

复合材料力学

曾春华

(中国科学院力学研究所)

复合材料力学是近二三十年才发展起来的一门新兴学科,随着现代工业和尖端技术的迅速发展,它越来越受到人们的重视。复合材料力学的研究跟国民经济和国防建设有着极为密切的关系。一些国家已经成功地把玻璃纤维增强复合材料应用在多种型号的固体火箭部件,如美国的北极星 4-3 和民兵式导弹的发动机壳体、大力神导弹的高压气体储存容器,法国的钻石 A 和钻石 B 导弹的第三级发动机壳体以及一些直升机部件等^[1,2],把高模量的碳纤维增强复合材料应用于导弹级间壳体,把铝-硼复合材料用于宇航结构,把玻璃钢用来制造汽车、机车的车身及其配件,制造石油管道和油缸,制造煤矿支柱,电机护环,带电操作工具,高压容器的气瓶等。可见复合材料力学的研究将对宇航、航空、军械装配、造船、石油化工、机械制造、交通运输、建筑和煤炭等现代工业产生深远的影响。

以复合材料代替金属材料来做结构材料,走复合材料的道路,已成为世界材料发展的一个方向。所以复合材料力学的研究是形势和时代的需要,它将呈现强大的生命力和有着非常广阔的前景。

复合材料的性能与种类

要研究和探讨复合材料力学,首先必需了解复合材料的构造、种类、性能、机理和应用情况。复合材料是当前具有最大强度而又最有效用的材料。它一般由两种或多种具有不同物理-力学性能的材料经人工复合而成,由较软的粘合剂基体和高强度的强化材料组成。通常以金属、高分子材料及无机非金属材料为基体,以上述材料的粉末、纤维、须晶、片、丝等制品为增强剂,通过一定的工艺方法(比如缠绕、压制、沉积、喷涂、铸造等)制成单一均质材料。用作基体的材料包括金属(铝、钛、钨等)、塑料(酚醛、环氧树脂、聚砒亚铵等)、橡皮、石墨和陶瓷等。用作增强材料的物质包括各种纤维(碳纤维、玻璃纤维、碳纤维、石墨纤维等)、各种颗粒(Al_2O_3 、 MgO 、 SiO_2 、 ThO_2 、 Cr_7C_3 等)、各种须晶(金属须晶、蓝宝石须晶等)以及各种板状薄片等。在复合材料中,

基体的作用是将高强度的强化材料紧紧地连结起来,保持一定的方向和间距,成为坚强的整体。复合材料可以发挥各种组成材料的优点,克服单一材料的弱点,从而大大地提高材料的综合性能。

现代复合材料的种类很多,包括非金属-非金属、非金属-金属、金属-非金属、金属-金属等各种具有特殊性能的复合材料。就目前发展情况看,大致分以下几种:

1. 纤维增强复合材料:这类复合材料是以各种纤维及其制品为增强物,以树脂为基体的一种复合材料。纤维按一定的规律分布在金属基体中,强化纤维是主要承载成分,基体是次要的强化因素,基体的主要作用是将载荷传递到纤维上。这类复合材料包括硼纤维及其增强的金属基复合材料(比如硼-铝系复合材料、硼-钛系复合材料)、碳纤维及其增强的金属基复合材料(比如碳-铝系复合材料、碳-镍系复合材料)、氧化铝长纤维及其增强的金属基复合材料(比如氧化铝-镍系复合材料、氧化铝-钛系复合材料)、难熔金属纤维增强复合材料。这类复合材料的强度跟纤维的临界长度、增强纤维的体积、纤维长度与直径比值、纤维方向都有关系。

国外对金属基纤维增强复合材料十分重视,通过六十年代广泛性试验、考察和研究,有了很大的进展。对纤维和基体的选择,目标逐渐缩小。目前主要集中在研制利用高温性能好的几种连续纤维增强钛、铝、镍等金属及其合金,以获得能在不同温度范围使用的比强度和比刚度高的复合材料。纤维增强复合材料可用粉末冶金、真空渗入等方法制造。

