

## 残余应力在材料设计中的重要性

蒋咏秋

(西安交通大学工程力学系 710049)

国际复合材料设计与制造会议于1994年8月10日至12日在加拿大蒙特利安市举行,与会代表150多人,来自15个国家和地区。这次会议是由加拿大康戈地亚大学主办,主席由该校S.V.郝教授及美国里海大学薛昌明教授联合担任。

宣讲的论文共51篇,可分为九部分:液体复合材料模制(Liquid Composite Molding);设计与应用;金属基与陶瓷基复合材料;编织复合材料;复合材料的冲击;模制、固化与纤维缠绕;振动、屈曲与试验特性;有限元法——理论分析与破坏准则;断裂与疲劳。

从其中有关复合材料设计的一部分论文来看,残余应力在材料设计中的重要性愈益显著,讨论也很热烈。

为了适应高科技发展的需要,材料往往由两相以上的材料组成,因此形成界面。例如碳/碳是一种能耐高温达3000℃的复合材料。为了防止这种材料在高温下氧化,有必要在它表面用陶瓷涂层。同样,在聚合物、金属和陶瓷表面也需要增加涂层以防止或减少腐蚀和磨损。

上述C/C复合材料喷涂温度高达1600℃以上,降至室温20℃,在这样高的温度梯度下,涂层与基体的弹性系数和温度线膨胀系数不相匹配,因此涂层材料往往会产生开裂或鼓包。这是由于界面上的残余应力导致的。

显然,为了防止涂层开裂或鼓包,必需进行残余应力的估算,从而进行材料设计。

同样,在一般纤维增强复合材料的界面上,纤维与基体之间也同样会产生残余应力,导致界面微区的脱粘、纤维拔出和基体开裂,对材料的宏观力学性能和物理性能影响很大。因此在这次会议中,对如何正确估算材料界面残余应力讨论很热烈。

估算复合材料界面的残余应力通常应用材料力学方法。在讨论中,认为这种方法只考虑了轴向的受力平衡,没有涉及纤维周围和基体的结合而引起轴向应力的变化,忽略了泊松效应,必然带来误差,且可能高达30%以上。因此,代表们对会上提出用弹性力学法估算复合材料残余应力的新公式很感兴趣。

这个新方法是采用Whitney-Riley力学模型。即一个基体相材料的圆柱中间嵌入一个增强相材料的同心圆柱,作为弹性力学的广义平面应变问题来处理。利用厚壁筒的公式和组合筒紧配合的压力作用在界面上的原理,所得结果和上述材料力学方法相比较,显然后者偏

小。新的估算公式的第一项是材料力学公式的结果，而第二项达到第一项的40%左右。因此，用材料力学方法估算残余应力偏心，带来的误差是较大的。

在讨论中，有人提出按照同一力学模型计算复合材料界面残余应力，用三维轴对称问题计算残余应力，不但能计算出沿纤维的径向应力 $\sigma_r$ ，还能计算出沿纤维轴向变化的剪应力 $\tau_{zr}$ 和纤维轴向应力 $\sigma_z$ 。沿界面任一点的这三个应力，对分析界面损伤和断裂是同样重要的。当纤维的线膨胀系数 $\alpha_f$ 大于基体的线膨胀系数 $\alpha_m$ 时， $\sigma_r$ 是拉应力，会使纤维脱离基体，这种脱粘是属于断裂Ⅰ型；剪应力 $\tau_{zr}$ 的存在，使脱粘属于断裂Ⅱ型。总起来说，脱粘是Ⅰ型和Ⅱ型的混合型的断裂，轴向应力过大时，还会导致纤维的拔出。

因此，用三维轴对称问题估算残余应力使复合材料界面的损伤机理分析相当清晰，并且据以计算残余应力对材料宏观力学性能（例如断裂韧性）影响的定量分析也有了眉目，这是材料设计工作者要解决的难题。而上述的广义平面应变问题无法计算 $\tau_{zr}$ 及 $\sigma_z$ 。大家都同意这种看法。

有人还提出这些残余应力应该用实验方法来验证。在讨论中，这是难题，因为界面在内部，用激光光弹法无法达到材料内部，用X光衍射法也无法找到界面的确切位置。但由于复合材料中存在着纤维，它的变形与振动的频率之间有一定的线性关系，因此可以用新型的激光拉曼光谱仪来标定这种关系。然后用这种仪器测定复合材料界面上纤维的频率，根据上述线性关系就计算出纤维的残余应变，再根据虎克定律，残余应力也就确定了。

我在会上提出，西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室正在进行这种激光拉曼光谱实验，初步得到的残余应力，用三维轴对称的理论分析与实验结果吻合良好。不少代表向我们祝贺。大家感到有了合理的新公式，可以用来估算复合材料界面残余应力的大小和方向，为定量解决残余应力对材料宏观力学性能和材料设计上了一个新台阶，也是这次会议的一大收获。

至于本文开始提到的材料涂层残余应力估算比较简单，因为涂层很薄，一般以 $\mu\text{m}$ 计，因此和基体的厚度相比，计算力学模型可以把基体作为半无限弹性体。根据界面不脱粘的条件，即基体在界面的应变等于涂层在界面的应变，就可得到残余应力的简单表达式了。和纤维增强复合材料一样，当 $\alpha_f > \alpha_m$ ，涂层中产生拉应力，会导致涂层的开裂。当 $\alpha_f < \alpha_m$ ，涂层中产生压应力，残余应力就会导致涂层鼓包（材料失稳引起的）。

该涂层的残余应力导致开裂或鼓包，因此可据以计算出驱动力。当它到达材料的断裂韧性时，裂纹将产生。根据这个断裂准则，就能计算出防止裂纹产生的涂层厚度。因此涂层的设计也和界面的残余应力密切相关。