DOI:10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2022. 08. 010

基于单层电堆形式的质子交换膜燃料电池仿真 模拟研究及优化

Simulation and optimization for the PEMFC based on single-cell stack structure

胡翀,赵袁, RAZA Ali, 陈代芬* HU Chong, ZHAO Yuan, RAZA Ali, CHEN Daifen*

(江苏科技大学 能源与动力学院,江苏 镇江 212100) (School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

摘 要:质子交换膜燃料电池(PEMFC)由于其较高的发电效率和常温工作稳定性而被广泛关注。传统PEMFC由 于电堆内部发电负载不均匀,容易发生"水淹"等问题。大多数研究基于在单电池层面上通过改变流场结构的方法 优化PEMFC,但PEMFC工作时往往是组装电堆的形式。为此,设计带有竖直流道作为反应物进出口的单电池电堆 结构,并提出一种新型的串联补偿流场,采用3个进气口,并具有首尾互相串联的3个流道,流道之间可以互相补偿 反应物。使用ANSYS软件基于单层电堆层面进行仿真模拟研究,保证阳极是相同蛇形流场的情况下,阴极分别采 用传统单流道蛇形流场和新型串联补偿流场,分析单层PEMFC电堆中多孔介质层(即扩散层(GDL)和催化层(CL)) 的电流密度、氧气质量分数、液态水饱和度、速度矢量和流道压力的分布规律。仿真结果表明:传统单流道蛇形流 场单层PEMFC电堆中,整体管道压降较高,电流密度和氧气质量分数较高的区域集中在入口段,越靠近出口段分布 越少;出口段液态水饱和度较高而速度矢量没有明显升高,液态水容易囤积在出口段;新型串联补偿流场,电流密 度分布相对均匀,氧气质量分数有多个较高的区域,分布更加广泛,电化学反应更加充分,整体压降较低,在氧气质 量分数较高的区域,速度矢量明显较高,促使氧气在多个流道间快速补充和扩散,整体液态水饱和度相对较低,出 口段同样速度矢量较高,排水效果增强。

关键词:质子交换膜燃料电池;流场;电堆;结构;仿真;氢能

文献标志码:A

中图分类号:TK 01

文章编号:2097-0706(2022)08-0091-06

Abstract: Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) attract extensive attention due to their high power-generation efficiency and working stability at normal temperatures. Traditional PEMFCs are vulnerable to flooding because of the uneven power generation loads among stacks. Most researches on PEMFC optimization are made by improving the flow field of a single cell, but PEMFCs are usually assembled in the form of stacks. Thus, a single-cell stack structure with a vertical channel as the inlet and outlet of reactants is designed, and a new series compensation flow field is proposed which has three air inlets and three flow channels connected in series. Reactants can compensate each other in the flow channel. A simulation study is conducted on the singe-layer PEMFC stack by ANSYS. On the premises that the anode adopts the same serpentine flow field and the cathode adopts the traditional single-channel serpentine flow field or the new series compensation flow field, the distributions of current density, oxygen mass fraction, liquid water saturation, velocity vector and flow channel pressure in the porous medium layers (GDL and CL) of the singe-layer PEMFC stack are analyzed. The simulation results show that the single-layer PEMFC stack in traditional single-channel serpentine flow field is of a higher overall channel pressure, and the closer it is to the inlet, the higher the current density and oxygen mass fraction are, and vice versa. The liquid water saturation around the outlet is relatively high and the velocity vector shows no significant increase as liquid water tends to hoard around the outlet. However, the current density distribution in the new series compensation flow field is relatively even, and there are multiple and extensive-distributed areas with high oxygen mass fractions. The electrochemical reaction is more sufficient and the overall pressure drop is lower. The velocity vector is significantly higher in the areas with higher oxygen mass fraction, which promotes the rapid compensation and diffusion of oxygen between flow channels. The overall liquid water saturation is relatively low. The high velocity vector around the

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; flow field;stack;structure;simulation;hydrogen energy

outlet facilitates the drainage effect.

