

湍流二相流大涡模拟颗粒相亚格子模型

晋国栋

中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京市北四环西路15号, 100190

携带颗粒的湍流二相流广泛存在于环境流动中, 如大气层暖云中雨滴的形成, 沙尘暴中的风沙二相流等。湍流二相流的复杂性在于其多尺度特性: 除了湍流自身的多尺度时空结构外, 颗粒可引入新的尺度并与湍流最小涡尺度分离, 例如颗粒直径尺度小于柯尔莫格洛夫长度尺度。湍流二相流的数值模拟对分析流动机理, 预测环境流动具有重要意义。近年来, 大涡模拟方法正逐渐发展为湍流二相流数值模拟的主要工具之一, 其优点是能预测多尺度的湍流结构与惯性颗粒的非定常相互作用。对单相湍流而言, 大涡模拟的基本原理是求解滤波的大尺度运动方程, 而小尺度对大尺度运动的影响通过亚格子模型来模拟。对湍流二相流而言, 未解析的小尺度湍流除了对流体相大尺度运动的影响需建模外, 还会对颗粒相的运动产生影响。如何模拟未解析的湍流对颗粒运动的影响, 建立颗粒相亚格子模型, 是发展湍流二相流大涡模拟方法的关键科学问题之一。本文讨论采用欧拉-拉格朗日方法表述湍流二相流时, 颗粒相亚格子模型的构建, 其中湍流采用欧拉方法描述, 而颗粒的运动采用拉格朗日方法跟踪颗粒的运动轨迹。我们基于随机微分方程的方法构造沿颗粒轨迹所经历的亚格子湍流运动。为封闭该随机微分方程, 需提供颗粒与亚格子涡相互作用的拉格朗日时间尺度。我们报道该时间尺度随颗粒惯性, 大涡模拟的滤波宽度和重力沉降速度变化。然后报道采用该颗粒相亚格子模型预测颗粒相对扩散的效果, 如图1所示。我们发现, 在颗粒对初始分离距离大于滤波宽度的情况下, 该亚格子模型可以提高大涡模拟预测颗粒相对扩散的精度。

关键词: 湍流二相流; 大涡模拟方法; 颗粒相亚格子模型

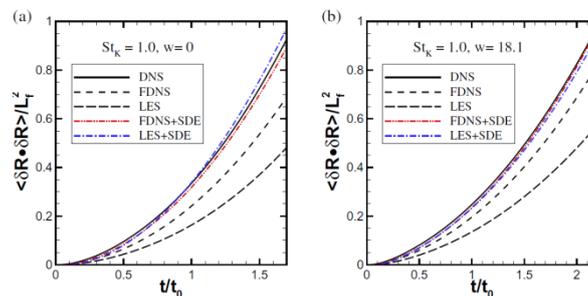


图1 湍流二相流颗粒相随机亚格子模型 (SDE) 提高大涡模拟方法预测颗粒相对扩散的精度。DNS: 直接数值模拟; FDNS: 滤波直接数值模拟; LES: 大涡模拟; FDNS+SDE: 滤波直接数值模拟采用随机亚格子模型 (先验); LES+SDE 大涡模拟采用随机亚格子模型 (后验)。(a) 不考虑沉降速度 w 影响; (b) 考虑沉降速度 w 影响 (Jin & He, *New Journal of Physics*, 15, 035011, 2013)。