

El、Scopus 收录 中文核心期刊

壁面展向震荡诱导颗粒湍槽流减阻的直接数值模拟研究

康晓宣, 胡建新, 林昭武, 潘定一

DRAG REDUCTION OF PARTICLE-LADEN CHANNEL FLOW BY SPANWISE WALL OSCILLATION: A DIRECT NUMERICAL SIMULATION

Kang Xiaoxuan, Hu Jianxin, Lin Zhaowu, and Pan Dingyi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.6052/0459-1879-22-590

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

倾斜吹吸控制下湍流边界层减阻的直接数值模拟

DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF DRAG REDUCTION IN TURBULENT BOUNDARY LAYERS CONTROLLED BY INCLINED BLOWING AND SUCKING

力学学报. 2021, 53(9): 2454-2467

减阻工况下壁面周期扰动对湍流边界层多尺度的影响

THE EFFECT OF PERIODIC PERTURBATION ON MULTI SCALES IN A TURBULENT BOUNDARY LAYER FLOW UNDER DRAG REDUCTION

力学学报. 2019, 51(3): 767-774

减阻用表面活性剂溶液分子动力学模拟研究进展

PROGRESS IN MOLECULAR DYNAMICS SIMULATIONS OF SURFACTANT SOLUTION FOR TURBULENT DRAG REDUCTION

力学学报. 2019, 51(4): 971-990

高超声速激波湍流边界层干扰直接数值模拟研究

DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF HYPERSONIC SHOCK WAVE AND TURBULENT BOUNDARY LAYER INTERACTIONS

力学学报. 2018, 50(2): 197-208

流向磁场作用下圆柱绕流的直接数值模拟

DIRECT NUMERICAL SIMULATIONS ON THE TURBULENT FLOW PAST A CONFINED CIRCULAR CYLINDER WITH THE INFLUENCE OF THE STREAMWISE MAGNETIC FIELDS 力学学报. 2020, 52(6): 1645-1654

椭圆颗粒在剪切流中旋转特性的数值研究

NUMERICAL STUDY ON THE ROTATION OF AN ELLIPTICAL PARTICLE IN SHEAR FLOW 力学学报. 2017, 49(2): 257–267



关注微信公众号,获得更多资讯信息

Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics

流体力学

2023 年 5 月

壁面展向震荡诱导颗粒湍槽流减阻的直接 数值模拟研究¹⁾

康晓宣* 胡建新 * 林昭武* 潘定一*,2)

*(浙江大学工程力学系,流体动力基础件与机电系统全国重点实验室,杭州 310027) *(浙江理工大学能源工程系,杭州 310018)

摘要 对湍槽流的减阻研究具有科学意义和工程应用价值,已有大量研究表明向单相湍流中添加离散物质是 一种有效的被动减阻方法.相比于被动减阻技术,主动减阻技术如壁面震荡减阻的可控性更高,近年来也得到 广泛的关注,但对于壁面展向震荡诱导减阻的研究主要针对单相湍槽流,还未见有相关研究将这一手段用于含 颗粒湍槽流的减阻.因此,文章采用直接数值模拟方法开展了壁面展向震荡诱导颗粒湍槽流减阻的机理研究. 一方面关注壁面震荡对颗粒湍槽流的调制效果及机理.另一方面关注颗粒和震荡对单相湍槽流的耦合减阻效 应.结果表明:壁面震荡可以达到有效减阻,存在最优震荡周期使减阻率达到最大,且最优震荡周期与单相流结 果相近.在相同体积分数下,施加壁面震荡的小颗粒湍槽流减阻效果更好.相比于单相湍槽流,当震荡周期小于 最优周期时,震荡和颗粒的耦合效应对减阻率的额外贡献较小且可能为负,当大于最优周期时额外贡献逐渐增 大,对整体减阻率的占比最高可达 10% 左右.

关键词 颗粒悬浮流,槽道湍流减阻,壁面展向震荡,直接力虚拟域方法

中图分类号: O359 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-22-590

DRAG REDUCTION OF PARTICLE-LADEN CHANNEL FLOW BY SPANWISE WALL OSCILLATION: A DIRECT NUMERICAL SIMULATION¹⁾

Kang Xiaoxuan * Hu Jianxin [†] Lin Zhaowu * Pan Dingyi ^{*, 2)}

* (State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Department of Engineering Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

[†] (Department of Energy Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract Study on drag reduction of turbulent channel flow has its significance in both scientific researches and industry applications. The passive drag reduction technique that has been reported to be effective is to add dispersed materials into the single-phase turbulence. On the other hand, the active drag reduction technique, i.e., spanwise wall oscillation, which can be controlled in advance, has attracted wide attention in recent years. Drag reduction induced by spanwise wall oscillation has been successfully applied to single-phase turbulence, however, there is few attentions is paid to the drag reduction of particle-laden channel flow by the aforementioned active technique. Therefore, the drag reduction of particle-laden channel flow by spanwise wall oscillation is studied in this paper by direct numerical

2022-12-13 收稿, 2023-03-28 录用, 2023-03-31 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (91852205, 51906224).

2) 通讯作者:潘定一, 副教授, 主要研究方向为非牛顿流体力学、多相流. E-mail: dpan@zju.edu.cn

引用格式: 康晓宣, 胡建新, 林昭武, 潘定一. 壁面展向震荡诱导颗粒湍槽流减阻的直接数值模拟研究. 力学学报, 2023, 55(5): 1087-1098 Kang Xiaoxuan, Hu Jianxin, Lin Zhaowu, Pan Dingyi. Drag reduction of particle-laden channel flow by spanwise wall oscillation: A direct numerical simulation. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(5): 1087-1098 simulations. The major concern is two-folded: the first is the turbulent modulation and mechanism of particle-laden channel flow induced by spanwise wall oscillation, and the second is the coupling effect of laden particles and wall oscillation on drag reduction. Comparing with non-oscillation particle-laden channel flow, the wall drag of particle-laden channel flow is reduced by spanwise wall oscillation. The optimal oscillation period is found to achieve the maximum drag reduction rate, which is similar with the trend of single-phase channel flow. With the same volume fraction, channel flow with small size particle exhibits large drag reduction. Comparing with non-oscillation single-phase turbulence, for small oscillation period scenario the coupling contribution of laden particles and wall oscillation has weak and even negative effect on drag reduction, as the oscillation period increases the coupling contribution becomes significant and the maximum magnitude is around 10% of the overall drag reduction.

