doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.002

基于球体模型的苹果接触点局部处理方式研究

韩佳伟[1]　赵春江[2]　钱建平[2]　张　翔[3]　范蓓蕾[2]

(1.北京工业大学计算机学院,北京 100124;2.国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100097;
3.天津科技大学电子信息与自动化学院,天津 300222)

摘要:为实现新鲜果蔬采后预冷 CFD 数值模拟研究,以单个富士苹果为研究对象,构建果品近真实 3D 模型,在雷诺数为 10~30 000 的范围内对比真实果形与等直径球体壁面切应力、壁面阻力系数、边界层分离角度以及尾流回流区长度之间的不同,验证在 CFD 模拟研究中是否可直接利用等直径球体替代苹果真实形状。为实现果品与果品(或箱体壁面)接触点局部位置的最佳 CFD 建模,充分考虑果品之间局部传热性对温度变化的影响,本文以彼此接触的两果模型为研究对象,从壁面阻力系数、两果中心线上的温度模拟结果准确性角度确定 4 种不同的局部处理方式(缩小法、膨胀法、消平法和桥梁法)在不同雷诺数范围内各自最佳的局部处理尺寸范围。研究结果表明,在研究中可直接利用等直径苹果替代苹果真实形状,在整个雷诺数范围内两者之间的各种边界层物理量最大相对偏差在 15% 左右,桥梁法在 4 种接触点局部处理方式中模拟准确性最高,通过对比实验验证,温度模拟值与实测值具有较好的一致性,其最大均方根误差为 1.514℃,平均相对误差在 20% 左右。

关键词:苹果;冷链物流;球体模型;接触点局部处理方式;计算流体力学;数值分析

中图分类号:U469.6+6;S229+.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2016)11-0008-10

Local Processing Mode of Contact Points for Apples Based on Sphere Models

Han Jiawei[1]　Zhao Chunjiang[2]　Qian Jianping[2]　Zhang Xiang[3]　Fan Beilei[2]

(1. *College of Computer Science and Technology*, *Beijing University of Technology*, *Beijing* 100124, *China*
2. *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture*, *Beijing* 100097, *China*
3. *College of Electronic Information and Automation*, *Tianjin University of Science and Technology*, *Tianjin* 300222, *China*)

Abstract: CFD simulations have been widely used in the study of precooling process of fresh fruits and vegetables. This work established a quasi real three-dimensional model of Fuji apples, by comparing the wall shear stress, drag coefficient, separation angle and recirculation length of an apple with those of an equal-diameter sphere over a large Reynolds number range (10~30 000), and whether an apple can be directly replaced by an equal-diameter sphere in the study of CFD models was verifed. Moreover, to achieve the optimal CFD model of contact points between apple and apple (or the wall of boxes) and fully consider heat transferring by contact among apples, two apples contacting with each other were studied. From the accuracy of simulation results of the drag coefficient and temperature distribution along a line from the center of an apple to the center of another apple, the optimal size range of four different ways of the contact point modifications (e.g., reduction, expansion, smoothing, bridge) for different Reynolds number range was determined. The results showed that an apple can be replaced by an equal-diameter sphere in academic research, and the maximum relative deviation was about 15% for all the physical parameters in the whole range of Reynolds number; the accuracy of bridge methods was the best in four

收稿日期:2016-05-09　修回日期:2016-06-19

基金项目:"十二五"国家科技支撑计划项目(2013BAD19B04)和欧盟 FP7 项目(PIRSES-GA-2013-612659)

作者简介:韩佳伟(1989—),男,博士生,主要从事计算机模拟与仿真研究,E-mail:hjwlove8@163.com

通信作者:赵春江(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业信息化关键技术研究,E-mail:zhaocj@nercita.org.cn

different ways of the contact point modifications. The predicted results were consistent with the measured results by comparing simulation results with those of experiments, and the maximum root-mean-square error and average relative error for produce temperature were 1.514℃ and 21.07%, respectively.

Key words: apple; cold-chain logistics; sphere models; local processing mode of contact points; computational fluid dynamics; numerical analysis

引言

在新鲜果蔬冷链物流中,确保果蔬从采后到消费者食用之前的食品安全,尽可能延长新鲜果蔬货架期时间,不仅要求新鲜果蔬在运输、存储及销售环节中处于适宜低温环境,对采收果蔬进行及时低温预冷更为重要。王身相[1]研究指出不经预冷处理的果蔬在流通中损失率高达 25% ~30%,经过预冷处理的果蔬损失率仅为5% ~10%。因此,对果蔬预冷环节进行系统性的学术研究是降低冷链流通环节果蔬损失率,提升全链条经济效益及实现跨区域、跨国远程销售的关键。

球形类果品(苹果、桔子、无花果等)最为常见,也是近年来相关学者的主要研究对象。随着计算机计算能力的飞速提升,CFD 数值模拟在新鲜果蔬冷链物流研究中得到广泛地应用,大幅度降低了科学研究中人力物力投入且周期性短,有效克服了单纯现场实验研究的复杂度大、投入大等缺点,同时也从现场实验的宏观研究跨越到微观、细节性的研究,能更好地洞察冷链中果品自身温度的高时空变化及通风箱体内部冷气流通均匀性等,其研究结果更具实际工程应用价值。为简化 CFD 前处理建模,在荔枝、番茄、苹果等近球形类果品的研究中学者们多采用球体替代果品真实形状,且为成功实现网格划分强制将彼此接触的果品与果品(或箱体壁面)之间留出空隙,而未考虑它们之间的热量传递,然而这是影响果品自身温度变化的关键因素[2-3]。为降低运输、搬运过程中果品的机械损伤,果品外围大多套有泡沫网袋且在包装箱内彼此接触,因此,接触点局部网格建模的合理优化是准确模拟果品温度变化的关键与瓶颈。DEFRAEYE 等[4]、DELELE 等[5-6]、FERRUA 等[7]以及陈秀勤等[8]研究中仅将等直径的球形果品按一定比例缩放产生空隙,不仅改变原有箱体内部孔隙率,且并未根据实际工况选取最佳缩放比例,忽略果与果(或壁面)之间的热传递现象,甚至文献中所示网格化效果图明显粗糙,以致不利于模拟准确性的提高。本文以单个苹果、两个彼此接触的苹果为研究对象,利用 CFD 模拟量化比较苹果真实形状与等直径球体在不同送风雷诺数下边界层分离角度、回流区长度、阻力系数及壁面切应力的大小,验证是否可利用等直径球体替代苹果真实形状进行研究。对比分析 4 种果品接触点局部处理方式对果品表面阻力系数及温度模拟值的影响,确定不同雷诺数下较佳的局部处理尺寸范围,并结合现场实验验证模拟结果的准确性。

