

文章编号: 1007-7294(2024)08-1209-12

极地环境下圆管液滴撞击特性分析

于东玮^{1,2,4}, 吴刚³, 刘志兵³, 纪杨¹, 刘晨阳¹, 韩雪阳¹, 张大勇¹
(1. 大连理工大学海洋科学与技术学院, 辽宁 盘锦 124221; 2. 大连理工大学运载工程与力学学部, 辽宁 大连 116023; 3. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200021; 4. 三沙市南海科学试验中心, 海南 三沙 573199)

摘要: 覆冰是威胁极地环境下海洋工程装备上部设施安全运行的潜在危险, 而液滴收集系数反映了结冰对象捕获过冷却液滴的有效程度, 因而是覆冰生长预测的关键参数。本文采用欧拉法对颗粒两相圆柱绕流进行数值仿真, 通过研究液滴的斯托克斯数(St)和液滴雷诺数(Re_w)两个关键因素, 对液滴运动轨迹的影响规律进行分析。研究发现, 斯托克斯数对液滴运动轨迹影响明显, 在 St 较大($St>1$)时, 收集系数完全取决于 St , 而 Re_w 的影响较弱, 随着 Re_w 的增加, 整体收集系数和局部收集系数缓慢减小; 在 St 较小($0.26<St<1$)时, 随着 Re_w 的增加, 局部和整体收集系数显著减小; 由于流体在圆柱下游形成漩涡, 在 $St<0.26$ 时具有更大的随流性, 驱使液滴卷入圆柱尾部近壁区, 甚至与圆柱后壁发生碰撞, 使得局部和整体收集系数随 Re_w 增加而变大。

关键词: 极地; 欧拉法; 收集系数; 数值模拟; 圆柱绕流

中图分类号: TK1 U6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.08.008

Analysis of droplet collision with circular tubes in polar environment

YU Dong-wei^{1,2,4}, WU Gang³, LIU Zhi-bing³, JI Yang¹, LIU Chen-yang¹, HAN Xue-yang¹, ZHANG Da-yong¹
(1. School of Ocean Science and Technology, Dalian University of Technology, Panjin 124221, China; 2. Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 3. Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200021, China; 4. South China Sea Scientific Experiment Center, Sansha 573199, China)

Abstract: The icing problem seriously threatens the safety of ship navigation in the polar environment. The droplet collection coefficient is to determine how effectively a body collects water droplets and is the key parameter for prediction of ice accretion. In this paper, the Euler method was used to numerically simulate the two-phase flow around a circular cylinder. Analysis of the influence on the trajectory of the droplet by studying the droplet Stokes number (St) and droplet Reynolds number (Re_w). Research shows that St has a significant effect on the trajectory of droplets. When St is large ($St>1$), the collection coefficient depends entirely on the St , Re_w influence is weaker, the total collection coefficient and local collection coefficient slowly decrease with the increase of Re_w . When St is small ($0.26<St<1$), as Re_w increases, the local and total collection coefficients significantly decrease. Because the fluid forms a vortex downstream of the cylinder, it has a greater flow-following feature at $St<0.26$, driving droplet coiling to be sucked into the near-wall area at the end of the cylinder, even colliding with the back wall of the cylinder, such that the local and total collection coefficients become larger with the increase of Re_w .

收稿日期: 2024-02-26

基金项目: 高技术船舶科研项目(CBG2N21-2-2); 国家自然科学基金资助项目(52071055);

中央高校基本科研业务费资助项目(DUT22QN237)

作者简介: 于东玮(1987-), 男, 博士; 张大勇(1978-), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: zhangdy@dlut.edu.cn。

Key words: Polar region; Euler method; droplet collection coefficient; numerical simulation; flow around circular cylinder

0 引 言

极地的油气资源与航道开发是国家战略的组成部分,未来将有更多的船舶航行在极地海域。极地气候环境极端恶劣,冰雪常年覆盖,在频繁的海气交换、大量海水溅淋和高湿空气的影响下,海工装备的上部结构极易结冰^[1]。当装备上层结构的表面覆冰不均匀时,船体会发生倾斜,从而导致航行不稳,严重情况下出现倾覆或沉没^[2]。覆冰增加的重量会对结构稳性和应力造成影响,也会造成设备损害和人员伤亡^[3]。同时,海工装备上部结构结冰会增加操作难度,造成不可预测的结果^[4]。圆管是极地海洋工程装备中应用较为广泛的构件,例如扶手、管道、杆件等,管系覆冰情况如图1所示。

覆冰是由过冷水滴撞击构件表面引起,如图2所示,所以过冷水滴参数是影响覆冰冰形和覆冰量的重要参数之一。它表征了构件表面的水滴撞击量以及撞击区域,通过获得的水滴收集系数,才能进行冰生长预测和防寒设计。国内外学者做了大量水滴撞击特性的研究工作。NASA早期就已经进行了航空航天领域装备覆冰过程研究,对圆柱体、机翼结构、旋转物体等结构类型进行冰风洞实验,主要开展云中液滴与结构碰撞试验,提出了液滴碰撞规律和水滴收集系数经验公式。一般来说,冰风洞造价昂贵,试验条件复杂,测量液滴碰撞系数也不方便。



图1 管系覆冰情况

Fig.1 Ice covered on pipe surface

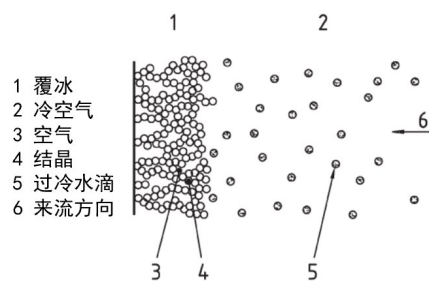


图2 覆冰生长过程

Fig.2 Growth of ice on surface of ocean structure

随着计算机的迅速发展,大多数学者通过仿真手段研究覆冰规律,并使用数值仿真进行水滴收集系数的计算。水滴在流场内的运动可以归纳为颗粒两相流问题,采用数值模拟求解空气流场和水滴的运动轨迹,主要有拉格朗日法和欧拉法。通过欧拉或拉格朗日法进行气流流场分析、水滴受力分析,建立水滴的运动方程并求解运动轨迹。通过不断积累的水滴撞击实验数据对算法进行验证,由此发展了较多的水滴收集系数数值分析方法。杨倩等^[5]采用拉格朗日方法对发动机进气道外的水滴撞击特性进行数值模拟,确定了水滴的撞击极限、总收集系数和局部水收集系数等水滴撞击特性参数;张大林^[6]等采用欧拉法进行了水滴撞击特性研究,明确过冷水滴的大小和机翼攻角的变化对结冰区的大小和水收集系数的影响;Mirshafiei^[7]、梁曦东^[8]、Iuliano^[9]等分别采用数值仿真方法对导线的液滴碰撞问题进行研究,总结出水滴运动规律。显然,气象条件会严重影响覆冰过程中过冷水滴碰撞规律,而上述研究环境条件大多为负温云层,这与极地环境差异较大。

