多孔复合材料热传导-辐射耦合与热-力耦合问题的二阶双尺度分析

马强

摘要

多孔材料是当前材料科学中发展较为迅速的一种材料, 由于其具有相对密度低、比强度高、比表面积大、重量轻、隔热性能好等优点, 其应用范围远远超过单一功能材料，在航空、航天等诸多领域中都具有广泛的应用前景。由于高温条件下热辐射在热传输行为中起着主要作用, 对于此种热传输行为就必须考虑热辐射的影响, 由于热辐射发生在小孔洞内部边界，且吸收及反射具有非线性与非局域性的特点, 这种复杂的微观构造特性就有必要引入多尺度方法来捕捉温度场的局部微观变化行为。

周期性复合材料与孔洞材料在工程中使用比较广泛, 在力学和数学上已经发展了诸多预测周期复合材料性能的方法, 但是由于材料受损伤后其性能会产生变异, 我们就需要考虑材料的拟周期特性, 此时材料的各项物理参数不仅拥有结构的周期性, 且具有周期的变异性, 即参数连续依赖于材料的在宏观中的位置, 这就需要发展新的特殊的多尺度分析方法来研究这类材料的微观特性。

本文第一部分, 研究了周期性孔洞材料在热传导-辐射耦合作用下的热传输问题的二阶双尺度分析方法, 热辐射主要体现在孔洞内部表面之间相对发射、吸引与反射作用, 热辐射以边界条件的形式加以引入, 我们引用了Allaire的稳态热辐射耦合模型, 在一定正则性假设下, 给出了合理的Taylor展开以消除辐射条件在微观与宏观之间的耦合行为; 构造了二阶双尺度近似解, 保证了实际计算的有效性; 利用不动点定理证明了均匀化解与一阶校正解耦合系统解的存在性; 对二阶双尺度解进行了近似性分析, 并给出了相应的有限元算法; 通过数值实验显示了二阶双尺度有限元方法具有较高的计算精度和效率, 验证了二阶双尺度解的近似性。

本文第二部分, 研究了拟周期性复合材料结构的动态热-力耦合问题, 构造了温度增量场与位移场的二阶双尺度近似解, 在对原热-力耦合问题解与均匀化热-力耦合问题解的正则性假设下, 对二阶双尺度解进行了近似性估计, 并得到了近似收敛阶, 提出了相应的二阶双尺度有限元算法, 数值实验显示了算法的有效性。

本文最后一部分, 利用有限元软件FreeFem++开发了基于二阶双尺度分析方法的用于预测非均匀材料结构物理和力学性能的有限元计算平台, 针对周期复合材料、孔洞材料与随机分布材料等不同的非均匀材料进行了有限元建模, 实现了热传输问题、线弹性问题、波传播问题、热-力耦合问题、拟周期问题等问题的二阶双尺度方法的有限元计算, 结果显示了该计算平台的正确性、高效性与较好的可扩展性。

关键词: 热传导-辐射耦合热传输问题, 动态热-力耦合, 二阶双尺度分析方法