1　材料与方法

1.1　物理模型及网格划分

1.1.1　单果模型

以富士苹果为研究对象,苹果直径 d_p 约为8 cm,对应等直径球体取 8 cm。以果轴、果径的交点为原点,在二维平面内测出 5 点位置坐标(*A*、*B*、*C*、*D*、*E*),连接 5 点构成曲线,通过旋转该曲线的方式获取近真实 3D 果实模型(见图 1)。由于球体为轴对称,苹果三维模型为中心面对称,为减少网格单元数量及模拟时间,分别选用 1/4 体积的球体和 1/2 体积的苹果为研究对象,计算域尺寸信息及边界条件设置见图 2。

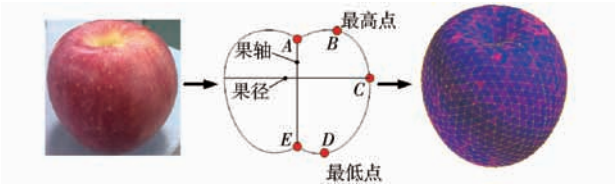

图 1　苹果三维模型构建过程

Fig. 1　Modeling process for three-dimensional CFD model of an individual apple

利用 Gambit 作为前处理软件构建模型并对其网格划分,构建 3D 边界层,确保表面阻力系数、边界层分离角度模拟值的准确性,不同送风雷诺数 *Re*(以果品直径为特征长度)下的边界层厚度 T_b(cm)计算公式为

$$T_b/d_p = 1.13Re^{-0.5}$$

其中

$$Re = \rho v_0 d_p/\mu$$

式中　ρ——空气密度,kg/m^3

v_0——送风速度,m/s

μ——空气动力粘度,N·s/m^2

共 6 层等高边界层,每层厚度为 $T_b/6$[9]。固体区域(球体或果品)网格单元尺寸为 0.2 cm,流体区域采用 Fixed size function 方法控制网格尺寸从边界层到流体区域边界逐步增大,实现固体表面的局部

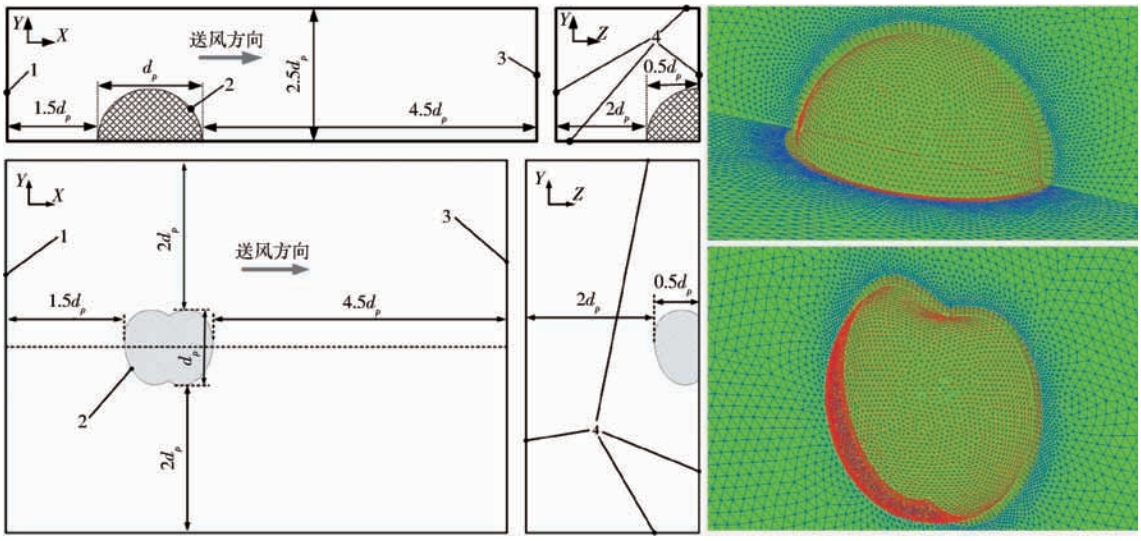

图 2 边界条件及网格划分

Fig. 2 Boundary conditions and meshing for an individual sphere and apple

1. 入风口 2. 无滑移壁面 3. 出风口 4. 对称边界

加密效果,设置起始网格尺寸为 $T_b/6$,最大网格尺寸为 0.5 cm。边界层采用规则六面体网格,其余区域采用非结构化网格,通过网格质量检查,网格单元歪斜度均小于 0.90,图 2 所示为 Re = 1 000 时的网格划分效果图。

1.1.2 两果模型

以球体为研究对象,研究果品与果品(或箱体壁面)接触点局部处理方式对果品表面阻力系数、热量传递的影响。关于接触点局部处理的方式有多种,其中空隙法、膨胀法、桥梁法与削平法是最为普遍使用的 4 种方式(见图 3),其中实线表示果品真实体积边界,虚线表示缩放后的体积边界。

依据球体缩放比例(d_a/d_p,d_a为实际建模直径尺寸)及局部修剪比例不同($2h/d_p$或r_p/d_p,图 3),分别对各方式的 5 种不同比例进行建模与模拟分析。缩小法(d_a/d_p):0.995、0.990、0.985、0.980、0.975;膨胀法(d_a/d_p):1.001、1.005、1.010、1.015、1.02;削平法($2h/d_p$):0.012、0.025、0.038、0.050、0.036;桥梁法(r_p/d_p):0.080、0.120、0.135、0.155、0.175。图 4 所示为两果模型计算区域尺寸、边界条件设置以及温度监测位置(T_1 – T_4),且以削平法($2h/d_p$ = 0.012)为例,给出网格化后的 3D 网格单元平面图。

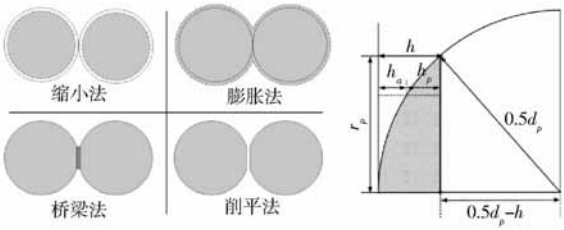

图 3 接触点处理方式示意图

Fig. 3 Schematics of contact point modifications

1.2 数学模型

1.2.1 模型假设与控制方程

假设空气为不可压缩流体,空气、果品物性参数为固定常数,不随温度波动而改变;忽略为搭建实验验证平台所用设备、钢丝等对空气流动及实验结果的影响;忽略果品之间的辐射传热。

