**多尺度间的连接**

近年来，随着微观力学的发展和渐近均匀化理论的深化，人们逐渐认识并开始研究复合材料宏观尺度和微观尺度之间的联系，并把二者结合起来应用到工程实践中。广义上讲，多尺度科学是一门研究各种不同长度尺度或时间尺度相互耦合现象的科学，涉及到纳米、介观、微观和宏观等多个尺度的物理和力学问题及其耦合，是复杂系统的重要分支之一[1]。其研究领域十分广泛，涵盖了诸如流体动力学、材料科学、生物学、环境科学、化学和高能物理等的各门学科，具有丰富的科学内涵和研究价值。必须处理大量复杂系统中的各种复杂现象，其复杂性的根源之一就是多物理、多尺度的耦合效应[2]。多尺度分析方法是考虑空间和时间的跨尺度与跨层次特征，并将相关尺度耦合的新方法，是求解各种复杂的计算材料科学和工程问题的重要方法和技术。通常认为，复杂系统的本质在于“整体大于部分和”，这意味着应当认真处理多尺度耦合问题，而多尺度耦合问题己经成为广泛关注的一大难题。探索多尺度跨层次耦合机制，建立相关理论，如微纳米尺度和原子分子间作用相结合的准连续力学理论等，寻找相应于复杂体系的多尺度模型算法，可以为材料设计提供基础[3]。

对材料和结构进行一体化设计，实现多尺度连接，是获得高性能复合材料结构的有效方法之一。多尺度连接是指基体相与添加相的颗粒大小处于不同尺度，可以是同相或多相的不同尺度[4]。其中，多元多尺度间的复合是基于目前材料研究领域当中多相复合、微米复合、纳米复合的增韧补强作用，力求获得更高综合力学性能而提出的材料设计新概念。将多尺度优化方法与复合材料设计相结合，已经发展为一个重要研究领域。在解决宏观和微观两个尺度关联问题的基础上，采用合适的复合材料增强方法，对复合材料结构进行一体化优化，设计出具有最佳期望性能的复合材料结构系统，对于多尺度一体化设计的发展和解决工程实际问题具有重要意义。复合材料的力学性能不仅受各组分材料性能的影响，同时与各组成部分的形状、相对排列方式，以及各组分之间的比例等微观特征密切相关[5]。对复合材料的研究表明，通过不同尺度相的连接，小尺寸相可显著改善复合材料的微观结构。多尺度复合材料的强化机制主要解释为晶粒细化、位错网强化、晶界钉扎、晶界增强及裂纹愈合强化。此外，由于小尺寸相弥散分布于大尺度基体晶粒间所形成的晶间型结构，使小尺度相在高温下牵制位错运动，因而其高温性能得以显著提高。这类结构的特点是宏观结构、介观结构、微观结构有机组合：多尺度结构，在不同尺度上有着不同的力学效果，能够避免单一尺度上的性能缺陷，而这正是工程材料难以解决的问题[6]。

**参考文献**

[1] Glimm J ， Sharp D H . Multiscale science: A challenge for the twenty-first century[J]. Advances In Mechanics， 1998.

[2] 何国威， 夏蒙棼， 柯孚久， et al. 多尺度耦合现象:挑战和机遇[J]. 自然科学进展， 2004， 14(2):121-124.

[3] 曹礼群. 材料物性的多尺度关联与数值模拟[J]. 世界科技研究与发展， 2002(6):23-30.

[4] 陈玉丽 ， 马勇 ， 潘飞 ， et al. 多尺度复合材料力学研究进展[J]. 固体力学学报， 2018.

[5] Li Y Y ， Cui J Z . The multi-scale computational method for the mechanics parameters of the materials with random distribution of multi-scale grains[J]. Composites Science and Technology， 2005， 65(9):1447-1458.

[6] 王崇愚. 多尺度模型及相关分析方法[J]. 复杂系统与复杂性科学， 2004(1):9-19.