

槽道内氦氙的RANS模拟的计算模型适用性分析

① 作者：王舜琦，吉宇，孙俊，孙玉良

② 作者单位：清华大学核研院





CONTENTS

01

研究背景与现状

02

研究内容与方法

03

标准数据介绍

04

结果与讨论

4.1 湍流模型适用性分析

4.2 Pr_t 模型适用性分析

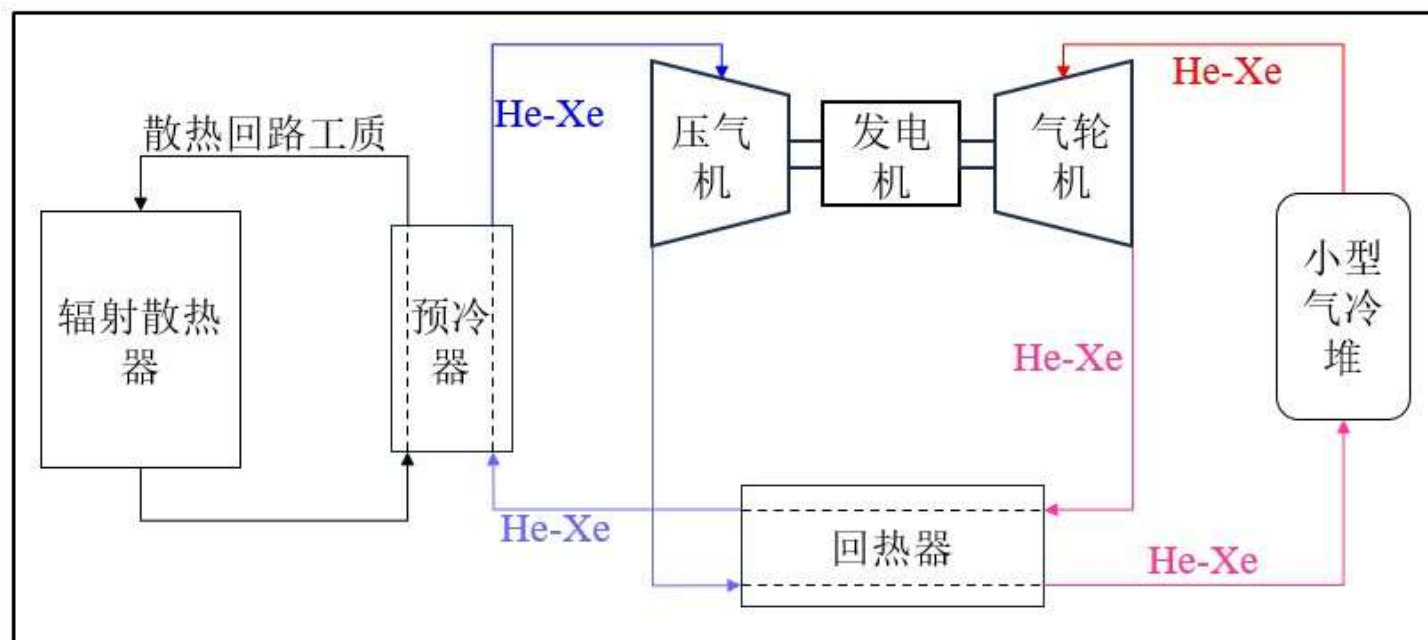
05

结论与展望



1.研究背景与现状：小型气冷堆系统简介

◆ 小型气冷堆搭配直接布雷顿循环系统采用**氦氙混合气体**作为工质



➤ **氦氙混合气体**的特点和优势：

- 工程应用的推荐混合比下，氦氙Pr在0.2-0.3之间，与常规流体不同
- 推荐混合比下，具有**不亚于氦气**的换热性能，但能**大幅缩小旋转机械级数与尺寸**

➤ 低Pr氦氙作为一种新型工质，针对其**流动换热规律**开展研究是很有必要的



1.研究背景与现状：现状

- ◆ RANS方法是研究工质流动换热特性的一种有力工具，但RANS计算依赖湍流模型与 Pr_t 模型。
- ◆ 对于中高 Pr 工质，如空气（ $Pr=0.7$ ），水（ $Pr>5$ ），采用 $Pr_t=0.85$ 的模型便有很好的精度，但对于低 Pr 工质，通常采用非常数的 Pr_t 模型开展换热计算，常见的 Pr_t 模型如下：

模型开发者	模型方程		适用对象
Jischa等人	$Pr_t = 0.9 + \frac{182.4}{Pr Re^{0.888}}$		液态金属
Reynolds等人	$Pr_t = (1 + 100(Pr Re)^{-0.5}) \left(\frac{1}{(1 + 120 Re^{-0.5})} - 0.15 \right)$		液态金属
Kays等人	$Pr_t = \frac{1}{\frac{1}{2 Pr_{t,\infty}} + 0.3 Pe_t (Pr_{t,\infty})^{-0.5} - (0.3 Pe_t)^2 (1 - \exp(\frac{-(Pr_{t,\infty})^{-0.5}}{0.3 Pe_t}))}$	$Pr_{t,\infty} = 0.85$	液态金属
Weigand等人		$Pr_{t,\infty} = 0.85 + \frac{100}{Pr Re^{0.888}}$	液态金属
周彪等人		$Pr_{t,\infty} = 0.86 + \frac{30}{Pr Re_{loc}^{0.888}}$	氦氘混合气体

1.研究背景与现状：问题提出

◆ 相关研究存在的问题：

- 学者进行模型开发时，模型本身通常源自理论推导或其他模型的改进，但研究只强调了 Pr_t 模型自身对工质换热的影响，却未说明湍流模型在换热计算中的作用。

◆ 研究内容：

- 本文依据槽道内氦氘工质的DNS标准数据，依次开展湍流模型与 Pr_t 模型适用性分析，得到适用于槽道结构的优选湍流模型，并进一步阐述两模型对换热计算的影响机制
- 以上述结论为基础，为后续氦氘的模型开发或RANS计算研究提出建议。

◆ 研究方法：RANS方法

◆ 软件：Fluent

2.研究内容与方法：RANS方法简介

◆ RANS计算模型包括：湍流模型+ Pr_t 模型

动量方程：
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + (\nu + \boxed{\nu_t}) \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2}$$

通过湍流模型求解

能量方程：
$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = (\alpha + \boxed{\alpha_t}) \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j^2}$$

$$\alpha_t = \frac{\nu_t}{\boxed{Pr_t}}$$

Pr_t 模型给出

2.研究内容与方法：RANS模型选择

◆ 用于适用性分析的湍流模型：

- 针对简单流道结构，一般选择二方程模型进行计算
- 湍流模型适用性分析的模型包括，标准k- ϵ 模型，可实现k- ϵ 模型，RNG k- ϵ 模型，标准k- ω 模型，SST k- ω 模型