对于大于 $1\ \mu\text{m}$ 的粒子,惯性撞击优于其他机制^[10],因此,粒子运动由惯性和液滴周围的流场决定^[11]。粒子的斯托克斯数(St)是惯性作用和扩散作用的比值,表示粒子跟随流体流动的能力,颗粒惯性越小,流体流动的影响敏感性越大,粒子扩散作用就越明显;反之,粒子惯性越大,粒子运动的跟随性越不明显。Langmuir^[12]提出了一种将两相体流动问题假设为势流或不可压缩流体的低雷诺数流的方法计算收集系数,采用线性插值方法,对中间区域雷诺数的液滴进行收集系数计算。Walton等^[13]通

过实验测定单个水滴,获得 Re_w 为 65.5~900、 St 为 0.06~2.81 时的水滴收集系数。Davenport 等^[14]对实验数据进行拟合,以 St 作为单变量参数,建立了水滴收集系数的简化公式,但是没有考虑 Re_w 的影响。

圆柱体绕流与液滴运动轨迹在不同环境下存在显著差异,当 St 较小时,圆柱体绕流产生的漩涡对液滴运动轨迹影响较为明显。因此,本文考虑影响极地装备覆冰的主要环境条件,基于欧拉法,采用 FLUENT 软件对三维圆柱的流场进行模拟,利用 FENSAP-ICE 对水滴撞击特性开展分析,选取斯托克斯数和液滴雷诺数作为敏感参数,对已有规范和研究人员给出的收集系数公式进行对比分析,讨论斯托克斯数和液滴雷诺数对液滴收集系数的影响。

1 液滴收集系数求解方法

1.1 液滴碰撞特性表征

含有液体颗粒的气体以某一初始速度运动,当遇到结构物时,气流路线将会发生改变。液滴的惯性使其与气流产生速度差,此时由于粘性力的作用,液滴的运动路线会发生偏转。含有液滴的气体在撞击圆柱的过程中,其中刚好与圆柱体相切的运动轨迹称为液滴切线轨迹,切线轨迹之内的液滴将碰撞结构,而轨迹之外的水滴则绕过结构。表征液滴碰撞特性的参数主要有极限碰撞角、局部收集系数和整体收集系数。

如图 3 所示,假设 N_i 液滴起始点垂直 x 轴的距离为 y_0 ,该液滴以速度 v 随流撞击结构,其运动轨迹恰好与结构相切,该切点与原点的连线与负 x 轴的夹角为最大碰撞角,用 θ 表示。

整体收集系数用来确定总的覆冰增长速度,其定义为整个圆柱体表面上实际碰撞的液滴量与最大可能碰撞的总体液滴量的比值,如式(1)表示:

$$E = \frac{y_0}{R} \tag{1}$$

式中, y_0 为水滴切线轨迹在未受到偏转处与 x 轴的距离,单位为 m; R 为圆柱体半径,单位为 m。

在覆冰的形成过程中,圆柱局部表面收集系数的不均匀性将直接影响覆冰的分布与形状,局部收集系数定义为局部表面实际碰撞量与该局部表面上最大可能碰撞量之比,是表征覆冰结构表面局部区域液滴的收集能力。局部收集系数越大,代表一定时间内与圆柱碰撞的液滴越多。如图 3 所示,两个相距为 d_y 的液滴 (N_i, N_{i-1}) 均以速度 v 向圆柱运动并与其发生有效碰撞,两个碰撞点之间的长度为 d_l ,则该处液滴局部收集系数按下式计算:

$$\beta = \frac{d_y}{d_l} \tag{2}$$

式中, d_l 为局部结构表面上上下两条液滴轨迹在圆柱上碰撞点间的表面弧长,单位为 rad; d_y 为上、下两条水滴轨迹在初始位置时的距离,单位为 m。

1.2 液滴收集系数数学分析

颗粒在气体中运动时,颗粒与气相流场间存在动量交换,为表征颗粒对流场变化的响应特性,通常引入斯托克斯数 (St) 进行描述,其定义为颗粒气动力响应时间与流体特征时间的比值:

$$St = \frac{t_0 U}{L} \tag{3}$$

式中, L 为结构物的特征长度,单位为 m; U 为随流速度,单位为 m/s; t_0 为粒子的松弛时间,表示速度受阻力影响而衰减,即

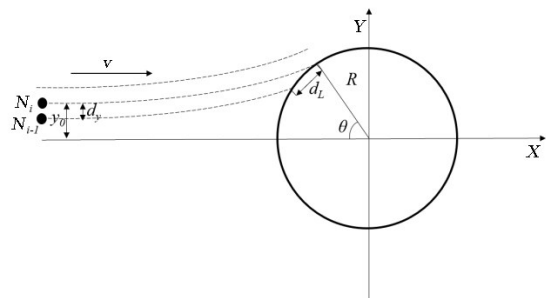


图3 液滴撞击过程

Fig.3 Collision process of droplet

$$t_0 = \frac{\rho d^2}{18\mu} \tag{4}$$

因此斯托克斯数(St)又可以表示为

$$St = \frac{\rho d^2 U}{18\mu L} \tag{5}$$

式中, ρ 为颗粒密度,单位为 kg/m^3 ; d 为颗粒直径,单位为 m ; μ 为流场的绝对粘度,单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