收稿日期:2022-06-20;**修回日期:**2022-07-30 **基金项目:**国家自然科学基金项目(22179054)

0 引言

近年来,新能源汽车已经在全世界范围内掀起 了热潮,广泛地出现在人们的生活中,而新能源汽 车与传统汽车最大的区别是使用了清洁能源,并且 新能源汽车最重要的是其动力来源,这是新能源汽 车驱动和保障的关键。新能源汽车常常采用电池 作为其动力源,因此,以氢气为燃料的燃料电池受 到了广泛关注。氢能不仅来源广泛,而且利用过程 产生的生成物水没有污染,同时氢气热值较高,很 可能取代汽油等能源。燃料电池包含的种类很多, 主要有质子交换膜燃料电池(PEMFC)、固体氧化物 燃料电池、碱性燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池和 磷酸盐燃料电池^[1-3]。其中 PEMFC 相对其他燃料电 池有发电效率较高、使用寿命相对较长、工作温度 低的优点,在100℃以下进行工作,适用于日常的生 活生产,尤其受到汽车行业的青睐。如何提高 PEMFC的综合性能,使其能成为可靠的动力源成为 研究热点。

燃料电池的结构与其性能息息相关,目前国内 外改变 PEMFC 的流场结构以优化 PEMFC 的设计主 要有改变流道尺寸、流道截面形状、流道数量以及 增设挡板等。文献[4]提出一种模仿猪笼草特殊的 鸭嘴形的微腔结构应用于 PEMFC 流场中,并进行数 值模拟研究,与其他几种类似的流道进行了对比, 结果表明新型猪笼草结构流场不仅能够有效提高 PEMFC性能,还能加强阴极流道的排水能力。文献 [5]通过改变3蛇形流道的高度和顶部底部的宽度, 利用非支配排序的多目标遗传算法和数值模拟结 合的方法对PEMFC流道尺寸进行优化,结果表明最 优流道为一种梯形流道。文献[6]用数值模拟的办 法分析比较了3种不同流道数量的PEMFC 蛇形流 场,研究了不同数量的流道对反应组分分布的影 响。结果表明随着流道数量增加,组分分布更均 匀,电化学反应更加充分。文献[7]对现有的常规 流道和新型流道进行总结分析,探明了流道尺寸和 挡板位置等对增强PEMFC性能的影响。文献[8]通 过仿真模拟研究了氢氧流道的相对位置和进口位 置对PEMFC的影响。文献[9]设计了一种改进的蛇 形流场,证明带有U型弯的蛇形流道有效提高了排 水能力。

合理的流道结构极大限度上影响着 PEMFC 的 性能,目前已有的研究大部分是基于单层电池结 构,但考虑实际应用时,新能源汽车使用的都是成 型电堆。燃料电池堆是将数个单层电池以堆叠的 方式进行组装,对于每层单电池相同的进口和出 口,采用同一根竖直管道进行供气、排气和排水,产 生的电流通过每层单电池的电极板正负极串联起 来,以达到所需功率。在单层电池结构时有着提升 综合性能效果的优化设计,由竖直流道集中进行供 气、排气和排水时,优化结构是否适用,在电堆层面 下的效果未知。

对此,本文基于蛇形流场提出一种新型的流场 改进方案,并利用ANSYS软件对应用该流场的单电 池PEMFC电堆进行三维多物理场建模和分析评价, 为提高PEMFC综合性能提供思路。

1 PEMFC几何模型

1.1 组成结构

PEMFC 主要由质子交换膜(PEM)、催化层 (CL)、扩散层(GDL)和双极板(BP)组成^[10],如图1 所示。



Fig. 1 Composition and structure of a PEMFC^[11]

PEM 层是一种能够传导质子,也就是氢离子的 聚合物薄膜,具有选择透过性,将燃料电池的电化 学反应拆分为2个半反应,分别在电池阴阳极发生。

CL是电化学反应场所,通常由电催化剂和离聚 物组成,由碳载铂基催化剂构成。GDL一方面收集 电流,另一方面有助于气体在电池内部扩散,与CL 结合能提高催化效率^[12]。