◆ 用于适用性分析的 Pr_t 模型：

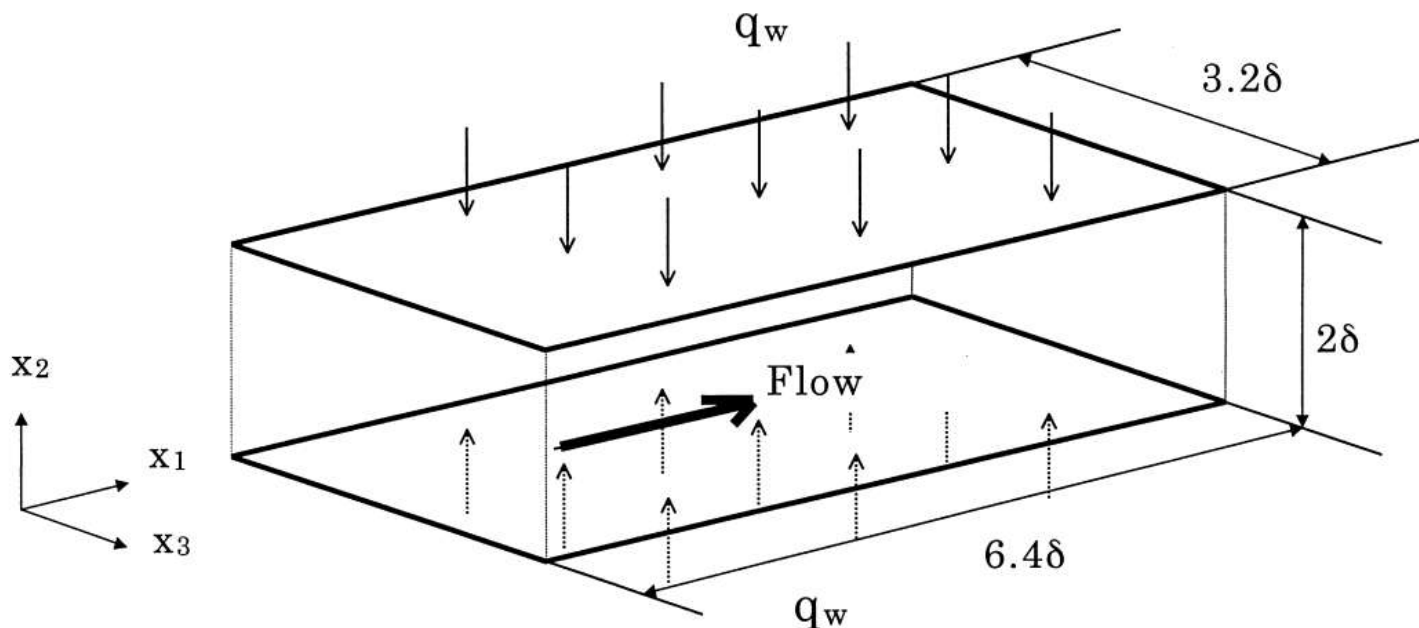
- 空气、水： $Pr_t=0.85$ 模型，Azer等人^[3]的模型；
- 液态金属：Jischa等人^[1]的模型、Reynolds等人^[2]的模型、Weigand等人^[4]的模型；
- 低Pr氦氙：周彪等人^[5]的模型

参考文献：

1. Jischa M, Rieke H B. About the prediction of turbulent Prandtl and Schmidt numbers from modeled transport equations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1979, 22: 1547-1555.
2. Reynolds A J. The prediction of turbulent Prandtl and Schmidt numbers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1975, 18: 1055-1069.
3. Azer N Z, Chao B T. A mechanism of turbulent heat transfer in liquid metals[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1960,1: 121-138.
4. Weigand B, Ferguson J R, Crawford M E. An extended Kays and Crawford turbulent Prandtl number model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997,40(17): 4191-4196.
5. Biao Z, Yu J, Jun S, et al. Modified turbulent Prandtl number model for helium-xenon gas mixture with low Prandtl number[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 366: 110738.