一般具有较低 St 的粒子将跟随流场运动,而具有较高 St 的粒子主要受惯性力作用,将沿初始轨迹继续运动,从而会与物体发生碰撞。从式(3)和(4)中可以看出,大直径的粒子或随流速度更大时,其 St 较高,发生粒子与物体碰撞的概率也越大,由此体现出水滴收集系数所代表的物理意义。

然而,液滴在实际流动中的行为要比以上情况复杂,水滴收集系数不能简单地用 St 的定义来解释,需要使用某种分析或经验公式来计算总体水滴收集系数。目前,液滴的收集系数主要参考 ISO 12494 标准^[15],基于 Langmuir 和 Blodgett 数值解析,采用合理化参数 φ 确定整体收集系数, φ 又称为朗缪尔参数,计算见式(6)。

$$\varphi = Re_w^2 / K \tag{6}$$

$$K = \frac{\rho_w d_w^2 u}{18\mu r} \tag{7}$$

$$Re_w = \frac{\rho_w d_w u}{\mu} \tag{8}$$

式中, ρ_w 为水滴密度,单位为 kg/m^3 ; d_w 为液滴直径,单位为 m ; μ 为空气流场的绝对粘度,单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$; u 为风速,单位为 m/s ; r 为圆柱半径,单位为 m ; Re_w 为液滴的雷诺系数。

目前,有许多学者提出了不同的圆管结构的理论覆冰预测模型,在 Langmuir 和 Blodgett 数值解析基础上,Lozowski、Cansdale、Makkonen 等学者进行改良后拟合出了不同斯托克斯数下的水滴收集系数数值理论预测模型^[16],其认可度较高且应用广泛,但是适用条件有所不同,具体如表 1 所示。

表 1 不同学者提出的水滴收集系数理论预测模型

Tab.1 Calculation formula of droplet collecting coefficients E by different researchers

来源	K 与 Re 关联式	水滴收集系数	适用范围
Langmuir & Blodgett ^[12]	$K_0 = 0.125 + \frac{(K - 0.125)}{1 + 0.0967Re^{0.6367}}$	$E = 0.466 [\log_{10}(8K_0)]^2$	$0.125 < K_0 < 1.1$
		$E = \frac{K_0}{K_0 + \pi/2}$	$K_0 > 1.1$
		$E = \frac{K}{K + \frac{\pi}{2} \cdot 0.112Re^{0.63} + 0.75 \times 10^{-4} Re^{1.38}}$	$E > 0.5$
Lozowski	$K_0 = 0.125 + \frac{(K - 0.125)}{1 + 0.0967Re^{0.6367}}$	$E = 0.489 [\log_{10}(8K_0)]^{1.978}$	$0.125 < K_0 < 0.9$
		$E = \frac{K_0}{K_0 + \pi/2}$	$K_0 > 0.9$
Cansdale & McNaughton	$K_0 = 0.125 + \frac{(K - 0.125)}{1 + 0.087Re^{(0.76Re^{-0.027})}}$	$E = 0.53 [\log_{10}(8K_0)]^{1.8}$	$0.125 < K_0 < 1.1$
Makkonen	$K_0 = 0.125 + \frac{(K - 0.125)}{1 + 0.087Re^{(0.76Re^{-0.027})}}$	$E = \frac{K_0^{1.1}}{K_0^{1.1} + 1.223}$	$K_0 > 1.1$
		$E = \frac{K_0^{1.1}}{K_0^{1.1} + 1.426}$	$K_0 > 0.8$

注: K_0 是关于无量纲参数斯托克斯数 K 计算水滴收集系数的一个中间计算量,随着斯托克斯数的变化而变化; Re 指的是自由流(液滴)的雷诺数。

1.3 收集系数的数值计算

欧拉模型^[17]将液滴和连续流体同样视为连续的介质,采用体积分数描述气流中含液滴量,获得流场各网格节点的液滴体积分数,并描述液滴在流场中运动轨迹及撞击特性。为得到水滴的运动轨迹,需要建立其运动方程。为此,本文将运动过程的液滴简化为固定直径的水滴,并做以下假设:液滴与气流具有相同的初始速度,液滴体积不影响流场性质;液滴设定为颗粒,外形尺寸不变;液滴的温度、粘性、密度等参数保持不变。

数值分析需要考虑两个方面,一是求解流体力学的基本方程组从而得到结构的流场;二是把流场的结果作为条件,求解液滴运动方程,从而确定收集系数。

(1) 流场计算

用偏微分方程对流场进行建模,基于质量、动量和能量守恒理论。对于牛顿流体,依据牛顿运动的第二定律可知,作用在粒子上的总力等于其动量的时间变化率,可以使用一组三个非线性方程式以3D形式编写成Navier-Stokes方程,其方程含有静态压力和动态粘度变量。对于粘性流层,粘度由Sutherland定律定义,该层流粘度是恒定的。由于空气是粘性流体,故模型选择为“Navier-Stokes”模型。

在能量计算上,由于能量守恒,系统的总能量必须守恒。在FENSAP-ICE软件仿真计算中,层流动态粘度是恒定的,是参考空气静态温度计算得出的,可通过“Full-PDE”对能量进行求解。

根据 Re 可以看出该流场呈现很强的湍流特性,所以湍流模型的选择对于结果影响较大。目前FENSAP-ICE软件中较为常见的几种求解湍流模型,有Spalart-Allmaras(S-A)模型^[18]、Low Reynolds Number $k-\omega$ (LRN $k-\omega$)模型^[19]、 $k-\omega$ SST模型^[20]。其中,S-A模型是一个单方程模型,适合应用于非结构网格;LRN $k-\omega$ 模型是为了模拟不可压流的分离流动现象而开发的; $k-\omega$ SST模型在关于风机和飞机湍流模型中有着较高的精度,对处理近壁面流动问题更有优势。故本文湍流模型选择 $k-\omega$ SST模型。由于对于近壁面网格要求是 $Y^+ = 1$,这就对三维结构的网格质量提出了较高的要求^[21]。