Key words particle-laden flow, drag reduction of turbulent channel flow, spanwise wall oscillation, direct-forcing fictitious domain method

引 言

在许多工业生产、化工、医药领域和自然现象 中经常会涉及到带有悬浮颗粒的湍流,如化工领域 流化床反应器、制药工业的药物输送、自然界的风 沙和泥石流等^[1-2].对包含颗粒的湍流阻力机理和调 控的研究有着重要的意义.

目前,已经有大量学者对含颗粒湍流的调制技 术进行了研究,根据粒径大小,可以将颗粒分为小于 Kolmogorov 尺度的点粒子和大于 Kolmogorov 尺度 的有限尺寸的颗粒. Gore 等^[3-4] 通过收集实验测量 结果总结了点粒子的粒径大小对湍流调制的影响, 指出大粒子倾向于增强湍流而小粒子倾向于减弱湍 流. 唐一敏等^[5] 采用点-力双向耦合模型对点粒子加 载的槽道湍流进行直接数值模拟,发现点粒子的加 入减少了流向涡的强度和数量,从而达到减阻的效 果,而随着点粒子的粒径增加,减阻效果减弱. Zhao 等^[6] 在含点粒子槽道流的双向耦合模拟中观察到了 明显的湍流调制效果,即点粒子的加入会使阻力减 少,增强近壁处的流向速度脉动,减弱展向和壁面法 向的速度脉动及雷诺应力.

相比于点粒子,有限尺寸颗粒的模拟要求处理 颗粒表面的无滑移边界条件,Pan等^[7]最先解决了 颗粒-流体间界面的处理,他们对两种粒径 (*a*/*H* = 0.05,0.1,其中 *a* 为颗粒半径,*H* 为半槽道高度)的有 限尺寸颗粒进行直接数值模拟,发现小颗粒降低了 平均流速而大颗粒在壁面附近可以提高平均流速. Lucci等^[8]研究了不同粒径大小的有限尺寸的重颗 粒对湍流的调制效果,指出大颗粒会降低湍动能的 耗散率,归因于颗粒数量和总表面积的减少.Shao等^[9] 对两种粒径 (a/H=0.05, 0.1) 的有限尺寸的中性浮力 颗粒进行了直接数值模拟,发现颗粒的加入降低了 距离壁面 0.1H~0.4H 区域的平均流速, 增加了壁面 附近和通道中心处的平均流速. 降低了流向脉动速 度, 增强了近壁处的展向和壁面法向脉动速度, 并且 小颗粒的湍流调制效果要强于大颗粒.余钊圣等[10] 对中性悬浮大颗粒的湍流调制开展数值研究,指出 添加体积分数为 2.36% 的颗粒 (a/H=0.1) 会对湍流 产生增阻的调制效果. Yu 等[11]指出向单相湍流中加 入体积分数为 0.098% 的中性浮力颗粒 (a/H=0.05) 会产生轻微的减阻效果,这是首次发现有限尺寸 颗粒的减阻现象,但是减阻量是可以忽略不计的. Balachandar^[12]总结了颗粒对湍流调制的几种机制, 颗粒载流的黏度、惯性的增强以及颗粒阻力引起的 耗散增加都可以减弱湍流,而尾流动力学和涡脱落 导致的速度脉动增强则可以增强湍流,且最终湍流 调制的结果取决于这几种机制间的竞争.

另一方面,以减阻为目的的湍流调制是湍流研究的热点之一,目前已知的有效减阻方法可分为被动减阻技术和主动减阻技术.被动减阻技术包括沟槽法、气泡法、柔壁法及添加聚合物、表面活性剂和颗粒等^[13-14].主动减阻技术则是指将能量引入系统的减阻方法,如壁面震荡减阻.

在主动减阻技术的研究方面, Jung 等^[15] 首次对 槽道湍流的壁面震荡展开了直接数值模拟研究, 通 过对槽道施加恒定流量驱动, 研究不同震荡周期下 的减阻效果, 发现减阻率随着周期的增加而先上升 后下降, 且最优的无量纲震荡周期在 100 左右, 模拟 中还观察到震荡导致速度脉动减弱, 且壁面法向方

向和展向方向的脉动速度的下降幅度高于流向方 向. Du 等^[16] 对壁面附近的高低速条带展开了研究, 指出震荡会导致条带倾斜. Quadrio 等^[17]将注意力 集中在震荡启动后的初始瞬态周期上,从早期震荡 和长期震荡两方面来阐明近壁湍流结构动力学, 描 述了初期的湍流与壁面相互作用. Choi 等[18] 通过结 合 Stokes 层的影响厚度和 Stokes 层的加速度, 首先 提出了一个用于预测减阻效果的参数 S^+ . Ricco 等^[19-20] 验证了 S+与减阻的关联性,并指出摩擦雷诺数对减 阻效果的影响.随着摩擦雷诺数从 200 增加到 400, 减阻效果减弱,且这种效应随着震荡周期的增加而 放大.此外,他们进一步研究施加壁面震荡的槽道湍 流的物理机理,重点研究均匀流动和湍流波动之间 的能量转移如何受到壁运动的影响,以及壁面震荡 对涡度拟能的调制.结果表明壁面震荡会增强湍流 耗散从而导致湍流活动减弱,这是造成减阻的主要 原因.

