后取一个较小的安全系数(譬如说2—3),原则上说,这才是合理的。至于安全系数如何选取,是一个复杂而重要的问题,有待于进一步研究,不能作简单的回答。

复合材料结构,当选取一定的安全系数以后,在使用条件下的应力应变关系,一般接近于线性弹性,分析起来也较为简单。若涉及结构的极限承载能力问题,或结构的一部分或全部进入塑性状态时,则需要部分或全部采用非线性的应力应变关系。梁和板在横向载荷作用下的极限载荷和板壳结构塑性屈曲载荷的计算,都属于这方面的例子。

对于不对称铺层的复合材料板壳结构,由于弯曲(扭曲)与拉伸(剪切)间存在着耦合关系,有耦合刚度 B_{11} ,一般说来,将使结构在给定载荷和边界条件下的变形增大,临界载荷降低,固有振动频率下降,且固化时会产生残余应力和残余变形,通常是不利的。但是,当板壳的上下两边有温差时,或吸收水分不同,或支承条件对板壳中面不对称,则在对称铺层情况下,也会带来拉伸弯曲间的耦合关系,产生不利影响,此时如能适当地选择不对称铺层,反而能带来好的效果,进一步减轻结构重量。对于固化应力,一般说来也是不利的,但在若干情况下如利用得当,也可作为一种预应力措施,带来好处。

复合材料板壳结构,由于它的密度比金属小,比强度比刚度比金属大,即使结构重量减轻20—40%,它的厚度仍比金属结构厚一些,因此算得的临界载荷和实验结果相比,符合的程度还可以好一些。因为结构的厚度增加时,一般说来,原始缺陷的影响可以减小。

大家知道,在相同的结构参数和载荷条件下,增加边界的约束程度,可使变形减小、临界载荷增大、固有频率升高。固支边的约束大于简支边的约束。对于加筋板壳的面板来说,闭口薄壁的帽形加筋优于开口薄壁的I形和L形加筋。但采用上述两点措施后,会给解析法求解带来困难,计算工作量增大。

七

在复合材料结构的计算问题中,如板壳很薄,或是加筋结构,沿厚度方向剪切变形的影响很小时,通常可采用克希荷夫假定,按经典理论求解,这时,对于壳体问题,广义位移为三个: u_0 , v_0 和 w ;对于平板问题,只有一个: w 。

纤维增强复合材料的层间剪切模量较低,如跨度和厚度之比较小,对于固支边或虽是简支边,但失稳时波数较多或对于高阶振动,则需要考虑沿厚度方向的剪切变形,否则会带来较大误差。对于夹层结构,由于夹心的剪切模量相当低,必须考虑沿厚度方向剪切变形的影响。对于薄的和中厚度的板壳,有时还需考虑几何的非线性问题。我们在《各向异性多层扁壳的大挠度方程》和《分解刚度法在各向异性多层扁壳理论中的应用》二文(将刊登在《应用数学与力学》杂志上),探讨了复合材料扁壳结构在相当复杂的条件下(如几何非线性,温度因素包括复合材料因吸收或放出水分引起的膨胀或收缩,不对称铺层带来的耦合影响,沿厚度方向剪切变形的影响,分布载荷 q_x , q_y , q_z

和分布力矩 m_x, m_y 是坐标 x, y 和时间 t 的函数,考虑惯性力和中性面上的力的影响等)的平衡方程、边界条件和初始条件,得到了以广义位移 u_0, v_0, ϕ_x, ϕ_y 和 w 作为未知量的基本方程,可求解变形、应力分布、稳定和振动等问题。又给出了求解沿厚度方向剪切变形影响的近似方法——分解刚度法。对于复合材料多层板壳,若要严格计算剪切刚度,将是一个很困难的问题,前人没有很好解决,有待于进一步研究。从实用角度看,我们在“大挠度方程”一文中给出的计算剪切刚度的近似公式,误差不大,已能满足设计要求。对于复合材料的厚板和厚壳,有人采用高阶理论进行研究,共有11个广义位移和7种刚度,问题极为复杂,虽有理论意义,但用以求解实际工程问题,尚有很大的距离。