2. 定向凝固共晶复合材料:这类复合材料是将共晶合金熔化后,在控制热流的条件下进行定向凝固,使共晶从融体中同时成长并整列。由于这种固化工艺自动地解决了须晶的生长、分类和空间分布、稳定性以及与基体结合等问题,因而一步就生产出具有在基体内整列的、很好结合的、均匀分布的须晶复合材料。这类复合材料包括片层复合材料(如 $Al-CuAl_2$ 共晶合金、 $Ni-NiBe$ 合金系、 $Ni-NiMo$ 合金系、 $Ni-NiN$ 共晶合金)、须晶复合材料(如 $Cu-Cr$ 共晶合金、

Al-Al₃Ni 共晶合金、Ta-Ta₂C 共晶合金、NiAl-Mo 共晶合金等)。

国外对定向凝固共晶复合材料的制造工艺、显微组织、结晶学及机械性能进行广泛的研究^[3~5]。简单的一次操作能够生产完整的复合材料,这种在制造上超过其他复合材料之处,是共晶合金定向凝固的最大优点。目前正研制用定向凝固法直接生产形状复杂的零部件。

3. 颗粒增强复合材料:这类复合材料是在金属基体中,均匀分布有超过 25% 的增强颗粒,这颗粒的直径一般大于 1 微米。在这类复合材料中,基体和颗粒共同承受载荷,颗粒的作用是约束延性复合材料中的基体变形,并能使脆性复合材料的基体硬化。这种复合材料是各向同性的,其应力-应变关系有明显的起伏点或有连续流动曲线,复合材料的强度与颗粒直径、颗粒间距和颗粒体积比都有关系。其高温强度依赖于基体受约束流动的性质,也与增强颗粒在高温时的性质有关。这类复合材料可用粉末冶金、渗入法和铸造法制造。它在结构部件、切削工具、钻头、铸模、冲床、透平叶片和电极上广泛应用。

4. 弥散增强复合材料:这类复合材料是在金属基体上,均匀分布有 1~15% 的增强颗粒,颗粒直径为 0.01~0.1 微米。基体是主要承载部分,增强颗粒的作用是阻碍基体的位错运动,从而使基体达到强化的目的。基体的加工硬化依赖于颗粒的形状、大小和比例。这类复合材料也是各向同性的,其应力-应变关系有起伏点,破坏时的伸长为 0.1~15%,其强度依赖于颗粒直径、颗粒间距和颗粒体积。它主要用于改善材料的高温强度。这类复合材料可用粉末冶金、内部氧化、电化学等方法制造。它具有较高的蠕变强度、高温强度好,因此在高温环境下工作的零部件广泛采用它。

现代复合材料应用之所以十分广泛,因为它在物理-力学性能等方面具有许多优点:

(1) 有较高的比强度和比刚度:碳纤维复合材料的比强度为钢的 3 倍,比刚度为钢的 4.8 倍,比弹性模量为钢的 4.4 倍;玻璃钢的一般抗拉强度在 2500 公斤/厘米² 以上,它的比重却只有钢的 1/5;硼-铝复合材料的拉伸强度可达 21000 公斤/厘米² 以上,比钢高 9 倍多^[6]、比铝合金高 3.4 倍,比强度为钛的 2~3 倍,比刚度为钛的 3~5 倍。这特性对航空和空间技术发展相当重要。

(2) 有较高的疲劳强度:硼-铝复合材料的疲劳强度能达到拉伸极限强度的 50~80%,而标准铝合金只达 30%。一般复合材料的疲劳强度都可达 50~90%。而钢只达 28% 左右。复合材料疲劳强度显著提高,对承受变幅载荷的结构件来说是十分可贵的。

(3) 耐高温并具有良好的隔热性能:玻璃钢的导热系数为 4.5×10^{-4} 卡/厘米·秒·度,为铝的 1/100,用玻璃钢做的发动机罩夏季不烫手、冬季不需另加保温套;硼-铝系复合材料可在较高的温度(316°C)中使用,纤维增强复合材料一般能在 1000°C 以上工作(如镍基复合材料能在 1100~1300°C 正常工作);钨纤维增强复合材料可经受 3400°C 高温^[7]。