Yakeno 等^[21]分析雷诺应力的象限贡献以及相 干结构与雷诺应力象限贡献间的定量关系. Quadrio 等^[22]对净功率进行研究,指出低振幅情况下的净功 率表现优于高振幅,并且随着震荡周期的增大,净功 率同样存在最优周期,与出现最优减阻率的最优震 荡周期一致. Quadrio 等^[22]进一步完善了 Choi 等^[18] 对参数 *S*⁺的研究,并对最优震荡周期的存在提供合 理的解释. 认为震荡会破坏近壁处的湍流结构从而 导致减阻,但在较高的震荡周期下,湍流结构有足够 的时间重新适应而达到平衡状态,从而使摩擦阻力 值趋向于恢复到未扰动状态.

Touber 等^[23] 对壁面震荡诱导的湍槽流进行了 直接数值模拟,详细阐明由壁运动引起的减阻机制. 指出壁面震荡会导致薄的、高度剪切的 Stokes 层的 形成,这是导致流向壁面摩擦显著减弱的原因.并且 这种机制的有效性取决于震荡周期,当位于最优震 荡周期时, Stokes 层完全被限制在黏性子层内,不与 缓冲区以外的湍流相互作用,从而使近壁处的流动 趋向于偏层流的状态,因此会导致最大减阻率的出 现. Yuan 等^[24]的研究主要关注震荡对近壁湍流动力 学的影响,进而分析湍流阻力减少的物理机制,明确 了震荡会抑制湍流的产生和输运.

此外,对于壁面震荡减阻的研究不仅限于单独 施加震荡,有许多学者对行波震荡及耦合各向同性 壁面滑移的震荡也展开研究^[25-26]. Ricco 等^[27] 将壁运动调控湍流阻力的机制归因于以下几种现象:湍流产生减少,湍流耗散增加,驱动周期内的迟滞效应,与近壁面运动相关的涡结构特征和 Stokes 层的表现等.

上述关于壁面展向震荡诱导减阻的研究主要针 对单相湍流,还未见有相关研究将这一手段用于含 颗粒湍流的减阻.本文基于直接数值模拟,对含颗粒 湍流施加壁面震荡,以探究主动减阻技术在含颗粒 湍流减阻的影响,并通过对减阻效果、湍流统计量 及湍流结构等进行分析系统研究相关湍流调制的机 理.本文余下内容共包括3节:第1节主要介绍本文 所使用数值方法的基本原理及方法验证;第2节共 包括3小节,壁面震荡诱导的单相湍槽流和颗粒湍 槽流的减阻结果及机理将分别在前两小节被介绍, 第3小节主要研究了颗粒和震荡共同作用下的减阻 效果;第3节为本文工作的总结.

1 直接数值模拟方法

针对本文所研究的包含颗粒等运动壁面的湍槽 流的直接数值模拟,本文采用虚拟区域方法 (fictitious domain method) 来满足颗粒表面的无滑移边界条件. 虚拟区域法的基本思想是假设颗粒内部充满虚拟流 体,通过对其施加额外的拟体力使得虚拟流体满足 颗粒刚体运动. 虚拟区域法可采用结构化网格代替 复杂的贴体网格,因此可以简化网格划分并节省计 算资源.本文主要基于 Yu 等^[28] 提出的直接力虚拟 区域法 (direct-forcing fictitious domain method, DF/FD) 开展相应的直接数值模拟. DF/FD方法是在 早期的分布式拉格朗日乘子虚拟区域法 (distributed-Lagrange-multiplier fictitious domain method, DLM/ FD)^[29]的基础上针对刚性颗粒悬浮流的直接数值模 拟进行的改进和优化.本节余下内容将首先对该方 法的原理进行简要介绍,并针对湍槽流的模拟进行 方法验证.

1.1 DF/FD 方法

针对刚性颗粒悬浮流, DF/FD 方法所求解的无 量纲形式的不可压流体控制方程和颗粒平动、转动 方程为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0, \quad \text{in } \Omega \tag{1}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{u} = \frac{\nabla^2 \boldsymbol{u}}{Re} - \nabla p + \lambda, \quad \text{in } \Omega$$
(2)

$$(\rho_{\rm r}-1)V_{\rm p}^*\left(\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}-Fr\frac{g}{g}\right) = -\int_P\lambda\mathrm{d}\mathbf{x},\quad\text{in }P\qquad(3)$$

$$(\rho_{\rm r}-1)\frac{{\rm d}(\boldsymbol{J}^*\cdot\boldsymbol{\omega})}{{\rm d}t}=-\int_P\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{\lambda}{\rm d}\boldsymbol{x},\quad\text{in }P\tag{4}$$

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{U} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}, \quad \text{in } \boldsymbol{P} \tag{5}$$

其中,式(1)和式(2)为无量纲的 Navier-Stokes 方程, Q 表示包括流体区域和颗粒区域的整个计算区域, u 为流体速度, λ 为作用在虚拟流体上的拟体力,p 为 流体压力, Re 为雷诺数,定义为 $Re = \rho_f U_c L_c/\mu$, ρ_f 为 流体密度, U_c 为特征速度, L_c 为特征长度, μ 为流体 动力黏度.式(3)和式(4)为描述颗粒刚性运动的方 程,P 表示颗粒区域,U 为颗粒的平动速度, ω 为颗 粒的转动角速度,g 为重力加速度, ρ_r 为颗粒密度与 流体密度的比值,Fr 为 Froude 数,定义为 $Fr = gL_c/U_c^2$. V_p^* 为无量纲颗粒体积,定义为 $V_p^* = M/(\rho_s L_c^3)$,M 为 颗粒质量, ρ_s 为颗粒密度, J^* 为无量纲转动惯量,定 义为 $J^* = J/(\rho_s L_c^5)$,J 为颗粒的转动惯量.式(5)则用 于强制颗粒内部虚拟流体运动满足颗粒刚性运动.

