

SiC_p/Al 材料力学行为研究的进展*Progress in Mechanical Behavior of SiC_p/Al

西北工业大学力学与土木建筑学院 秦亮 耿小亮 郭运强
广西大学土木建筑工程学院 张克实

[摘要] 碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiC_p/Al)在材料科学和力学领域被关注,也是航天航空、汽车、电子仪表等领域关注较多的潜力材料。本文主要介绍 SiC_p/Al 的增强机理和破坏机制,结合数值计算方法的进展从增强机理、破坏机理、建模方法和本构模型几个方面综述力学研究的若干进展。

关键词: 碳化硅颗粒增强铝基材料 增强机制 破坏机理 本构关系

[ABSTRACT] SiC particle reinforced aluminum matrix composites (SiC_p/Al) gets more attention in the field of materials science and mechanics, as well as aerospace, automotive, electronic instrumentation and other areas. The enhancement mechanism of SiC_p/Al is introduced. With the progress in numerical method, the advance in mechanics research is summarized from the aspects of reinforcement, failure, modeling methods and the construction of the constitutive model.

Keywords: SiC_p/Al Reinforcement mechanism Failure mechanism Construction of constitutive model

碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiC_p/Al)具有高比强度和比刚度、耐磨、耐疲劳,并具有低热膨胀系数和导热性等特点,表现出优异的力学性能和物理性能。SiC_p/Al 基体材料为铝合金或者纯铝,增强颗粒的体积分数和粒径大小都是可以依据需要进行变化的,且可用传统的金属加工工艺进行加工,表现出较强的适应性,故引起了材料研究者的极大兴趣,并在航空航天、军事领域及汽车、电子仪表等行业中显示出了巨大的应用潜力。从 20 世纪 80 年代开始, SiC_p/Al 引起人们的广泛关注^[1-2]。关于这种材料的相关制备和研究进展,已经有相当多的文献对其进行了介绍^[3-6]。

碳化硅颗粒增强铝基复合材料 SiC_p/Al 的力学性能主要决定于多晶铝基体与增强颗粒构成的复杂结构,建

立复合材料性质与复合材料的相材性质和微结构参数的关联,是力学工作者的工作目的,也是实现复合材料设计和优化的基础。近几十年来,人们在细观力学和非均匀材料力学性质方面的研究,取得了不少新的进展,成为被广泛关注的固体力学前沿之一。为了研究 SiC_p/Al 多晶铝基体-增强颗粒结构的增强机制和破坏机理,人们开展了大量的试验研究。在计算机技术快速发展的背景下,数值计算方法发展迅速,并成为固体力学研究中很重要的一种方法。研究者们对 SiC_p/Al 采用了多种分析模型,通过对增强颗粒体积分数、颗粒大小和颗粒形状等因素的影响分析,来研究材料的增强和破坏机理,讨论这种材料的破坏和损伤。本文结合各方面的发展,着重阐述利用数值方法对 SiC_p/Al 材料进行力学研究的进展。

1 增强机制

1.1 载荷传递

对于界面结合理想完好的材料,一般认为是这种机制在起主要作用,这也是连续介质力学解释复合材料的理论基础。假定金属基颗粒增强复合材料中颗粒为均匀分布,连续介质力学认为不管增强颗粒尺寸如何,只要颗粒的体积分数相同,强度就应该是一样的。当材料发生变形时,由于变形协调,颗粒承受较大的应力,基体承受较小的应力,因此能够提高材料的承载能力。早期的切变剪滞模型和 Eshelby 夹杂模型都采用了这种增强机制。然而,大量试验的观测结果却是随着颗粒尺寸增加, SiC_p/Al 的强度下降^[7-9]。

1.2 材料中热残余应力和位错

铝基颗粒增强复合材料均在高温条件下制备,多晶铝基体材料和碳化硅增强颗粒之间热膨胀系数具有较大的差异,这导致基体和颗粒之间存在较大的热错配,因此产生了分布不均匀的残余应力。在铝基体材料上表现为拉应力,碳化硅颗粒上则为压应力。对这些应力的测定和预测已经有许多学者进行了研究,他们对增强颗粒的体积分数、形状、大小等多个方面进行了分析^[10-11]。所得结果显示:基体材料中存在的残余应力可导

