专题综述

文章编号: 1001-2060(2010)02-0127-07

表面活性剂减阻溶液湍流传热结构研究进展

庞明军¹,魏进家¹,李凤臣²

西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室,陕西 西安 710049
 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:与聚合物添加剂相比,表面活 性剂减阻剂具有寿命长不发生降解的 特点,已被广泛地应用到集中供暖 (冷,係统。表面活性剂在降低流体湍 流摩擦阻力时,溶液的传热性能恶化。 为了扩大表面活性剂在传热领域的应 用,理解传热下降的原因,针对表面活 性剂溶液的湍流传热结构目前开展了 一些实验研究和理论分析,但仅处于 探索阶段、尚未定论。为了进一步开 展研究,对目前国内外关于湍流传热 结构的研究,以及取得的成果做了分 析和总结,并分析了目前研究存在的 问题,对今后继续开展研究提出了自 已的观点。

关 键 词:表面活性剂;流动减阻; 传热结构;槽道

中图分类号: TQ316 文献标识码: A

引 言

减阻添加剂可以大大减低湍 流摩擦阻力,有时高达 90% 以 上^[1-10]。与聚合物添加剂相比, 表面活性剂不发生降解,即使在 一定条件下失去减阻功能,即使在 一定条件下失去减阻功能,当这 些条件去除以后,经过短暂时间 减阻功能自行恢复,所以已被广 泛应用到液体的闭式循环系统 (如集中供暖系统等)。研究发 现,由于表面活性剂减阻溶液的 湍流受到巨大的抑制,在阻力减 小的同时,减阻溶液的传热系数 也大大降低,严重恶化了供暖系 统换热器的传热性能。为了拓宽 表面活性剂减阻技术的应用范 围,理解减阻流体在流动过程中 能量的传递规律和表面活性剂传 热下降的机理,相关学者对减阻 流体的传热湍流结构做了一些研 究。针对平均温度、温度脉动、热 通量、瞬时温度和温度脉动功谱 函数等进行了实验研究^[9-28]。 目前认为,传热下降的主要原因 是由干法向速度脉动分量和温度 脉动的解耦导致法向热通量降低 而引起的。为了理解表面活性剂 传热下降的机理,方便相关研究 者开展工作,对此方面目前的研 究工作做了分析和总结。尽管由 管道和槽道测得结果在数值上有 些差异,但分布规律相似,限于篇 幅,研究给出的结果基本上是由 二维槽道测得的结果。

1 传热下降研究

实验时大部分文献采用激光 测速仪(LDV,PDA或 PIV)和细 丝热电偶(TC)相结合的方法测 试传热湍流结构。实验多采用电 加热,局部传热系数计算为:

 $\alpha = \frac{q_{\rm w}}{(T_{\rm w} - T_{\rm f})} \qquad (1)$

式中:^Q—热通量, W/n², 由通过 热阻丝的电流和电压计算; T₂— 加热面的壁温, K₃ T₁—减阻溶液 进出口温度平均值, K₃ 可以进 一步计算局部努赛尔数:

Nu=αH/λ。 (2) 式中: λ。一溶剂的导热系数, W/ (^{m。}K); H-二维槽道的高度, ^m。因此也可以计算柯尔伯恩因 子:

i = Nu∘ R e P r^{1/3} (3) 式中: R = 雷诺数, R = ρ ч H/μ, μ-溶剂的粘度, Pa∘ s ρ-溶剂 的密度, k^{g/m³}; ч-流体断面平 均流速, m/s, P-普朗特数。

图 1 是文献 [21] 给出的部 分工况的传热因子随雷诺数的变 化情况。对于聚合物溶液的传热 因子遵循式为:

$$\dot{H} = 0.03 R \bar{e}^{0.45}$$
 (4)





实验时为了检验实验系统

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10602043 50536020); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2009145),高等学校博士学科点专项科研基 金资助项目(20090201110002)

作者简介: 庞明军 (1976—), 男, 山西大同人: 西安交通大学博士研究生, 讲师. ?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

收稿日期: 2009-02-16 修订日期: 2009-05-26

的可靠性.将水的测试结果与同 等条件下 G^{njeljnsk}访程的求解 结果做比较。G^{njeljnsk}访程为: Nb=0 012(Rb⁸⁷-280)× P^{f4} f2 (5) 式中: f-入口效应修正系数,f2

=1+(D/L)^{2/3}; R⁶-以水力半 径计算的雷诺数, R⁶=θ4D/4; 其中, D-水力直径, ^m, L-加热 段长度, ^m。

传热下降率计算为: $HIR_{0} = \frac{N_{0}^{u} - N_{u}^{u}}{N_{v}^{u}} \times 100\%$

(6)