本文主要采用时间分裂格式对上述控制方程进 行求解,即:将颗粒两相流问题分解成流体和颗粒两 个子问题.其中,流体子问题主要求解, $u^* n p^{n+1}$,颗 粒子问题主要求解 $U^{n+1}, \omega^{n+1}, \lambda^{n+1}, u^{n+1}$,拟体力的 迭代方程为

$$\lambda^{n+1} = \frac{\boldsymbol{U}^{n+1} + \boldsymbol{\omega}^{n+1} \times \boldsymbol{r} - \boldsymbol{u}^*}{\Delta t} + \lambda^n \tag{6}$$

在求解过程中,描述颗粒运动公式中的拟体力 是定义在颗粒的拉格朗日点上,而流体公式中的拟 体力定义在流体欧拉网格上,因此需要在流体的欧 拉网格和颗粒的拉格朗日节点之间进行插值运算, 本文中主要采用三线性插值函数进行物理量在不同 网格间的转换.

除了考虑颗粒与流体之间的相互作用外,针对 颗粒与颗粒间的相互作用以及颗粒与壁面之间的相 互作用,本文采用了简化的软球模型^[30]进行处理, 即排斥力 (artificial repulsive force, ARF)碰撞模型. 该模型只考虑碰撞过程中颗粒间的法向作用力 (排 斥力)

$$\boldsymbol{F} = F_0 \left(1 - d/d_c\right) \boldsymbol{n} \tag{7}$$

其中, F 为排斥力, d 为两个颗粒间的最小距离, n 是 两个颗粒间的单位法向向量. d_c 表示截断距离, 即当 颗粒间的距离满足 $d < d_c$ 时, 判定为颗粒间发生碰 撞. F_0 表示排斥力的量级, 是一个经验参数^[11,31-33], 一般情况下设定 $F_0 = 1.0 \times 10^3$.

1.2 单相湍槽流模拟的验证

学

报

学

力

为验证本文所采用的 DF/FD 方法的计算精度, 本节中首先对恒定压力梯度驱动的单相非震荡湍槽 流开展直接数值模拟. 槽道计算域如图 1 所示,大小 为 8*H*×2*H*×4*H*,*H*是半槽道宽度,对应网格数为 512×128×256. 其中,*x*方向为流向,*y*方向为壁面 法向,*z*方向为展向.余钊圣等^[10]也采用尺寸为*H*/64 的网格对含中性悬浮大颗粒的湍槽流进行了数值模 拟研究,并分析了流向长度对结果的影响,指出在该 网格分辨率下流向长度为 4*H*时就可满足计算可靠 性. 壁面法向方向采用无滑移边界条件,流向和展向 则采用周期性边界条件.对于湍槽流,摩擦速度 *u*_r和 壁面切应力 τ_w 的数学关系定义如下

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_{\rm f}}} = \sqrt{Hg} \tag{8}$$

摩擦雷诺数 Re_r 的定义为

$$Re_{\tau} = \frac{u_{\tau}H}{\mu} \tag{9}$$

本文中,摩擦雷诺数设为180.

当无量纲时间为 $t^* > 30$ 时 ($t^* = tu_\tau/H$), 湍流达 到稳定状态, 本文选取湍槽流达到稳定状态后的 100 个无量纲时间进行湍流统计平均, 得到平均流速 分布、雷诺应力分布及速度均方根分布如图 2 所 示, 其中速度均方根为 $u_{rms}^* = \sqrt{u'^2/u_\tau}$, $v_{rms}^* = \sqrt{v'^2/u_\tau}$, $w_{rms}^* = \sqrt{w'^2/u_\tau}$. 通过与文献 [34-36] 结果对比, 可以 看到本文模拟结果与文献结果吻合较好.





Fig. 1 Schematic of the computational domain which contains particles and wall oscillation direction





2 结果与讨论

2.1 壁面展向震荡的单相湍槽流

本节首先系统考察壁面展向震荡诱导的单相湍 槽流的减阻效果.在上节算例的基础上对壁面施加 展向的简谐震荡,如图1所示,其震荡速度为

$$W = A\sin(2\pi t/T) \tag{10}$$

这里,对震荡振幅和周期分别进行无量纲化,即

$$A^+ = A/u_{\tau}, T^+ = T u_{\tau}^2/v$$

其中 v 为流体运动黏度. 对于壁面展向震荡诱导单 相湍槽流的研究, 文献 [27] 中已有相关的报道. 其 中, 无量纲振幅的考察范围一般在 3~12 之间, 且已 有研究表明减阻效果随着振幅的增加而增强. 因此, 为了观察到更明显的减阻效果, 本文设置 *A*⁺=12, 而 无量纲周期 *T*⁺的考察范围为 10~170. 模拟中, 待湍 流达到稳定状态之后, 通过如下计算壁面展向震荡 诱导的减阻率

$$R_{\rm osc} = \frac{u_{\rm pf-osc}^2 - u_{\rm pf-no-osc}^2}{u_{\rm pf-osc}^2} \tag{11}$$

其中, *u*_{pf-no-osc} 为壁面非震荡情况下的平均流速, *u*_{pf-osc} 为壁面震荡时对应的平均流速. 图 3(a) 所示为减阻 率 *R*_{osc} 随震荡周期的变化情况,可以发现,随着震荡 周期的增加, *R*_{osc} 呈现先升高后降低的趋势,因此存 在最优周期使得减阻效果达到最优,其最优无量纲 周期位于 75 附近,与 Yakeno 等^[21] 的结果相吻合.本文进一步选择 *T*⁺=40, 75, 150 的情况进行统计量



图 3 壁面展向震荡的单相湍槽流模拟结果



分析,平均流速分布如图 3(b) 所示,可以发现震荡使 平均流速明显增加,且处于最优周期时,平均流速沿 槽道方向均高于其余工况.需要指出的是,文献中关 于壁面展向震荡的单相湍槽流模拟主要采用定流量 驱动^[15,18,26],而非本文所采用的定压力梯度驱动,这 使得对摩擦雷诺数定义存在差异,因此本文没有就 平均速度分布等湍流统计量与文献结果进行定量对 比,而是选择瞬时展向速度进行验证,过往的文献 [37-38] 中也做过同样的验证.