(2) 液流计算

通过Navier-Stokes方程加上粒子(液滴或晶体)的连续性和动量方程构成欧拉双流体模型,方程中的重要变量是作用在平均直径粒子上的阻力,它与相对粒子速度成正比,其阻力系数和液滴雷诺数成正比。控制方程描述了与当前拉格朗日编码相同的物理粒子传输现象。对于液流,需考虑粒子间的拖曳关联,这与粒子类型及其阻力相关,液滴阻力模型有四种:Water-default模型、Water-Stokes law模型、Water-extended Reynolds模型、Snowflakes模型^[22]。其中,Water-default模型阻力系数是基于围绕球形液滴的流动的经验相关性,该阻力系数对所有范围的 Re_w 有效;Water-Stokes law模型用于围绕孤立球体的流动,仅对很小的 Re_w ($Re_w < 1$)有效;Water-extended Reynolds模型是默认定律的扩展版本,该阻力系数对应 $Re_w < 10^6$ 均有效;Snowflakes模型的相关性适用于扁球体,可用于计算雪花的收集效率。本文不考虑雪花、过冷大液滴等因素的影响,这里不阐述其机理。

2 数值分析

本文以圆柱作为计算模型,讨论不同斯托克斯数和液滴雷诺数对水滴撞击特性的影响。为了验证模型的准确性,本文利用FLUENT和FENSAP-ICE软件计算了三维圆柱的局部水滴收集系数,并与文献[23]实验值做了对比。计算条件:圆柱直径 $D=0.1016$ m,来流速度 $V=80$ m/s,液滴直径 $d=16$ μ m,计算域为方形,沿着来流方向长度为 $10D$,尾流去流段长度为 $10D$,两侧宽度为 $10D$ ^[24]。流动在选定的计算域内充分发展,圆柱周围采用边界层网格,以捕捉圆柱周围的细微流动。图4为计算域示意图,图5为圆柱周围边界层加密处理的网格划分。

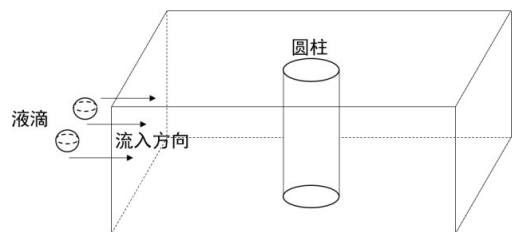


图4 计算域

Fig.4 Computed field

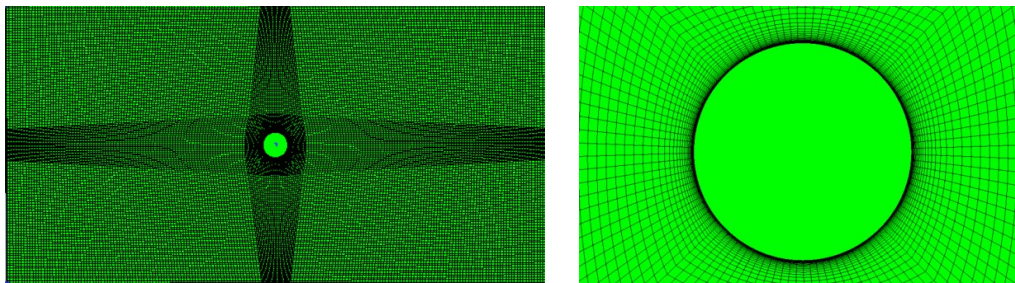


图5 网格划分

Fig.5 Computed meshes

水滴收集系数分布仿真结果与实验数据的对比如图6所示,仿真结果基于FENSAP-ICE(DROP3D)得到,与实验数据相比,两者碰撞极限角相差4.09%、整体收集系数相差3.9%。可以看出,FLU-ENT与FENSAP-ICE结果与实验数据吻合较好。

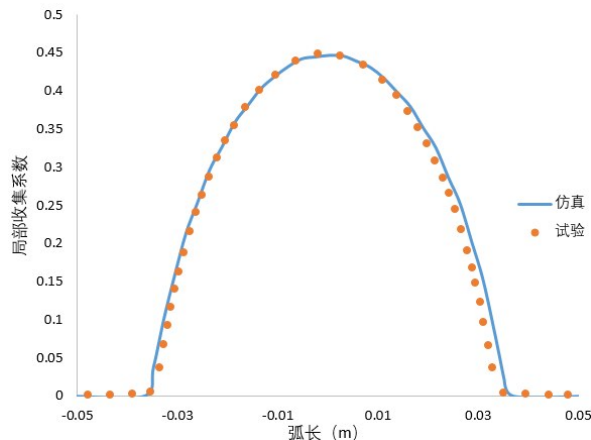
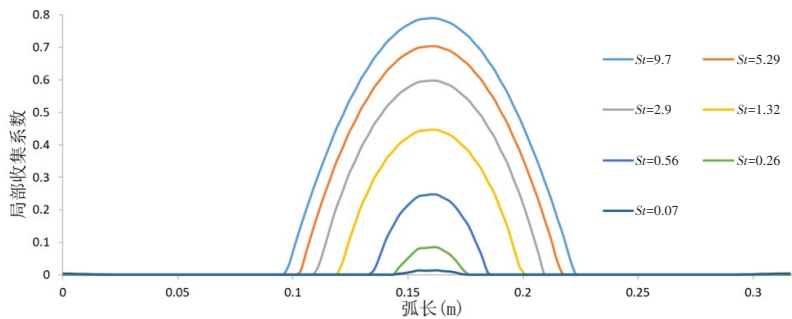


图6 收集系数与实验结果对比

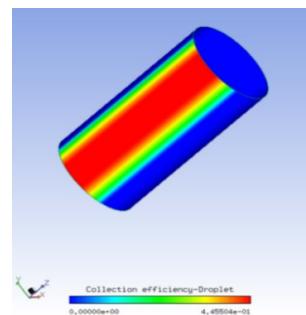
Fig.6 Comparison of numerical and experimental results for droplet collection coefficient

3 计算结果与讨论

上述验证算例表明,该方法能较准确地预测三维结构的收集系数。本文关注的是极地气象条件下圆管构件表面水滴撞击特性的影响,为便于对比分析并从中获得一般规律,选取不同斯托克斯数工况进行分析,如图7~8所示。不同的流动特