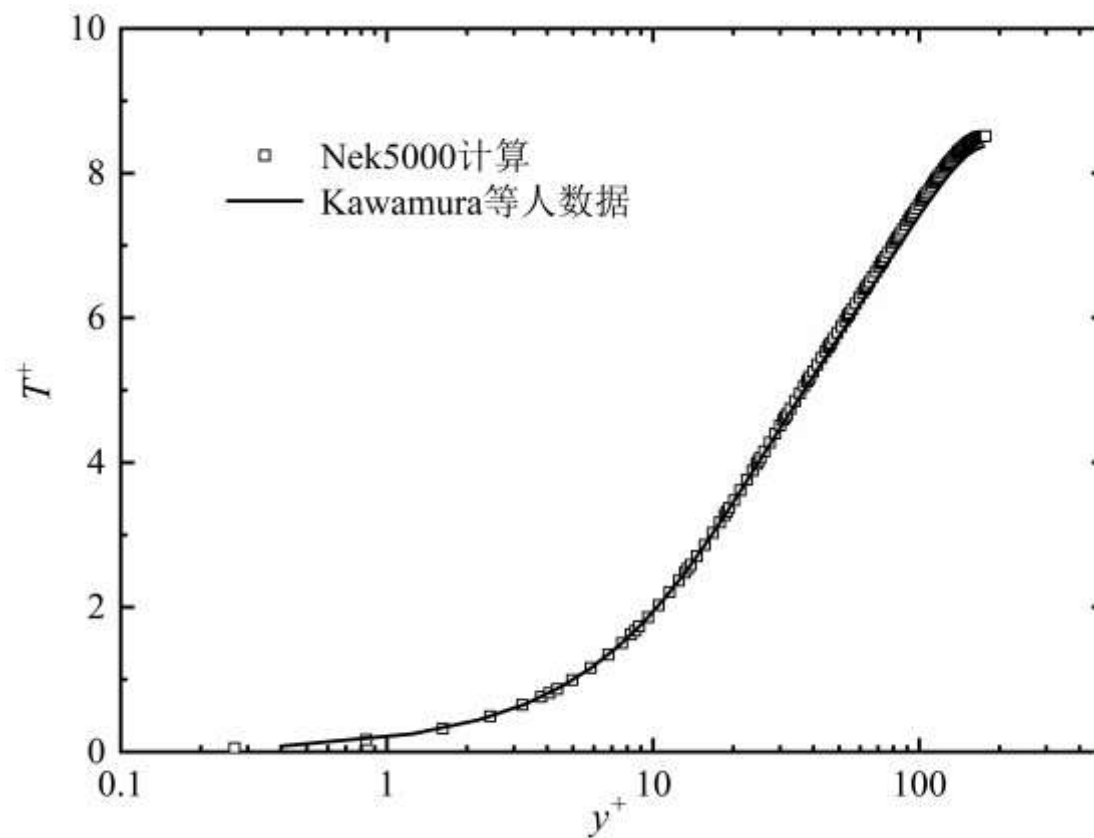
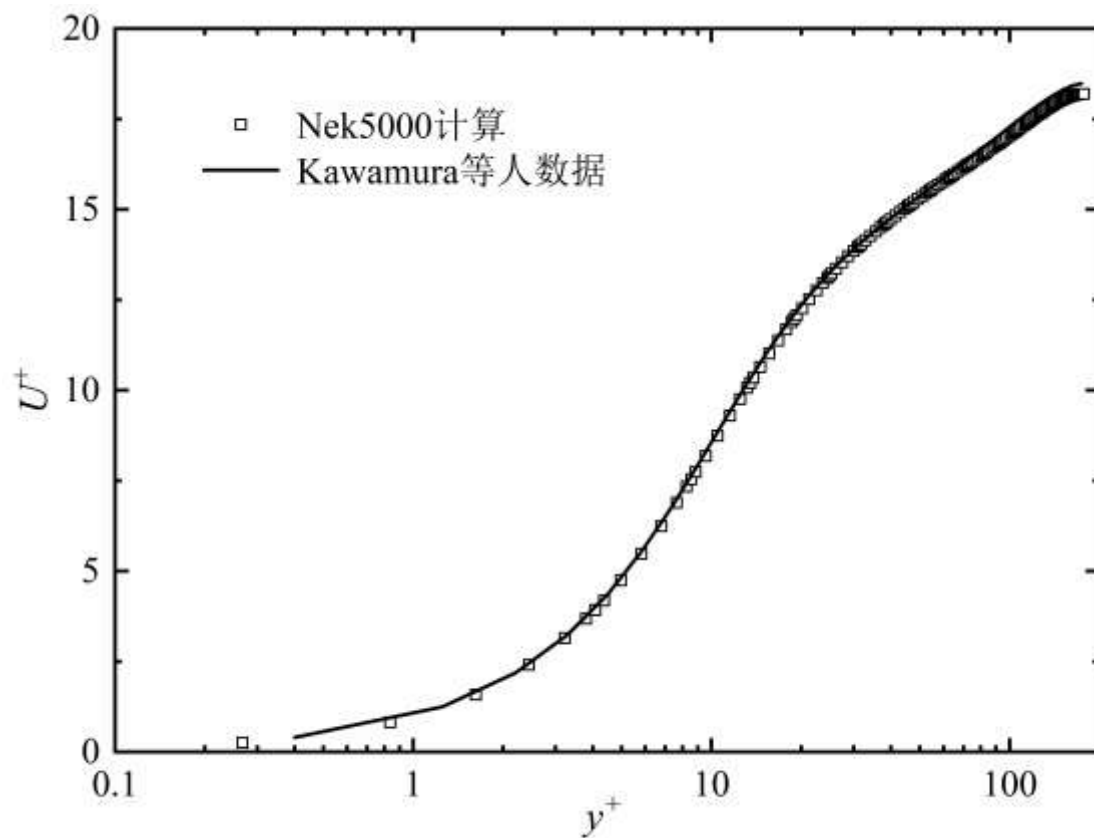
3.标准数据介绍

- ◆ DNS方法具有数值精度高的特点，不引入模型直接求解控制方程，因此DNS数据可以作为标准数据
- ◆ 课题组利用Nek5000软件，对槽道内低Pr氦氙的流动换热开展DNS计算，空间离散精度为七阶，时间离散精度为三阶