由于湍流存在黏性底层,且黏性底层的流动可 近似成层流流动,可以将展向流动与流向流动进行 解耦.因此,根据 Stokes 理论^[39]可推导出展向速度 沿 y 方向分布的解析解为

$$W(y,t) = A^{+} e^{-y \sqrt{\pi/(vt)}} \cos\left(\frac{2\pi t}{T^{+}} - y \sqrt{\frac{\pi t}{vT^{+}}}\right)$$
(12)

基于本文的模拟结果,计算得到一个周期内不同时刻的展向速度的数值解,并与解析解进行对比,结果如图4所示,可以发现本文数值解与式(12)的解析解结果吻合较好,进一步表明本文所采用数值模拟方法的准确性.



图 4 一个震荡周期内不同时刻的展向速度分布的解析解与数值解 对比

Fig. 4 Comparison of analytical solution and numerical solution of the spanwise velocity distribution in an oscillation period

2.2 壁面展向震荡的颗粒湍槽流

在上节模拟工作的基础上,本节中进一步考察 壁面展向震荡的颗粒湍槽流的减阻情况,含颗粒槽 道示意图如图 1 所示.球形颗粒半径 a 设置为 a/H = 0.1,0.25,体积分数为 2.36%,颗粒数量分别为 360 个 和 23 个.本文所考察的颗粒半径和体积分数的范围 适中且与前人研究范围相近^[34,40-41],若考察更小半 径或更大体积分数工况则需较大计算量.颗粒密度 与流体密度相同,处于中性悬浮状态,其余参数与上 节一致.本节中分别对含颗粒的非震荡湍槽流和震 荡湍槽流进行直接数值模拟,并在统计过程中剔除 固体颗粒占据的区域.以非震荡情况下的平均流速 为基准,定义壁面展向震荡诱导的颗粒湍槽流的减 阻率为

$$R_{\rm p} = \frac{u_{\rm pl-osc}^2 - u_{\rm pl-no-osc}^2}{u_{\rm pl-osc}^2}$$
(13)

其中, *u*_{pl-osc} 表示含颗粒震荡的平均流速, *u*_{pl-no-osc} 表示含颗粒非震荡的平均流速, 减阻率计算结果如图 5 所示, 结果表明对含颗粒槽道湍流施加壁面震荡可以达到有效减阻, 且减阻率随周期的变化趋势与单相流一致, 同样存在最优周期为 75 左右. 但颗粒尺寸会对减阻率产生影响, 相比于大颗粒, 在震荡周期较大时, 施加壁面震荡会使含小颗粒湍流产生更好的减阻效果.

图 6 给出了颗粒半径为 a/H = 0.1 时的湍流统 计量的分布情况.图 6(a) 为平均流速分布,可以明显 看出位于最优周期时的平均流速高于其余周期.图 6(b) 为速度脉动分布,相对于非震荡的情况,震荡导致流 向速度脉动峰值从壁面向槽道中心移动,表明黏性 底层变厚,进而说明近壁处湍流减弱,且当最优震荡 周期时,速度脉动峰值向槽道中心移动的距离最大. 此外,震荡导致近壁区流向方向的速度脉动明显降 低,从而导致湍动能的降低,且震荡引起的速度脉动 的下降幅度随着周期的增加而越来越明显. 图 6(c) 为雷诺应力分布,其变化情况与速度脉动类似.由于 流向速度脉动和雷诺应力是随着震荡周期的增大而 单调减小的,并非在最优周期处减小的最多,因此速 度脉动或者雷诺应力峰值的减小并不能作为判断减 阻效果的依据. 图 6(d) 给出了颗粒体积分数的分布 情况,对于非震荡的情况,可以发现颗粒体积分数在





Fig. 6 The particle laden (a/H = 0.1) turbulent channel flow by spanwise wall oscillation

近壁处很小,即颗粒倾向于向槽道中心迁移,这种现 象是剪切诱导迁移现象^[42-44],即颗粒从高剪切速率 区域迁移到低剪切速率区域,原因是剪切作用会给 颗粒提供一个垂直于流动方向的升力.而施加壁面 震荡后,由于展向剪切作用对升力的贡献使得颗粒 向槽道中心的迁移程度更大,因此近壁处的颗粒数 量减少,对近壁处流场扰动较少^[41,45],这可能是震荡 导致颗粒湍槽流减阻的重要原因之一.

图 7 给出了颗粒半径为 *a*/*H* = 0.25 时的湍流统 计量的分布情况.图 7(a) 所示的平均流速随震荡周 期的变化趋势与小颗粒的结果一致.图 7(b) 和图 7(c) 所示震荡导致大颗粒的流向速度脉动和雷诺应力峰 值同样向通道中心偏移,但小颗粒的偏移程度稍大, 这在雷诺应力上表现较为明显.图 7(d) 为颗粒半径 为 *a*/*H* = 0.25 时的颗粒体积分数的分布情况,从整 体上看,小颗粒更偏向于聚集在壁面附近.但在施加 震荡后,小颗粒向槽道中心迁移得更多,因此,相对 于大颗粒,施加壁面震荡后的含小颗粒湍流在壁面 附近的扰动减弱得更多,其所对应的减阻效果越好.

