

纤维增强金属基复合材料 及其在航空发动机上的应用

卿 华 江和甫

(中国燃气涡轮研究院 成都·610500)

摘要 回顾了纤维复合材料,尤其是金属基复合材料的发展及应用情况,对金属基复合材料应用中涉及的一些问题进行了讨论。鉴于西方发达国家航空新材料研究以及在航空发动机上应用取得的巨大成功,和我国金属基复合材料的研制、应用落后的现状,呼吁在未来航空发动机发展规划中要加大对金属基复合材料及其应用的研究,重视建立适合金属基复合材料结构强度和寿命预测分析系统。

关键词 纤维复合材料 金属基复合材料 发动机强度

Fibre - reinforced Metal Matrix Composites and Application on Aircraft Engine

QING Hua & JIANG He - fu

(China Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500)

Abstract Fibre composites, especially the development and application of metal matrix composites, have been reviewed in the paper. Discussion centers on problems about metal matrix composite applications. Western developed countries in the investigation of new aeronautical materials and application have made tremendous achievements, while China is lag behind in the same field. It is appealed that strength should be made to investigate metal matrix composites & application. It is also important to establish a predication analysis system of structure strength and life of metal matrix composites in the development of aircraft engine.

Key words fibre composites, metal matrix composites, engine strength

1 纤维增强复合材料

为了实现并不断提高航空发动机性能和结构效率,需要成功地应用先进材料。就结构材料而言,要求材料具有高的比强度、比刚度和使用温度。但是,从已经取得很好发展的常规材料的发展趋势来看,即使把设计技术和目前的常规材料发展到高度完善和成熟,也很难进一步获得重大的收益。可以说,先进航空发动机对材料的要求已经接近常规材料的极

限。而进一步大幅度提高发动机的能力将愈加依赖采用先进的材料和新颖的设计方案的综合。目前,各国航空发动机生产商正在研制的或应用的先进材料主要包括:高温增强聚合物基复合材料、钛铝和镍铝金属化合物、金属基复合材料以及陶瓷基复合材料^[1~5]。

顾名思义,复合材料是由两种或多种性质不同的常量固体组分构成的材料。由多组分构成的材料很多。仅当材料各组分具有明显不同的物理性质,

组分间存在明显的界面,且材料的性质也明显不同于组分性质时,才能把这种材料称为复合材料。复合材料的基本特点是各向异性、可设计性和结构特性。复合材料作为一种有生命力的工程材料近几十年来得到了蓬勃的发展,尤其是纤维增强复合材料。这类材料的种类繁多。它们主要分为以下几类:石墨纤维/树脂基复合材料(PMC)、陶瓷纤维/金属基复合材料(MMC)和陶瓷纤维/陶瓷基复合材料(CMC)。高强度、各向异性、低延伸率是这些材料的共性。但是不同的体系,其差异是很明显的,有各自的适用范围。

自20世纪50年代以来,随着尖端技术的发展,特别是航空、航天技术的发展,纤维增强复合材料越来越受到人们的重视。早在1947年就开始了玻璃纤维缠绕火箭发动机壳体的研究,并取得成功,促进了一系列研究项目的开展,使纤维复合材料从60年代起就在火箭、导弹、飞机等重要承力部件获得了实际应用。连续纤维增强的复合材料在航空发动机上也存在广泛的应用前景。PMC起步比较早,是最早应用于航空发动机的复合材料。