(a) 局部收集系数



(b) 圆柱表面收集系数分布云图

图7 不同St下局部收集系数分布

Fig.7 Distribution of local collection coefficients under different St

性会引起不同的液滴运动行为,从而导致收集系数的变化。当St较低($St < 1$)时,整体收集系数、局部最大值、极限碰撞角均随St的增加而显著增加;当St较高($St > 1$)时,总收集系数、局部最大值、极限碰撞角均随St增加而相对缓慢增加。由此可见,St对液滴在流体中的运动轨迹有明显影响,在相同的St下有着不同的液滴 Re_w 。本文基于南极第六次考察极地航线天气分析报告^[25]选取计算工况:液滴直径1~100 μm 、风速0.1~20 m/s、温度-4.5 $^\circ\text{C}$ 、液滴含量1 g/m^3 环境条件下,对不同St下液滴 Re_w 影响进行分析。

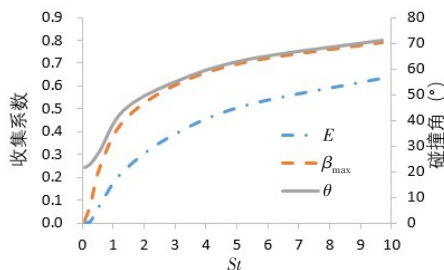
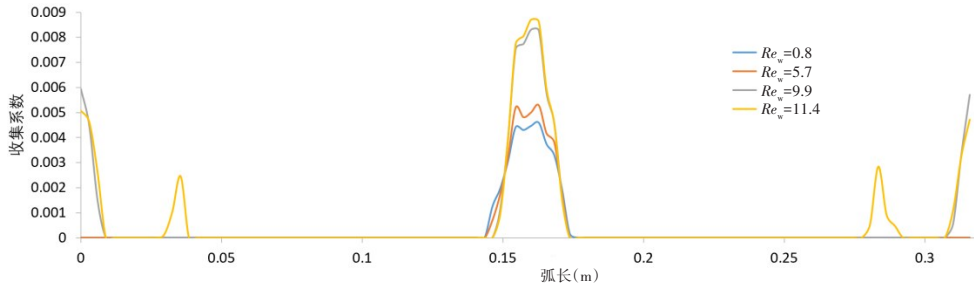


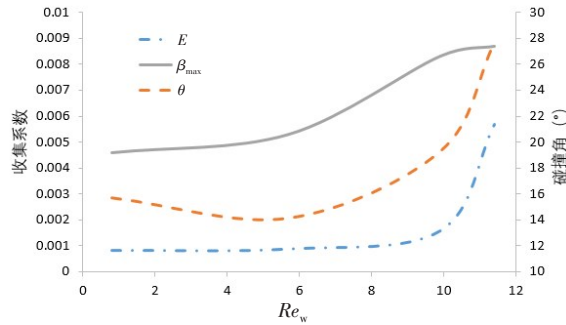
图8 不同St对液滴碰撞特性的影响

Fig.8 Collision characteristics of droplets at different St

液滴 Re_w 表示液滴周围的流场特征,它是决定碰撞特性的另一个关键因素。固定 $St=0.07$ 不变,在不同 Re_w 下的液滴碰撞特性及收集系数如图9所示。总收集系数、极限碰撞角、局部收集系数均随着液滴 Re_w 增加而增大,随着 Re_w 增大其影响也增大。当 St 较小时,液滴越容易跟随流体运动,其扩散作用就越明显,局部收集系数在驻点两侧达到最大。从收集系数局部分布图可以发现,随着 Re_w 增大圆柱下游发生液滴碰撞,主要原因是当流体绕圆柱流动时,随着 Re_w 增大,在尾流中将出现一对稳定的反对称涡,如图10流场图所示。由于 St 较小,液滴跟随流体的运动强于自身的惯性运动,所以液滴也会跟随对称涡运动,并与圆柱下游结构面发生碰撞。



(a) 局部收集系数



(b) Re_w 对碰撞特性的影响

图9 $St=0.07$ 时不同液滴 Re_w 下的碰撞仿真分析

Fig.9 Collision characteristics and local droplet collection coefficients at different Re_w ($St=0.07$)

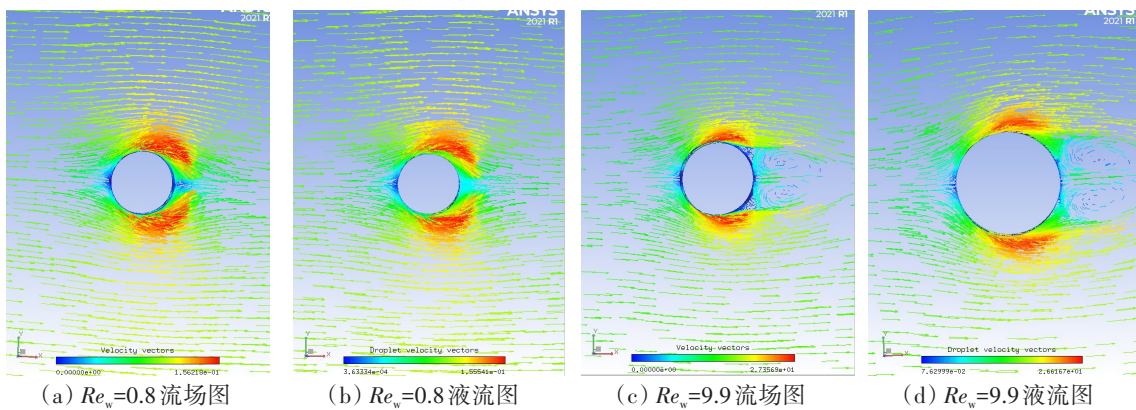
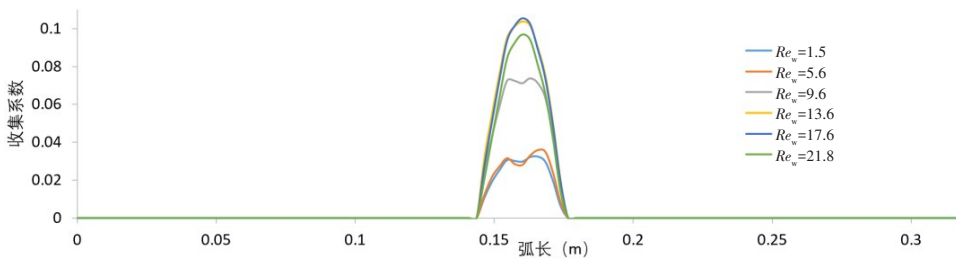