图 8 和图 9 给出了近壁处相干结构的可视化情 况. 图 8(a) 和图 8(d) 为非震荡的情况, 可以观察到明 显的高低速条带分布,震荡的加入导致近壁处高低 速条带产生变形,主要表现为明显倾斜且变短,即破 坏了相干结构.这可能会导致垂直于壁面的动量对 流速率减少,从而使雷诺应力、动能的产生及壁面 摩擦产生衰减.此外,可以发现处于最优震荡周期时 的高低速条带的破坏情况最为严重,如图 8(b) 和 图 8(e) 所示. 当震荡周期超过最优震荡周期时, 明显 的条带结构又重新恢复,如图 8(c) 和图 8(f) 所示.这 说明在较高的震荡周期下,近壁处的湍流结构有足 够的时间重新适应而趋向于达到未扰动前的状态, 从而降低减阻效果,这也是最优震荡周期在壁面震 荡诱导的含颗粒湍槽流中存在的原因.这一发现与 Quadrio 等^[22] 对壁面震荡诱导的单相湍槽流的最优 震荡周期的解释一致. 图 9(a) 和图 9(c) 为非震荡情 况下的涡结构,可以发现震荡导致近壁处的涡结构 增多.

为了进一步探究减阻规律,本节在 Choi 等^[18]

力







Fig. 8 Streamwise velocity contours near a wall

和 Quadrio 等^[22] 研究的基础上对壁面震荡诱导的颗 粒湍槽流的参数 S⁺进行了分析, S⁺可以用作预测 减阻率, 表达式为

$$S^{+} = \frac{a^{+}y_{d}^{+}}{A^{+}}$$
(14)

其中, y⁺_d为 Stokes 层的影响厚度, 定义为

 $y_d^+ = \sqrt{T^+/\pi} \ln(A^+/W_t^+)$ (15)

 a^+ 为 Stokes 层的加速度, 定义为

$$a^{+} = 2\pi (A^{+}/T^{+}) \exp\left[-\sqrt{(\pi/T^{+})}y^{+}\right]$$
(16)

其中, W⁺ 表示展向速度波动的临界值, y⁺表示距壁



面的位置. 可以发现 S^+ 取决于 y_d^+ , a^+ 以及 A^+ 这 3 个 参数, 为了计算 S^+ , 需要先对 W_t^+ 和 y^+ 这两个参数进 行赋值. 根据过往研究的经验^[18,22], 设定 W_t^+ 的取值 范围为 $0.5 \sim 1.5$, y^+ 的取值范围为 $5.0 \sim 7.5$, 分别计 算对应的 a^+ 和 y_d^+ , 进而求得 S^+ . 根据 Quadrio 等^[22] 的思想, 将 S^+ 与减阻率 R_p 进行最小二乘拟合, 拟合 质量的好坏通过相关系数 R^2 给出, 选择最高的 R^2 所对应的拟合结果即可.

为了获得更准确的拟合结果,本节继续增添了 更多的算例,设置 $A^+=7$, 3, $T^+=40$, 75, 85, 105.考虑到 在较高的震荡周期下,湍流结构有足够的时间重新 适应从而使摩擦阻力值趋向于恢复到未扰动状态, 这可能会使得 S^+ 的预测不再准确.因此在拟合过程 中剔除了 $T^+ > 150$ 的点,这里与 Quadrio等^[22]的做 法类似.分别对含粒径为 a/H = 0.1, 0.25 的颗粒湍槽 流的 S^+ 进行拟合, 拟合结果如图 10所示,可以发现 S^+ 与 R_p 间呈线性关系.

当 $R_p=0$ 时,可以求得能够实现减阻的 S^+ 的最 小值 S_{\min}^+ ,即横轴上的截距.进一步通过式 (14) ~



式(16)推导出能够实现减阻的最小无量纲震荡振幅

$$A_{\min}^{+} = W_t^+ \exp\left[\frac{S_{\min}^+}{2}\sqrt{\frac{T^+}{\pi}}\exp\left(y^+\sqrt{\frac{\pi}{T^+}}\right)\right]$$
(17)

分别计算不同粒径下的 A^+_{min} 随 T^+ 的变化情况, 结果如图 11 所示,可以发现当 T^+ 较小时, a/H =0.25 对应的 A^+_{min} 较小,即更容易减阻,而当 T^+ 较 大时, a/H = 0.1 对应的 A^+_{min} 较小,这一结论与减阻 率的变化 (见图 5) 情况相符:在震荡周期较大时,施 加壁面震荡会使含小颗粒湍流产生更好的减阻



报

效果.

2.3 颗粒与震荡的耦合减阻效果研究

上节中主要以含颗粒非震荡湍槽流的平均流速 为基准,研究了壁面震荡对含不同尺寸颗粒湍槽流 减阻的影响.事实上,与单相非震荡湍槽流相比,无 论是添加悬浮颗粒还是施加壁面震荡均会对阻力产 生影响.本节将以单相非震荡湍槽流的平均流速为 基准,进一步研究添加不同尺寸颗粒和施加震荡共 同作用下的减阻效果.参考 Li 等^[25] 对震荡和各向同 性壁面滑移耦合效应的研究,本文将颗粒和震荡共 同作用下的减阻效果 R'_{p+osc} 分解为以下 3 部分:震荡 带来的减阻效果 R'_{osc} ,颗粒带来的减阻效果 R'_{p} 震荡和颗粒耦合效应对减阻的调制效果 R'_{coup} .为了 方便计算,将减阻率公式的分母统一设置为单相 非震荡湍槽流的平均流速,上述减阻效果定义则分 别为

$$R'_{p+osc} = \frac{u_{pl-osc}^2 - u_{pf-no-osc}^2}{u_{pf-no-osc}^2}$$
(18)

$$R'_{\rm osc} = \frac{u_{\rm pf-osc}^2 - u_{\rm pf-no-osc}^2}{u_{\rm pf-no-osc}^2}$$
(19)

$$R'_{\rm p} = \frac{u_{\rm pl-no-osc}^2 - u_{\rm pf-no-osc}^2}{u_{\rm pf-no-osc}^2}$$
(20)

$$R'_{\text{coup}} = R'_{\text{p+osc}} - R'_{\text{p}} - R'_{\text{osc}}$$
 (21)