流体、果品及流体-果品交界面区域相对应的守恒控制方程参见文献[10 – 12]。

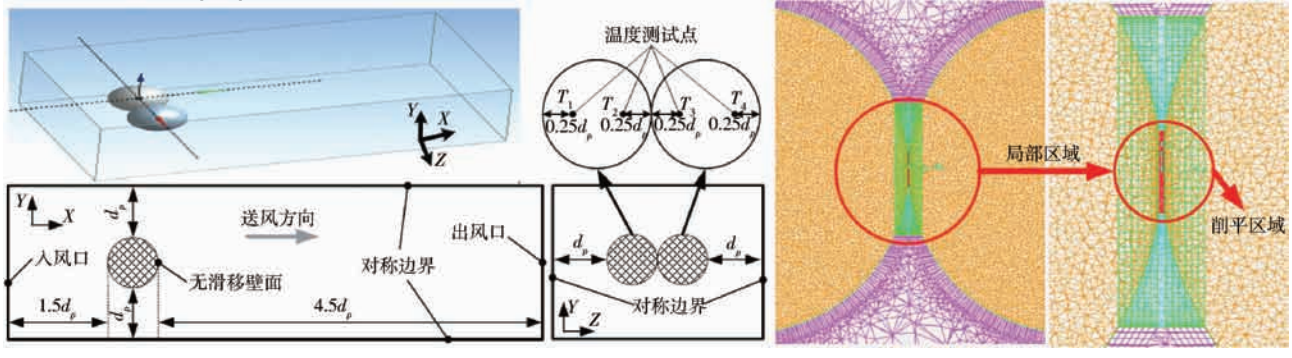

图 4 边界条件及网格划分

Fig. 4 Boundary conditions and three-dimensional grid model

1.2.2 初始及边界条件

初始条件：果品初始温度 T_{pin} 为 27℃，冷空气温度为 2℃左右。

边界条件如下：

（1）入风口（Inlet）：图 2 所示入风口设置为速度进口（velocity-inlet）边界条件。基于单球体绕流的相关研究可知[13]，$Re<20$ 时绕流无边界层分离现象；$20\leqslant Re\leqslant 200$ 时绕流发生边界层分离且呈现稳态对称轮廓；$200<Re<400$ 时绕流发生边界层分离且呈现稳态非对称轮廓；$Re\geqslant 400$ 时绕流发生边界层分离且呈现非稳态非对称轮廓。因此，为充分研究不同流态（层流、过度及湍流）对研究结果的影响，选取 10 种不同 Re（10 ~ 30 000）进行模拟与分析，依据雷诺数对应设置入风口风速值。

（2）出风口（Outlet）：图 2 所示出风口设置为出流（outflow）边界条件，在 outflow 边界上的所有物理量（除压力）梯度为 0，如速度分量 u、v、w 和温度 T 等。

（3）无滑移壁面（No-slip wall）：将果品表面都定义为无滑移壁面（wall），壁面上速度为 0，且垂直于壁面的速度也为 0。

（4）对称边界（Symmetry）：如图 2 所示，将其他计算区域界面设置为对称面。垂直于对称边界面上的速度为 0，其他物理量的值在对称边界的内外相等。

1.2.3 物性参数

空气相对湿度：采用 Apresys 179 - TH 型温湿度数据记录仪测量空气相对湿度（Relative humidity，RH），温湿度测量范围分别为 - 40 ~ 100℃、0 ~ 100%，其测量精度分别为 ±3℃、±3%。

苹果密度：采用浸液法测量果品密度[14]，在相同环境下重复实验 3 次，取平均值。

苹果含水率（W_{H_2O}，%）：采用 HE53/Z02 型水分测定仪测量果品含水率，量程范围为 0.5 ~ 54 g，含水率可读性为 0.01%。

苹果比热容（c_p）与热导率（λ_p）：依据实验获取的果品含水率 W_{H_2O}，参考文献[15]求得果品比热容与热导率。表 1 汇总列出了所有相关物性参数值。

桥梁法圆柱体部位物性参数：基于流体与果品所占体积分数算出圆柱体有效物性参数 P_{eff} 为

$$P_{eff}=0.25P_a+0.75P_p \tag{1}$$

其中 P_a、P_p 分别表示空气与果品的物性参数值（密度、热导率、比热容）。

1.3 实验方法

1.3.1 CFD 模拟

（1）单果模型：通过对比壁面平均切应力 τ_{avg}、壁面阻力系数 C_d、边界层分离角度 θ_s（壁面局部切应力 $\tau_{loc}\approx 0$ 位置，见图 5）、回流区长度 L_s（见图 5）模拟值，验证 CFD 应用于苹果采后处理过程中是否可直接用等直径球体替代苹果真实果形。C_d 的计算式为

表 1　热物性参数

Tab.1　Thermo-physical parameters

参数	名称	
	空气	苹果
密度/（kg·m^{-3}）	1.287 6	840.25
热导率/（W·（m·K）$^{-1}$）	0.024 26	0.575
比热容/（J·kg^{-1}·K^{-1}）	1 004.8	3 739.44
动力粘度/（kg·（m·s）$^{-1}$）	1.72×10^{-5}	
空气相对湿度/%	70 ~ 80	
苹果含水率/%		86.64

$$C_d=\frac{\tau_x A_p}{0.5A_t\rho v_0^2} \tag{2}$$

其中　$A_p=\pi d_p^2$　$A_t=0.25\pi d_p^2$

式中　τ_x——x 方向（流向）的壁面切应力，Pa

A_p——单果表面积，m^2

A_t——垂直于流向方向的单果特征面积，m^2

（2）两果模型：消平法 $2h/d_p\approx 0.004$ 时已非常逼近真实两果接触情况，将此工况下的模拟值作为基准值，比较不同 Re、不同局部处理方式下 C_d 的变化，并且比较预冷 180 min 时刻两果中心连接线上（L_{tem}，见图 5）的温度分布情况，揭示出不同布局处理方式对 C_d 及接触点位置热传递的影响，确定不同 Re 下较佳的接触点局部处理尺寸范围。

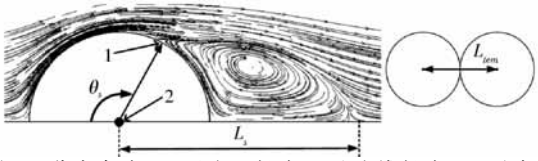

图 5　分离角度 θ_s、回流区长度 L_s 及连线长度 L_{tem} 示意图

Fig. 5　Schematics of separation angle θ_s, recirculation length L_s and line L_{tem}

1. 分离点　2. 圆心

为进一步减少模拟时间，先稳态模拟获取稳定流场，再非稳态模拟求解出温度随时间的变化过程，计算时采用 SST $\kappa-\omega$ 方程模型[16-18]，基于压力的分离式求解器，动量、能量、湍动能、扩散率的离散格式为二阶迎风格式，压力速度耦合方法采用 PISO（Pressure implicit with splitting of operators）算法。