式中: HIR—传热下降百分比; Ng—水的努赛尔数, Nu—表面 活性剂溶液的努赛尔数。图 2是 文献[11]给出减阻表面活性剂 溶液的传热下降率(HIR)和阻力 减小率(DR)随雷诺数的变化情 况。



图 2 减阻和传热减小情况

2 湍流传热结构的研究

2.1 平均温度[10~11, 19, 29]

文献给出基于内尺度的温度 分布曲线,其中温差($\Theta = T_{e} - T$ 和壁面法向距离(^y分别由摩 擦温度(T和v/^v无量纲化,温 度和壁面距离分别为:

 $\Theta^+ = (T_{-} T)/T_{,} y = y_{,} v$ 式中: T-摩擦温度, T = Q/($\rho \in Q$), Y-距壁面的垂直距离 (壁面处 y=0), m, 太溶剂运动 粘度, n^2 / s^7 —测量点流体的温 度, $K \in$ 液体的比定压热容, $J / (k^{g_{\circ}} K), u - 摩擦速度, u = <math>(\tau_w / \rho)^{0.5}$; $\tau_w - 壁面切应力, P_a^{\circ}$ 对于聚合物溶液和阳离子表 面活性剂溶液过渡层的温度分布 分别遵循式 (7)和式 (8)^[29], 则: $\Theta^+ = 69 \ln^{y^+} - 75$ (7)

 $\Theta^+ = 210 \ \text{ln}^{\text{y}^+} - 600 \qquad (8)$

图 3是文献 [21] 给出的平 均温度分布情况,图中 Kader方 程是牛顿流体在槽道内的温度分 布方程:



图 3 平均温度分布情况

从图中可以看出,水的平均 温度与 K方程非常吻合, 减阻流 体的平均温度分布完全不同于牛 顿流体的温度分布,最大温度梯 度不在近壁层,而是在 10< ^ず< 70范围之间。比较发现减阻溶 液的高温度梯度层和热传导层的 温度分布 $\Theta^+ = \Pr^{, y}$ 非常相似, 可以推测 HIR DR发生同一个 层,该层的传热机理与层流相类 似。研究发现,在层流底层减阻 流体的温度梯度小于相同工况下 水的温度梯度:在过渡层内,尤其 是 10< ^y<30范围内,减阻流体 的温度梯度远大于水的温度梯 度。在湍流核心区,减阻流体温 度梯度小于水,当 ^{yt}>70时,减 阻流体的温度梯度趋于零。由此 可见,破坏 10< ^y<70范围内减 阻流体内部胶束网状结构、增加 湍流可以起到强化传热的作用。 表 1 为图 3 测试工况说明,后面出 现的代号与此表含义相同。

$$\begin{split} \Theta^{+} &= P \mathfrak{r} \quad \overset{\circ}{\mathcal{T}} \circ \operatorname{exp}(-\Gamma) + \\ \left\{ 2 \ 12 \ \overset{h}{\mathbb{L}} \ (1+\overset{\circ}{\mathcal{T}}) \circ \frac{1.5(2-2\overset{\circ}{\mathcal{T}}/\mathrm{H})}{1+2(1-2\overset{\circ}{\mathcal{T}}/\mathrm{H})^{2}} \right\} + \beta \left(P \mathfrak{T}\right\} \quad \exp\left(-\frac{1}{\Gamma}\right) \\ \end{array} \tag{9}$$
 $\overrightarrow{\mathbf{x}} \overrightarrow{\mathbf{P}} : \ \Gamma &= 0 \ 01 \left(P \mathfrak{r}^{\circ} \quad \overset{\circ}{\mathcal{T}}\right)^{4} / \left(1+5P^{\frac{3}{4}} \circ \quad \overset{\circ}{\mathcal{T}}\right), \\ \beta \left(P \mathfrak{T}\right) &= \left(3.85P^{\frac{1}{4}/3} - 1.3\right)^{2} + 2 \ 12 \ \overset{h}{\mathbb{I}}(P \mathfrak{T})_{\circ} \end{split}$

表 1 图 3的测试工况说明

测试工况	T_{in}/K	${ m Re}(imes 10^4$)	$u_{\tau}^{}/m \circ s^{-1}$	T_{τ}/K	DR/%	HTR/%
水	304	2 5	0 025	0. 020	—	_
CTAC(CA)	304	3 5	0 027	0. 018	33 0	20 2
CTAC(CB)	304	2 5	0 012	0. 041	70 0	77.3
CTAC(CC)	304	15	0 009	0. 034	65 1	77.0