分别计算含不同尺寸颗粒的湍槽流的 R'_{p+osc},结 果如图 12(a) 所示.可以发现 R'_{osc} 随震荡周期的变化 趋势与 R'_{osc}一致,说明震荡占主导作用.当颗粒尺寸为 a/H = 0.1 时,计算 R'_p =-0.06,当颗粒尺寸为 a/H = 0.25 时,计算 R'_p =0.002,说明对于单相湍流而言,添 加大颗粒可以减阻而添加小颗粒可以增阻,这解释 了图 12(a) 中大颗粒对应的曲线高于小颗粒对应的 曲线的原因. R'_{coup} 的结果如图 12(b) 所示,可以发现 震荡周期小于最优周期时, R'_{coup} 较小甚至为负数,而 超过最优周期后, R'_{coup} 逐渐增大,且 R'_{coup} 最高可占 R'_{p+osc} 最大值的 10% 左右.这种现象在添加小颗粒 的情况下表现更加明显,即小于最优周期时,大颗粒 表现更好,而大于最优周期时,小颗粒表现更好.这 也可以进一步解释图 12(a) 的趋势变化,即对于小颗 粒而言,当震荡周期超过最优周期时,曲线更接近



R'osc,而当震荡周期小于最优周期时,曲线远离R'osc, 对于大颗粒则反之.因此,对于单相湍流而言,在施 加震荡和添加大颗粒的共同作用下,大震荡周期时 的减阻效果会比仅施加震荡更好.

3 总结

颗粒湍槽流的减阻研究具有广泛的应用价值, 本文采用 DF/FD 方法开展了壁面展向震荡诱导的 颗粒湍槽流的直接数值模拟研究.

首先,本文对非震荡单相湍槽流和壁面展向震 荡诱导的单相湍槽流进行直接数值模拟,并将结果 与文献中进行对比,结果吻合较好,验证了本文所使 用数值方法的准确性.

其次,本文对含不同大小颗粒的壁面展向震荡 诱导的颗粒湍槽流展开了研究.发现对于含颗粒湍 流而言,壁面震荡的加入可以达到有效减阻,且随着 震荡周期的增加,减阻率有着先上升后下降的趋势, 即存在最优震荡周期.且减阻效果在含小颗粒湍槽 流上表现得更好. 震荡导致流向速度脉动和雷诺应 力峰值及颗粒向槽道中心迁移并显著影响近壁处的 湍流动力学,包括使流向速度脉动和雷诺应力降低 以及破坏相干结构.为了进一步探究减阻规律,本文 对壁面震荡诱导的颗粒湍槽流的参数 *S*⁺进行了分 析,发现 *S*⁺与减阻率间呈线性关系.并通过减阻率预 测表达式在横轴上的截距计算了能够实现减阻的最 小无量纲震荡振幅*A*⁺_{min},结果表明在相同的震荡周 期下,较小的*A*⁺_{min}对应着较大的减阻率.

最后,本文进一步研究了施加震荡和添加颗粒 的耦合减阻效果,发现在震荡和大颗粒共同作用下 的减阻效果要优于仅震荡和震荡与小颗粒共同作用 下的减阻效果.

参考文献

- Peng C. Study of turbulence modulation by finite-size solid particles with the lattice boltzmann method. [PhD Thesis]. Newark: University of Delaware, 2018
- 2 Voth GA, Soldati A. Anisotropic particles in turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2017, 49(1): 249-276
- 3 Gore RA, Crowe CT. Effect of particle size on modulating turbulent intensity. *International Journal of Multiphase Flow*, 1989, 15(2): 279-285
- 4 Gore RA, Crowe CT. Modulation of turbulence by a dispersed phase. *Journal of Fluids Engineering*, 1991, 113(2): 304-307
- 5 唐一敏, 陈林烽, 董宇红. 近壁湍流和微颗粒的两相作用及减阻效 应. 上海大学学报 (自然科学版), 2012, 18(3): 282-287 (Tang Yimin, Chen Linfeng, Dong Yuhong. Numerical investigation of particle interaction with wall-bounded turbulence and drag reduction. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2012, 18(3): 282-287 (in Chinese))
- 6 Zhao LH, Andersson HI, Gillissen JJJ. Turbulence modulation and drag reduction by spherical particles. *Physics of Fluids*, 2010, 22(8): 081702
- 7 Pan Y, Banerjee S. Numerical investigation of the effects of large particles on wall-turbulence. *Physics of Fluids*, 1997, 9(12): 3786-3807
- 8 Lucci F, Ferrante A, Elghobashi S. Modulation of isotropic turbulence by particles of Taylor length-scale size. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 650(1): 5-55
- 9 Shao X, Wu T, Yu Z. Fully resolved numerical simulation of particle-laden turbulent flow in a horizontal channel at a low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 693: 319-344
- 10 余钊圣, 王字, 邵雪明等. 中性悬浮大颗粒对湍槽流影响的数值研究. 浙江大学学报:工学版, 2013, 47(1): 109-130 (Yu Zhaosheng, Wang Yu, Shao Xueming, et al. Numerical studies on effects of neutrally buoyant large particles on turbulent channel flow. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2013, 47(1): 109-130

(in Chinese))