- ◆ 计算中，流向（ x_1 ）与展向（ x_3 ）为周期性边界，壁面为定热流边界



3.标准数据介绍：数据验证

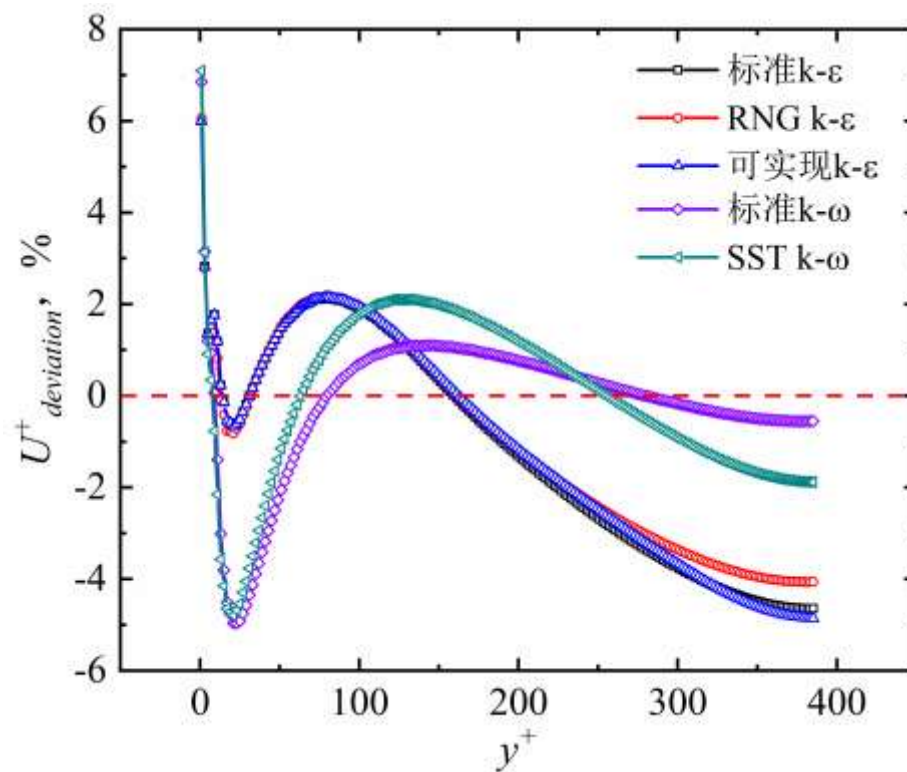
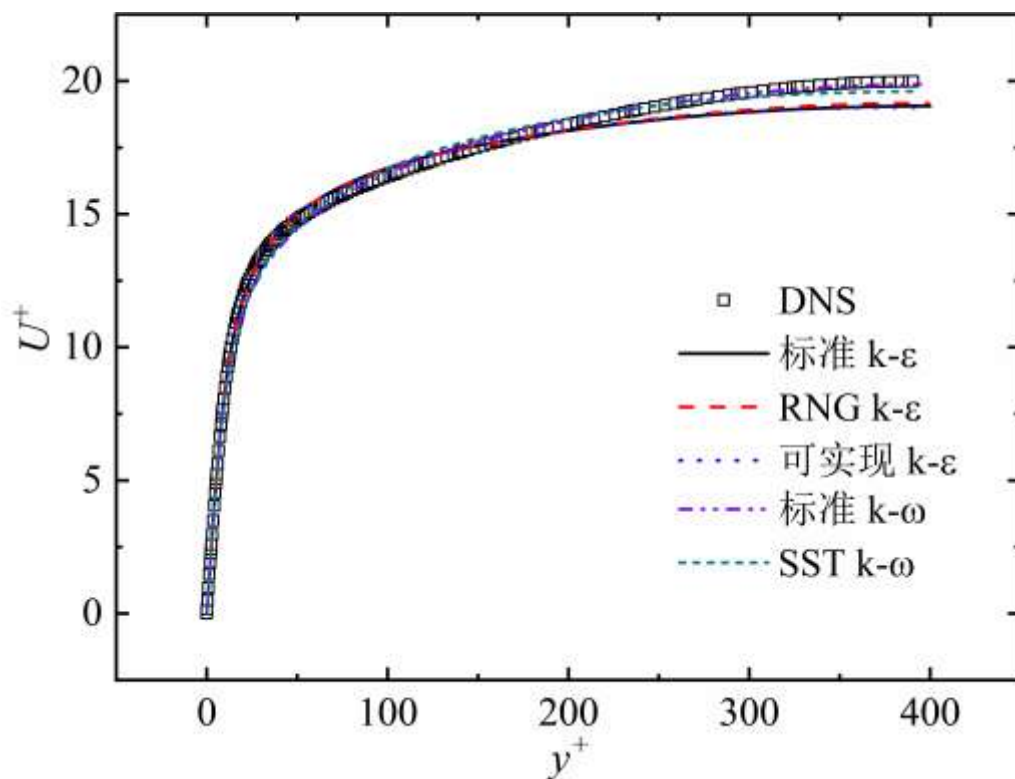
- ◆ 低雷诺数条件下的数据与已有DNS数据进行对比，数据吻合度高，验证了计算结果的准确性，计算过程的合理性