文献 [29] 研究发现, 阳离子 表面活性剂溶液的温度分布与速 度分布非常相似, 类似于速度分 布的三层分布模式, 即粘性底层、 过渡层和核心层。传热能力的下 降与温度分布过渡层的存在有 关, 而且随着过渡层厚度的增加, 传热下降程度增加。而对于非离

子表面活性剂的温度分布完全不同于阳离子表面活性剂的温度分布,没有明显的过渡层和核心层。 温度分布曲线的斜率随传热能力下降程度的增加而增加。

降与温度分布过渡层的存在有文献 [18] 分别研究了进口关,而且随着过渡层厚度的增加,温度和热通量对平均温度分布的传热下降程度增加。而对于非离影响,如图 4和图 5所示。从图tal Electronic Publishing House. All rights reserved.http://www.enki.net

4可知,随着进口温度的升高,表 面活性剂溶液的平均温度分布与 水的靠近,对应的表面活性剂溶 液的减阻功能开始丧失,说明温 度对平均温度分布的影响与溶液 的减阻效应密切相关。另外也可 以看出,近壁处表面活性剂溶液 的温度梯度比水小,说明表面活 性剂溶液的扩散能力很低。



图 5 壁面热通量对平均温度 的影响 R € 12000

从图 5可知,随着壁面热通 量的增加,高扩散层的厚度增加, 高扩散层对应的温度梯度的值也 增加。主要是因为随着壁温的增 加,壁面附近胶束的强度被削弱, 减阻能力降低、流体稳定性下降, 扩散容易进行。壁温不同,高扩 散层的定性温度不同(但与溶液 的临界温度不同)。从改善传热 的角度来看,加热虽能改变近壁 处温度场和流场的分布,但对传 热系数的提高不大,这是因为在 减阻溶液的外层存在传热阻力。

22温度脉动强度[10 18 20]

度脉动强度分布曲线。减阻流体 的温度脉动强度与速度脉动强度 分布非常相似,其峰值均向外层 移动。与牛顿流体相比,最大值 变大,在一个短暂的峰值过后,很 快地下降,在远离壁面区域低于 水的值。在大温度梯度层内,产 生强烈的自然对流。文献 [10] 研究发现,近壁处高扩散层的温 度脉动频率很小,而在平均温度 梯度高的低扩散层内,减阻流体 的温度脉动频率有所增强: 当 ^梦 增大到远离热边界层的外层区域 时,减阻流体的温度脉动频率变 得很大。水的温度脉动频率比减 阻流体的高,温度脉动频率特性 在整个研究范围之内几乎不发生 变化。图 7是文献 [11] 给出的 不同位置的温度脉动记录情况。



图 6 温度脉动强度变化曲线

23 热通量^[9~10,21]

图 8是文献 [21] 给出的热 通量分布情况。图中的坐标分别 由内尺度参数无量纲化。研究发 现,水的主流方向上的热通量 $\overline{t} \theta^+$ (由摩擦速度和摩擦温度无 量纲化,后面与此相同)最大值 的位置与 $t^{t} 和 \theta^+$ 的最大值的位置与 $t^{t} 1 \pi \theta^+$ 的最大值的位 置基本相同,表明了牛顿流体 t^{t} $1 \pi \theta^+$ 的最大值远离壁面, θ^+ 对 $\overline{t} \theta^+$ 的最大值。减阻溶液的 t^{t} $1 \pi \theta^+$ 的最大值。远离壁面, θ^+ 对 $\overline{t} \theta^+$ 的影响大于 t^{t} 对它的影 响, $\overline{t} \theta^+$ 与 θ^+ 峰值的位置几乎 是相同的,但与 t^{t} 不同。在峰值 后, $\overline{t} \theta^+$ 快速下降至零,甚至出



R∈12 000 T=30 °C

置恰好与高温度梯度结束的位置 一致。减阻溶液 🕈 🕅 (壁面法向 热通量)完全不同于 ^{ι†} θ⁺, 在整 个测量范围内受到极大的抑制, 抑制程度随 HIR的增大而加强。 阻力的降低主要是由于雷诺应力 的减小引起的,与其相类似, 一 🕆 🖯 🕂 巨大的减小, 引起传热率 的大大下降。在湍流流动中,与 – ^{.t †} 负 责 动 量 输 送 类 似, —^{,†}θ⁺负责热量输送, — ^{ι†, †}和 一^{寸 θ⁺}具有相似的变化趋势。 可以推理减阻添加剂对 — 🕈 🖯 与 - ^{.t . †} 的 影 响 是 相 似 的, 一[†]θ⁺的减小不单是由法向速 度脉动强度的减小引起的,两个 关联量的解耦是主要的原因。表 面活性剂对 $\mathbf{u}^{+} \theta^{+}$ 的影响与 θ^{+} 相 (u) $u^{\dagger} \theta^{\dagger}$ 的增加伴随着 $u^{\dagger} \eta$ θ⁺的增加,表明 ч和 θ的脉动是 u† ♥和. [†]θ⁺的降低