* 国家自然科学基金(10662001 和 90815001)、广西自然科学基金(桂科自 0832024)资助。

致材料通过塑性应变发生应力松弛。很多文献通过试验发现位错通过颗粒和基体界面释放出来,证实了通过微观塑性变形产生的应力松弛效应^[12]。颗粒增强材料中位错优先形成于颗粒尖角处(见图1)。Arsenault^[7-8,13-14]和 Miller^[15]对这种机制做了较为详细的研究。Barlow^[16]通过施加加热载荷研究了位错密度,研究了材料中应力应变的分布,并采用数值方法进行了预测。熊黎明^[17]等人采用有限元方法模拟了夹杂颗粒和基体之间由于形状和热残余应力的存在导致的应力分布的差异。Mammoli^[18]采用三维单胞模型来考虑团簇和残余应力对材料的影响,其研究认为残余应力将对材料的性能产生较大的影响,而团簇的影响则主要反映在材料基体破坏机制的改变方面。Orowan 认为材料中位错绕过增强颗粒运动,颗粒的加入阻碍了位错的运动,所以增强了材料的性能,但这种作用在增强颗粒小于 $1\mu\text{m}$ 的情形下才会对材料宏观行为产生明显影响。Tariq A^[19]等人采用动态位错理论(Dislocation Dynamics)对位错运动进行了研究,认为在材料中发生 Orowan 机制的条件是颗粒临界尺寸大小应该在 Burges 矢量的 5.44 倍左右。

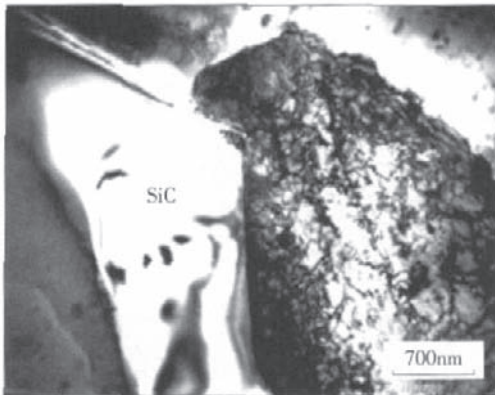


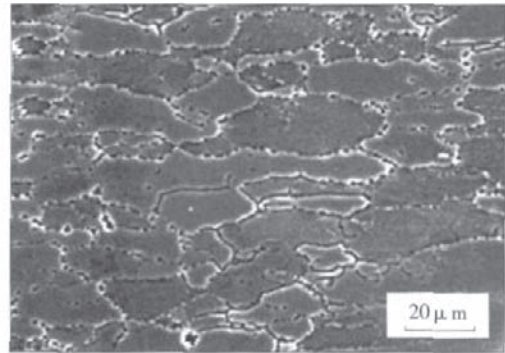
图1 SiC/Al材料基体中的位错^[15]
Fig.1 Dislocation of SiC/Al base material

1.3 亚晶强化与晶界钉扎

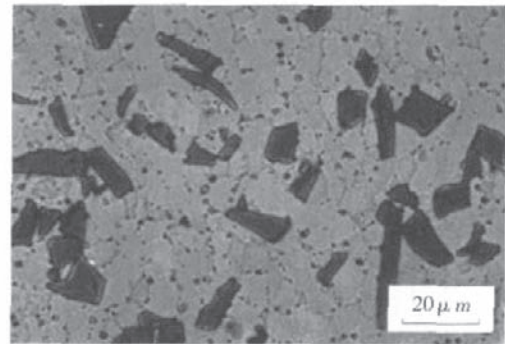
文献 [15] 显示粒径超过 $1\mu\text{m}$ 的增强颗粒在冷却或者加热过程中能刺激晶粒再结晶形核。因为 SiC_p/Al 的增强颗粒很多大于 $1\mu\text{m}$, 这种情形下颗粒促进形核对材料的增强效应是主要的, 并且在大颗粒旁边能够形成不止一个的晶粒。另一方面, 大量增强颗粒的存在导致晶界钉扎, 又阻碍了晶粒的长大, 这样会形成较多的亚晶结构。观察发现, 材料中形成晶粒的平均大小一般在几个或者几十个微米之间, 比未增强材料的晶粒平均尺寸小许多, 如图 2 所示。研究发现, 如果加入纳米 SiC 颗粒, 大量的纳米 SiC 颗粒会阻碍基体晶粒的生长, 会产生更多的晶界钉扎, 从而使材料性能得到很大提升。

