

# 含灰气体近壁区流动及传热增强机制分析<sup>1)</sup>

王柏懿 戚隆溪 王超 江先金

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 在双流体模型的理论框架下, 提出描述稀相气固悬浮体流动的数学模型, 给出含灰气体近壁区流动特性并分析了传热增强的物理机制。

**关键词** 含灰气体, 双流体模型, 边界层流动, 传热增强

## 引言

含有大量悬浮微细固体颗粒的气体(即含灰气体)的近壁区流动及热传递过程的研究在空间探测、航空航天、化工能源以及其它诸多工程领域中有着广泛的应用。在分析高雷诺数流动时, 可以类似于纯气体的情况, 将整个绕流场分解为“外部”无黏流和“内层”黏性边界层分别处理。在已知外部解的条件下, 采用匹配的渐近展开方法, 使可确定物体壁面毗邻的边界层方程和相中的外缘边界条件。由于固体颗粒的存在, 流动介质变为复杂的两相体系, 大量实验揭示了气固两相绕流情况中物面上的导热系数显著增加。一般而言, 传热增强的主要原因是固体颗粒撞击在物体表面上, 其动能转化为物体的热能。其它的增强机制还有: (1) 固体颗粒相对于气体的速度滑移形成下游尾迹导致了边界层内湍流度增加; (2) 固体颗粒撞击形成固壁粗化导致了边界层内湍流度增加。这里有两种机制都和固体颗粒在物面上的接触与沉积(即所谓的“粒子云浸蚀”)有关。然而, 对于固体颗粒尺寸十分小的情况(粒径为  $1 \mu\text{m}$  量级), 粒子一般不会在物面上沉积, 它们与气体之间的速度和温度滑移亦可以忽略。最近人们发现: 即使含灰气体的自由来流中固相质量分数十分低(小于 5%), 钝头体驻点区热流可达纯气体绕流响应值的 2 倍<sup>[1]</sup>。本文将从稀相气固悬浮体近壁区流动特点出发, 探讨无惯性沉积条件下驻点热流增大的物理机制。

## 1 理论模型

本文在双流体模型的理论框架下, 给出一个描述近壁区两相流动的数学模型, 其中假定: 固相由直径相同的球形粒子组成, 它们的质量分数与体积分十分小, 两相介质为稀相体系, 固相应力可以忽略不计; 气相和颗粒之间的相互作用通过摩擦阻力和热传导而实现, 它们可以采用连续条件下的 Ranz-Marschall 公式来表示。以自由来流为参照, 描述含灰气体流动的无量纲基本方程为(下标  $s$  表示固相)

$$\text{div}(\rho V) = 0$$

$$\rho(V\nabla)V + \nabla p + \alpha\theta\mu_s(V - V_s)D = \frac{\kappa}{\text{Re}} \left[ -\frac{2}{3}\nabla(\mu\text{div}V) + 2\text{div}(\mu S) \right]$$

$$\rho(V\nabla)T = 2(V\nabla)p + \frac{2\kappa}{\text{Re}} \left[ 2\mu S^2 - \frac{2}{3}\mu(\text{div}V)^2 \right] + \frac{\kappa}{\text{Re Pr}} \text{div}(\mu\nabla T) + 2\alpha\theta\mu_s D |V - V_s|^2 +$$

$$\frac{2}{3} \frac{\alpha\theta\mu}{\text{Pr}} n_s G(T_s - T)$$

1) 自然科学基金资助课题(编号: 19972069)

$$\operatorname{div}(n_s V_s) = 0; \quad (V_s \nabla) V_s = \theta \mu D (V - V_s); \quad (V_s \nabla) T_s = \frac{2\beta}{3Pr} \theta \mu G (T_s - T)$$

其中,  $S$ ,  $a$ ,  $\beta$ ,  $\kappa$  分别为应变率张量, 固相质量分数, 气固比热之比和气体压缩性。表示相间摩擦阻力和传热经验表达式  $D$  和  $G$  与气固两相流动的非平衡程度相关。

## 2 机理分析

基于量纲分析可知, 这种两相流动体系具有六个相似性判据。其中三个与表征单相黏性流动的参数完全相同, 即气体的 Reynolds 数、Prandtl 数和 Eckert 数。此外, 对于两相流动, 又增加了另外三个相似性判据: (1)  $R_s = \rho_\infty u_\infty d / \mu_\infty$  为颗粒的最大滑移雷诺数(其中  $\rho_\infty$  和  $u_\infty$  为自由来流中气相的密度和速度), 表征相间阻力对 Stokes 情况的偏离; (2)  $\alpha = \rho_{s\infty} / \rho_\infty$  颗粒的质量载荷比(其中  $\rho_{s\infty}$  为自由来流中固相的密度), 表征固相在两相体系中的质量浓度; (3)  $\theta = 18u_\infty L / \sigma_s u_\infty d^2$  为颗粒的弛豫参数(其中  $\sigma_s$  为固体材料密度,  $L$  为绕流物体的特征长度), 表征颗粒惯性程度。对于圆柱或圆球绕流问题, 驻点区的热流计算一直是人们关注的重点, 此时含灰气体自由来流沿着物面的法线方向。在这种情况下, 颗粒弛豫参数存在一个阈值  $\theta_0$ 。当  $\theta \geq \theta_0$  时, 粒子不会“撞击”到物面上, 所有粒子的轨迹将形成一个围绕物面的包络线。显然, 固体材料密度越低或者固体颗粒尺寸越小, 颗粒的惯性就越小, 相应的  $\theta$  值就越大。我们将满足  $\theta \geq \theta_0$  的气固两相流动参数称为“无惯性沉积区”。在这个流动区制中, 气固两相具有相同量级的横向速度, 近壁区的颗粒浓度迅速增加并在极限轨迹处趋于无限大, 而在极限轨迹和壁面之间则出现一个无粒子区域。近壁区中是否存在粒子的惯性沉积, 导致了两相边界层流场结的的显著差异: 对于气相而言, 主要是边界层方程中表示相间作用的源项有所不同; 对于固相而言, 按小参数展开得到的边界层方程不再相同。数值计算表明, 在不存在粒子惯性沉积的情况下, 两相流动驻点区的热流可以比单相流动的相应值增加 2~3 倍。其原因在于尽管自由来流中固相浓度很低, 但近壁区内粒子的聚积效应及它们对气体的能量传递, 使得边界层内气相温度及壁面处的温度梯度大幅度增加, 从而增加了壁面导热系数。

## 参 考 文 献

- 1 Osipov A N, Vasilevskii E B. Heat transfer in a stagnation region of a blunt body in a hypersonic gas flow with an admixture of ting particles. In: Proc. 2nd Int. Cont. Two-Phase Flow Modelling and Experiment, Pisa, Italy, 1999-5-23~26. 191~199
- 2 Marble F E. Dynamics of dusty gases. *Ann Rev Fluid Mech.* 1970, 2:397~446