

温度梯度对平板边界层转捩影响的数值模拟*

董 平, 颜培刚, 黄洪雁, 冯国泰

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了研究温度梯度对边界层转捩的影响, 在对有/无压力梯度的 T3 系列平板转捩实验进行数值模拟获得满意结果的基础上, 对原型实验进行重新设计, 以在平板边界层内形成不同温度梯度并进行数值模拟。计算结果表明随着温度梯度的增大, 转捩位置向下游推延发生, 平板相同位置边界层的形状参数和壁面切应力系数也相应大幅增高, 边界层湍流脉动得到抑制, 这是因为温度梯度形成的密度分层, 湍流能量为了克服因为密度分层形成的法向浮力而被逐渐耗散, 但是温度梯度对转捩影响与其它流动特性对转捩的影响相比较弱。

关键词: 温度梯度; 压力梯度; 密度梯度; 边界层转捩; 数值仿真

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2008) 05-0527-06

Numerical simulation of temperature gradient influence on flat plate boundary layer transition

DONG Ping YAN Pei-gang HUANG Hong-yan FENG Guo-tai

(School of Energy Science and Engineering Harbin Inst. of Technology Harbin 150001, China)

Abstract To investigate the influence of high temperature gradient on transition in boundary layer, Coupland's T3 flat plate experiments at zero and non-zero pressure gradient are adapted with different temperature gradient in boundary layer by numerical simulation and are validated by experiments. The results show that the higher temperature gradient can delay transition process and postpone the onset location of transition to backward position, wall skin-friction coefficient and shape factor of boundary layer with temperature gradient are higher than that with no temperature gradient in the same place of plate. The turbulent pulse of mainstream is weakened because of density gradient caused by temperature gradient. The turbulent energy is dissipated by the vertical buoyancy caused by the density gradient in boundary layer. The influence on transition by temperature gradient is weaker than mainstream hydrokinetics properties, such as turbulence intensity, inlet velocity and pressure gradient.

Key words Temperature gradient; Pressure gradient; Density gradient; Boundary layer transition; Numerical simulation

1 引 言

透平叶片边界层内的流动中直接影响叶片的气动性能和传热特性。透平叶片边界层流动的主要形式是层流、湍流和从层流向湍流转化的转捩流动; 一般来说层流流动除了存在粘性阻力外, 流场中没有其它额外的耗散因素, 流动损失相对湍流较小, 大量研究表明, 如果机翼流动一直保持层流, 可以节约 25% ~ 30% 的能量, 因此在机翼设计中常常采用层流技术^[1]; 而燃气涡轮环形叶栅的几何形状非常复杂, 燃

气涡轮入口燃气的湍流强度也较高, 使得燃气在叶片边界层内流动通常发生较大的分离并导致转捩, 层流转化为湍流流动, 湍流常常伴随较大的流动损失, 并对涡轮叶片的传热性能有很大的影响, 所以在现代燃气轮机的设计中, 通常希望采用相应的手段对透平叶片表面的边界层流动加以控制, 如压气机叶片表面边界层抽吸技术^[2], 来减小损失并提高透平叶片的综合性能, 所以认识转捩的机理, 正确设定转捩的条件, 准确预测转捩发生的位置都是非常重要的。转捩的发生是一个非定常、非线性、对干扰极其敏感的复杂

* 收稿日期: 2007-07-20 修订日期: 2007-11-29。

基金项目: 国家自然科学基金 (50476028 50576017)。

作者简介: 董 平 (1974-), 男, 博士生, 研究领域为叶轮机械气动热力学。E-mail dps777@163.com

三维过程,影响转捩的因素即有外来扰动因素,又有内部因素,是外力惯性力和流体粘性应力平衡受到破坏的过程,文献[3~5]对这些影响因素进行了研究。

现代燃气轮机效率的提高主要通过提高涡轮进口温度和压气机压比来实现,但是较高的压比又使冷却气体的温度升高,这样燃气涡轮叶片表面的换热量也越来越高,近壁边界层内的温度梯度也越来越大,文献[6~7]针对加热平板表面密度分层结构中的逆转捩现象进行了实验研究,结果表明温度梯度对于转捩的影响很大,但是目前关于温度梯度对转捩影响的文献还是相对较少,针对于此,本文的主要工作是通过Coupland^[8]所作的T3系列平板转捩实验(T3A, T3B, T3C1, T3C2)进行数值模拟并得到满意校核的基础上对其重新设计,在有/无压力梯度条件下,设计一系列有规律温度梯度(主流与平板壁面之间),对温度梯度对转捩流动的影响进行研究。