上述影响 SiC_p/Al 复合材料力学行为的几种机制在

材料中一般不是单独存在的, 因此这几种机制会有相互作用。为研究这种相互作用, Cheng^[20] 采用粉末冶金和热压方法制备了 12% 颗粒增强材料, 并通过观测发现增强颗粒与基体间存在界面层。采用改进的 EMA 模型对增强机理进行了分析, 认为增强作用主要取决于由于制备过程中热错配导致的位错分布, 其次取决于载荷在基体和增强相之间的传递, Orowan 机制对增强机理的贡献最小。



(a) 铝合金金相图



(b) 增强颗粒加入后金相图

图2 颗粒增强材料中出现的晶粒细化现象^[15]
Fig.2 Grain refinement phenomenon of particle reinforced material

2 断裂机理

SiC_p/Al 差的塑性和低的断裂韧性限制了它在高性能结构方面的应用。Song^[9] 研究发现, 随着颗粒体积分数的增加, 断裂强度随之降低。欲通过微观结构设计来减少材料塑性和断裂韧性的下降, 需要对 SiC_p/Al 断裂过程的微观机制有一个更全面的了解。

2.1 基体破坏

基体中孔隙的形核、生长和聚合引起的塑性破坏是许多非连续增强铝基复合材料的主要断裂机制。由于增强相的加入, 使得 SiC_p/Al 的基体不同于未增强材料。塑性应变集中和热膨胀不均匀会导致很高的三轴应力度, 在增强相的尖锐边角以及增强相颗粒的聚集区域, 会产生很强的应力应变集中。Li^[21] 建立了三维模型, 分

析了多轴载荷下体心立方的单胞模型中基体的破坏,认为塑性变形是基体破坏的主要原因。Geni^[22]采用改进的 Gurson 模型模拟了材料中孔洞形核直至断裂的全过程,发现仅仅依靠孔洞体积无法准确预测材料的破坏机理,应力三维度对材料破坏有很大的影响。

2.2 增强颗粒破坏

由于增强相受到的应力近似地与尺寸无关,因此只有当颗粒含有足够大的裂缝(大颗粒更可能)时才发生断裂。Lloyd^[23]发现,只有颗粒尺寸大于 $20\mu\text{m}$ 的 SiC_p/Al 材料,颗粒断裂才是 SiC_p/Al 重要的断裂机制。而当颗粒尺寸较小(小于 $5\mu\text{m}$)时,颗粒断裂很少发生,此时 SiC_p/Al 的断裂则以基体的韧性断裂为主。Kolednik^[24]在电镜下进行了不同颗粒大小不同体积分数材料的拉伸试验,在大颗粒中发现裂纹起始于颗粒并扩展到基体中。Ghosh 和 Moorthy^[25]采用 Voroni 单胞研究了材料中颗粒的起裂和破裂,他们采用包含 50 个颗粒的模型,研究了材料中由于颗粒破裂引起的局部应力的重新分布。姜云鹏^[26]等人基于增量损伤理论,考虑材料中颗粒的长径比、体积分数和基体的弹塑性性质,分别采用把破裂颗粒假定为空洞和依旧可承载的两种模型,对材料的应力应变进行了研究,并比较了两者的区别。Ayyar^[27]采用二维模型和弹簧单元,模拟材料中颗粒的破裂。V.A.Romanova^[28]研究了颗粒形状、界面强度及加载情况对材料断裂强度的影响。

2.3 界面破坏

在制备过程中,如果界面结合比较强,主要以基体的塑性破坏为主;如果界面结合较弱,界面的破坏就成为材料的主要破坏机制。Shi^[29]采用高倍电镜发现了材料中界面层的存在,主要是以 SiO_2 的形式存在,厚度大约为 40nm 。Kang^[30]利用有限元模拟的方法,建立界面模型,以此研究界面性能对材料棘轮效应性能的影响,与常用的理想界面模型进行了比较,得到更接近实际的结果。Legarth^[31-33]采用二维模型考虑基体的塑性各向异性时,分别采用了 Hill、Barlat 以及 Mises 等人提出的 3 种屈服判据模拟了材料中刚性夹杂和基体之间的界面开裂情形。