21 图 6 是文献 [21] 给出的温 现负值。 d^{\dagger} 的低值出现的位 同步的, $-d^{\dagger}$ d^{\dagger} 和 $-d^{\dagger}$ d^{\dagger} 的降

热能动力工程

说明 ¹和 ¹θ和 ¹是异步的。总 之,表面活性剂不仅仅抑制了湍 流,而且改变了湍流的结构。



图 8 湍流热通量分布图

2.4 温度方差产生项

图 9是文献 [21] 给出的温 度方差产生项分布图。从图中可 知,在相同的壁面距离下表面活 性剂溶液的温差产生项均低于 水,而且随减阻程度的增加,温度 方差的值减小。温差预算平衡方 程为 $-\overline{\mathbf{u}^{\dagger}\,\theta^{+}}$ (∂T^{\dagger} / ∂x^{\dagger}) $-\overline{\mathbf{v}\,\theta^{+}}$ $(\boldsymbol{\vartheta}^+ / \boldsymbol{\vartheta}^{\text{y}})$ 如果主流方向上的 温度梯度为零,法向温差湍流能 量产生率可以通过法向热通量和 平均温度分布来计算。对于牛顿 流体,在边界内 $- \dagger \theta^+$ ($\partial \Theta^+$ / ∂^{\dagger}) = P r/4 其中 - $\forall \theta^+ = 0.5$ $(\partial D^+ / \partial^{y^+}) = P r_{2}$ 、对于表面 活性剂溶液的温度方差产生项与 湍流动能产生项相似,由于法向 热通量的抑制, $- \dagger \theta^+$ ($\partial \Theta^+$ / ∂^y 池减小,但两者又不完全相 同,两者在高温度梯度区域减小 的程度不同,而且-[†] θ^+ ($\partial \Theta^+$ / ∂^y 弱小的峰值也没有远离壁 面。



由于温度脉动与主流速度分 量关系相对密切,温度脉动功谱 密度函数除了具有温度脉动自身 的特征,也具有主流速度的脉动 特征。从图 10可以看出,与水相 比,当 \leq 4 Hơt,减阻溶液的 G (F)/ θ^2 随 DR和 HIR程度的增 加而增加,然而当 \geq 5 Hơt,开 始减小,这表明活性剂抑制了高 频、小尺度的湍流,增加了低频和 大尺度湍流能量。该特征与主流 方向上的速度脉动功谱显示的特 征是一致的^[21]。



图 10 温度脉动功谱分布

26 法向热通量的平衡分析

流体的法向热通量等于法向 湍流热通量和传导热通量之和, 则:



与水流相比,在热边界层 内,减阻 CIAC溶液的法向热通 量表现出完全不同的特征,随着 HIR程度的增加,减阻流的 《 减小。与水相比 《 具有相似的 值。由于 《 的减小直接导致传 热率的下降。在减阻溶液中,添 加剂抑制了湍流槽道内的法向涡 动,因此湍流热量输送就像动量 输送一样被抑制了。因为湍流动 量输送在热量输送中起到了重要 的作用。

2 7 法向湍流热通量的象限分 析^[24]

图 12给出法向热通量的象 限分析。对于水流 Q和 Q在热 量输送中占主导地位,而 Q和 Q有负的贡献且绝对值非常小。 对于 减阻 CTAC溶液,在高的 HIR程度下,Q和 Q被大大抑 制,与水的相比 Q和 Q变化不 大。所以,Q和 Q的抑制直接 导致法向热通量的减小。

 3 涡扩散和湍流普朗特 数^[2]]

由雷诺应力和法向湍流热通

2.5.温度脉动功谱函数 2.51994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.clith.net

涡扩散的表达式,则:

$$-\rho \overline{u' \psi} = \rho \chi \frac{\partial u}{\partial y} \Rightarrow \chi = -\overline{u' \psi} / \frac{\partial u}{\partial y}$$
(11)

$$-\rho \varsigma \overline{\psi \theta'} = \rho \varsigma \alpha_{\tau} \frac{\partial \theta}{\partial y} \Rightarrow \alpha_{\tau} =$$

$$-\overline{\psi \theta'} / \frac{\partial \theta}{\partial y}$$
(12)

湍流普朗特数改写为: $P \mathfrak{t} = \frac{\overline{u' v'}}{\overline{v \theta'}} \circ \frac{\mathfrak{D}}{\partial u/\partial y} \longrightarrow (13)$