1.3.2 验证方法

以两果模型为对象，进行相应的实验布置（见图 6）。由于在微尺度下果品周围风速、表面阻力大小不易测量，且由相关文献[19]可知，果品周围风速、阻力系数的大小对果品表面对流换热系数、果品

温度变化存在密切的关联性,因此该研究仅测量随时间变化的果品温度值验证整个模拟过程结果的准确性。首先确保冷气温度降为 2℃左右以后再将果品置于实验箱内;所有温度传感器设置每隔 1 min 记录 1 次数据。

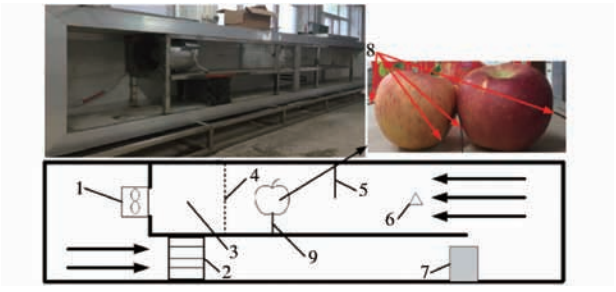

图 6 实验平台结构图与实验装置部署图

Fig. 6 Structure diagram of experimental platform and equipment deployment

1. 差压风机 2. 蒸发器 3. 静压室 4. 蜂窝网 5. 风速仪探头 6. 温湿度传感器 7. 加湿器 8. 热电偶 9. 钢丝

2 结果与分析

2.1 单果模型

表 2 给出了不同 Re 下球与苹果壁面平均切应力 τ_{avg} 的比较,在 $Re=10$ 时,τ_{avg} 存在最大相对偏差为 15.51%,随着 Re 的增加,相对偏差基本呈现不断降低趋势。当 $Re<300$ 左右时,利用球体替代苹果真实果形时产生误差略微偏高,这主要由于在低 Re 壁面边界层流动中,壁面粘性力在动量、热量及质量交换中占主要作用,以致于表面形状的微小变化就会产生比较明显的模拟值偏差。当 $Re\geqslant300$ 左右时,τ_{avg} 的最大相对偏差仅为 5.79%。

图 7 给出了阻力系数 C_d、分离角度 θ_s 与回流区长度 L_s 随 Re 的变化过程,当 $Re=10$ 时,壁面边界层流动不发生分离,以致于 θ_s 与 L_s 为 0。图 7a、7b 中也同时分别给出 CLIFT 等[20]所得 C_d、θ_s 的研究结果,不仅可作为该研究的验证辅助数据,也可实现球形与苹果形状的充分比较。从图中可看出,本研究所得 C_d、θ_s 与 CLIFT 的结果具有较好的一致性。如图 7a 所示,随 Re 的增大,C_d 不断减小且减小速率不断降低。在 $Re=10$ 时,所示球形与苹果的 C_d 偏差最大,其他 Re 下 C_d 的最大偏差值仅为 0.018。如图 7b 所示,θ_s 随 Re 的增大也呈现不断降低的趋势,当 $Re\geqslant5\,000$ 以后基本处于平稳,在整个 Re 范围内球形与苹果的最大相对偏差为 9.4%。从图 7c 可以看出,L_s 随 Re 增大近似呈现先增大后降低的趋势,在低雷诺数时球与苹果两者之间具有更好的一致性,这可能主要由于低雷诺数下尾流处于一种稳态、有规律的流动状态(参见图 8),L_s 较为稳定,在整个 Re 范围内 L_s 的最大相对偏差为 13.51%。

表 2 不同雷诺数下球与苹果的壁面平均切应力比较

Tab. 2 Comparison of surface-averaged shear stress (τ_{avg}) for sphere and apple for different Re

Re	风速/(m·s^{-1})	壁面平均切应力/Pa		相对偏差/%
		球	苹果	
10	0.002	3.5×10^{-6}	3.03×10^{-6}	15.51
50	0.01	2.04×10^{-5}	2.25×10^{-5}	9.33
100	0.018	4.93×10^{-5}	5.41×10^{-5}	8.87
300	0.05	1.75×10^{-4}	1.79×10^{-4}	2.23
500	0.09	4.16×10^{-4}	4.22×10^{-4}	1.42
1 000	0.18	1.16×10^{-3}	1.15×10^{-3}	0.86
3 000	0.54	6.23×10^{-3}	6.05×10^{-3}	2.97
5 000	0.91	1.46×10^{-2}	1.38×10^{-2}	5.79
10 000	1.82	4.43×10^{-2}	4.47×10^{-2}	0.89
30 000	5.48	2.43×10^{-1}	2.41×10^{-1}	0.83

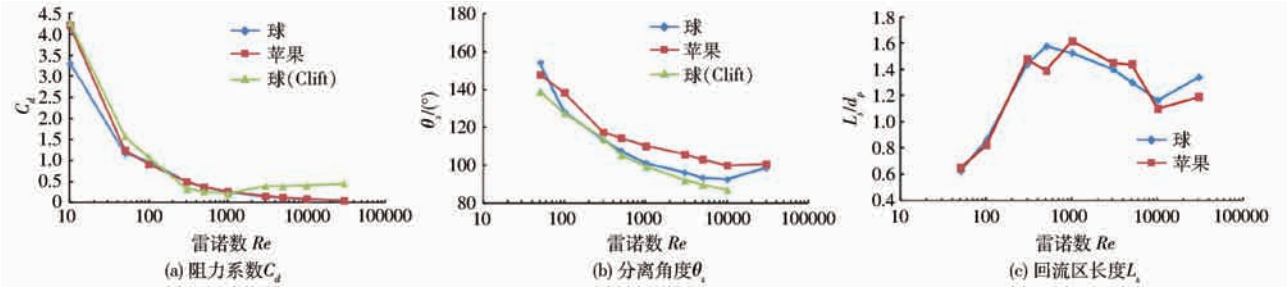

图 7 阻力系数、分离角度及回流区长度随雷诺数的变化过程

Fig. 7 Changing process of drag coefficient, separation angle and recirculation length with Re

在新鲜苹果的预冷处理中,送风 Re 大多在 1 000以上[8,12,21],即使在更小的 Re 范围内,等直径球与苹果形状在 τ_{avg}、C_d、θ_s、L_s 上的最大相对偏差也仅 15%左右,综合以上分析,CFD 模拟在苹果采后预冷处理的应用中,可直接利用等直径球体替代苹果真实形状。

2.2 两果模型

2.2.1 阻力系数

图 9a 给出了 4 种接触点局部处理方式下阻力系数 C_d 随 Re、缩放比例(d_a/d_p)、局部处理比例($2h/d_p$、r_p/d_p)的变化情况。当 $Re\geqslant300$ 以后 C_d 的数量级较小,单纯利用图 9 不易观察不同 d_a/d_p、