3 二维和三维力学分析模型的比较

对 SiC_p/Al 进行力学分析时,限于计算条件,较早期的计算多采用二维模型,并且采用平面应力或者平面应变假设。而且早期研究一般采用对称单胞模型,假定颗粒在材料中周期分布,颗粒一般假定为规则的圆形、椭圆形或者四边形。随着计算能力的提高,越来越多的三维模型被用于计算,并且开始考虑颗粒在材料中的随机分布。Dias^[34]采用单胞模型方法,建立了包含椭球

的 3D 模型,研究椭球的取向对材料宏观力学性能的影响,利用一个公式来分别体现几何形状和载荷对材料性能的影响。Chawla^[35-36]采用切片的方法,建立了包含不规则颗粒的二维和三维模型,并对两者进行了比较分析,采用有限元方法对弹性模量和应力应变关系进行了预测。Ghosh^[26]等人则采用 Voronoi 模型进行计算。Lung^[37]进行了二维和三维模型的比较,认为三维模型能够更加合理地反映材料的性能。Saraev^[38]等人考虑了材料中颗粒的长径比的影响,建立二维和三维模型进行比较,发现长径比的影响在三维模型下表现得更加显著,甚至会比二维模型下的影响高出 15%。Bohm^[39]等人建立包含 15 个球和短纤维的三维模型进行了计算,认为增强体的形状对材料宏观性能影响不大,主要影响局部应力分布。所有的研究表明,三维模型能够考虑增强相的空间分布,长径比等因素对材料性能的影响,能更加准确地体现材料的响应。

采用单胞模型方法时,会涉及到代表性单元(RVE)尺寸的选取问题。郑泉水课题组^[40]采用平面应力假设,利用数值试验的方法考察了数百种立方多晶,发现对于等效剪切模量(或者是杨氏模量)来说,在 5% 的误差范围内,绝大多数立方多晶的最小代表体元尺度约为晶粒尺度的 20 倍或者更小。Martin^[41]也在更小的尺度上对 RVE 的尺寸进行了研究,提出统计代表单元(SVE),有助于更好地研究相关塑性理论。

4 本构模型

研究复合材料的性能,最主要的目的就是建立宏观材料力学行为和微观材料结构力学行为的联系,从而建立材料的本构关系。对材料进行分析主要采用解析方法和数值方法。解析方法主要以 Elsheby 夹杂模型到 Mori-Tanaka 模型为代表,数值方法则是以有限元方法为代表。徐娜^[42]分别采用 Elsheby 夹杂模型和有限元模型对 T4 和 T6 时效处理的 SiC_p/Al 材料进行了分析,并与试验结果进行对比,发现 Elsheby 夹杂模型计算结果和两者都比较吻合,而有限元方法所得结果和 T6 处理的材料吻合的更好。Kachanov^[43]、Tan^[44]发展了 Mori-Tanaka 方法。胡更开^[45]在微极介质理论框架下,建立了从非均质微极介质到 Cauchy 介质的解析的过渡方法,并且可以考虑到材料的颗粒尺寸效应,将传统细观力学的弹性和塑性分析方法推广到微极复合材料有效性质的分析。很多学者在连续介质力学的范畴内对材料进行了研究,也就是假定材料为 Cauchy 介质,还有一些学者假定材料为高阶介质^[46-47]。

解析方法不能体现局部应力应变的分布,数值方法能够比较准确地体现这一点。采用数值方法进行研

究时,很多工作都是假定材料内部是周期性分布的,比较具有代表性的是 GMC^[48-50] 方法和 TFA^[51] 方法。Chaboche^[52-53] 在 TFA 方法的基础上,引入渐近切线刚度,对材料局部塑性进行了研究,提出了纠正。Bansal^[54] 在 GMC 模型的基础上进行了发展,并采用有限元方法得到实现。Oahr^[55] 研究发现, GMC 方法比较适合于求解弹性性质,对于非弹性性质, FE 单胞模型能够取得更好的精度。Zhu^[56] 采用宏观模型研究了材料中的塑性流动。