(4) 耐腐蚀性能好:比如玻璃钢具有良好的化学稳定性,在 60°C 以下有很高的耐酸耐碱性能。

除此之外,复合材料还具有耐冲击、减振性能好、容伤性(发现裂纹后仍可承受载荷,可检查和维修,破坏前也有征兆)、电绝缘性能好、抗磁性好、使用寿命长、二次损坏小并且易成型加工等优点。

复合材料力学

复合材料力学是从六十年代中期随着复合材料的迅速发展而逐渐形成的新学科。那么什么是复合材料力学呢?复合材料力学就是研究复合材料在各种条件下的变形、应变、应力和破坏的力学,它研究复合材料的物理-力学性能以及复合材料结构在各种外载条件下的承载能力,如强度、刚度、稳定性和失效等。由于复合材料在现代工业中得到广泛应用,因此要更合理地利用复合材料的性能,使得结构件安全可靠,就必须深入研究所碰到的一系列力学问题。

复合材料力学是一门综合性的学科,涉及的知识领域很广,关联的学科有数学、物理、化学、冶金、机械以及力学的各个分支(包括弹性力学、塑性力学、粘弹性力学、冲击、振动、稳定、疲劳和断裂力学等)。它的研究范围既包括微观机制,又包括宏观力学行为,既有高深的理论研究,又有大量的应变-应力分析和实验技术。综合起来,复合材料力学的研究大致包括下列几个方面。

复合材料的微观力学方面:主要研究纤维和基体的两相性(包括它们之间的不均匀性和相互作用性)、复合材料破坏的机理,研究在简单加载和复杂加载条件下复合材料的应力-应变场计算、应力应变与破坏准则之间的联系,确定复合材料的弹性常数等。一般都是从复合材料的微观构造出发,把复合材料看成是由基体和增强材料所组成的不均匀材料,考虑基体和增强材料的特性、增强材料在基体中的比例和几何排列、基体和增强材料的界面结合等,引进一些基本假定后采用弹性力学、粘弹性力学、塑性力学来模拟复合材料的基本性能、建立基本方程、计算出复合材料的微观应力、应变和宏观应力、应变,建立微观与宏观的联系等。

复合材料的宏观力学方面:主要包括复合材料的结构力学和动力学,主要研究和探讨连续介质力学问

对金属疲劳破坏机理的认识

岑继平 (洛阳农机学院)

金属疲劳问题的研究已有一百多年的历史,但至今尚无一个可靠的、精确的理论,以解释金属疲劳过程的各种现象和本质。在疲劳过程中出现的现象和主要问题有:在循环载荷作用下,何以应力远低于

静强度极限时即能造成疲劳破坏?疲劳破坏为何象脆性材料一样,没有明显的残余变形,而具有突然性和高度局部性?疲劳裂纹是怎样形成、扩展,以致使零件失效的,等等。对这些问题的正确解释,是深入研究金属疲劳问题的关键。下面谈谈我的看法。

零件(或试件)的疲劳破坏是应力集中的结果。而应力集中则是因零件中存在着各种缺陷而造成的。气孔、微裂、裂纹、原子位错、环境介质等缺陷在循环应力的作用下,都会导致应力集中。疲劳破坏过程中另一个重要的特点是应变集中,而它的出现是应力集中的结果。由于应力的集中,集中应力点应力可能比材料强度极限高很多倍,所以疲劳破坏所需的外加应力在远低于强度极限时就能发生。

单晶和纯金属材料缺陷多存在于晶体内或位错结构中,这些缺陷的存在导致应力集中,使试件局部产生滑移和一些塑性变形,而后出现滑移带。滑移的特点是:虽然滑移带因塑变而产生硬化,但滑移和塑性变形仍然在这些区域内进行,没有向较软的周围基体部分扩