BP的主要作用是保障反应气体在电池内部进行反应,BP内部有凹槽即流道可供反应气体通过, 并将多个单电池区分,用于连接不同的单电池从而 构成电堆。

1.2 流道

当反应气体进入传统平行流场PEMFC内部,分 散于多个平行直流流道中,总是存在反应气体分布 不均的问题。有学者为了解决这一问题,提出了一 种单流道蛇形流场,如图2a所示。迫使反应气体全 部集中于一条流道中,避免了平行流道中部分流道 反应气体不足,而部分流道反应气体过多的问题。 蛇形流道可以视为将多个平行流道的串联。单流 道蛇形流场同样存在不足,尽管避免了气体的分 散,但是在单流道中,反应物容易集中在入口处,沿

[13]

着管道浓度逐渐降低,并且过长的反应路径,同样存在着一定程度上的组分分布不均问题,因此可以将蛇形流道作为基础,进行优化设计,保留其将反应物充分反应的优势,消除高压降带来的多余损耗,保证反应分布均匀。为此,提出一种3流道并带有3个进气口的蛇形流道,流道之间相互串行,并能互相补偿反应气体,如图2b所示。



Fig. 2 Flow field of a PEMFC

1.3 几何尺寸及参数

利用ANSYS进行仿真模拟时,需要精确的模型 尺寸和计算参数,经过比对,选择较为适合的尺寸 进行建模,仿真模拟研究所用参数见表1、表2^[13]。

表1 模型几何参数^[13]

 Table 1 Geometric parameters of the model^[13]

部件	值	单位
流道高度	0.800	mm
流道宽度	0.800	mm
肋宽	0.800	mm
BP厚度	1.600	mm
GDL厚度	0.190	mm
CL厚度	0.015	mm
PEM厚度	0.050	mm
活性面积	510.400	mm^2

2 PEMFC 数学模型

2.1 工作原理

PEMFC属于质子型燃料电池,其电解质为聚合物薄膜,由氢气产生的氢离子通过电解质膜到阴极 与氧气、电子结合生成水。其电化学反应方程式为

阳极:
$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$
, (1)

阴极:
$$\frac{1}{2}$$
O₂ + 2H⁺ + 2e⁻ → H₂O₀ (2)

2.2 控制方程

FLUENT 中 PEMFC 模块为仿真模拟研究提供 了极大的便利,涉及的控制方程包括气态方程、液

Table 2 Settings of the main parameters of the simulation				
	项目	值	单位	
操作温度		60	°C	
操作压力		101 325	Ра	
BP	材料密度	1 990	kg/m ³	
	比热容	710	$J/(kg \cdot K)$	
	电导率	92 600	S/m	
	热导率	120	$W/(m \cdot K)$	
	材料密度	321.5	kg/m ³	
	电导率	280	S/m	
GDL	液水接触角	110	(°)	
	孔隙率	0.6		
	渗透率	1.76×10 ⁻¹¹	m^{-2}	
CL	孔隙率	0.4		
	渗透率	1.76×10 ⁻¹¹	m^{-2}	
	比表面积	1.127×10^{7}	m^{-1}	
PEM	热导率	0.16	$W/(m \cdot K)$	
	干膜密度	1 980	kg/m ³	
	干膜当量质量	1 100	kg/kmol	
电化学反应 相关参数	孔隙堵塞饱和度指数	2		
	阳极浓度指数	1		
	阴极浓度指数	1		
	开路电压	1.05	V	
	阳极参考浓度	0.881 4	mol/m ³	
	阴极参考浓度	0.881 4	mol/m ³	
	阳极电荷转移系数	1		
	阳极参考电流密度	7.17	A/m^2	
	阴极电荷转移系数	1		
	阴极参考电流密度	7.17×10 ⁻⁵	A/m ²	

表2 仿真主要参数设置[13]

态水方程、溶解态方程和能量守恒方程等,其中,控制方程总结见表3。

3 单层PEMFC电堆仿真

3.1 模型验证

利用离散方法对模型进行网格划分,由于 GDL,CL和PEM部分较薄,物质浓度存在较大的变 化梯度,因此需要对这些部分进行网格加密处理, 采用不同的网格密度进行验证,保证仿真结果不会 因为网格的变化而改变,并且取适当的网格密度可 以提高仿真速度,减少计算量。将模型网格沿着高 度方向划分层数,网格尺寸保持0.2 mm,取3—6层 共4组不同的网格密度进行对比验证,网格无关性 验证如图3所示。