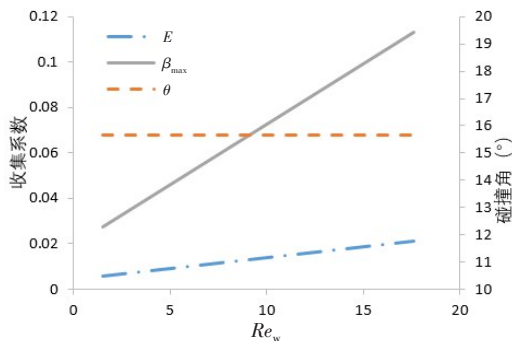
图10 $St=0.07$ 时不同 Re_w 下的流场图和液滴流图

Fig.10 Flow field and droplet velocity at different Re_w ($St=0.07$)

$St=0.26$ 时不同液滴 Re_w 的影响如图11所示。总收集系数、局部收集系数均随液滴 Re_w 的增加而增大,极限碰撞角几乎不变。随着 St 与液滴 Re_w 的增大,液滴惯性增大,液滴运动的跟随性越不明显,局部收集系数在驻点处达到最大。如图12所示,随着 Re_w 增大,当圆柱下游产生对称漩涡后,由于 St 变大,在漩涡内没有发生液滴随流现象。



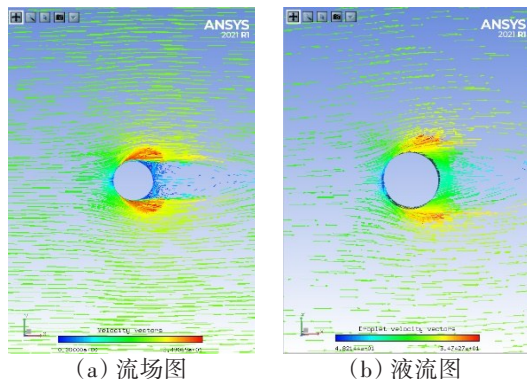
(a) 局部收集系数



(b) Re_w 对碰撞特性的影响

图 11 $St=0.26$ 时不同液滴 Re_w 下的碰撞仿真分析

Fig.11 Collision characteristics and local droplet collection coefficients at different Re_w ($St=0.26$)



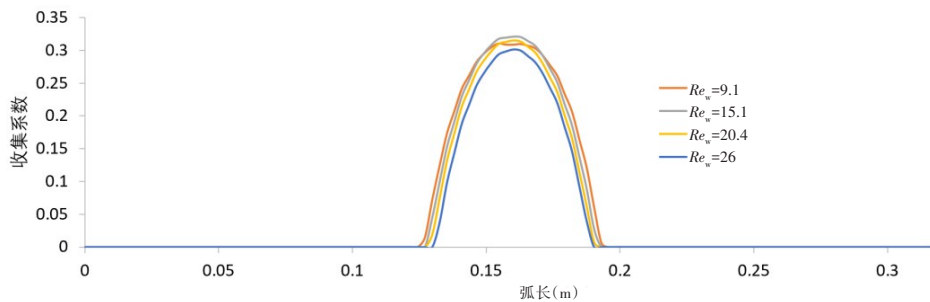
(a) 流场图

(b) 液滴流图

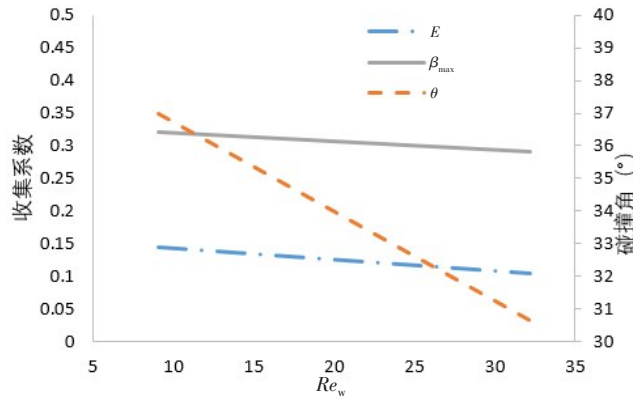
图 12 $St=0.26$ 、液滴 $Re_w=21.8$ 的流场图和液滴流图

Fig.12 Flow field and droplet velocity at $Re_w=21.8$ ($St=0.26$)

$St=0.56$ 时不同液滴 Re_w 的影响如图 13 所示。总收集系数、局部收集系数受液滴 Re_w 影响较小。极限碰撞角随 Re_w 的增大而减小。随着 St 的增大,液滴运动的跟随性变得越不明显,局部收集系数在驻点处达到最大。



(a) 局部收集系数



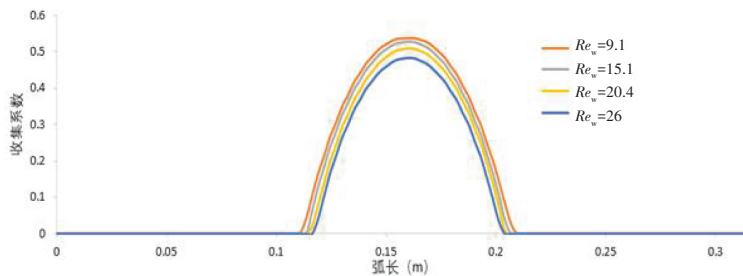
(b) Re_w 对碰撞特性的影响

图 13 $St=0.56$ 时不同液滴 Re_w 下的碰撞仿真分析

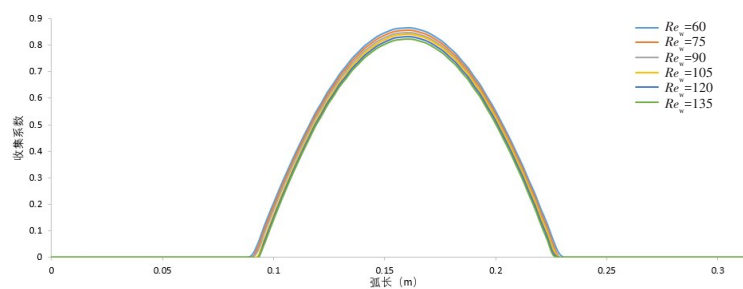
Fig.13 Collision characteristics and local droplet collection coefficients at different $Re_w(St=0.56)$