展。发生这一现象的原因是:应力集中效应仍然产生在因滑移和塑性变形而继续产生更大的缺陷的区域内;由于应力因缺陷而集中,已发生硬化的滑移带内的应力仍比周围基体应力要高得多。滑移带的滑移及塑性变形继续进行至产生“侵入”“挤出”,“侵入”的形成就相当于缺口(或微裂)。微裂又成为新的更大的应力集中点,为发展成为破坏性裂纹创造了条件。滑移带周围的材料虽软,因没有或基本没有集中的应力,所以应力仍低于滑移带内的应力,因而滑移及塑性变形不易转移到其他地方。这一现象在实验中充分得到了证明。这就是疲劳破坏过程中塑性变形区小且具有高度局部性的重要原因。

多晶体材料中,若存在夹杂物、硬点等等缺陷(尤其是其处于零件表面时),在循环应力下,将在软硬交界处,或夹杂物、硬点与基体交界处产生应力集中。集中应力的多少,根据夹杂物的形状不同可达施加应力的2~3倍。

当循环应力值达到某一数值时,上述缺陷处的集中应力值将达到很大。这样,在某一瞬间缺陷处

题、确定复合材料结构的宏观应力-应变关系、建立平衡方程、位移和应变关系,加上适当的边界条件,从而进行求解。它还研究复合材料的强度、稳定、变形、应力和振动冲击等问题,建立复合材料的强度规范和屈伏破坏准则,为工程设计提供资料,并用理论和实验计算复合材料结构的寿命。

复合材料的疲劳断裂力学方面:主要研究复合材料结构在静、动载荷下裂纹的形成、裂纹的生长、裂纹的扩展速率及断裂的机理与规律、研究疲劳破坏和断裂判据,应用数理统计方法预计复合材料的疲劳与断裂,把线弹性断裂力学理论用到复合材料问题上以及研究非均匀介质或界面裂纹并将理论推广到复合材料中。比如对于纤维复合材料,就可根据断裂力学的方法分析均匀各向异性材料裂纹尖端的应力-应变场,并确定其强度或用有限元方法确定其寿命。

对于复合材料来说,理论研究和实验研究都很重

要,由于影响复合材料力学性能的因素很多(比如纤维的连续与否、纤维的取向和间距、界面结合情况以及温度效应等)、制造工艺对复合材料性能和质量的影响很大,所以必须在大量的实验基础上(尤其是当前理论研究还不成熟情况下)才能得到较准的复合材料力学性能;为搞清复合材料的破坏规律以及影响因素的影响程度,就必需从理论上进行深入的研究,才能减少实验工作量和从较少的实验中获得最佳结果。

目前,在理论上确定复合材料的物理-力学性质有两条途径:一是把复合材料看成一种连续介质,其物理-力学性质是坐标的随机函数;另一是选择具有规则的双向周期纤维结构的连续介质,作为单向纤维增强复合材料的力学模型。

应该指出,目前复合材料力学的研究尚处于刚开始的探索阶段,特别是理论研究方面尤需大力加强。

可能突然被撕裂,成为初始微裂。撕裂就是在高应力下,对物体的强行破坏。因为撕裂量很小,在随后的循环应力的作用下及材料的弹性恢复作用,微裂重新吻合,并因分子亲和力的作用而粘合在一起^①。下一次循环再要把它重新拉开仍须要很大的力才能办到,所以微裂并不是连续发展的。这样一开一合进行相当多的次数以后,两个裂面将因环境介质、微量变形等原因而不能做到重新粘合。之后,由于集中应力的作用,再次向前撕裂一点,微裂得以扩展一点(鲍申格效应应起到促进的作用)。这个过程重复地进行,微观裂纹就会发展成较大的裂纹。发展成较大裂纹(临界尺寸裂纹)所需的时间,根据材料的性能不同而异,这就是疲劳破坏需要一定时间和一定的循环次数的原因。也是微裂扩展的机理。

裂纹的两表面在高应力下被撕开时,产生塑性变形量很小,随后两表面反复挤压,使两表面光滑并产生一定的塑性变形。由于塑性变形而产生加工硬化,使金属不易再进行塑性变形,从而使金属产生疲劳强化现象。对于已冷作硬化的材