使用上述仿真参数和方法,对单层蛇形流道 PEMFC模型进行仿真,得到*I-V*曲线,与参考的试验 数据*I-V*曲线对比如图4所示。结果表明仿真曲线 与试验曲线基本吻合,由此可知,利用上述数据和

综合智慧能源

表3 控制方程			
Table 3 Governing equation			
方程		公式及描述	
连续性方程	$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_{m}$ $\nabla \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon(1-S)}\rho \vec{u}\right) = S_{m}$ 式中: $\rho \pi \vec{u}$ 为气体的密度与速度; S为液态水的饱和度; ε 为多孔介质层的孔隙率; S_{m} 为质量源项		
动量方程	$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + S_u$ $\nabla \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon^2 (1-s)^2} \rho \vec{u} \vec{u}\right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon (1-s)} \mu \nabla \vec{u}\right) + S_u$ 式中: μ 为气体动力黏度; p 为气体压力; S 为液态水的饱和度; ε 为多孔介质层的孔隙率; S_u 为动量源项		
组分方程	$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon(1-s)}c_k\vec{u}\right) = \nabla \cdot \left(D_k^{\text{ef}}\nabla c_k\right) + S_k$ 式中: c_k 为对应组分k的浓度; D_k^{ef} 为对应组分的有效扩散系数; S_k 为对应组分的组分源项		
液态水方程	$\begin{split} p_e = \begin{cases} \sigma \cos\theta_e \sqrt{\frac{\varepsilon}{K}} J(1-s) & \theta_e < 90^\circ \\ \sigma \cos\theta_e \sqrt{\frac{\varepsilon}{K}} J(s) & \theta_e > 90^\circ \\ J(x) = 1.417x - 2.12x^2 + 1.263x^3 \\ \text{式} \text{P}:S \text{为 液态水的在多孔介质中的饱和度, 其定义为液态水体积占多孔介质中传质通道体积的百分比;} \theta_e \text{为液滴与 壁面的接触角;} \sigma \text{为表面张力} \end{split}$		
溶解态方程	$\nabla \cdot \left(\vec{i}_m \frac{n_d}{F} \right) = \nabla \cdot \left(D_w^i \nabla \lambda \right) + S_\lambda + S_{gd} + S_{ld}$ 式中: \vec{i}_m 为离子电流密度; λ 为计算区域的溶解态水含量; n_d 为电渗透系数; D_w^i 为溶解态水的扩散系数; S_λ 为电化学反应产生水所带来的溶解态水的源项; S_{gd} 为溶解态水域气态水转化所产生的源项; S_{ld} 为溶解态水与液态水相互转化所产生的源相		
能量守恒方程	$\nabla \cdot \left(\epsilon \rho c_{p} \overline{u} T \right) = \nabla \cdot \left(k^{\text{eff}} \nabla T \right) + S_{Q}$ 式中: k_{eff} 为有效热导率; T 为温度; S_{Q} 为热量源项		
电化学方程	$\nabla \cdot (\sigma_{sol} \nabla \varphi_{sol}) + R_{sol} = 0$ $\nabla \cdot (\sigma_{mem} \nabla \varphi_{mem}) + R_{mem} = 0$ 式中: φ_{sol} 为固相电势即电子产生的电势; φ_{mem} 为膜相里势即离子电势; σ 为对应导体中对电子或离子的电导率; R 为 对应相中电子或离子的源项,即实际产生的电流密度大小		
0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.2 0.0	→ 3 层网格 → 4 层网格 → 5 层网格 → 6 层网格	0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.6 0.5 0.4 0.6 0.5 0.6 0.5 0.6 0.5 0.6 0.5 0.6 0.5 0.6 0.5 0.7 0.6 0.5 0.7 0.6 0.5 0.7 0.7 0.7 0.8 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7	
-0.2 0.0	0.2 0.4 0.0 0.6 1.0 1.2 1.4 1.0 1.8 电流密度/(A・cm ⁻²)	电流密度/(A・cm ⁻²)	
图 3 网格无关性验证 ^[13] 图 4 模型验证 ^[13]		图4 模型验证 ^[13]	
Fig. 3 Verification of grid independence ^[13]		Fig. 4 Model verification ^[13]	