2 计算模型和数值方法

2.1 计算模型

T3A和T3B的实验示意图见图1(a), T3C1和T3C2的示意图见图1(b), 实验条件见表1。

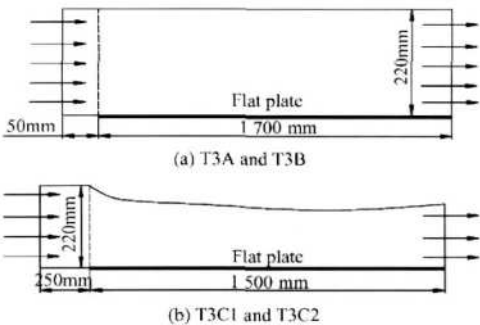


Fig. 1 Sketch of the flat plate boundary layer transition experiments

由实验条件可见,所选实验的进口湍流强度与实际涡轮工作条件相似:3%~6%,其中T3C1和T3C2通过带有收缩/扩张型线的上端壁在流动过程中形成

正/逆压力梯度,这是为了模拟涡轮叶片吸力面的工作条件。T3系列实验的平板壁面条件是绝热壁面^[8],主流温度为室温,本文为了研究边界层温度梯度对转捩的影响,根据燃气涡轮的流动情况,设定平板壁面温度保持恒定为293K,主流进口温度则相应较壁面温度高100~700K,具体见表1。

2.2 数值方法

本文选用商业程序CFX作为求解器,湍流模型选取k-ω模型的SST格式,并启用M-L转捩模型gamma形式^[9],同时与采用全湍流模型(不启用转捩选项的k-ω模型的SST格式)和层流模型计算结果进行对比,差分格式均为二阶迎风格式,当计算残差不再下降并周期性波动,进出口流量不再变化的时候为判断收敛条件。

2.3 网格

T3系列实验可以看作二维流动,但由于CFX对于二维计算的局限性,只能使用三维网格近似二维网格,所以在平板计算区域高度方向取140个网格点,流动方向取600个网格点,侧向取4个网格点,合计33.6万;为准确地捕捉边界层的速度分布,在近壁面附近对网格进行加密,距壁面第一个网格点的y⁺<1,并在边界层内(假设边界层厚度≤25mm)保证30个网格点。

3 计算结果与讨论

图2是壁面切应力系数分布图,切应力系数的定义是: $C_f = \tau / 0.5 \rho U_{ref}^2$,τ是流向方向上的壁面切应力,U_{ref}为边界层边缘处势流区域的速度分布,切应力直接反应主流对边界层的影响,层流的边界层较厚,边界层的速度梯度较小,摩擦系数较小,湍流反之,通常认为转捩流动为一个摩擦系数突跃的过程,最小处为转捩的起始点,最大之处为终点。图3是边界层形状参数分布,形状参数的定义是: $H = \delta_1 / \delta_2$, $\delta_1 = \int_0^{\delta_2} \rho / \rho_{ref} (1 - u / U_{ref}) dy$ 为边界层位移厚度, $\delta_2 =$

Table 1 Inlet boundary condition of test case

	Inlet velocity /(m/s)	Turbulence intensity/%	Pressure gradient	Viscosity ratio	Plate wall temperature/K	Main-stream inlet temperature/K
T3A	5.4	3.0	No	13	293	393 493 593 693 793 893 993
T3B	9.4	6.0	No	100		
T3C1	5.9	6.6	Yes	100		
T3C2	5.0	3.0	Yes	30		

$\int_0^{\delta} \rho/\rho_{\text{ref}} (u/U_{\text{ref}}) (1 - u/U_{\text{ref}}) dy$ 为边界层动量损失厚度, 形状参数是衡量边界层流动状态的参数, 一般情况下认为层流状态的形状参数应该大于 2 在湍流

边界层内由于流速分布更趋均匀化而边界层位移厚度 δ_2 减小, 由于阻力的增加而边界层动量损失厚度 δ_2 增加, 形状参数下降到 1.5 以下, 所以如果发生转