4.1 湍流模型适用性分析：无量纲速度

◆ 无量纲速度及其与DNS数据的相对偏差 $u^+ = \frac{u}{u_\tau}$

$$\phi_{deviation} = \frac{\phi_{RANS} - \phi_{DNS}}{\phi_{DNS}}$$



- 壁面附近，三种k- ϵ 模型与DNS数据吻合度更好
- 远离壁面区域，两种k- ω 模型的吻合度更高

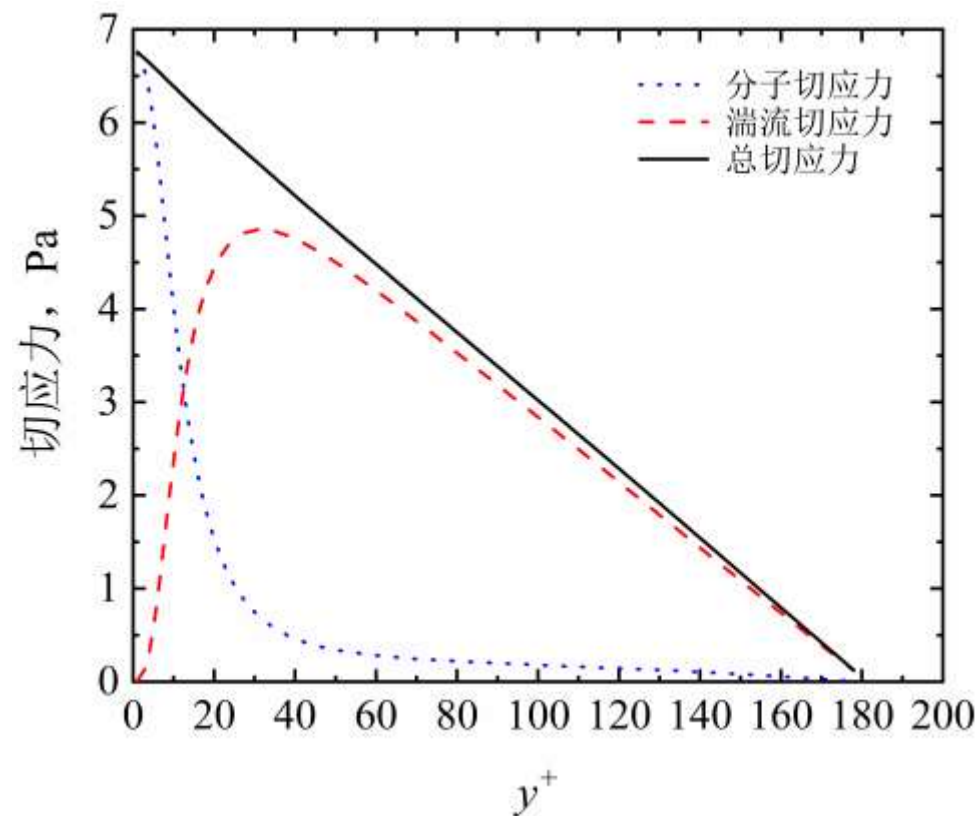
4.1 湍流模型适用性分析：切应力分析

◆ 流场中的应力分为分子切应力与湍流切应力

$$\text{分子切应力} = \nu \frac{\partial U}{\partial y}$$

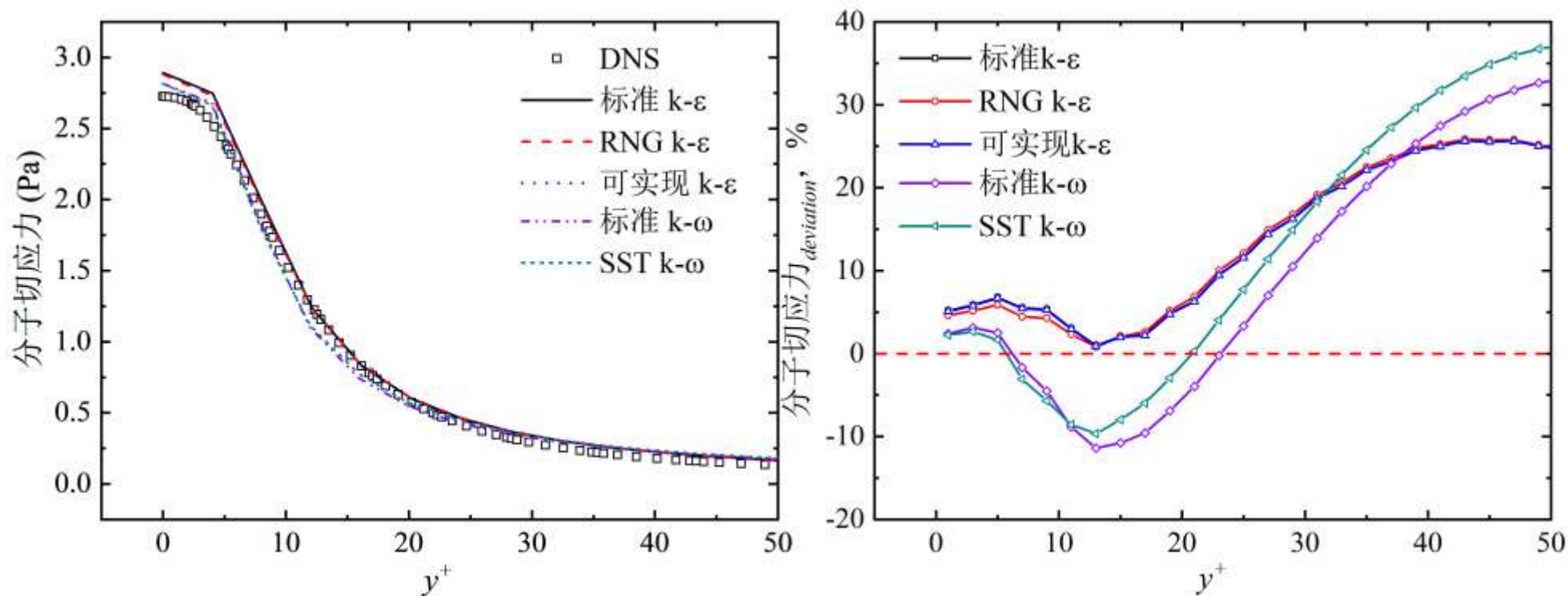
$$\text{湍流切应力} = \nu_t \frac{\partial U}{\partial y}$$

总切应力 = 分子切应力 + 湍流切应力



4.1 湍流模型适用性分析：分子切应力

◆ 分子切应力与DNS数据的相对偏差： $y^+ < 30$ 的区间



- 整体来看，三种k- ϵ 模型的偏差更小
- 但壁面切应力的刻画上，两种k- ω 模型更有优势，该物理量与压降相关，因此从工程角度看，两种k- ω 模型更有优势



4.1 湍流模型适用性分析：流向压力梯度

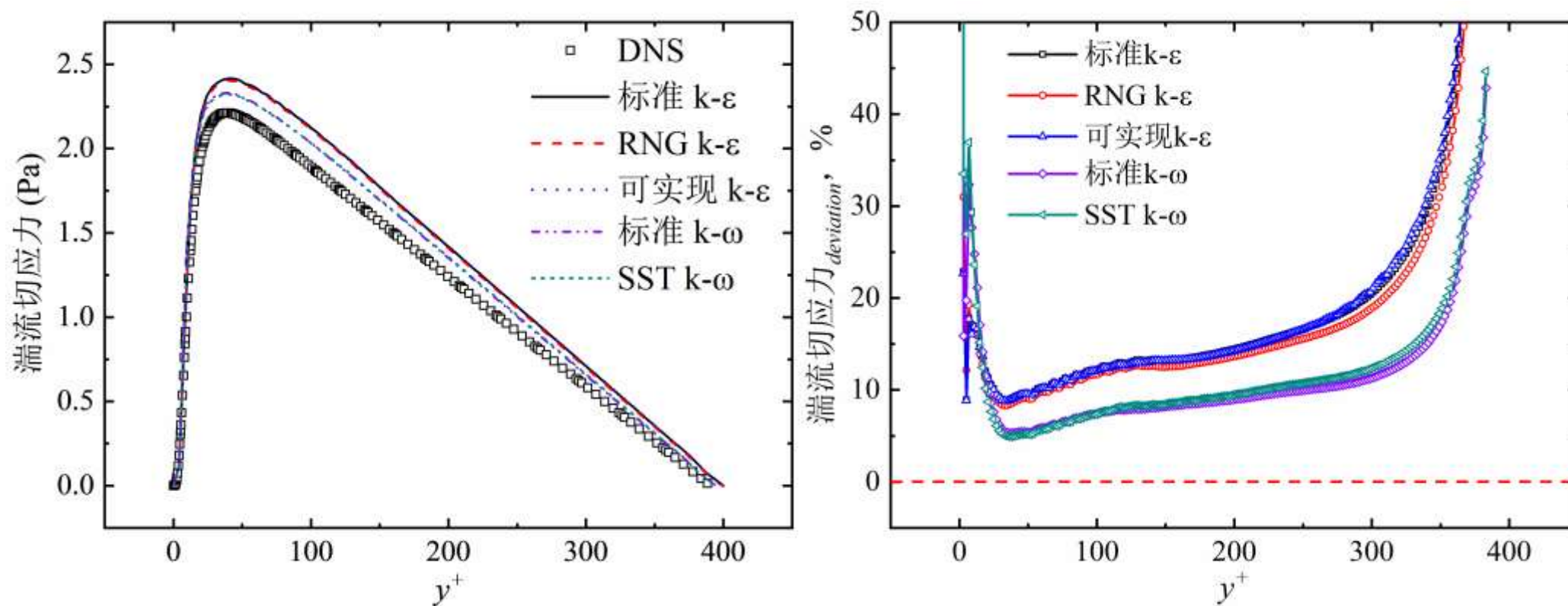
◆ 根据切应力信息可以求得流向的压力梯度，如下表：

湍流模型	标准k- ϵ	RNG k- ϵ	可实现k- ϵ	标准k- ω	SST k- ω
流向压力梯度与 DNS数据的相对 偏差	4.92%	4.47%	4.84%	2.16%	2.15%