式中: ੫, √ 速度脉动分量, ^m/ ^s □ 主流方向上的瞬时速度, ^m/^sθ′–温度脉动, K



3.1 动量和热量涡扩散



图 13. 图 14分别是文献 [21]给出的水与表面活性剂溶 21994-2018 China Academic Io 液的动量和热量涡扩散分布曲 线。与水的相比动量和热量涡扩 散在整个测量范围均减小,而且 随 DR和 HIR的增加,两者减小 程度增加。变化趋势与雷诺应力 和法向热通量的变化趋势基本相 同。在 $y^{+} = 50 之前 \alpha^{+}_{+}$ 偏离水 的程度比 $\sqrt[4]{}$ 更严重。这就导致 活性剂溶液的普朗特常数偏离了 水的普朗特数。



- 图 14 热量涡扩散
- 3.2 湍流普朗特数



图 15 湍流普朗特数分布情况

图 15是文献 [21] 给出的湍 流普朗特数的分布曲线。从图中 可知,对于水的 P在 $^{f} \approx 1.38$ 有个接近 2 0的峰值,远离这个 位置在外层快速地下降。对于减 阻溶液的 P¹完全不同于水,当 $^{f} > 50$ 时与水接近。在 0 $< ^{f}$ < 50范围内, P¹增加到 CTAC溶 液的分子 P数,这是由 α_{t}^{+} 和 f 变化引起的。高的湍流 P数区 域与高的温度梯度层相对应。

与水的相比,表面活性剂减 阻流的边界层粘性底层变厚,这 表明在近壁处存在层流,这里所 指的层流是流动特征完全偏离湍 流,接近层流状态。近壁区域的 平均速度和平均温度分布分别与 层流的相接近: $t^{\dagger} = y^{\dagger}, \Theta^{+} = \Pr r$ 。 y^{\dagger} 。因此局部湍流 P数与溶 液分子的 P数相接近。对于稀 的 CTAC溶液,分子 P数与水的 相同,因此,出现在减阻溶液中湍 流 P数的分布与层流的一样。 3.3 热量湍流输送和 HIIR的关 系^[21]

对于流动充分发展而传热未 充分发展的二维槽道流在稳态 下,能量守恒的微分方程近似地 为:

$$\mathbf{u}\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}} \left[\alpha \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{x}} - \overline{\mathbf{v}'\theta} \right] \quad (14)$$

因为在热边界层外,温度梯 度和湍流热通量几乎为零,所以 主要关注热边界层的分布情况。 假设仅在一面加热,主流方向上 的温度梯度为:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial x} = \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x} = \frac{\partial \langle T_w \rangle}{\partial x} = \frac{q}{\rho \varsigma \langle U \rangle_{\delta}}$$
(15)

$$\frac{1}{\Pr r} \frac{\partial \Phi^{+}}{\partial y^{\dagger}} - \overline{v} \theta^{+} = 1 - \frac{1}{\operatorname{Re}_{\tau\delta}} \int_{0}^{y_{+}} \frac{U^{\dagger}}{\langle U \rangle_{\delta}^{+}} dy^{\dagger}$$
(16)

式中: Real Land 动得。

法向热通量和 ^{Nu}之间的关 系为:

$$\frac{1}{\mathrm{Nu}} = \frac{\langle \Theta \rangle_{\mathrm{m}}}{\langle \Theta \rangle} \left[\left(\frac{1}{2} - A - \int_{0}^{\delta^{*}} (1 - y) \left(-\overline{v} \theta^{+} \right) dy \right] \right]$$
(17)
$$\mathbf{T} \mathbf{P}: \ \delta^{*} = \delta / \mathbf{H}$$
$$\langle \Theta \rangle_{\mathrm{m}} = \int_{0}^{1} \mathbf{\Phi} dy / \int_{0}^{1} \mathbf{u} dy$$

 $A = \left[\frac{(1 - y)}{R_{t\delta}} \int_{0}^{y_{+}} \frac{U}{\langle U_{\delta}^{+}} d^{y} \right] dy$ s reserved. http://www.cnki.net

994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.c

热能动力工程

对应一定的流动条件,存在 一定的热边界层厚度,当流动完 全是层流时,湍流热通量为零,对 应的 Nu有最小值 Ny。当流动 完全是湍流时,湍流热通量具有 最大值 $q = \int_0^1 (1 - y) \times (-\sqrt{\theta^+}) dy$ 与其相对应 Nu有 最大值。而减阻流是完全湍流的 部分层流化,所以减阻流的 Nu 介于 Ny和 Ny之间。那么 $\int_0^1 (1 - y)$