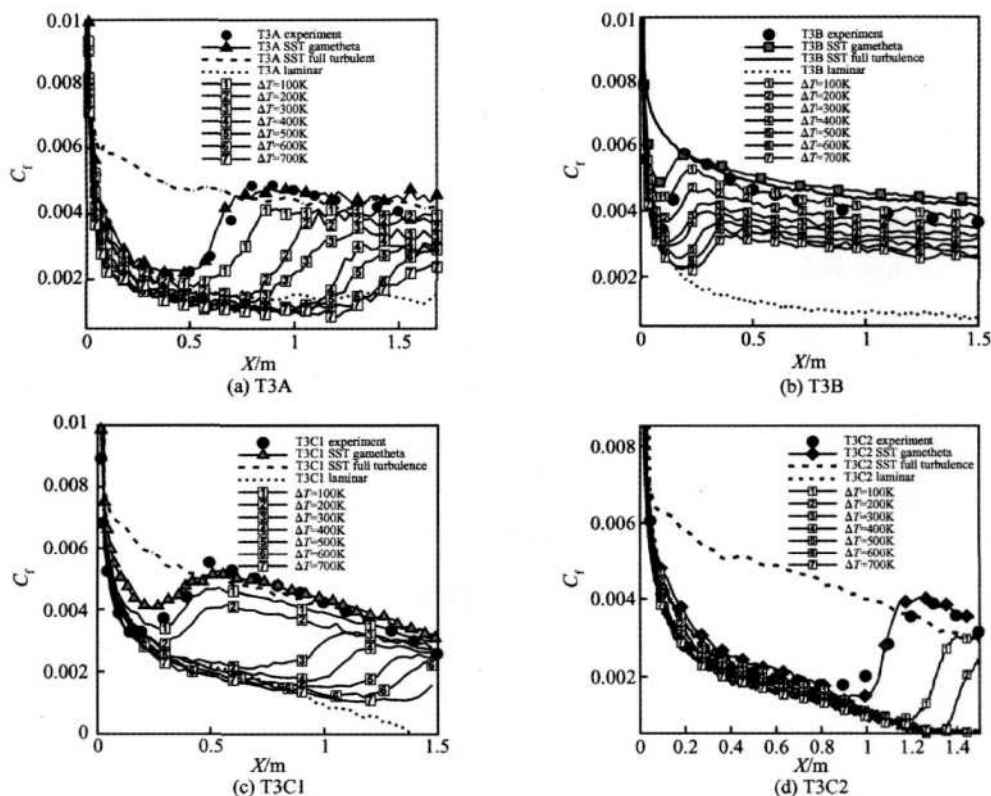


Fig. 2 Distribution of wall skin-friction coefficient

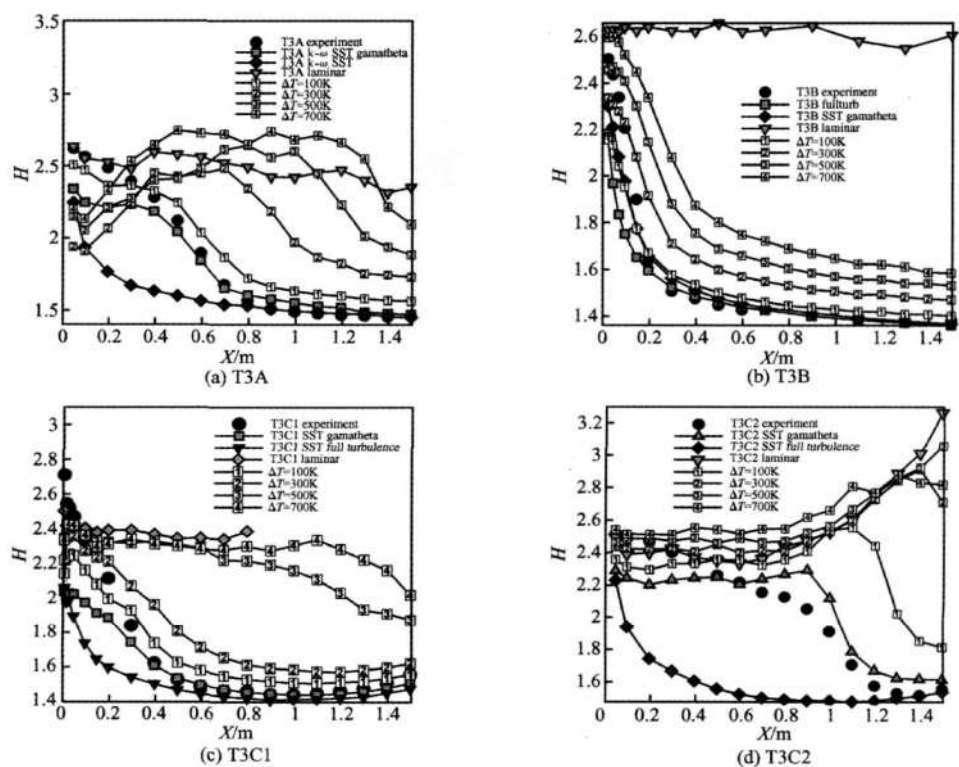


Fig. 3 Shape factor distribution of boundary layer

捩,形状参数也必然有一个从高向低的跳跃过程。由图 2和图 3中使用各模型的计算结果比较,可以看出对于 T3系列原型实验 ($\Delta T = 0\text{ K}$),应用 M-L 转捩模型能比较准确地捕捉从层流向湍流的转捩过程的始终点和发展过程,数值模拟的壁面切应力参数和边界层流动状态形状参数与实验值都吻合很好,为后续数值实验奠定了比较充分的基础。由图 2和图 3中有温度梯度的计算结果可以发现,在相同实验工况下,随着进口与壁面温度梯度的增大,一方面转捩过程向下游推移,另一方面不同的流场对于温度梯度的影响有较大的差别。对于无压力梯度实验 T3A 和 T3B,由图 2(a)和 (b)可见随着温度梯度的增加,边界层转捩位置向下游移动;对于有压力梯度实验 T3C1和 T3C2(在 $X \leq 0.9\text{ m}$ 这段区域里为顺压梯度,流动加速,而在余下区域里开始逐渐减速,为逆压梯度),由表 1可知 T3A 与 T3C2的进口条件大致相同,他们主要区别是否存在压力梯度,由图 2(a)和 (d)比较可知,原型实验中由于压力梯度的存在促使转捩向下游推移,当叠加温度梯度升高后,转捩位置进一步向下游推移延迟;T3C1 与 T3C2的进口条件的主要区别是进口湍流强度不同,由图 2中 (c)和 (d)比较可知,高湍流强度进口条件促进边界层转捩发生;由图 2中 (b)和 (c)比较可知,较高的进口流速同样促使转捩的发生,由图 2中 (b)和 (a)比较可以发现,对于 T3B 既有高进口湍流强度,又有较高的进口速度,其边界层流动的转捩在平板的前缘就发生了,而近壁边界层温度梯度的增大对其转捩的影响的作用相对很小,只在很小的范围内向下游推移;由图 2还可发现,随着温度梯度的增大,在转捩以后相同流动位置加热条件下摩擦系数较不加热时有明显减小,这说明温度梯度的增大对于湍流流动也起到一定的抑制作用。与图 2相对应由图 3可以发现,温度梯度增大,平板相同位置形状参数较不加热时有明显增大,进口主流的温度升高促使流体在近壁边界层区转变为层流流动 ($H \geq 2$),转捩位置随之向下游推移。以上现象说明,温度梯度的增大抑制了平板表面的湍流成分,推迟转捩的发生。