◆ 对于流向压力梯度求解，两种k- ω 模型与标准数据的相对偏差最小

4.1 湍流模型适用性分析：湍流切应力

◆ 湍流切应力与DNS数据的相对偏差



➤ 两种 $k-\omega$ 模型在刻画湍流切应力的效果优于三种 $k-\epsilon$ 模型

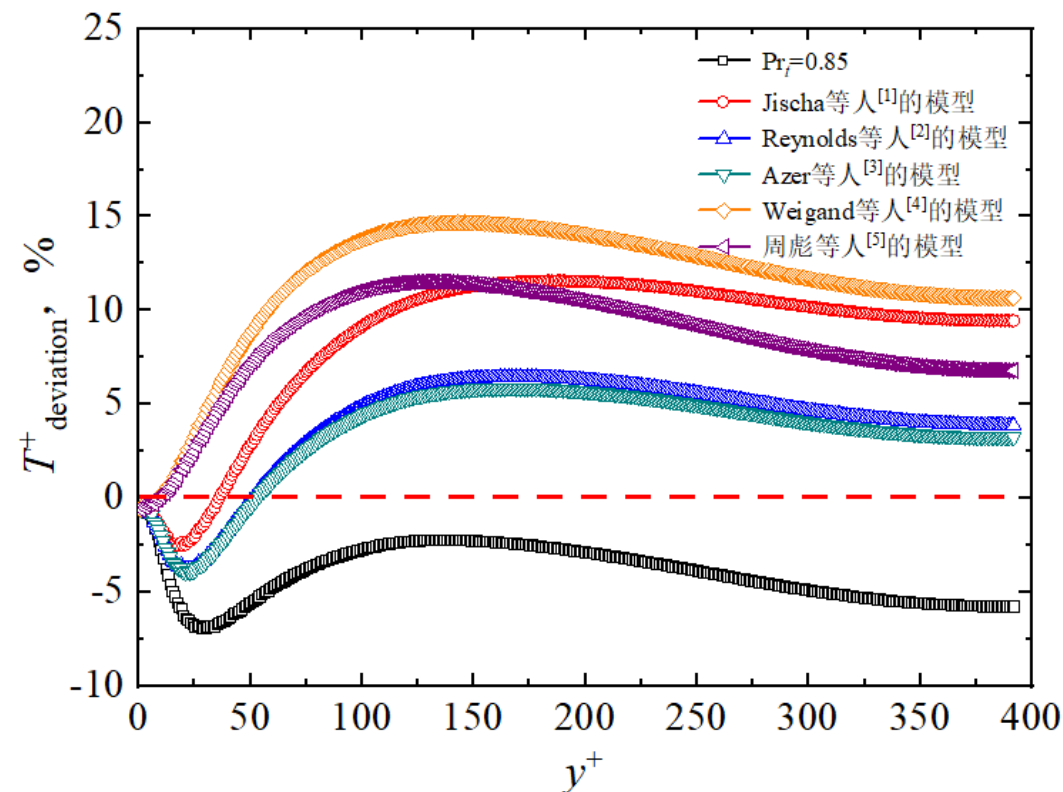
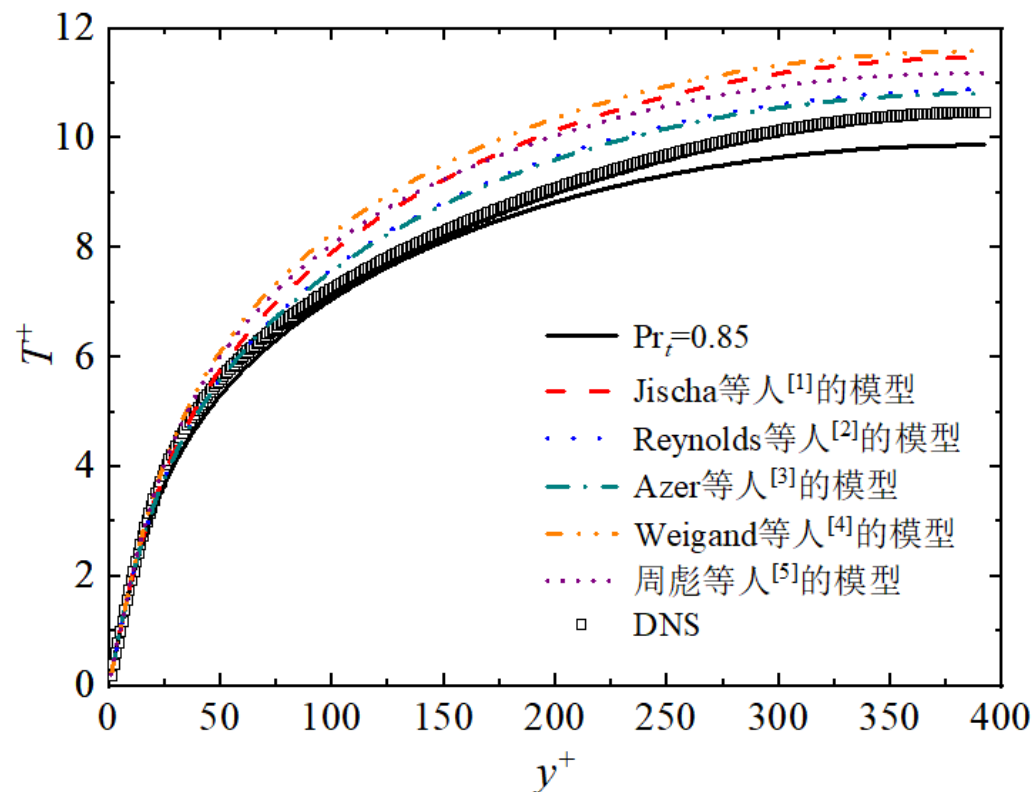
4.1 湍流模型适用性分析：小节

◆ 根据前面的对比发现：

- 对于流场信息，不同类型的湍流模型间存在明显差异，而相同类型的湍流模型，如三种 $k-\varepsilon$ 模型，两种 $k-\omega$ 模型间的差异不大；
- 以应力场及流向压力梯度求解， $k-\omega$ 类模型是槽道流的优选湍流模型。

4.2 Pr_t 模型适用性分析：无量纲温度

◆ 无量纲温度及其与DNS数据的相对偏差 $T^+ = \frac{T_w - T}{T_\tau}$ $\phi_{deviation} = \frac{\phi_{RANS} - \phi_{DNS}}{\phi_{DNS}}$