 $- y \left(- \sqrt[6]{\psi} \theta^{+} \right) d^{y}$ 介于零和 4之 间。由上面分析可以看出。壁面 垂直方向上热通量的抑制是传热 系数降低的主要原因。

4 传热减小与阻力下降的 对比分析

众多研究者发现,相同雷诺 数下表面活性剂减阻溶液的传热 系数比阻力系数的减小更为严 重,针对该现象文献[21]给出了 解释。表面活性剂尽管极大地抑 制了湍流,减小了湍流摩擦阻力, 但对阻力系数增加了一个正的弹 性应力的贡献。而对于传热来 说,表面活性剂只是极大地抑制 了湍流、使法向热通量大大减小, 流体粘弹性对湍流热通量没有产 生任何额外的贡献,所以导致传 热下降比阻力减小更为严重,柯 尔伯恩类比也不再成立。定量的 分析, 雷诺切应力的抑制, 导致湍 流对阻力系数的贡献减小产生阻 力减小:与其类似法向热通量的 减小,引起努塞尔数的减小导致 传热能力降低。

5 结 论

综上所述,虽然目前国内外 学者对个别表面活性剂减阻溶液 的传热下降做了一定的实验分 析,对传热下降原因有了一些定 性的解释,但仍缺乏定量的解释

减阻技术要想大规模的投入到工 程实际应用中仍需大量的实验和 理论研究作指导。目前,针对表 面活性剂减阻技术研究主要存在 以下几个问题: (1)对阻力下降 研究的比较多,而对传热下降研 究的比较少: (2) 对传热下降的 研究多数集中在理想状态下的小 型实验研究 考虑复杂多变的实 际管路系统对传热的影响比较 少; (3) 实验测试研究远远多干 理论数值模拟研究^[29~30];(4)对 表面活性剂减阻溶液强化传热研 究采用的方法比较单一,基本是 采用剪切流场来破坏胶束结构改 善传热,传热虽然得到了一定的 提高,但带来额外的压力损失; (5) 传热下降的研究和表面活性 剂溶液流变特性的研究不能有机 的统一起来。

对今后开展工作提出如下几 点建议: (1)在研究湍流传热结 构的同时,应同时注重流变特性 的测试: (2) 在小规模实验研究 的同时,应注重大规模的实际应 用研究: (3) 在实验研究的同时, 应注重理论数值模拟研究:(4) 应加强对不同种类、不同特性的 表面活性剂的研究,整合测试结 果获得表面活性剂传热下降的普 遍规律: (5) 对强化传热的研究, 可以尝试采用拉伸流场来破坏胶 束结构改善传热;(6)介于表面 活性剂溶液对生态环境有一定的 危害,应及时发展表面活性剂溶 液的回收和后处理技术。

参考文献:

- [1] 王燕萍, 顾卫国, 张红霞, 等. CTAC减 阻流体湍流高阶矩的研究[J]. 节能 技术, 2007, 25(141): 10-13
- [2] 蔡书鹏,杨 林,唐川林.边界层中 CTAB表面活性剂减阻水溶液的湍流 特性[].力学学报,2008 40(2):250 -254

性剂减阻流体湍流空间结构试验研究[J.热能动力工程。2004 19(2) 140-143

- [4] 蔡书鹏,唐川林.表面活性剂减阻水
 溶液在紊流边界层中的流动结构
 [4].四川大学学报,2007 39(3),52 -56.
- [5] 许 鹏,王德忠,扈黎光,等.低浓度 CTAC减阻流体流动性能试验研究
 [4].热能动力工程,2002,17(6):585 -588.
- [6] 魏进家,川口靖夫.零下温度时二维
 通道内界面活性剂减阻流动的实验
 研究[].西安交通大学学报,2006
 40(1):79-83.
- [7] 官峰,许鹏,王德忠,等.氯化十 六烷基三甲基季铵盐减阻流体试验
 [1].上海交通大学学报.2002 36
 (2),193-197.
- [8] 魏进家,川口靖夫, DAVID JH 一种 新型两性界面活性剂的减阻特性 [J.化工学报, 2006 57(11): 2750-2754.
- [9] 马祥馆,陶 进.表面活性剂管道减 阻及传热特性的研究[J].水动力学 研究进展,1993 12^A(8);636-642
- [10] 张红霞,王德忠,顾卫国,等.表面活 性剂减阻流体热边界层温度脉动及 传热特性实验研究[J].水动力学研 究进展,2008 23^A(1):42-47.
- [11] KAWAGUCHIY DA SAKA H LIP W, et al Study on a them al boundary layer of drag reducing surfactant solution measurement of temperature fluctuation R. ASME MECE Forum on Measurement Techniques in Multiphase Flows America Dallas 1997 1 -6
- [12] 王德忠,胡友情,王松平,等.低浓度 表面活性剂减阻流体的性能[].上 海交通大学学报,2005 39(2):225 -229
- [13] 张红霞,王德忠,顾卫国,等.供热水 系统 CTAC减阻流体减阻与传热性 能研究[J].暖通空调,2007,37(9), 45-47
- [14] LIPW, KAWAGUCHIY YABE A Transitional heat transfer and turbulent characteristics of drag reducing flow through a contracted channel J. EnhancedHeatTransfer 2001 8(1): 23 -40.