层流流动是一种特殊的流动状态,存在流动不稳定的缺点,特别是在高雷诺数下由于扰动很大而流动阻尼较小,不能保持流动稳定,随着流动发展,边界层厚度逐渐加厚,必须会发生转捩。温度梯度的存在使流体形成密度不均的分布形态,当进口温度高,平板

壁面温度低(端壁冷却),在壁面边界层内形成较大的温度梯度,并使得边界层上层流体密度较低(温度较高)、下层流体密度较高(温度较低)的分布,这种密度分层是一种稳定的分布形式,这是因为上部流体密度低,所以流体微团在上升时中要克服重力做功,使湍流能量转变为重力势能逐渐耗散,与湍流产生项的作用正好相反,这种能量的转化使湍流能量受到抑制,甚至引起了逆转捩的发生——由湍流重新转变为层流。图 4为边界层内密度分布云图,图 5为边界层内湍流强度云图: $I = \sqrt{2/3K} / U_{\text{ref}}$ 。图 4和图 5中箭头所示位置是根据图 2和图 3标定的转捩始终位置。由图 4可见随着温度梯度增大,相对于无温度梯度时,平板同一位置边界层内密度梯度也随之增大;层流和湍流的密度分层结构有较大区别,层流的密度梯度相对湍流要小;另外由图 4(a)和 (d)相比较可以发现,平板前部顺压梯度对流动加速作用 ($X \leq 0.9\text{ m}$)使近壁边界层的密度梯度较无压力梯度时增大,并使边界层厚度增加不会过快,流动保持稳定的流动状态,推延转捩的发生,在图 5中相同位置近壁边界层内的湍流强度则相应降低,这说明温度梯度引起边界层内的密度分层确实抑制了平板表面的湍流成分,流体在近壁区域已经转变为层流流动;由图 4(b)和 (c)并与其他工况比较可以发现,较高进口湍流强度和主流进口速度使得近壁边界层的密度梯度急剧增加,这是因为主流通过剪切应力做功将主流的能量转变为湍流能量,主流流速增加,动量随之增大,近壁边界层的速度梯度增大,促进主流与边界层之间的掺混,主流惯性力对流体粘性应力的平衡被打破,使得边界层迅速由层流发生转捩转换为湍流,在图 5中相同位置边界层内的湍流强度相应增高,而温度梯度只是对于近壁法向速度产生影响,这相对于主流速度的影响要小得多。

