复合材料动态热 - 力耦合多尺度分析的弹塑性模型及算法

关晓飞

摘　要

复合材料力学性能的预测是实现复合材料及其结构一体化优化设计的基础。由于复合材料优异的性能，它经常被用在复杂、极端环境下，这时复合材料及其结构往往表现出非线性行为，例如塑性，损伤等。由于复合材料的非线性力学行为是和热载荷紧密相连的，使得复合材料结构的非线性行为变得更加复杂。因此，有必要发展高效的数学、物理、力学方法来预测复合材料结构在热 - 力耦合环境下的动态响应。现今复合材料及其结构非线性行为的研究大都是利用传统的宏观弹塑性本构模型，没有考虑材料晶粒团簇微结构的结构演变。因此，这需要建立更精确的与微观多晶团簇结构演变相关的本构模型和计算方法。

本文研究了考虑微结构演变的复合材料及其结构动态热 - 力耦合行为的多尺度模型和计算框架，描述了热 - 力耦合下的物理力学行为。提出了将微观、介观和宏观本构模型融入一体实现复合材料及其结构的微观、介观和宏观一体化分析的方法，既能够考虑微观、介观结构特征对宏观性能的影响，又能够获得宏观应力、应变场，以及微 - 介观应力、应变场，进而为复合材料构件损伤、破坏分析提供了基础。本文的主要内容和研究结果如下：

第一部分给出了多尺度模型和算法的整体框架。首先描述了一个从微观晶粒到宏观的物理、力学参数的计算过程，以及从结构的宏观热 - 力耦合行为直到微观晶粒团簇的热 - 力耦合行为模拟的算法；接着叙述了把整个复合材料结构分成为强非线性演变区域和弱非线性演变区域来提高计算效率的方法。

第二部分针对复合材料结构的宏 - 介观尺度的动态热 - 力耦合行为，建立了复合材料宏 - 介观动态热 - 力耦合分析的双尺度弹塑性模型及其二阶双尺度计算方法。首先由热力学第一和第二定律，动量守恒及本构关系导出了热 - 力耦合宏 - 介观尺度分析的双尺度控制方程，进而定义了问题的一阶和二阶双尺度渐进展开式及均匀化参数和均匀化问题。

第三部分针对复合材料的微 - 介观尺度的热 - 力耦合弹 - 塑性行为，建立了一种多晶团簇材料的动态热 - 力耦合双尺度分析的弹塑性模型，该模型考虑了晶粒团簇内晶粒、界面弹 - 塑性变形、晶粒之间的滑移，以及晶粒之间的热交换行

为等。首先由热力学第一和第二定律，微观动量守恒及晶粒与晶界的本构关系引入了计算晶粒团簇材料微观物理和力学参数的模型。进而，建立了具有随机分布的晶粒团簇内部热 - 力学耦合行为的构造型统计双尺度算法，给出了计算晶粒团簇的等效物理和力学参数的方法。

第四部分首先给出了复合材料结构宏 - 介观动态热 - 力耦合弹塑性分析的二阶双尺度算法的有限元格式；接着给出了晶粒团簇材料动态热 - 力耦合弹塑性行为分析的二阶双尺度算法的有限元格式；进而针对晶粒团簇单胞的有限元计算，给出了等效物理和力学参数的算法；最后给出了简单的数值算例。

关键词：复合材料，动态热力耦合，多尺度分析，双尺度有限元算法，多晶团簇结构，弹塑性行为。