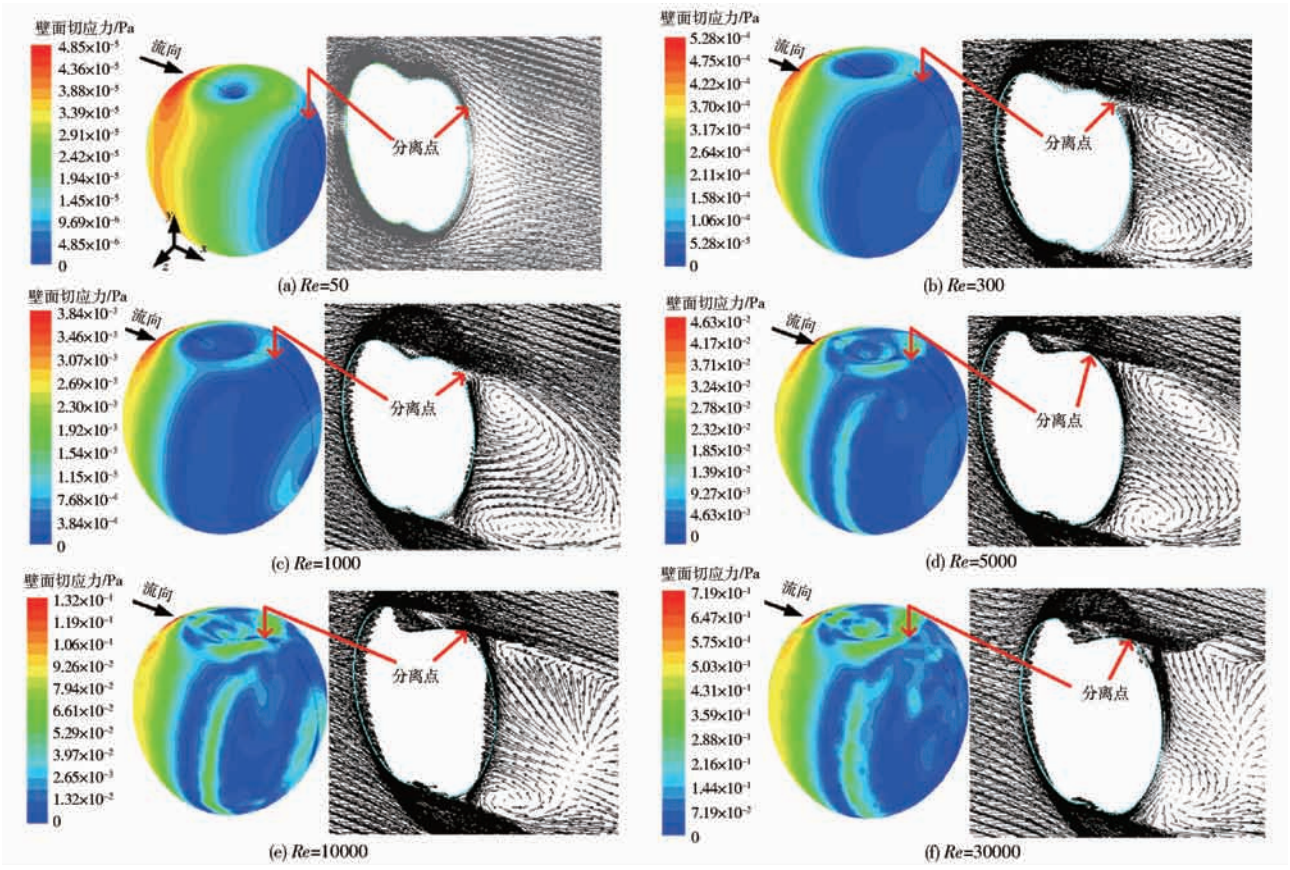

图 8　不同雷诺数下壁面切应力云图与速度矢量图

Fig. 8　Wall shear stress contours and velocity vector field around apple for different *Re*

$2h/d_p$、r_p/d_p对 C_d 的影响，因此在图 10 中给出了 $300 \leqslant Re \leqslant 30\,000$ 工况下 4 种接触点局部处理方式下 C_d 随不同 d_a/d_p、$2h/d_p$、r_p/d_p 的变化情况。

由图 9 可以看出：①缩小法，在整个 *Re* 范围内，C_d 随 d_a/d_p 的降低而增大，相应与基准值的偏差也越大，*Re* 越低与基准值的偏差就越大，当 $Re \geqslant 300$ 后，不同 d_a/d_p 比例下的 C_d 模拟值与基准值之间的偏差越来越小，说明随着 *Re* 的增大，C_d 对 d_a/d_p 变化的敏感性越来越小。②膨胀法，当 $Re \leqslant 100$ 时，C_d 随 d_a/d_p 的增大而降低，同时与基准值之间的偏差在不断增大，当 $Re \geqslant 300$ 后，C_d 反而随 d_a/d_p 的增大而增大。③消平法与桥梁法，在整个 *Re* 范围内，除桥梁法 $Re = 30\,000$ 的工况，C_d 都随 $2h/d_p$、r_p/d_p 的增大而增大，对此可归因于 $Re \geqslant 30\,000$ 后，桥梁圆柱直径的增大导致圆柱外围特征面积（$2h \times 2r_p$）显著增大，由式（2）可知，C_d 与风速、特征面积成反比，导致高 *Re* 下 C_d 可能出现随 r_p/d_p 不断变小的现象。综上所述，针对所有局部处理方式存在一个共同点就是低 *Re* 工况下的 C_d 对表面局部形状的微小变化更为敏感，随 *Re* 的增大这种敏感性越来越小。

2.2.2　局部传热性比较

为对比分析不同局部处理方式对两果之间传热性的影响，依据不同 *Re* 范围内的尾流状态不同（参见 1.2.2 节），图 10 选取 *Re* 等于 10、50、300、10 000 为例给出不同局部处理方式下冷却 180 min 时刻两球中心连接线上的温度分布情况。