对于轴对称问题,可进一步简化。对于圆柱壳的稳定和振动问题,采用 $\epsilon_\theta \approx 0$ 的假定,也可化简,得到良好的近似解。

由于复合材料板壳问题相当复杂,只有少数问题可用解析法求解,大多数问题需要用有限元法求解。一般有位移法和应力杂交法。如果层数不多,例如精确研究一些典型试件的应力和应变问题,可取复合材料的一薄层(也可把相同材料相同取向的数层看作一薄层)的厚度作为三维有限元的厚度,如层数较多,则由于计算机容量的关系,会遇到很大的困难,计算工作量很大,也很费钱。对于有些问题(自由边的边界效应除外),例如研究结构中广大区域内的应力,或者计算结构的变形、临界载荷和固有频率问题,那么,以取板壳厚度作为三维有限元的厚度为宜。这两种情况的有限元公式和结果是有区别的,前者可计算层间剪应力,而后者则不能,但后者对计算机容量的要求相对来说可较低。对于变厚度板壳,材料的拉伸和压缩模量不相等,板壳的刚度是 x, y 的函数,温度和湿度影响复合材料的性能,局部区域已有开裂,复杂的外形、复杂的载荷分布和边界条件等情况,要计算复合材料结构的变形、应力、稳定和振动问题等,只能采用有限元法求解。国外已有相当数量的程序可以引进或者作为借鉴,但是并不能得到或看到所需的许多重要程序,即使找到了,有的也不够完善,或者因客观条件(指计算机的条件)不具备,不能生搬硬套,需要我国的科技人员创造性地进行研究。

八

对于单向纤维增强复合材料,弹性模量 E_{11}, E_{22} 和面内剪切模量 G_{12} 以及纵向、横向的拉伸和压缩强度的测定,测试方法已经成熟,测得数据精确可靠。对于沿厚度方向的两个剪切模量 G_{13}, G_{23} ,尤其是剪切强度的测定,测试方法很多,都不够完善,从力学方面严格地加以考察,都存在着不少问题,需要进一步的研究。

对于单向纤维增强复合材料的试件,面对着纤维方向进行观察,材料性能是接近于横观各向同性的。因此,它在两个正交方向上的剪切模量和剪切强度也是相当接近的,在一些书刊的典型算例中,常常认为是相同的。由于制造过程和工艺因素的关系,两者实际上有所差别,不是完全相同。

对于复合材料板壳结构,一般说来,有拉伸刚度、弯曲刚度、弯曲与拉伸间的耦合刚度和剪切刚度,而且在结构的不同部位,由于铺层数量、厚度、取向和叠层次序的变化,各部位的刚度并不相同,如全部采用实验方法来求,则工作量太大,费时费钱。因

此需要研究,找出切实有效的方案来。建议采用下述方案。进行相当数量的典型试验,其中有一批是用来测定弹性模量、剪切模量和泊桑比的,另一批用以测定拉伸刚度、弯曲刚度和剪切刚度的,采用矩形梁和与实际结构相近的一维试件,由一定数量的试验数据和有关公式作比较,经数据处理后,可算得比较切合实际的 E_{11} , E_{22} , ν_{12} , G_{12} , G_{13} , G_{23} , 作为计算各部位所有的四种刚度的依据,较有成效。

复合材料,可采用单一纤维和单一基体复合的方案,也可采用一种以上的纤维和基体材料,这就是混合复合材料的方案。全部是同一种高性能复合材料(例如碳纤维-环氧),结构重量可减轻得多些,通常可比铝合金部件轻15—45%左右,视原部件和新部件的设计水平、材料性能和工艺因素而定。从经济上看,采用混合铺层,将模量高的碳纤维安排在板壳的外侧,用价格较低模量较小的玻璃纤维或Kevlar纤维放在中间,这样如采用50%的碳纤维,抗弯刚度仍能达到全部采用碳纤维方案的7/8以上,重量增加不多,原方案一个部件的碳纤维可做两个部件,从这个意义上说是很经济的。此外,碳纤维-环氧复合材料的抗冲击性能不好,采用碳纤维和玻璃纤维(或Kevlar纤维)交互铺层的方案,可大大提高复合材料及其结构的抗冲击强度。

在与我们力学所协作的某项目中,有一块进气道大面积壁板,初步打算采用10毫米厚的碳纤维复合材料,以取代原飞机上铝表板和镁加筋条的铆接夹层壁板,经讨论后,采纳我们的建议,采用总厚度为8毫米,在中心部分为4毫米厚的玻璃纤维增强塑料,外侧为(主要是环向铺层的)碳纤维复合材料,各用2毫米作面板,计算、试验和实际飞行表明,性能合乎原设计要求,减轻重量25%以上,提高冲击韧度2倍多,节约成本约一半,工艺过程比原金属部件简单得多,且安全可靠,值得推广。