5 断裂损伤分析模型

Tvergaard and Needleman^[57] 较早把塑性损伤模型引入到连续介质力学。Chaboche^[53] 基于 TFA 模型在连续损伤力学的框架内,利用两种方法引入了损伤的概念,其中之一是直接简化模型,另外一种为广义特征应变模型。Bao^[58] 研究了局部不均匀区域的塑性变形模型。Bekheet^[59] 通过研究时效以及颗粒对材料的疲劳断裂性能的影响,发现颗粒的加入影响了基体的结构,随着颗粒体积分数的增加,基体的晶粒尺寸逐渐变小,并且颗粒的加入极大地提高了材料的疲劳性能,提高了疲劳寿命。Nan^[60] 基于等效介质近似结合位错塑性理论和连续介质力学,对材料的颗粒效应和断裂行为进行了研究,讨论了增强颗粒体积分数、颗粒大小以及颗粒分布对材料性能的影响,引入 Griffith 断裂判据考虑材料的损伤。Drabek^[61] 和 Naboulsi^[62] 等在热力学第一和第二定律的基础上建立了损伤模型,用来预测高强度动态载荷下材料的响应。Zhang^[63] 利用 Mises-Schleicher 屈服准则建立了粘塑性多轴连续模型,研究了材料扭转和压缩情形下材料的破坏,并与试验结果进行了对比。Thomson^[64] 采用 Gurson-Tvergaard-Needleman 模型研究了团簇情形下材料中空洞的聚合,认为材料的破坏和团簇的方向有较大的关系。LLora^[65-66] 对非连续增强材料的损伤研究成果进行过比较系统的阐述。Zhang^[67] 通过材料不均匀性对晶体塑性滑移影响的描述模型对多晶材料晶界区域的力学性质的影响进行了研究,同时对材料微观破坏判据与破坏方式的关系开展了研究,这一方法应该可用于 SiC_p/Al 材料增强颗粒-铝基晶粒结构、增强颗粒尺寸和铝基晶粒尺寸对材料力学行为影响的分析,以及用于 SiC_p/Al 材料微观破坏方式的分析。

6 发展与展望

颗粒增强材料有着广泛的应用前景,特别是在较高温度环境下的应用,必将得到更广泛的研究。在颗粒增强复合材料的研究中,尚有许多问题需要解决,最重要的就是更有效的模型的建立。现在的工作主要集中在

对材料基体的有效描述上,多考虑材料的增强相为弹性性质。目前的力学模型主要是建立在连续介质力学或者是晶体滑移理论基础上的唯象模型,建立普适的能够准确描述材料的各种力学性能模型尚需要很多人的努力。

随着计算能力的增强,位错力学已经成为一种比较有潜力的材料性能研究工具,但是这一工具的缺陷就是其苛刻的计算条件,是建立在分子动力学基础上的,而且模型能考虑的空间尺度和时间尺度范围都非常小。因此有必要对现有连续介质力学和晶体塑性理论进行合理的改进,并进一步研究不同尺度和跨尺度描述的分析方法。

在今后的研究中,材料中变形、损伤的初始化和演化以及材料的破坏需要引起更多的关注。SiC_p/Al 是典型的非均质材料,在细观或微观尺度下其力学性质的不均匀性对材料宏观行为的影响,尺寸关联效应(例如增强颗粒和基体晶粒尺寸改变会对材料宏观行为产生明显影响)产生的原因,以及材料微观损伤破坏判据与过程描述和模拟还需要在理论和分析方法上作进一步的研究。更有效的预测模型和理论以及适合支持大型结构的材料力学模型迫切需要建立,以便为以后这种材料在各种工程以及基础设施中的应用提供依据。

利用我们现有的知识框架,考虑上述关于进一步改进设想,是可以在 SiC_p/Al 材料性能、相应结构性能和损伤破坏研究方面取得更大进展的。

本文共有参考文献 67 篇,由于篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 岩石)

(上接第 78 页)

速而变化(即不同转速下对应的挠度曲线的形状不同)。挠性转子由于其本身的刚度差,在高速旋转时其不平衡离心力产生的转子动挠度将进一步产生附加离心力,甚至达到相当大以致造成转子强烈振动。显然,刚性转子动平衡方法不能消除挠性转子的振动,也达不到平衡的目的。

4 结论

总结归纳挠性转子平衡的特点是:(1)在多转速(或在整个转速范围)下均能消除轴承的动反力;(2)在工作转速时(或临界转速附近),消除转子的弯矩(或使转子动挠度最小);(3)高速平衡加重不应破坏已进行了的低阶平衡,并且要求全工作转速工况下达到运行平稳,所以挠性转子的平衡是多转速下的平衡,或全速工况下的平衡。(责编 小颖)