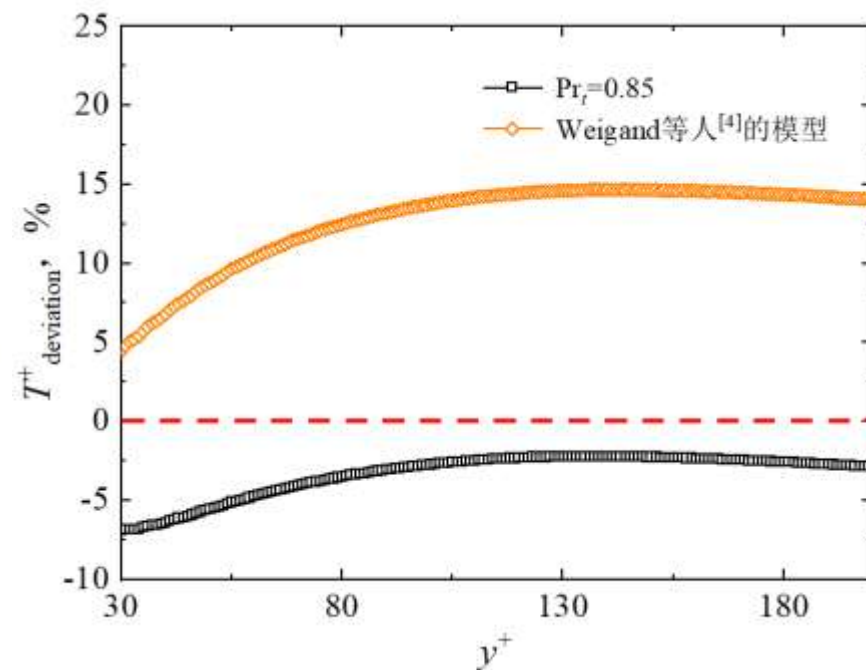
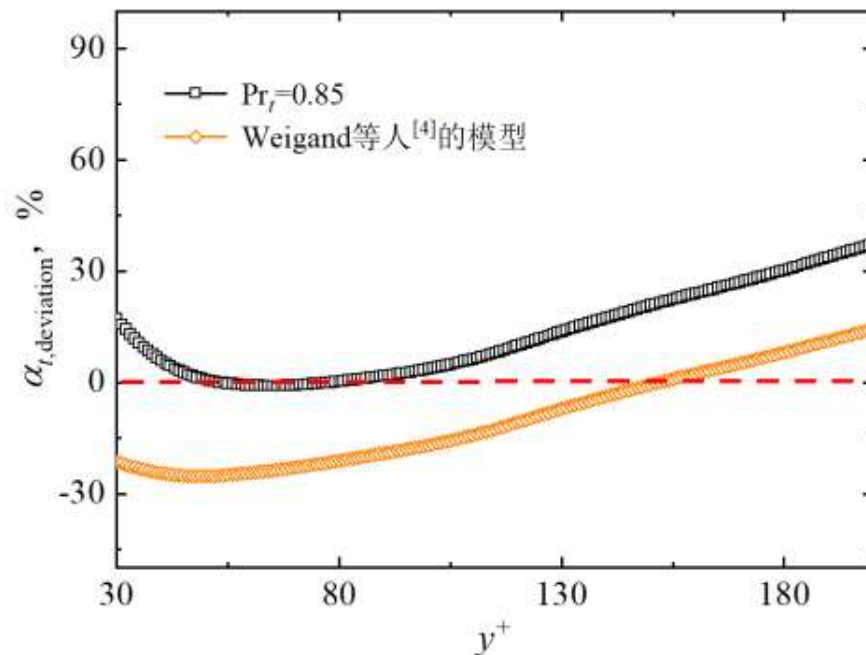


➤ 整体来看，已有模型在刻画氦氩温度剖面方面均存在一定偏差，表明当前模型存在一定的改进空间。

4.2 Pr_t 模型适用性分析：湍流热扩散系数

- ◆ 湍流热扩散系数是决定RANS方法湍流主导区温度求解的关键参数：以 $Pr_t=0.85$ 、Weigand等人^[4]模型分析湍流模型与 Pr_t 模型对换热计算的影响

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = (\alpha + \alpha_t) \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j^2}$$

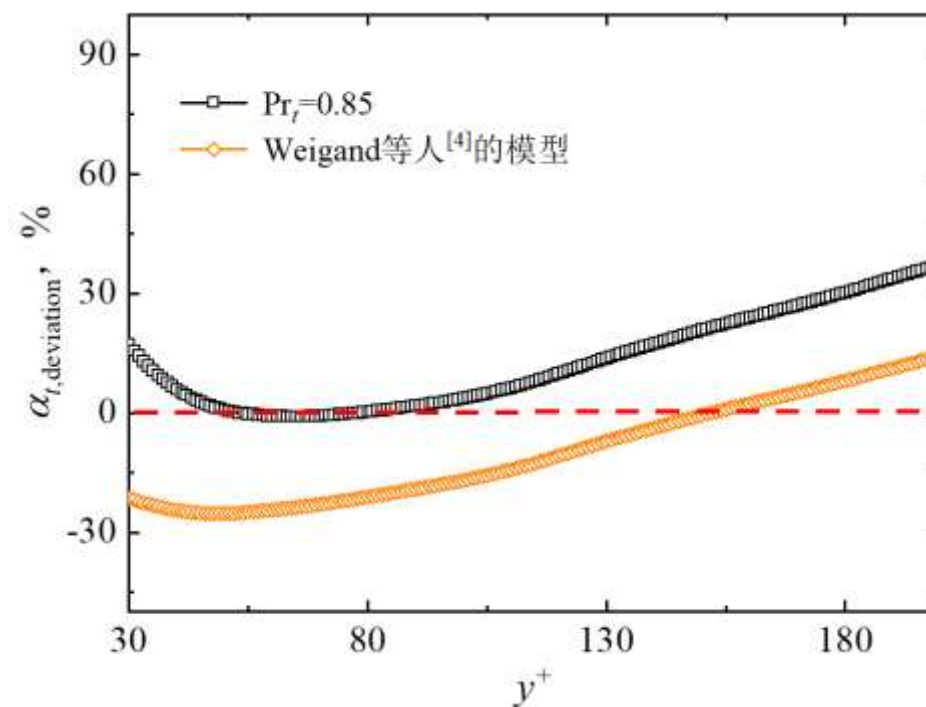
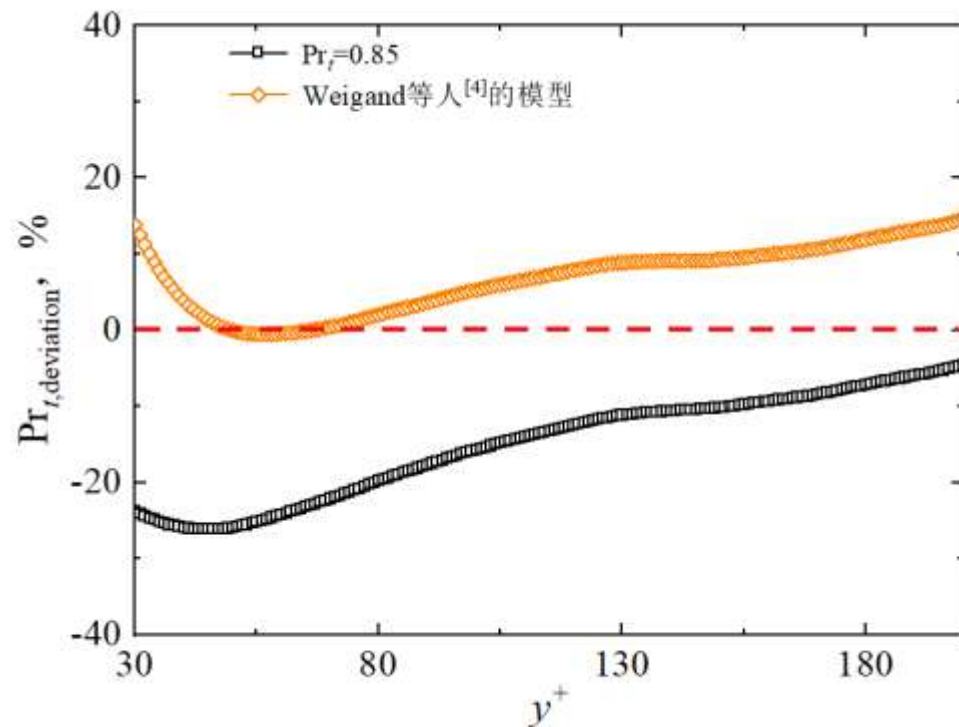