纤维复合材料的发展和纤维制备是密切不可分的。新型连续长纤维的研制和应用在60年代获得了明显的进展。首先是硼和碳的连续纤维,也包括难熔化合物和金属的连续纤维。这些纤维的强度一般为 $250\text{kg/mm}^2 \sim 300\text{kg/mm}^2$,对基体有明显的增强作用;同时,高温性能也有所提高。60年代中叶发展起来的硼-环氧树脂和碳-环氧树脂,是对玻璃-环氧树脂的一个改进。这些新型复合材料的比强度与玻璃-酚醛树脂大体相当,而比刚度为其4~5倍。这使结构承受压力和动载荷的能力大为提高,使用温度也有所改善。因此,对它们的应用研究(美对硼-环氧,英、美、日、法对碳-环氧)多如雨后春笋。其中,在飞机结构上的应用进步较快,并已经取得了相当好的结果,通常采用这些材料的结构可减轻结构重量20%~30%。但是,玻璃纤维复合材料以及其它PMC的弹性模量和剪切强度较低,高温性能也较差,限制了它们在航空发动机重要承力部件上的应用。虽然PMC已经应用于发动机,但是主要应用于发动机的冷端部件,如短舱、风扇的推进锥、反推力装置、外涵道、风扇机匣包容环、风扇系统等。

以树脂为基的复合材料的使用温度有很大的局限。在长时间使用的条件下,环氧树脂一般不超过

200℃,正在发展的聚酰亚胺的也不超过300℃~350℃。即使在较低的温度下,树脂基的弹性模量和强度也不高,在大的负荷应力下容易开裂。特别是单向复合材料的层间强度决定于基体,而树脂基的强度低。虽然可以通过纤维交叉排列来改善偏轴方向的性能,但又会使轴向性能削弱,致使复合材料的特点得不到充分发挥。为了得到在更高温度下使用的高比强度和高比刚度的材料,自60年代中期开始,各国竞相发展纤维增强金属基复合材料(Fiber Reinforced Metal-Matrix Composites)^[6]。

2 纤维增强金属基复合材料

人们发现,纤维状增强物能够最有效地增强金属基体。虽然对作为增强物的纤维的要求随不同的基体合金而改变,但如下几点性能差不多是对增强纤维共同的要求。

(1) **高强度** 纤维的高强度首先是为了满足复合材料强度的需要,其次还能使加工制造过程简单。

(2) **高模量** 对于金属基复合材料,这是为了在复合材料承载时基体不致发生过大的塑性流动。玻璃纤维的模量比较低,因此很少用做金属基体的增强纤维。

(3) **容易制造和价格便宜** 尽管目前增强纤维的制造并不容易,价格也相当昂贵,但如果要在重要结构上扩大应用,这种工业生产的要求是重要的。

(4) **化学稳定性好** 对所有的纤维来说,对空气和基体的稳定性都很重要。

(5) **纤维的尺寸和形状** 对于采用固相制造法的金属基复合材料,大直径的圆纤维更加合适。一般用于增强金属的新型纤维的直径大于 $100\mu\text{m}$ 。借助金属基体的塑性流动,纤维和基体容易结合。如用液态金属制造法,由于纤维表面积小,化学反应也比较小。

(6) **性能的再现性或一致性** 对于脆性材料或高强度材料,这种要求始终是极重要的。

我们知道,复合材料的强度,在很大程度上取决于纤维束的强度。到目前为止,可用于增强金属的新型纤维并不多。对钛基而言,主要有SiC纤维,如SCS-6。

被纤维增强的金属基体大致可分三类:

a 低温合金,如锂、铝合金;

b 中温合金,如钛合金;

c 高温合金,如镍基高温合金、TiAl 化合物、钨合金。

当前,金属基复合材料主要应用于发动机的中、低温部件。常用的金属基复合材料是纤维增强铝基金基、钛合金基复合材料。

金属基复合材料,尤其是纤维增强钛基复合材料,是先进航空承力部件的候选材料。其最主要的优点就是它具有高的比强度和高的比刚度。用这样的材料加工部件,其重量将比传统的合金材料部件轻。而且,金属基复合材料是可以设计的,通过合理的搭配,可以实现特殊的用途。金属基复合材料的应用往往决定于航空工业的特殊要求,看是否满足产品的不同形式。比如,单向纤维增强的复合材料环和杆等用于发动机,而层板和梁则适合于飞机结构。另外,和一般的金属材料相比,金属基复合材料的性能对温度不太敏感,由于纤维的存在,还增加了基体材料抵抗裂纹扩展的能力。