采用单向纤维增强复合材料的条带,选择性地加强在金属结构的关键部位,可提高金属结构的刚度和承载能力。用这种方案,对于提高了刚度和承载能力的结构而言,可减轻重量10—20%。由于硼-环氧和钛的线膨胀系数差不多,制造时可采用高温固化,不会引起显著的残余应力。碳纤维增强环氧复合材料和铝的线膨胀系数相差较大,胶接后采用高温固化会带来严重的固化应力,如采用高强度常温胶,或再加上一点机械联接措施,则对于温度变化不大的结构,可实现选择性加强的方案。

九

在复合材料的结构中,会遇到断裂和疲劳问题。金属的断裂力学的研究成果,只有一部分适用于纤维增强复合材料,有的虽保留断裂力学中常用的术语,可是实际含义已有很大变化。复合材料的断裂规律有它的特殊性。要提高复合材料的强度和弄清破坏机理,就需要从宏观和微观力学的角度进行研究。

复合材料的疲劳问题,尤其是复合材料结构和接头的疲劳问题,和复合材料的断裂问题一样,是国际上大家都重视的研究课题。复合材料,特别是以树脂为基体的纤维增强复合材料,在高频疲劳试验中,因基体的粘弹性和内耗,试件要发热而改变疲劳特性,因此需要采取措施(例如用气流冷却),以降低温度。复合材料的疲劳判据和金属材料不完全相同,需要进行研究。

复合材料由于基体的粘弹性,其动力特性有别于静力特性。它的动态弹性模量显著

高于静态弹性模量。所以要进行复合材料结构动力特性的研究,就必须进行相应的复合材料动力特性的研究。

复合材料中,纤维和基体的线膨胀系数差别很大。单向纤维增强复合材料,在纤维方向和横向的线膨胀系数差别很大,前者接近于零或为负值,而后者为较大的正值。因此除制造过程中,会产生固化应力问题外,在高温下会产生热应力问题。在高速热流冲击下,又会产生热冲击的问题。反复受热会产生热疲劳的问题。

复合材料在湿热环境下的性能,以及复合材料在各种不利条件下的短期和长期强度,变形和承载能力问题,以及许多其他有关的问题,都值得研究。

环境流体力学(下)

J. C. R. Hunt

[英]剑桥大学应用数学和理论物理系

三、人类活动和环境的一些相互作用

3.1 流体作用在建筑物上的力

当建筑物被风或波浪破坏时,环境以最直接的方式损害着人类的的活动。环境流体力学的主要问题之一是怎样预言,了解,以及在哪些地方有可能利用这种作用在建筑物上的力。在实际中设计大建筑物时,例如就在此地多伦多的C. N.塔,在模拟大气边界层的风洞里测量了作用在此塔模型上的平均气动力和脉动气动力[57]。对于在海上应用的类似建筑物,则主要根据事先的现场观测和水槽中的模型试验来进行设计。

现已确认,对于结构计算,物理模型研究依然是最可靠的手段。随着对这些流动基本理论的了解的加深,例如了解压力和载荷对于结构形式的敏感性或来流的性质这样一些方法的改进,这些试验的解释和外推也已得到发展。

i) 作用于均匀流动中钝体上的力 在这些流动中,分离流动区域的迎风面压力分布可以相当好地用定常无粘计算来描述,这些计算以定常流动假设为依据,以存在自由流线或等压流线来表示分离尾流外缘的假设为依据[58]。但在分离区,平均压力和脉动压力除了用尾流中发展的大涡以外是不能了解的。例如有一个用观测证实的很好的物理论点,联系着涡旋脱落频率 n ,速度 U_0 ,尾流宽度 D_w 和基础压力 P_0 ,即[59]

$$\frac{nD_w}{U_0} \approx \frac{0.18}{[1 - P_0/(1/2)\rho U_0^2]^{1/2}} \quad (3.1)$$

但还没有大涡脱落和增长的一般满意的理论;计算机计算例如 Clements and Maul [60]的研究,对于从钝体上脱落的小离散涡如何集聚成Karman涡街的机制作了很有用的深入了解。但在这些计算里必须作一些假设及离散化的基本假设,而离散化的意义和正确性尚未得到了解。