当 $St>1$ 时不同液滴 Re_w 的影响如图 14 所示。总收集系数、局部收集系数、极限碰撞角随 Re_w 的增大而缓慢减小,局部收集系数均在驻点处达到最大。

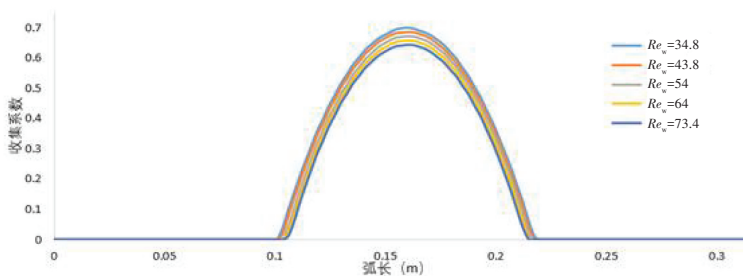
通过以上分析发现,在不同的环境条件下, St 和液滴 Re_w 与收集系数的关系不同。在低 St 区域($St<1$),整体和局部收集系数随 St 的增加而显著增加。而在高 St 区域($St>1$),整体和局部收集系数随 St 增加而相对缓慢增加。在不同的 St 下,受 Re_w 影响的收集系数变化率的计算结果如表 2 所示。由表可



(a) $St=1.3$ 时局部收集系数



(b) $St=2.8$ 时局部收集系数



(c) $St=9.7$ 时局部收集系数

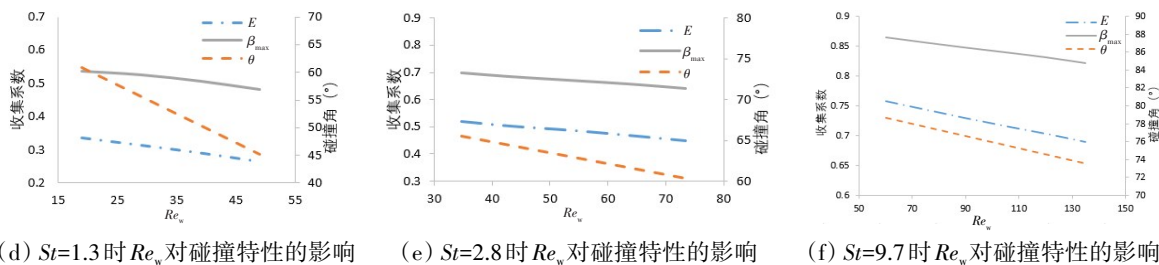


图14 当 $St > 1$ 时不同液滴 Re_w 下的碰撞仿真分析

Fig.14 Local collection coefficients and collision characteristics at different Re_w ($St > 1$)

以发现, Re_w 对收集系数的影响存在显著差异, 当 $St > 1$, 收集系数完全取决于 St , 受 Re_w 的影响较弱, 随着 Re_w 的增加, 整体收集系数和局部收集系数缓慢减小; 但在 $St < 1$ 时, 随着 Re_w 的增加, 局部和整体收集系数则会发生显著变化。

表2 不同 St 下圆柱收集系数受 Re_w 影响的变化率

Tab.2 Differences of cylinder collection coefficients caused by Re_w variation under different St

St	整体收集系数变化率	局部收集系数变化率	St	整体收集系数变化率	局部收集系数变化率
0.07	55.80%	7.46%	1.3	-0.9%	-0.38%
0.26	12.40%	13.9%	2.8	-0.41%	-0.23%
0.56	-1.74%	-1.76%	9.7	-0.13%	-0.07%

表3列出了不同工况下本文的仿真计算值与若干经验公式计算值。从经验公式的结果可以看出, 总收集系数随着 St 的减小而减小, 与本文仿真结果的误差也随之增大, 当 $St < 0.125$ 时将无碰撞发生; 当 $St > 1$ 时, Makkonen 经验公式计算的总收集系数与本文的仿真结果基本相符; 当 $0.125 < St < 1$ 时, Cansdale & McNaughton 经验公式更接近本文的仿真结果。

表3 水滴收集系数的不同计算结果比较

Tab.3 Comparison of calculated results for droplet collection coefficients from different approaches

斯托克斯数	水滴收集系数(与仿真误差)				
	Langmuir & Blodgett	Lozowski	Cansdale & Mc-Naughton	Makkonen	仿真
3.7660	0.58(3.33%)	0.58(3.33%)	0.65(8.33%)	0.61(1.67%)	0.60
0.8686	0.19(17.39%)	0.20(13.04%)	0.23(0.00%)	0.24(4.35%)	0.23
0.5068	0.09(18.18%)	0.09(18.18%)	0.11(0.00%)	0.13(18.18%)	0.11
0.3856	0.053(19.70%)	0.056(15.15%)	0.071(7.58%)	0.084(27.27%)	0.066
0.1928	0.006(45.45%)	0.007(36.36%)	0.010(9.09%)	0.015(36.36%)	0.011
0.0964	0	0	0	0	0.0022
0.0482	0	0	0	0	0.000 71
0.0386	0	0	0	0	0.000 05

4 结 论

基于流体动力学理论, 本文采用欧拉方法, 利用 Fluent 和 FENSAP-ICE 软件分析了圆柱形状碰撞效率, 对不同 St 及不同初始条件的颗粒动态特性进行了分析, 并与理论模型计算结果进行了分析对比。主要结论如下:

(1) 不同 St 的液滴由于其惯性、对气相速度跟随性和湍流弥散能力不同, 在复杂的圆柱绕流流场中表现出较明显运动差异, 具体体现在运动轨迹、收集系数和极限碰撞角等方面。

(2) 在 $St < 0.26$ 时, 液滴的随流特性明显, 随着 Re_w 的增大圆柱下游产生对称涡, 液滴进入圆柱尾流近壁区域, 甚至与圆柱后壁面发生碰撞, 使得局部和整体收集系数随 Re_w 增加而变大。