和合理的机理分析,表面活性剂。[3] 王德忠,胡友情,王松平,等.表面活。[15] WEIJJ,KAWAGUCHIY,YUB, et al. 2019;4:2016;5:11] WEIJJ,KAWAGUCHIY,YUB, et al. 2019;4:2016;5:11] WEIJJ,KAWAGUCHIY,YUB, et al. 2019;4:2016;5:12]

al Rheological characteristics and turbulent friction drag and heat transfer reductions of a very dilute cationic surfactant solution [J]. Journal of Heat Transfer 2006 128 (10): 997-983

- [16] AGULAR G GASLJEVICK MATIH YSE F Asymptotes of maximum friction and heat transfer reductions for drag_reducing surfactant solutions J. International Journal of Heat Mass
- Transfer 2001 44(15): 2835-2843
 [17] LIF Ç KAWAGUCHIY, HISHIDA K The influence of a drag reducing surfactant on turbulent velocity and temperature field of a 2 D channel flow //.
 Pro 11 th Application of Laser Tech in Fluid Mecht Q. Lisbon 2002
- [18] KAWAGUCHI Y DAISADA H YABE A et al Existence of double diffusivi ty fluid layers and heat transfer charac teristics in drag reducing channel flow // The 2rd Int Symposium on Tutbul lence Heat and Mass Transfer [Q. Delft 1997
- [19] LIFC The influence of a drag-reducing surfactant on turbulent velocity and temperature field of a 2D channel flow // Pro 11 th Application of Laser Tech in fluid Mech [C]. Lisbon 2002
- [20] KAWAGUCHIY SEGAWA T FENG Z P et al Experimental study on data — reducing channel flow with surfac.

tant additives.spatial structure of tur. bulence investigated by PIV system [J. International Journal of Heat and Fluid F by 2002 23(5): 700-709

- [21] LIFC KAWAGUCHIYHBHDAK Investigation on the characteristics of turbulence transport formomentum and heat in a drag.reducing surfactant solution flow J. Physics of Fluids 2004 16(9): 3281-3295
- [22] LIFÇ KAWAGUCHIY YUB et al Experimental study of drag reduction mechanism for a dilute surfactant solution flow J. International Journal of Heat and Mass Transfer 2008 51(3-4): 835-843
- [23] HETSRONIG MOSYAK A TAIMON Y et al The effect of a cationic surfactant on turbulent flow Patterns J. Journal of Heat Transfer 2003 125 (5): 947-950
- [24] LIFÇ KAWAGUCHIYH SHDAK Structural analysis of turbulent trans port in a heated drag.reducing channel flow with surfactant additives J. International Journal of Heat and Mass Transfer 2005 48 (5): 965-973
- [25] LIFC KAWAGUCHIYH BHDAK et al Investigation of turbulence structures in a drag reduced turbulent channel flow with surfactant additive by stereoscopic particle in age velocimetty [J]. Experiments in Fluids

2006 40(2): 218-230.

- [26] DESLOUIS Ç TR BOLLET B THON J Nearwall turbulence in drag reducing flows investigated by the photolithography-electrochemical probert J. Journal of NonNewtonian Fluid Mechanics 2004 123 (2-3): 141-150.
- [27] GASLJEVICK AGULAR G MATTH YS E F Measurement of temperature profiles in turbulent pipe flow of poly mer and surfactant drag-reducing so lution [J]. Physics of Fluids 2007 19(8): 0831051-08310518
- [28] LIPW, KAWAGUCHIY YABE A Transitional heat transfer and turbulent characteristics of drag reducing flow through a contracted channel J. EnhancedHeat Transfer 2001, 8(1): 23 -40
- [29] YU B LIFC KAWAGUCHIY. Numerical and experimental investigation of turbulent characteristics in a dragreducing flow with surfactant additives [J. International Journal of Heat and Fluid Flow 2004 25, 961-974.
- [30] YU B KAWAGUCHIY DNS of Fully developed turbulent heat transfer of a viscoe lastic drag reducing flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2005 48(21-22): 4569-4578