- 靠近壁面区域，温度梯度大，湍流热扩散对温度求解精度的影响权重更大，此时 $Pr_t=0.85$ 的模型与DNS数据的吻合度更高，这使温度剖面的刻画也更好
- 远离壁面后，由于温度梯度逐渐减小，此时即使湍流热扩散系数有较大的偏差，对于温度的刻画影响也较小

4.2 Pr_t 模型适用性分析: Pr_t

◆ 湍流热扩散系数由湍流粘度与 Pr_t 共同确定

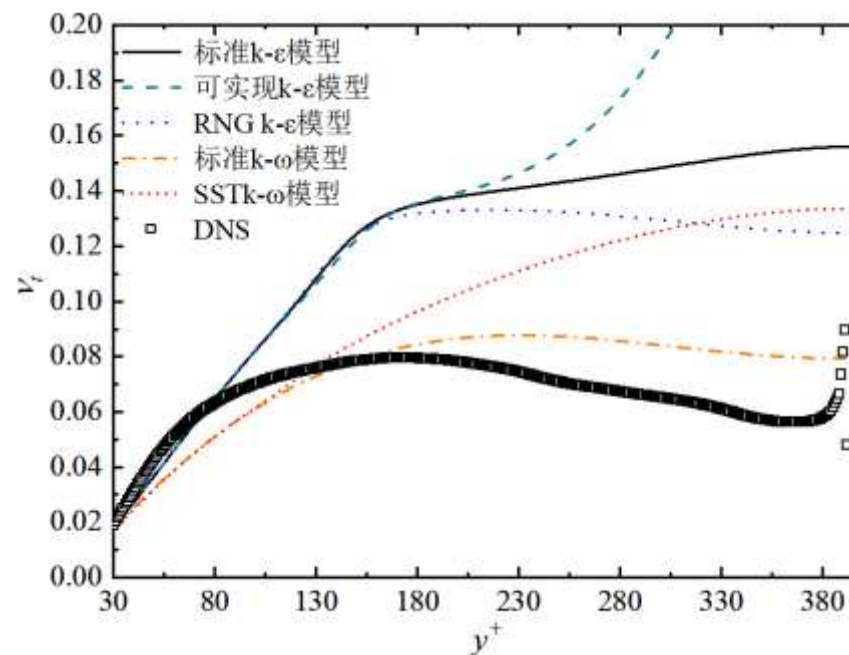
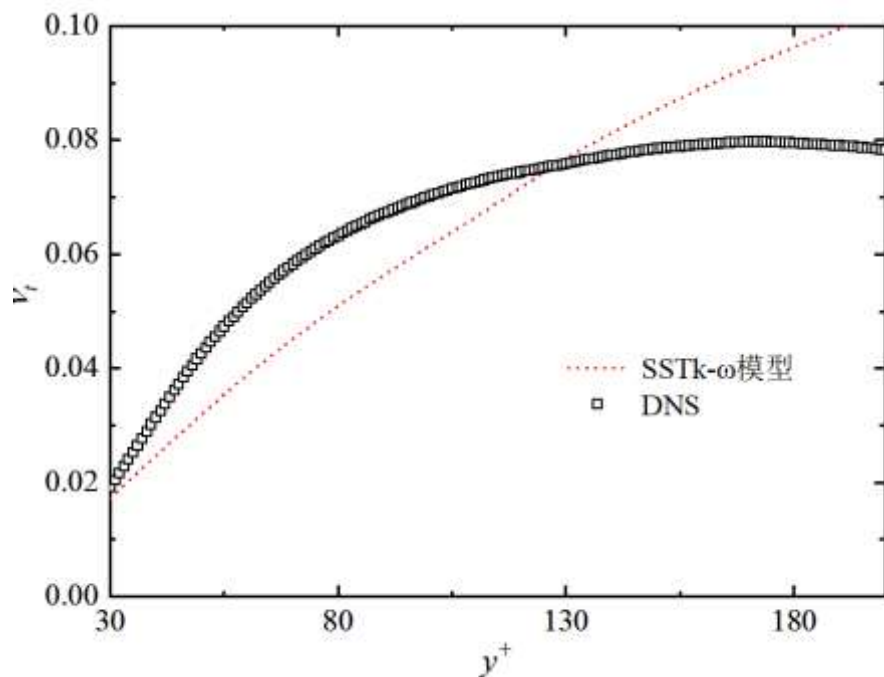
$$\alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t}$$



- 在更靠近壁面区域, Pr_t 刻画效果更好的Weigand等人^[4]的模型对于湍流热扩散系数以及温度场的刻画效果反而更差
- 造成该现象的原因是湍流模型在计算湍流运动粘度时本身带有一定的偏差

4.2 Pr_t 模型适用性分析：结论

◆ 湍流热扩散系数由湍流粘度与 Pr_t 共同确定



- 已有模型开发研究中只关注了 Pr_t 模型对温度场求解的影响而忽视了湍流模型的作用
- 由于不同湍流模型计算的湍流粘度不同，因此同一 Pr_t 模型搭配不同湍流模型时得到的结果会存在差异
- 因此，后续模型开发及RANS计算研究中需要考虑湍流模型与 Pr_t 模型的组合

➤ 本研究主要结论如下：

- 对于槽道流动换热的RANS计算， $k-\omega$ 类模型是优选的湍流模型；
- 已有 Pr_t 模型在求解氦氩流动换热时，依旧有改进空间；
- 湍流模型求解的湍流粘度与实际情况的偏离与 Pr_t 模型共同作用影响温度场求解，而不同湍流模型求解的湍流粘度差异很大，在后续的开发及RANS计算研究中，需考虑两种模型组合。



谢谢聆听！