- 11 Yu Z, Zhu C, Wang Y, et al. Effects of finite-size neutrally buoyant particles on the turbulent channel flow at a Reynolds number of 395. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019, 40(2): 293-304
- 12 Balachandar S. Turbulent dispersed multiphase flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010, 42(1): 111-133
- 王英奎, 江春波, 李玲. 流动减阻的研究综述. 水力发电, 2008, 2: 70-73 (Wang Yingkui, Jiang Chunbo, Li Ling. Review of research on drag reduction. *Water Power*, 2008, 2: 70-73 (in Chinese))
- 14 Marusic I, Chandran D, Rouhi A, et al. An energy-efficient pathway to turbulent drag reduction. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5805
- 15 Jung WJ, Mangiavacchi N, Akhavan R. Suppression of turbulence in wall-bounded flows by high-frequency spanwise oscillations. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1992, 4(8): 1605-1607
- 16 Du Y, Karniadakis GE. Suppressing wall turbulence by means of a transverse traveling wave. *Science*, 2000, 288(5469): 1230-1234
- 17 Quadrio M, Ricco P. Initial response of a turbulent channel flow to spanwise oscillation of the walls. *Journal of Turbulence*, 2003, 4(1): 007
- 18 Choi J, Xu C, Sung HJ. Drag reduction by spanwise wall oscillation in wall-bounded turbulent flows. *AIAA Journal*, 2002, 40(5): 842-850
- 19 Ricco P, Quadrio M. Wall-oscillation conditions for drag reduction in turbulent channel flow. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 2008, 29(4): 891-902
- 20 Ricco P, Ottonelli C, Hasegawa Y, et al. Changes in turbulent dissipation in a channel flow with oscillating walls. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 700(6): 77-104
- 21 Yakeno A, Hasegawa Y, Kasagi N. Modification of quasi-streamwise vortical structure in a drag-reduced turbulent channel flow with spanwise wall oscillation. *Physics of Fluids*, 2014, 26(8): 085109
- 22 Quadrio M, Ricco P. Critical assessment of turbulent drag reduction through spanwise wall oscillations. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 521: 251-271
- 23 Touber E, Leschziner MA. Near-wall streak modification by spanwise oscillatory wall motion and drag-reduction mechanisms. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 693: 150-200
- 24 Yuan W, Zhang M, Cui Y, et al. Phase-space dynamics of near-wall streaks in wall-bounded turbulence with spanwise oscillation. *Physics of Fluids*, 2019, 31(12): 125113
- 25 Li Z, Ji S, Duan H, et al. Coupling effect of wall slip and spanwise oscillation on drag reduction in turbulent channel flow. *Physical Review Fluids*, 2020, 5(12): 124601
- 26 Quadrio M, Ricco P, Viotti C. Streamwise-traveling waves of spanwise wall velocity for turbulent drag reduction. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 627: 161-178
- 27 Ricco P, Skote M, Leschziner MA. A review of turbulent skin-friction drag reduction by near-wall transverse forcing. *Progress in Aerospace Sciences*, 2021, 123: 100713
- 28 Yu Z, Shao X. A direct-forcing fictitious domain method for particulate flows. *Journal of Computational Physics*, 2007, 227(1): 292-314
- 29 Glowinski R, Pan TW, Hesla TI, et al. A distributed Lagrange multi-

plier/fictitious domain method for particulate flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 1999, 25(5): 755-794

力

- 30 Crowe CT, Sommerfield M, Tsuji Y. Multiphase Flows with Droplets and Particles. Boca Raton: CRC Press, 2011
- 31 Yu Z, Lin Z, Shao X, et al. A parallel fictitious domain method for the interface-resolved simulation of particle-laden flows and its application to the turbulent channel flow. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2016, 10(1): 160-170
- 32 Zhu C, Yu Z, Pan D, et al. Interface-resolved direct numerical simulations of the interactions between spheroidal particles and upward vertical turbulent channel flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 891: A6
- 33 Zhu C, Qian L, Lin Z, et al. Turbulent channel flow of a binary mixture of neutrally buoyant ellipsoidal particles. *Physics of Fluids*, 2022, 34(5): 53609
- 34 Wang LP, Peng C, Guo Z, et al. Lattice Boltzmann simulation of particle-laden turbulent channel flow. *Computers & Fluids*, 2016, 124: 226-236
- 35 Moser RD, Kim J, Mansour NN. Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to *Reτ* = 590. *Physics of Fluids*, 1999, 11(4): 943-945
- 36 Jimenez J, Hoyas S. Turbulent fluctuations above the buffer layer of wall-bounded flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, 611: 215-236
- 37 Hurst E, Yang Q, Chung Y. The effect of Reynolds number on turbulent drag reduction by streamwise travelling waves. *Journal of*

Fluid Mechanics, 2014, 759: 28-55

报

- 38 Stokes GG. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1851, 9: 8-106
- 39 Stokes GG. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1851, 9: 8-106
- 40 Zhu C, Yu Z, Shao X. Interface-resolved direct numerical simulations of the interactions between neutrally buoyant spheroidal particles and turbulent channel flows. *Physics of Fluids*, 2018, 30(11): 115103
- 41 Picano F, Breugem W, Brandt L. Turbulent channel flow of dense suspensions of neutrally buoyant spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 764: 463-487
- 42 Rubinow SI, Keller JB. The transverse force on a spinning sphere moving in a viscous fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961, 11(3): 447
- 43 Saffman PG. The lift on a small sphere in a slow shear. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, 22(2): 385-400
- 44 Shao X, Yu Z, Sun B. Inertial migration of spherical particles in circular Poiseuille flow at moderately high Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 2008, 20(10): 103307
- 45 Costa P, Picano F, Brandt L, et al. Universal scaling laws for dense particle suspensions in turbulent wall-bounded flows. *Physical Review Letters*, 2016, 117(13): 134501