新技术、新工艺

燃气轮机陶瓷动叶榫头连接应力状态的研究

据《Гяк елое ма шино строение》2009年1月号报道,鉴于燃气初温决定了燃气轮机装置的效率和比功,提高燃气初温是改进简单循环性能的最有效方法之一。

分析表明,燃气初温提高到 1 500 ~1 800 [℃],允许使燃气轮机效率提高到 50%。在无需冷却的情况下, 用陶瓷制成的涡轮叶片和轮盘就能够承受如此之高的温度。

为此,世界上许多动力机械制造公司,诸如 Solar Turbine,三菱重工、列宁格勒金属工厂等在建造具有陶瓷零部件的燃气轮机方面进行了大量的工作。

在燃气轮机动叶榫头连接的平面弹性模型上利用光测弹性法完成的研究表明,具有线性接触的陶瓷叶片榫头结构优于具有沿圆柱表面接触的结构。它们中最佳的结构是支承表面相对于叶片中心线倾斜 15°的结构。所提议的结构允许保证陶瓷动叶榫头连接必要的强度安全系数。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表面活性剂减阻溶液湍流传热结构研究进展 = Research Advances Concerning the Heat transfer Turbulent Structure of Drag reducing Surfactant Solutions[刊,汉] / PANG Ming jun, WEI Jin jia (National Key Labo ratory on Multi phase Flows in Power Engineering X ian Jiaotong University X ian, China, Post Code 710049), LIFeng chen (College of Energy Science and Engineering Harbin Institute of Technology Harbin, China, Post Code 150001)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power -2010 25(2). -127~133

The drag reducing surfactants feature a long service life and produce no degradations when compared with various polymer additives, and have been widely used in centralized district heating (ccoling) systems. As the surfactants reduce the fluid turbulent friction drag they will also deteriorate the heat transfer performance of the surfactant so lution. To expand their applications in the heat transfer domain and understand the cause of the deterioration in heat transfer performance some experimental study and theoretical analyses have been conducted of the turbulent heat transfer structures for the surfactant solutions. However, the foregoing is still at an exploratory stage and no final conclusion has been drawn. To facilitate further study an analysis with a summing up was performed of the recent research on turbulent heat transfer structures and of the achievements made both at home and abroad. Moreover, the problems existing in the current research were also analyzed with personal viewpoints being presented for future studies K ey words surfactant flow drag reduction heat transfer structure spt.

超微涡轮动叶栅叶顶间隙对流场影响的数值模拟 = Numerical Sinulation of the Influence of the Blade TP Clearance on the Flow Field of an Ultramicro Turbine Rotating Cascad [刊,汉] / HU Jianju, SUN Xi shan (College of Architectural Engineering and Mechanics Yanshan University Qinhuangdao China Post Code 066004), XU Jinliang (Guangzhou Energy Source Research Institute Chinese Academy of Sciences, Guangzhou China, Post Code 510640), CAO Hailiang (College of Chemical Engineering Zhengzhou University Zheng zhou China, Post Code 450001)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power - 2010 25 (2). -134~140

Through a numerical solution of the Revnolds number time averaged 3-D steady viscous N-S equation and in conjunction with a RNG k_{ϵ} turbulent flow model and a non-equilibrium wall surface function numerically simulated was the flow state in the rotating cascade of an ultramic rotatial turbine. As a result, the influence of the rotating cascade blade tip clearance with an extremely be aspect ratio on the parameter distribution and aerodynamic passes of the flow field was revealed providing a theoretical basis for the design and improvement of ultramic rotatibres. The simulation results show that them agnitude of the blade tip clearance exercises amajor influence on the distribution of Mach number inside the flow from the blade tip clearance constitutes the major cause for a decrease in Mach number of the main stream. The existence of the blade tip clearance makes the total pressure loss coefficients hom of geneous j e, the total pressure losses in both the wall neighboring region and main stream zone are relatively high. The bad on the rotating cascade along the blade span direction assumes a uniform distribution, and the bad in the chord direction is mainly undertaken by the arc segment close to the trailing edge. During the simulation a three dimensional wake vortex was identified through an analysis. This is mainly caused by an excessively thick trailing edge of the rotating cascade making it necessary to improve the blade profile K ey words ultramicro turbine blade tip clearance invertion.

边界元法在气冷涡轮叶栅气热耦合计算中的应用 = Application of Boundary Element Method in the Gas. therm all Coupled Calculation of an Air cooled Turbine Cascade刊,汉] / WANG Zhen_feng HUANG Hongyan TANG Hong-fei HAN Wan_jin (College of Energy Science and Engineering Harbin Institute of Technology ?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net