从图 10a ~ 10d 可以看出，对于所有送风 *Re* 工况，任何比例的果品自身体积缩小都会导致果品温度模拟值偏低于基准值，随着缩小程度的增大，相应孔隙度也随之增大，使得冷空气更为充分地流过果品表面，温度模拟值就越小于基准值。同时由于体积的故意缩小，导致原有接近果皮部位的果肉温度被显著偏低的果皮温度所替代，特别是随着 *Re* 的增大，这种现象更为明显（当 $Re \geqslant 300$ 以后，偏差大于 1℃）。从图 10e ~ 10h 可以看出，随着膨胀系数的增大温度模拟值越来越大，随着 *Re* 的增大，不同 d_a/d_p 比例下温度模拟值在不断低于基准值且偏离程度越来越大。当 $Re \geqslant 10\,000$ 后，由于对流传热量的显著增大，不同 d_a/d_p 下的温度模拟值差异性也显著降低（≤0.2℃）。从图 10i ~ 10l 可以看出，在整个 *Re* 范围内，所有 $2h/d_p$ 比例下的温度模拟值都比基准值要低，此现象与缩小法相同。随着 *Re*、$2h/d_p$ 的同时增大，由于消平部位尺寸的增大，接触点部位冷空气流通性增强，致使该部位的温度模拟值会突然显著地偏低于基准值，其偏差值在 1℃ 左右。从图 10m ~ 10p 可以看出，随着 *Re* 的增大，所有 r_p/d_p 下的温度

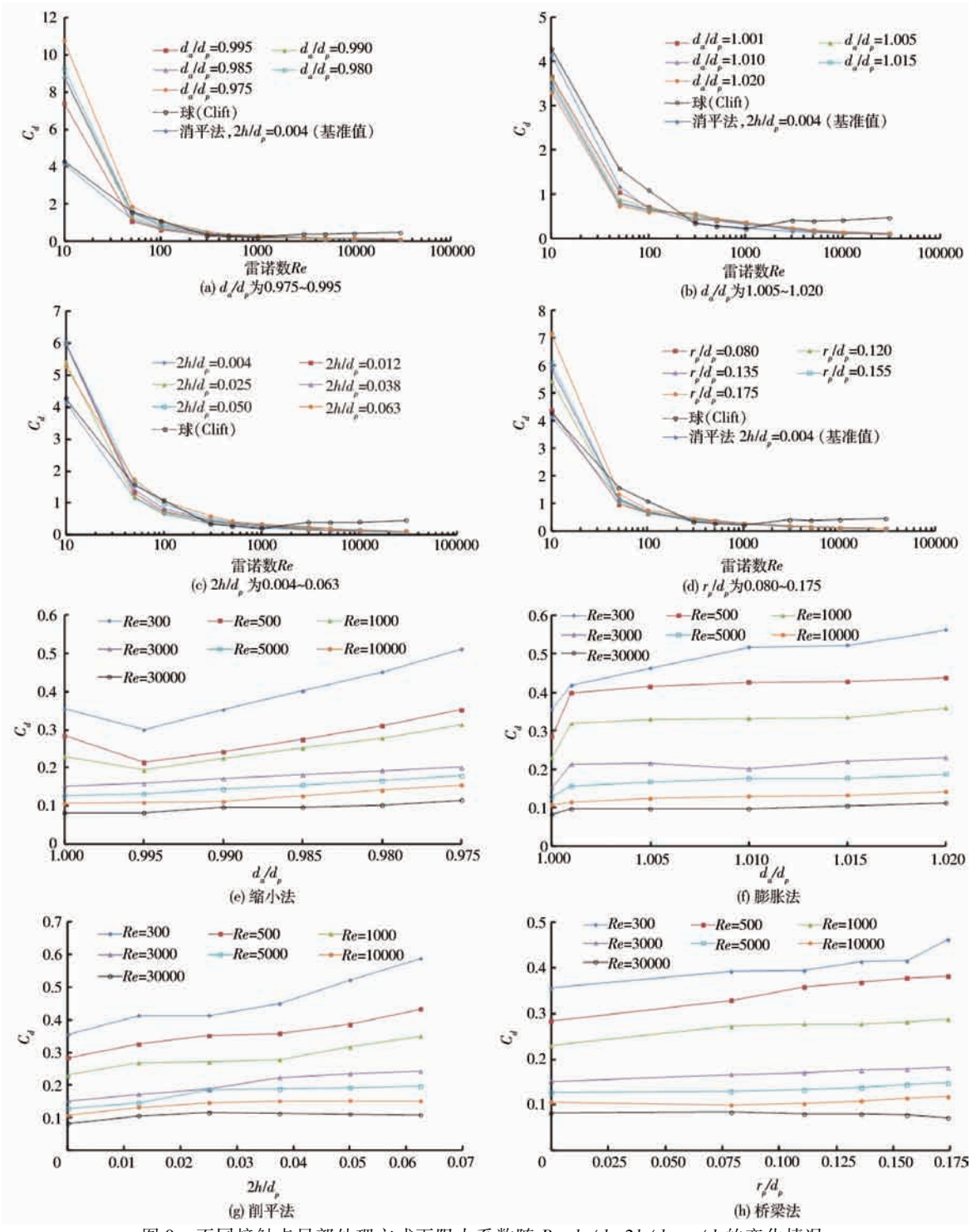

图 9 不同接触点局部处理方式下阻力系数随 Re、d_a/d_p、$2h/d_p$、r_p/d_p的变化情况

Fig. 9 Changing process of drag coefficient with Re, d_a/d_p, $2h/d_p$ and r_p/d_p for different contact point modifications

模拟值逐渐偏高于基准值,并且在整个 Re 范围内相对于其他的局部处理方式,桥梁法的温度模拟值与基准值之间的偏差最小,不存在局部位置温度偏差波动较大的现象,与基准值吻合性最好。

综上所述,不同的接触点局部处理方式对果品表面阻力系数、温度分布的预测都有不同程度的影响,以至于也会对预冷过程中所需压差、预冷时间等预冷操作控制的预测产生直接的影响,综合以上对比结果,桥梁法预测表面阻力系数及传热过程都具有最好的准确性。同时为确保各种局部处理方式的模拟值与基准值相对偏差控制在 30% 以内,表 3 建议性地给出了不同送风雷诺数下对应的 d_a/d_p、$2h/d_p$、r_p/d_p最优取值范围。