(3) 在 $0.26 < St < 1$ 时, 随着 Re_w 的增加, 局部和整体收集系数显著减小; 在 $St > 1$ 时, 收集系数完全取决于 St , 而 Re_w 的影响则较弱, 随着 Re_w 的增加, 总收集系数和局部收集系数均缓慢减小。

(4) St 越大, 理论模型计算与仿真结果就越贴近, 误差越小; 当 $St > 1$ 时, Makkonen 模型与仿真结果符合较好; 当 $0.125 < St < 1$ 时, Cansdale & McNaughton 模型与仿真结果符合较好。

参 考 文 献:

- [1] 谢 强, 陈海龙, 章继峰. 极地航行船舶及海洋平台防冰和除冰技术研究进展[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(1): 45-53.
Xie Qiang, Chen Hailong, Zhang Jifeng. Research progress of anti-icing/deicing technologies for polar ships and offshore platforms[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(1): 45-53. (in Chinese)
- [2] 卜淑霞, 储纪龙, 鲁 江, 等. 积冰对船舶稳性的影响[C]//第二十七届全国水动力学研讨会文集(下册), 2015: 63-69.
Bu Shuxia, Chu Jilong, Lu Jiang, et al. Effect of ice accumulation on ship stability[C]//Proceedings of the 27th National on Hydrodynamics(Volume II). 2015: 63-69. (in Chinese)
- [3] 沈 杰, 白 旭. 基于 Fluent 和 FENSAP-ICE 的极区海洋平台甲板结构结冰数值模拟[J]. 极地研究, 2020, 32(2): 177-183.
Shen Jie, Bai Xu. Numerical simulations of deck structure icing on polar offshore platforms based on Fluent and FENSAP-ICE[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2020, 32(2): 177-183. (in Chinese)
- [4] 汪仕靖. 极地航区船舶积冰预报模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
Wang Shijing. Research on ship ice accumulation prediction model in polar waters[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] 杨 倩, 常士楠, 袁修干. 水滴撞击特性的数值计算方法研究[J]. 航空学报, 2002, 23(2): 173-176.
Yang Qian, Chang Shinan, Yuan Xiugan. Study on numerical method for determining the droplet trajectories[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 173-176. (in Chinese)
- [6] 张大林, 杨 曦, 昂海松. 过冷水滴撞击结冰表面的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 87-91.
Zhang Dalin, Yang Xi, Ang Haisong. Numerical simulation of supercooled water droplets impingement on icing surfaces[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 87-91. (in Chinese)
- [7] Mirshafiei F, McClure G, Farzaneh M. Modelling the dynamic response of iced transmission lines subjected to cable rupture and ice shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 948-954.
- [8] 梁曦东, 李雨佳, 张轶博, 等. 输电导线的覆冰时变仿真模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 336-343.
Liang Xidong, Li Yujia, Zhang Yibo, et al. Time-dependent simulation model of ice accretion on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 336-343. (in Chinese)
- [9] Iuliano E, Mingione G, Petrosino F, et al. Eulerian modeling of large droplet physics toward realistic aircraft icing simulation [J]. Journal of Aircraft, 2011, 48(5): 1621-1632.
- [10] Mohan B R, Jain R K, Meikap B C. Comprehensive analysis for prediction of dust removal efficiency using twin-fluid atomization in a spray scrubber[J]. Separation and Purification Technology, 2008, 63: 269-277.
- [11] Friedlander S K. Smoke, dust, and haze[M]. New York: Oxford University Press, 2000.
- [12] Langmuir I. A Mathematical investigation of water droplet trajectories: Report No.5418[R]. San Antonio: Army Air Forces Headquarters, Air Technical Service Command, 1946: 65-75.
- [13] Walton W H, Woolcock A. The suppression of airborne dust by water spray[J]. International Journal of Air Pollution, 1960, 3: 129-142.
- [14] Davenport H M, Peters L K. Field studies of atmospheric particulate concentration changes during precipitation[J]. Atmospheric Environment, 1978, 12: 997-1008.
- [15] ISO 12494: 2017(E), Atmospheric icing of structures[S]. 2017.
- [16] Wang A, Song Q, Yao Q. Study on inertial capture of particles by a droplet in a wide Reynolds number range[J]. Journal of Aerosol Science, 2016, 93: 1-15.

- [17] 朱永灿. 架空输电线路覆冰生长模型及其关键参数研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
Zhu Yongcan. Research on the icing growth model and key parameters on overhead transmission lines[D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [18] Spalart P R, Allmaras S R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[J]. *Recherche Aerospaciale*, 1994.
- [19] Xiong J, Koshizuka S, Sakai M. ICONE19-43282 turbulence modeling for mass transfer in separated and reattaching flows for flow-accelerated corrosion[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2011.
- [20] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [21] 赵欢, 高正红, 王超, 等. 适用于高速层流翼型的计算网格研究[J]. *应用力学学报*, 2018, 35(2): 351-357.
Zhao Huan, Gao Zhenghong, Wang Chao, et al. Research on the computing grid of high speed laminar airfoil[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2018, 35(2): 351-357. (in Chinese)
- [22] ANSYS FENSAP-ICE user manual[K]. 2021.
- [23] Wirogo S, Srirambhatla S. An eulerian method to calculate the collection efficiency on two and three dimensional bodies[C]// 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, USA, 2003.
- [24] 李霖, 张志国, 王先洲, 等. 低雷诺数圆柱绕流的大涡模拟分析[J]. *舰船科学技术*, 2013, 35(1): 22-26.
Li Lin, Zhang Zhiguo, Wang Xianzhou, et al. Investigation of flow cross cylinder using large eddy simulation at low Re [J]. *Ship Science and Technology*, 2013, 35(1): 22-26 (in Chinese)
- [25] 郭进修, 卞林根, 薛振和, 等. 南极第六次考察极地轮航线天气分析[J]. *海洋预报*, 1992, 1: 72-79.
Guo Jinxiu, Bian Linggen, Xue Zhenhe, et al. Weather analysis of the polar wheel route in Antarctic during the sixth expedition[J]. *Marine Forecasts*, 1992, 1: 72-79. (in Chinese)