4 结 论

综上所述,本文通过数值模拟对比有/无压力梯度、有/无温度梯度的平板转捩流动进行数值研究,发现随着温度梯度的增大,转捩推迟发生,平板相同位置边界层的形状参数和壁面切应力系数也相应大幅增大,这是因为温度梯度的存在使流体形成密度不均(上低下高)的分层形态,这种分层是一种稳定的分布,因为上部流体密度低,所以流体微团在上升时中要克服重力做功,使湍流能量转变为重力势能而逐渐

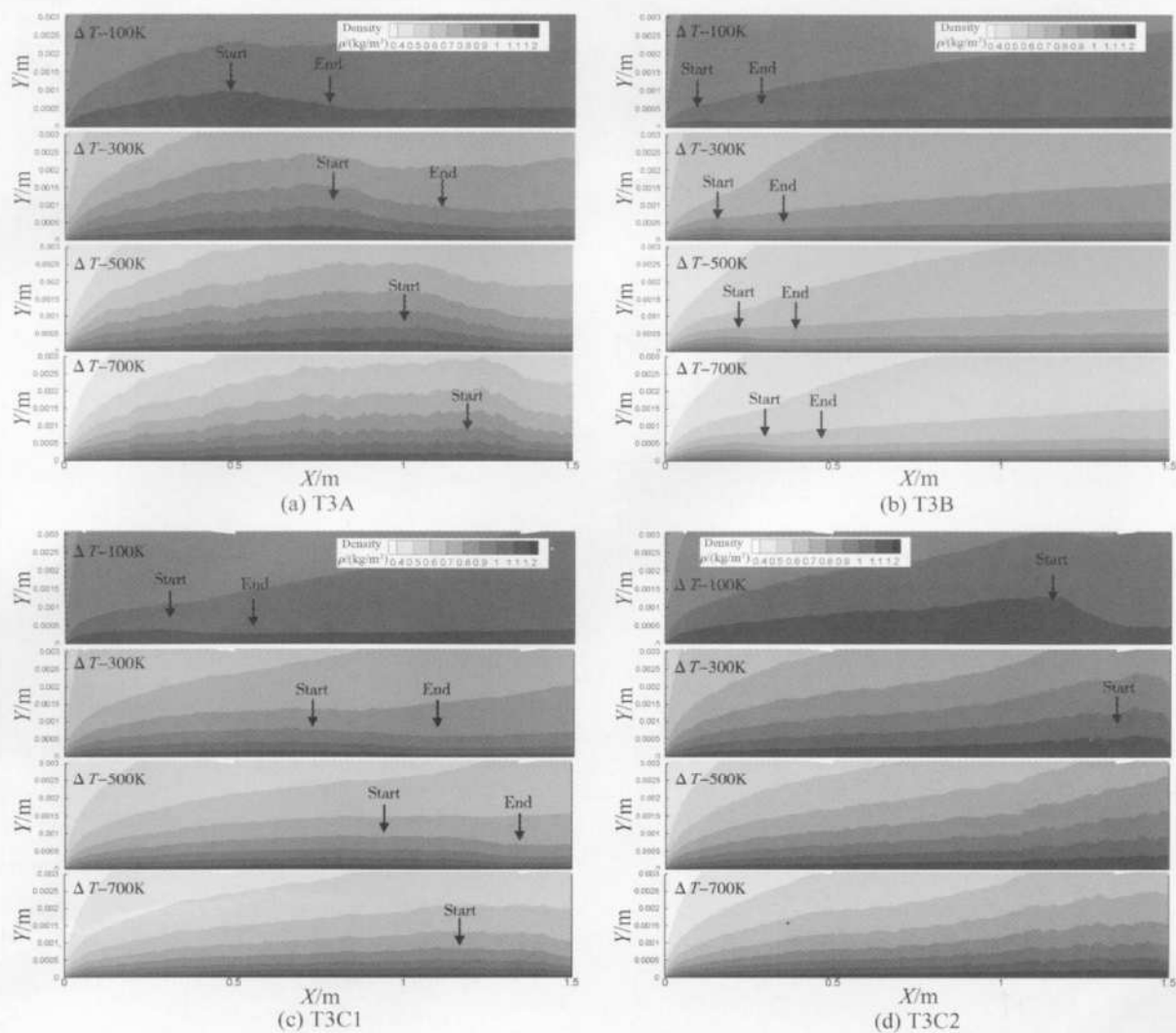
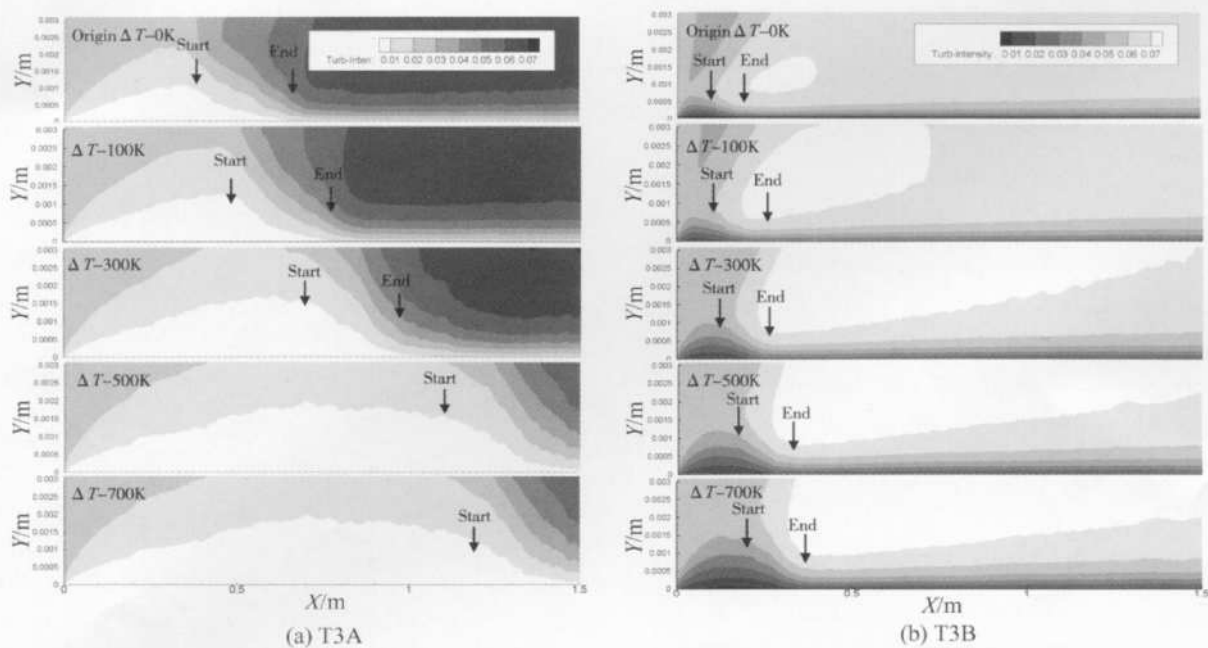