2.3 实验验证

图 11 直观地给出了 T_1 ~ T_4点位置对应的模拟值与实测值比较,从图中可以看出模拟值与实测值的变化趋势基本一致,通过均方根误差(Root mean

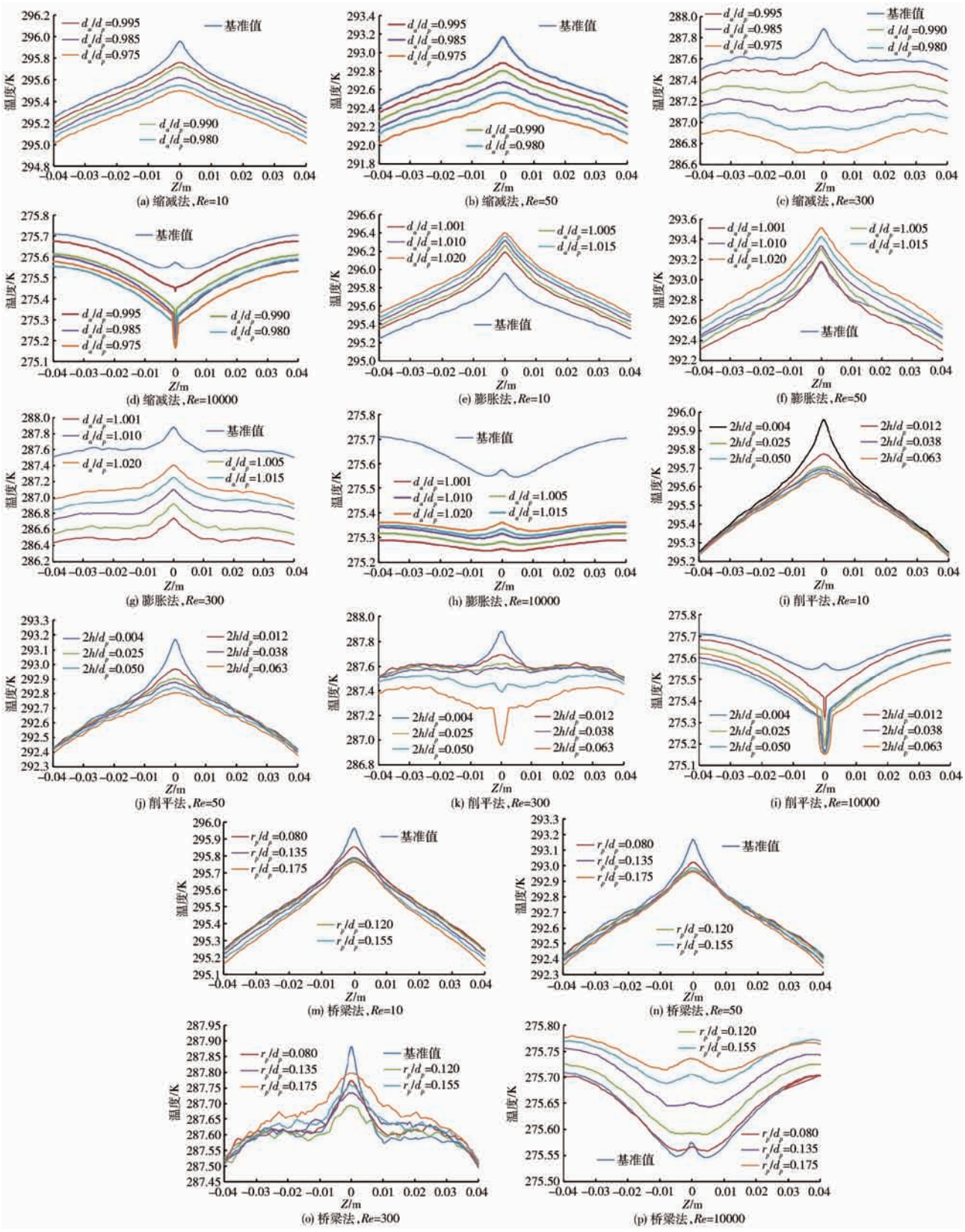

图 10　不同接触点局部处理方式下 L_{tem} 的温度分布情况

Fig. 10　Temperature distributions of L_{tem} for different contact point modifications

square error，RMSE）、平均相对误差（Average relative deviation，ARD）公式求得，T_1 ~ T_4 的 RMSE 分别为 1.426℃、1.340℃、1.436℃、1.514℃，ARD 分别为 19.26%、17.95%、19.49%、21.07%，模拟值与测试值存在偏差的原因可能主要归结于热电偶实测位置与模拟点位置的偏差、测量仪器自身误差、果品物性参数与实际物性参数值的偏差，送风速度和温度的波动以及模拟过程值的脉动等现象，但从整体而言，

模拟值与实测值具有较好的一致性,验证了本次实验的准确性、可靠性。

表 3 不同雷诺数下 d_a/d_p、$2h/d_p$、r_p/d_p 最优取值范围

Tab. 3 Optimal value ranges of d_a/d_p, $2h/d_p$ and r_p/d_p for different Re

雷诺数 Re	缩小法 (d_a/d_p)	膨胀法 (d_a/d_p)	消平法 ($2h/d_p$)	桥梁法 (r_p/d_p)
(0,20)	[0.995,1)	(1,1.005]	(0,0.025]	(0,0.120]
[20,400]	[0.985,1)	(1,1.010]	(0,0.038]	(0,0.155]
[400,+∞)	[0.980,1)	(1,1.015]	(0,0.050]	(0,0.175]

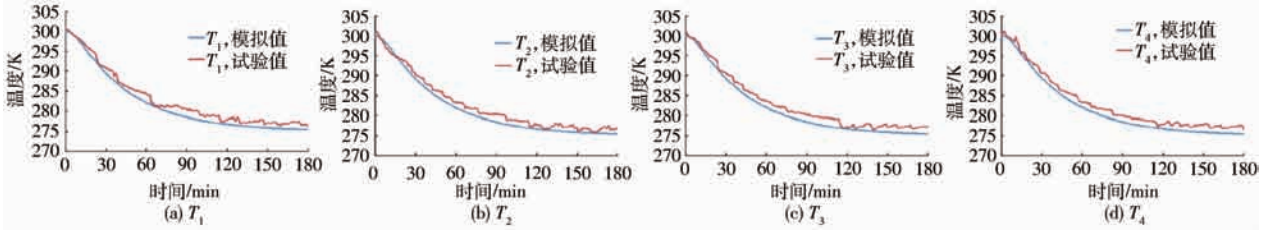

图 11 温度模拟值与实测值

Fig. 11 Simulated and experimental temperature profiles based on temperature-test points (T_1 ~ T_4)

究对象,通过比较不同处理方式下的壁面阻力系数及两果中心连接线上的温度分布情况,最终在确保各种局部处理方式的模拟值与基准值相对偏差在30%以内的情况下给出了不同送风雷诺数下对应的 d_a/d_p、$2h/d_p$、r_p/d_p 最优取值范围,同时也得出桥梁法的准确性最好。

(3)通过模拟值与实测值的对比验证,最大均方根误差为 1.514℃,平均相对误差在 20% 左右,验证了该实验研究的准确性、可行性。

3 结论

(1)以富士苹果为研究对象,利用 CFD 数值模拟量化比较苹果与等直径球体壁面阻力系数、平均壁面切应力、边界层分离角度以及尾流回流区长度的不同,最后得出:CFD 应用于苹果预冷过程可直接利用等直径球体替代果品真实果形,并且随雷诺数的增大,两者之间的各种物理量偏差就越小。