MMC 复合材料至少具有耐 538℃ 温度的潜力并且有可能达到 980℃ 的高温。同目前决定发动机工作温度范围的现有的镍基合金相比,钛基化合物可以更大限度的减轻结构重量。例如,刚度和强度相当的钛合金的密度仅仅是镍基合金的一半。此外,MMC 是唯一正在研制并具有固有延展率的强基体复合材料。正打算把这些材料用在高载荷的结构部件上,如轴、涵道、盘。

金属基复合材料的发展离不开航空航天工业的发育和支持。在美国,高性能涡轮发动机综合技术计划(IHPTET)是推动金属基复合材料在涡轮发动机中得以应用的首要的推动力。这个计划的目的是通过采用先进的材料实现新结构和采用先进的气动设计等完整的计划提高发动机的推重比,减小燃油消耗率。金属基复合材料发展的另外一个推动力来源于高速飞机。当飞机的速度超过 5 马赫,则需要能承受更高温度的高比强度和比刚度材料。对高速飞机,除了结构梁,还需要能承受两向或多向应力的大尺寸的复合材料板。而这些能力正是金属基复合材料拥有的。

在航空航天工业界的大力推动下,金属基体纤维增强复合材料得到了迅猛的发展。由于金属基复合材料的发展,使材料领域发生了一场革命^[5]。材料性能的提高必然带来其功能的改变和应用范围的

扩大。反过来也推动了航空航天工业的发展。和未增强的金属合金相比,金属基复合材料拥有更高的刚度,更高比强度,而且对疲劳具有更好的抵抗力。因此金属基复合材料已经被众多的要求重量轻、可靠性高的结构所选用。

总之,航空航天技术的需要推动了复合材料的发展,反过来,航空航天技术的发展也越来越依赖于复合材料等先进材料的发展。已经研制和试验了用于发动机机匣、盘、压气机叶片以及尾喷管的复合材料。用复合材料制造控制箱体、导管和作动器,能大大地减轻结构重量。金属基复合材料在结构设计上的应用依赖于一系列的因素,包括:成本,加工特性,机械特性,应用可靠性,等等。

3 金属基复合材料的应用

当今,世界各国研究者正在雄心勃勃追求高性能、高可靠性的航空发动机,以期在世纪之交的军事和民用航空推进系统领域占据有利地位。在 20 世纪 70 年代末 80 年代初,欧美各国积极开展高推比发动机的预研工作,先后制定了一系列发展发动机技术的计划,如美国的先进战术战斗机(ATF)发动机计划和高性能涡轮发动机综合技术计划(IHPTET),以及英国和欧洲的先进核心军用发动机(ACME)计划等。这些计划各有特点,但总的目标是一致的,即到 21 世纪初使军用发动机的推重比达到 15~20。其中最具有影响的是 NASA 和美国国防部开展的 IHPTET 计划,企图到 2003 年时使发动机推重比达到 20,燃油效率提高一倍。IHPTET 计划采取变革性的技术途径,综合运用发动机气动热力学、材料、结构设计和控制方面突破性的成就,大大提高涡轮前温度,简化结构,减轻重量,实现最佳性能控制,达到计划预期目标。可以说,航空发动机技术呈现出加速发展的态势^[4,5,7]。

在最近几十年中,主要由于基础技术的发展和材料研究取得进步,使涡轮推进系统的能力有了显著提高。进一步的提高将要求改变结构设计、材料生产和加工工艺。IHPTET 计划的实现将使 2020 年的战斗机发动机呈现出一种崭新的结构。与推比 8 一级的发动机 F110 比较,未来的发动机将有以下主要特点:风扇由三级减少为一级,叶片带后掠,空心;压气机由九级减少为三级,第一级带后掠。转子为