料,则与上述情况相反,在撕裂前或裂尖处的材料受到正反应力的作用,原来塑变及位错缺陷处于不稳定的大量原子,可借助交变应力恢复至位能最小的位置,因而降低硬度,这就产生疲劳弱化。实验证明,试件冷作硬化程度愈大,疲劳弱化愈明显。这说明疲劳强化与弱化是疲劳破坏过程产生的现象,并不是由于强化或弱化才导致疲劳破坏。

当裂纹发展到临界尺寸时,裂纹的扩展将发生质的变化,扩展的速度大为加快,每次撕裂的面积也逐次增大,这是由于裂纹失稳扩展的结果。由断口的海滩状组织表面可以清楚地看出这一点。

裂纹加速扩展的结果,导致承载力断面很快缩小到应力达到的强度极限断面,但因外力为循环应力(即正反应力作用于零件上),作用时间短暂,材料来不及应变,所以不会立即断裂。但是此时裂纹扩展仍按原扩展的势头进行,且扩展的速度愈来愈快,剩余的承力断面急剧缩小,应力就随之急剧增加,很快就会比强度极限高出很多倍,此时才足以短时间内把零件(或试件)拉断。

也就是说,只有很高的应力才能做到短时拉断,也只有在短时内造成失效,剩余断面才会被拉断。由于材料基本上来不及应变就被拉断了,所以断口就象脆性材料断裂一样,没有明显的残余变形。这种性质的断裂称为瞬断。这些就是疲劳破坏的突然性和脆断的原因。

以上认识,如有不妥之处,欢迎给予指正。

^① 粘合现象对材料疲劳寿命有重要影响,粘性强的材料疲劳寿命相对地要高;在渗透性强的介质中工作的零件疲劳寿命显著地降低就是介质破坏重新粘合的结果。

自然杂志(胶版纸本)

征求订户

每期定价 0.80 元,全年 9.60 元(包括平寄邮费),挂号全年另加 1.44 元。

订费请寄上海瑞金二路 450 号自然杂志编辑部。

报纸本仍由全国各地邮局发行。

研究动向与展望

复合材料从它问世那天起就显示出强大的生命力,近二十年来,美、英、日、法等国家对它的应用研究如雨后春笋,特别是自六十年代中期开始,各国竞相发展并致力于复合材料和复合材料力学的研究。其中宇航和航空结构上的应用进展最快,如美国经过自 1967~1968 年以来结合现有有机种对各种受力程度不同的部件包括翼尖、襟翼、方向舵、水平尾翼等一系列飞行试验考核。研究结果表明,采用复合材料不仅性能好而且可使结构重量减轻 20~30%。用硼铝复合材料代替现有的铝制件,结构总重量减轻 23%。

美国金属学会技艺知识咨询委员会曾预言:在 1970~1980 年,具有拉伸强度极限为 100~20 万磅/吋²的纤维将用于复合材料;在 1980~1990 年,复合材料将兼备钢的强度和低成本并具有塑料、陶瓷非金

属材料所期望的性能;到 2000~2010 年,在材料的利用和结构的强度方面,基于单一整体材料作出的设计将不能与采用复合材料的设计相竞争了。

复合材料的出现为材料科学的发展展示出新的前景,复合材料的发展又为复合材料力学的发展打下基础,而复合材料力学的成长又带动了一系列技术和科学领域的前进。

- [1] Morris E. E., Proc. First Joint Aerospace and Marine Corrosion Technology Seminar (1968) 97
- [2] Spincourt J., Interavia, 27, 3(1972)
- [3] Kerr, Winegard, J. Metals, May (1966) 563
- [4] Kraft, J. Metals, Feb. (1966) 192
- [5] Salkind, Lemkey, George, Whisker Technology (1970) 344
- [6] Toth I. J., Brentnall W. D., Menke G. D., J. Metals, 24, 11 (1972)
- [7] Forest J. D., Composite, 3, 1 (1972)