(2)针对 CFD 在应用于球形类果品采后处理过程中的 4 种局部接触点处理方式,以两果模型为研究对象,通过比较不同处理方式下的壁面阻力系数及两果中心连接线上的温度分布情况,最终在确保各种局部处理方式的模拟值与基准值相对偏差在30%以内的情况下给出了不同送风雷诺数下对应的 d_a/d_p、$2h/d_p$、r_p/d_p 最优取值范围,同时也得出桥梁法的准确性最好。

(3)通过模拟值与实测值的对比验证,最大均方根误差为 1.514℃,平均相对误差在 20% 左右,验证了该实验研究的准确性、可行性。

(4)该研究为微观细节性地了解苹果真实形状与等直径球体边界层流动的区别,了解不同局部处理方式对接触点局部热传递的影响以及为提高 CFD 应用于球形类果品冷链过程研究中的准确性提供了理论支持。

参 考 文 献

1 王身相. 预冷对冷链过程中食品质量的保护作用[J]. 成都航空职业技术学院学报, 2015, 31(1): 45 - 47.
WANG Shenxiang. Protective effect of quality of food with pre-cooling during cold chain logistics[J]. Journal of Chengdu Aeronautic Vocational & Technical College, 2015, 31(1): 45 - 47. (in Chinese)

2 AMARA S B, LAGUERRE O, FLICK D. Experimental study of convective heat transfer during cooling with low air velocity in a stack of objects[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(12): 1213 - 1221.

3 KONDJOYAN A. A review on surface heat and mass transfer coefficients during air chilling and storage of food products[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(6): 863 - 875.

4 DEFRAEYE T, LAMBRECHT R, Tsige A A, et al. Forced-convective cooling of citrus fruit: package design [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(1): 8 - 18.

5 DELELE M A, NGCOBO M E K, GETAHUN S T, et al. Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticulturalproduce packaging system using a 3-D CFD model. Part I: model development and validation[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 86(12): 536 - 545.

6 DELELE M A, NGCOBO M E K, GETAHUN S T, et al. Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model. Part II: effect of package design[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 86(12): 546 - 555.

7 FERRUA M J, SINGH R P. A nonintrusive flow measurement technique to validate the simulated laminar fluid flow in a packed container with vented walls[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(2): 242 - 255.

8 陈秀勤,卢立新,王军. 包装箱内层装果品差压预冷温度场的数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 249 - 257.
CHEN Xiuqin, LU Lixin, WANG Jun. Numerical simulation and experimental verification of forced-air precooling temperature field inside fruit packaging box with multiple-layer grids[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(12): 249 - 257. (in Chinese)

9 DIXON A G, TASKIN M E, NIJEMEISLAND M, et al. Systematic mesh development for 3D CFD simulation of fixed beds: single sphere study[J]. Computers and Chemical Engineering, 2011, 35(7): 1171 - 1185.

10 ZHAO C J, HAN J W, YANG X T, et al. A review of computational fluid dynamics for forced-air cooling process[J]. Applied Energy, 2016, 168: 314 - 331.

11 HAN J W, ZHAO C J, YANG X T, et al. Computational modeling of airflow and heat transfer in a vented box during cooling: optimal package design[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 91: 883 – 893.

12 韩佳伟,赵春江,杨信廷,等. 送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 280 – 289.
HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. Effect of air-flow velocity on cooling efficiency during forced-air precooling of apples[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 280 – 289. (in Chinese)

13 JOHNSON T A, PATEL V C. Flow past a sphere up to a Reynolds number of 300[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1999, 378: 19 – 70.

14 ABHAYAWICK L, LAGUERRE J C, TAUZIN V, et al. Physical properties of three onion varieties as affected by the moisture content[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(3): 253 – 262.

15 BECKER B R, MISRA A, FRICKE B A. Bulk refrigeration of fruits and vegetables part I: theoretical considerations of heat and mass transfer[J]. HVAC & R Research, 1996, 2(2): 122 – 134.

16 HAN J W, ZHAO C J, YANG X T, et al. Compuational fluid dynamics simulation to determine combined mode to conserve energy in refrigerated vehicles [J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 39(2): 186 – 195.

17 韩佳伟,赵春江,杨信廷,等. 基于 CFD 数值模拟的冷藏车节能组合方式比较[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 55 – 62.
HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. Comparison of combination mode of energy conservation for refrigerated car based on CFD numerical simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 55 – 62. (in Chinese)

18 赵春江, 韩佳伟, 杨信廷, 等. 基于 CFD 的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 168 – 173.
ZHAO Chunjiang, HAN Jiawei, YANG Xinting, et al. Numerical simulation of temperature field distribution in refrigerated truck based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):168 – 173. (in Chinese)

19 DEFRAEYE T, BLOCKEN B, CARMELIET J. Analysis of convective heat and mass transfer coefficients for convective drying of a porous flat plate by conjugate modelling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(1 – 3): 112 – 124.

20 CHENG N S. Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles[J]. Powder Technology, 2009, 189(3): 395 – 398.

21 DURET S, HOANG H M, FLICK D, et al. Experimental characterization of airflow, heat and mass transfer in a cold room filled with food products[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 46: 17 – 25.

(上接第 99 页)

18 顾耀权,贾洪雷,郭慧,等. 滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(5):38 – 42.
GU Yaoquan,JIA Honglei,GUO Hui,et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(5):38 – 42. (in Chinese)

19 JB/T 11908—2014 农用圆盘开沟机[S]. 2014.

20 GRISSO R B,HOLSHOUSER D,PITMAN R. Planter drill considerations for conservation tillage systems[R]. Virginia Cooperative Extension,Publication Number:442 – 457,2007.

21 GRISSO R B, HOLSHOUSER D. Equipment considerations for no-till soybean seeding[R]. Virginia Cooperative Extension, Publication Number:442 – 456,2002.

22 朱瑞祥,李成鑫,程阳,等. 被动式圆盘刀作业性能优化试验[J]. 农业工程学报,2014,30(18):47 – 54.
ZHU Ruixiang,LI Chengxin,CHENG Yang,et al. Working performance of passive disc coulter[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(18): 47 – 54. (in Chinese)

23 林静,李博,李宝筏,等. 阿基米德螺线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2014,44(6):1 – 9.
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment on archimedes spiral type gap cutting disc[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,44(6):1 – 9. (in Chinese)

24 赵旭,张祖立,唐萍. 被动式倾斜波纹圆盘刀破茬刀工作性能试验[J]. 农业机械学报,2011,42(5):64 – 67.
ZHAO Xu,ZHANG Zuli,TANG Ping. Passive tilt corrugated disc cutter knife stubble-breaking performance test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(5): 64 – 67. (in Chinese)

25 彭飞,李腾飞,康宏彬,等. 小型制粒机喂料器参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(2):51 – 58.
PENG Fei,LI Tengfei,KANG Hongbin,et al. Optimization and experiment on feeder for small scale pellet mill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(2): 51 – 58. (in Chinese)