鼓筒式无盘结构,由钛基复合材料制成,与传统结构相比,可以减轻重量 70%之多^[5]。典型的压气机转子如图 1 所示。

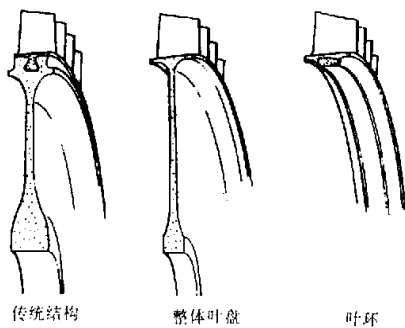


图 1 典型的压气机转子结构

未来的发动机无疑将比目前的发动机轻,部件将在更高的温度下工作。为达到这些目的必须依靠先进的材料。新材料是实现 IHPTET 计划的关键。由于大量采用复合材料、非金属材料,发动机正在由目前的金属材料变成非金属发动机。主要的材料有:耐温更高的超级合金和隔热涂层、金属间化合物(钛-铝和镍-铝)、树脂基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料和碳-碳复合材料以及非结构材料(轴承润滑剂)。专家预测,在 2020 年以前飞机发动机结构材料中金属基和陶瓷基复合材料所占比重将达到 50%^[2,4,5]。

普惠公司所进行的研究表明,转子占发动机总重量的 24% 左右。而且转子直接影响其支承结构设计,因此对发动机总重量有进一步的影响。所谓转子就是指叶片、叶片连接部分、封严、阻尼器、盖板、盘、轴等。盘是转子的主要部件,除了要承受自身的惯性载荷外,它还要支承叶片和封严等部件。如果能减少这些部件的重量,就能大大地降低轮盘的重量。基于这些原因,转子部件的材料就需要有高的比强度、比刚度。金属基复合材料,典型的有陶瓷纤维增强钛基复合材料,通常被认为是未来发动机的最佳候选。因为这些材料不仅轻,而且在较高工作温度下仍然能保持其强度。

从现有的文献看^[4,5,7],金属基复合材料目前在发动机上应用主要处于试验研究阶段,还未广泛进入具体型号应用,尤其是转子部件。原因是金属基

复合材料的制备工艺复杂、成本昂贵,界面稳定性难于控制,性能波动大,稳定性相对较低,以及缺乏应用经验。尽管如此,由于与金属相比,金属基复合材料具有的独特性能,被认为是未来高性能航空发动机的必选材料。国外曾经对金属基复合材料进行了很多试验和应用研究。1976 年以来,PW 公司将碳纤维/铝复合材料的风扇叶片装在 F100 原型上进行过台架运转,证明这种材料适应性好、很有发展潜力。GE 公司用 SCS-6/Ti-6-4 复合材料制造低压涡轮轴(体积含量 35%),并进行了试验。据称,如果 F110 的低压涡轮轴用该种材料制造,发动机可以减重 68kg—其中轴本身减重 9kg。罗·罗公司成功地研制了宽弦复合材料空心风扇叶片。

在未来的发动机中,金属基复合材料所占的比例无疑将越来越高。预计到 2020 年前,其所占比重将达到发动机结构材料的 1/4。

新材料是实现 IHPTET 计划的关键。对于新材料,特别是复合材料,必须采用全新的结构设计才能充分发挥其作用。骨架式结构是一种采用先进的材料(主要是金属基复合材料)、具有高比强度和比刚度的主传力路线结构,它能大幅度提高结构效率。骨架式结构除了因采用先进材料使结构重量减轻外,还可以通过减小振动和变形来提高发动机的性能。用金属基复合材料制造的风扇外涵机匣、发动机主轴和一些承力静止结构已经进行了试验。美国等发达国家还争先研究将金属基复合材料应用于转子部件。金属基复合材料增强的压气机转子已经完成了部件试验。主要的新结构有:空心风扇和压气机叶片、整体叶盘、整体叶环、无盘转子、骨架承力结构设计等。有关压气机的新结构设计的减重效果如图 2 所示。