Fig. 4 Density distribution of boundary layer



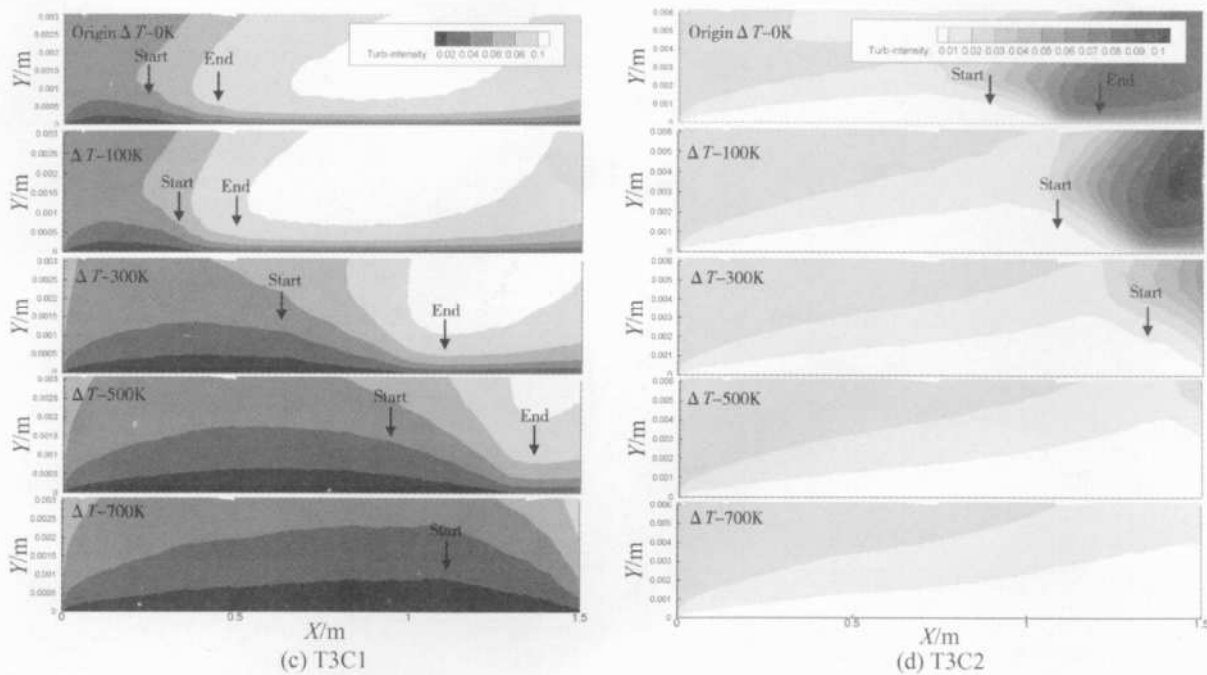


Fig. 5 Turbulence intensity distribution of boundary layer

耗散,与湍流产生项的作用正好相反,湍流的能量会逐渐被消耗而使边界层湍流脉动得到抑制;同理,这种温度梯度形成的密度分层对于转捩后的湍流流动也起到一定的抑制作用。

主流进口高速度、高湍流度都促进转捩的发生,流场顺压梯度抑制转捩的发生,温度梯度与这些因素相互叠加应用时对边界层的转捩仍起到推延作用,但是相对主流进口特性对转捩的影响,温度梯度的影响相对较弱,这是因为温度梯度只是对于近壁边界层法向方向产生影响,而具有高动量的主流对边界层的剪切和掺混的影响要大得多。

参考文献:

- [1] Trevor Young, Brian Mahony, Bryan Humphreys, et al. Durability of hybrid laminar flow control (HLFC) surfaces[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2003, 7(3).
- [2] Reijnen D P. Experiment study of boundary layer suction in a transonic compressor[D]. *MIT*, 1997.
- [3] 何克敏,郭渠渝,白存儒,等. 低湍流度风洞中湍流度对平板边界层转捩影响的实验研究[J]. *实验力学*, 1994, 9(4).
- [4] 刘波,王掩刚,肖敏. 压气机叶栅叶片表面边界层流态变化影响因素探讨[J]. *推进技术*, 1999, 20(3). (LIU Bq, WANG Yan-gang, XIAO Min. Effects of inlet flow conditions on boundary flow on compressor blade surface[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(3).)
- [5] 刘波,王掩刚,高丽敏. 来流条件对叶片表面边界层转捩影响的数值模拟研究[J]. *航空动力学报*, 1999, 114(1).
- [6] 李铁明,颜大椿. 加热平板表面温度分层产生的湍流逆转捩现象[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(3).
- [7] 张振,孙智利,颜大椿. 湍流边界层逆转捩机制的实验研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2006, 42(3).
- [8] Coupland J. Flat plate transitional boundary layers experiments[EB/OL]. <http://cfd.mech.uct.ac.uk/ercoftac/classif.html>, 1990.
- [9] Menter F R, Langtry R B, Likki S R, et al. A correlation-based transition using local variables part I: model formulation[R]. *ASME 2004-GT-53452*.

(编辑:梅 瑛)