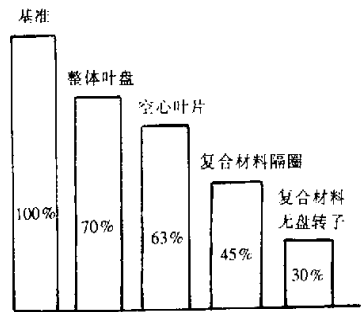


图 2 压气机新结构的减重效果

金属基复合材料的强度和疲劳性能具有明显的各向异性,失效模式也和传统的金属材料不同。因此,预测金属基复合材料的强度和寿命的工作更加复杂。至今,还没有广泛适用适合工程设计的疲劳寿命预测方法。为了在保证可靠性的前提下充分发挥、挖掘材料的潜能,必须建立合适的强度评估、寿命预测系统^[7-8]。如果分析能力得到提高,在部件研制中需要的试验将减少,设计周期也将缩短。为了这个目的,从1988年起,NASA刘易斯研究中心和普惠公司开展了一个为期4年的合作研究计划^[7]。其直接目的为:建立和验证金属基复合材料,特别是TMC材料的疲劳寿命预测模型,重点放在微缩的TMC材料增强环的静破坏载荷和疲劳寿命预测建模上。为了支持和引导疲劳寿命建模工作,还开展了相应的材料试验和TMC材料增强环的试验件试验。在研究中,TMC材料采用的是SCS-6/Ti-15-3,其纤维体积百分数大约为35。该计划的成果引起了美国航空界的高度重视,并吸引了更多的参与者。在1993年,代表美国政府的刘易斯及怀特试验室和5个飞机发动机生产商达成了更大的为期5年到10年的MMC寿命预测研究计划。可以说MMC寿命预测研究计划是同HiTEMP计划一样重要的,是IHPTET计划的重要内容。

4 我国金属基复合材料的研究和展望

在我国高推比发动机设计中,减重工作非常艰巨,没有高性能的材料和强度设计方法,减重无法成功。国外高推比发动机设计的经验表明,发动机重量的减轻主要从冷端部件入手。采用高性能的金属基复合材料和先进的结构设计方法,是解决目前我们困境的希望。基于这个现实,中国燃气涡轮研究院已经开始开展SiC纤维增强钛基复合材料叶环结构强度及寿命课题预先研究。但是,研究要取得大的、实质性的进展,还有待于我国金属基复合材料研究方面的突破。这需要我国在金属基复合材料的研究

和应用研究方面有更大的投入。

我国航空发动机中复合材料的应用还很少,处于探索阶段。金属基复合材料的制作成本高,工艺水平要求严;在先进金属基复合材料的研制以及探讨应用于发动机方面,国内更是处于起步阶段,仅西北工业大学等少数单位正在进行研究工作。由于国际先进国家的发动机发展已经进入一个加速发展的阶段,为了跟上国际航空技术的发展速度,不至于使差距进一步拉大,我国应该重视先进材料以及相应的结构强度设计的研究。尤其在“十五”规划中应该注意到这一点。广泛借鉴国外先进经验,实现我国航空发动机技术的跨越式发展。

参 考 文 献

- 1 Jeal R H. Meeting the High Temperature Challenge - The Non - Metallic Aeroengine. Metal and Materials, 1988
- 2 推比 15 - 20 的航空发动机技术的发展途径和对策. 航空情报研究报告 HY90015, 1990
- 3 Rolls - Royce, The Impact and Requirement of New Material on Aeroengine, PNR90671, 1989
- 4 洪杰, 吴炜. 复合材料在航空发动机中的应用. 中国航空学会第十届航空发动机结构强度与振动会议文集. 2000
- 5 综合高性能涡轮发动机技术 (IHPTET) 计划文集. 航空科技情报研究所. 1992
- 6 Metelfe A G. Current Status of Titanium - Boron Composites for Gas Turbine. ASME - 69 - GT - 1
- 7 MMC Life System Development (Phase I) - - a NASA/Pratt/Whitney Life Prediction Cooperative Program. NASA Reference Publication 1361, 1996
- 8 齐红宇, 温卫东. 纤维增强复合材料的疲劳模型研究. 中国航空学会第十届航空发动机结构强度与振动会议文集. 2000
- 9 我国航空复合材料技术发展展望. 航空制造工程. 1997 (4)
- 10 张国定, 赵昌正. 金属基复合材料. 上海交通大学出版社. 1996

下发生了负方向上的回蠕变行为。A1203/ZL109短纤维复合材料卸载后的蠕变曲线可以分为两个部分，瞬时的弹性变形阶段以及随后的应变收缩阶段(即回蠕变阶段)，瞬时变形阶段的应变大致等于复合材料的弹性变形。A1203/ZL109短纤维复合材料回蠕变阶段的蠕变速率随松弛时间的延长而减小，在主蠕变的不同阶段卸载后，回蠕变应变随着主蠕变时间的推移增大，同时增大的幅度越来越小。回蠕变后再加载，再蠕变过程中的最小蠕变速率不受加载前回蠕变的影响。

应用基体合金局部区域的蠕变本构方程和应力松弛方程，定性地解释了A1203/ZL109短纤维复合材料的回蠕变行为，以及回蠕变速率随松弛时间减小的现象。基于基体合金蠕变引起的纤维与基体的应力松弛规律，建立了短纤维复合材料的回蠕变本构方程应用此方程成功地模拟了A1203/ZL109短纤维复合材料的回蠕变行为。

本文建立了能用于预测A1203/ZL109短纤维复合材料蠕变行为的有限元分析理想单元模型，通过有限元分析获得A1203/ZL109短纤维增强复合材料在高温恒载荷和变载荷条件下蠕变过程的应力场分布和应变变化情况，对A1203/ZL109复合材料最小蠕变速率的预测值与实验值吻合较好。有限元分析表明，A1203/ZL109复合材料的蠕变变形主要受到纤维的蠕变抗力和纤维/基体界面间应力传递的控制。增大纤维的长径比有利于应力在两相间传递，从而提高短纤维增强复合材料的蠕变强度。

本文还探讨了不同增强体对复合材料蠕变性能的影响机制，研究发现增强体的形状与尺寸决定复合材料的蠕变性能。体积分数一定时，增强体尺寸越小，复合材料的蠕变强度越高。研究表明，原位合成超细颗粒增强复合材料具有比常规复合材料更好的高温蠕变性能。增强体的形状则决定了复合材料的变载荷蠕变行为。短纤维增强复合材料发生回蠕变的原因是短纤维的弹性恢复作用；颗粒增强复合材料由于门槛应力的存在以及缺少短纤维的弹性恢复作用，在低的松弛应力下没有发生蠕变变形。未增强的合金材料发生滞弹性变形是由于位错环的螺旋位错部分快速收缩或长大引起的。

4. 期刊论文 [高庆. 康国政. Gao Qing. Kang Guozheng 短纤维复合材料应力传递的修正剪滞理论 - 固体力学学报](#)
2000, 21 (3)

对短纤维增强金属基复合材料应力传递的传统剪滞理论进行了修正和改进. 修正理论中包含了一些在传统剪滞理论中没有很好考虑的因素, 包括纤维端部的正应力传递和界面的结合状态. 推导得到了描述短纤维复合材料应力传递机制的一些公式. 通过与有限元分析得到的应力传递结果比较发现, 修正理论对应力传递的描述准确性明显优于传统的剪滞理论. 修正是合理而必须的.

5. 期刊论文 [于思荣. 何镇明. 任露泉. Yu Sirong. He Zhenming. Ren Luquan ZA22/A1203短纤维复合材料高温拉伸行为](#)
[为的理论分析 - 复合材料学报](#)1998, 15 (3)

采用日本产AG-10TA型电子万能试验机对挤压铸造ZA22/A1203短纤维复合材料的高温抗拉强度进行了测定, 并用Friend修正的混合律模型对该试验结果进行了理论分析, 结果表明ZA22/A1203短纤维复合材料及其基体的强度均随温度升高而下降, 但ZA22合金基体的强度下降幅度更大. 任一纤维体积分数的复合材料, 均存在一临界转变温度 T_{crit} ; 超过该温度, 复合材料强度大于基体强度. 纤维体积分数越大, 所需临界转变温度越低. 在本试验中, V_f 为15%和20%的复合材料的 T_{crit} 分别为123℃和187℃. 任一温度下, 复合材料均存在一临界纤维体积分数, 超过该纤维体积分数, 复合材料强度高于基体强度. 温度越高, 临界纤维体积分数越低. 对ZA22/A1203短纤维复合材料来说, Friend模型中的经验参数 C^* 的取值随温度升高而降低.

6. 期刊论文 [康国政. 高庆. KANG Guo-zheng. GAO Qing 短纤维增强金属基复合材料基体中的应力分布及其变形特征 - 复合材料学报](#)2000, 17 (2)

基体行为是影响随机分布短纤维增强金属基复合材料力学性能的一个重要因素. 本文作者将在短纤维复合材料单纤维三维模型的基础上, 借助于弹塑性有限元分析方法, 研究在加载过程中, 不同纤维位向和界面结合状态下基体中的应力分布情况及基体的变形特征. 研究表明, 该类复合材料中基体的应力分布情况和变形特征将受到纤维位向改变和界面结合强弱的显著影响.

7. 期刊论文 [康国政. 高庆. KANG Guozheng. Gao Qing 短纤维金属基复合材料应力传递的有限元分析 - 应用力学学报](#)
2001, 18 (1)

基于短纤维增强金属基复合材料的单纤维轴对称和三维细观力学模型, 利用弹塑性有限元分析方法对该复合材料中基体与纤维间的应力传递进行研究. 研究中主要讨论了基体、纤维和界面的力学性能以及纤维位向的变化对应力传递和应力分布的影响. 研究表明, 复合材料微结构参数的变化将显著影响基体与纤维间的应力传递和复合材料中的应力分布, 复合材料设计过程中必须考虑合理的微结构特征。

8. 学位论文 [唐国政 短纤维增强金属基复合材料力学行为的细观力学研究](#) 1997

9. 期刊论文 [于思荣. 何镇明. YU Si-rong. HE Zhen-ming 纤维增强金属基复合材料残余应力及其在拉伸时的行为 - 吉林工业大学自然科学学报](#)2000, 30 (1)

根据弹性力学理论建立了纤维增强金属基复合材料中纤维周围基体中的残余热应力模型. 探讨了在单向拉伸时该残余热应力对材料性能的影响, 为分析复合材料的力学行为提供理论指导.

10. 期刊论文 [胡跃辉. 胡鸿豪. 周小明. 陈光华 用弯曲模型推导二组元复合材料杨氏模量新公式 - 陶瓷学报](#)
2002, 23 (4)

用弯曲模型推导了适用于悬丝耦合弯曲共振法检测金属第二组元的杨氏模量的理论公式, 通过实验数据计算, 结果表明在两组元 $h_2/h_1 \approx 1$ 时与文献[2]的计算结果几乎接近, 为用悬丝耦合弯曲共振法检测各种减振材料、陶瓷材料杨氏模量提供了理论公式; 同时用改进后的弯曲模型推导出了适用于纤维复合材料横向杨氏模量的预测公式.

引证文献(3条)

1. [穆欣 纳米Al₂O₃ 3⁺碱性化学复合镀镍的研究\[学位论文\] 硕士 2006](#)
2. [姜云鹏. 岳珠峰. 王心美. 王亚芳 金属基复合材料的蠕变力学研究进展\[期刊论文\]- 燃气涡轮试验与研究](#) 2003 (2)
3. [王为. 李克锋 Ni-P基纳米化学复合镀研究现状\[期刊论文\]- 电镀与涂饰](#) 2003 (5)