Fig. 3 Verification of grid independence^[13]

(图 5a)和串行补偿流场(图 5b),对比不同阴极流场 下PEMFC电堆的综合性能。

3.3 仿真结果分析

对上述单层电堆结构分别进行仿真,保证串行 补偿流场每个流道的进气量相同,并且总进气量与 单流道蛇形流场相同,其他参数保持一致。考虑到 反应主要发生在多孔介质层(即CL和GDL),仿真结 果分别从多孔介质层的电流密度分布(如图6所

方法建立的仿真过程,结果具有可靠性,并能够在 此基础上进行单层 PEMFC 电堆研究,并改变结构进 行优化。

3.2 单层 PEMFC 堆几何结构

将前文中单流道蛇形流场和串行补偿流场分 别设计为单层电池堆结构,如图5所示。为了更好 地体现改变流场结构带来的变化,保证2种模型中 阳极蛇形流场不变,阴极分别设为单流道蛇形流场



示)、氧气质量分数分布(如图7所示)、液态水饱和 度分布(如图8所示)和速度矢量分布(如图9所示) 进行分析,分布云图均取自CL和GDL的交界处,结 合流道压力分布(如图10所示),研究改变流道结构 对流道内部压力分布及电堆综合性能的影响。





Fig. 8 Distribution of liquid water saturation

由仿真结果可知,单流道蛇形流场电流密度 (图 6a)和氧气质量分数(图 7a)都集中分布在流道 入口处,并随着流道的深入呈现出越来越小的趋



势,这反映出单流道蛇形流场的电化学反应主要在 入口处进行,这样会导致热量集中堆积在入口处。 根据压力分布(图 10a)可知,入口处压力较大,当 PEMFC构成电堆进行工作时,热量和压力大量囤积 在入口处并不断堆叠,很容易导致PEMFC结构遭到 破坏,影响PEMFC电堆性能。由液态水饱和度分布 (图8a)和速度矢量分布(图9a)可知,单流道蛇形流 场中,液态水向出口处迁移的速度在每一条流道中 几乎保持一致,而液态水随着管道深入,不断堆积 在管道中,可能会导致水淹的现象。而串行补偿流 场中电流密度分布(图6b)和流道压力(图10b)相对 均匀,因此构成电堆工作时,比单流道蛇形流场更 具有稳定性。由氧气质量分布(图7b)可以看出,在 不同流道的首尾段,都有氧气质量分数较高的区 域,这得益于3流道首尾串行补偿反应气体的设计, 并且速度矢量(图9b)反映了这些浓度较高的区域, 都有较大的流速,利于氧气的补充。结合液态水饱 和度分布(图8b)可知,在出口处,虽然液态水饱和 度相对较高,但是出口处同时具备了高质量分数的 氧气和较大的速度矢量,能有效排除液态水,避免 水淹现象。

4 结论

利用ANSYS在单层电池电堆层面下,保证阳极 采用相同的蛇形流道,对阴极中单流道蛇形流场和 串行补偿流场分别进行仿真分析。单流道蛇形流 场PEMFC电堆有着较好的发电性能,但其存在较高的压降,流道出口流速偏小,排水性能较差等问题, 入口处的集中反映也容易导致PEMFC电堆工作时 产生的热量堆积,使PEMFC结构易受到破坏。而串 行补偿流场采用3流道设计,并且流道之间互相串 行,能够将3个不同流道的反应物相互进行补偿,极 大地优化了PEMFC中组分分布,降低了流道中的压 降,提高了流道出口处的流速,避免了容易积水等 问题,还保留了蛇形流道出色的发电性能。同时, 串行补偿流场具有3个进气口,改变不同进气口的 进气流量占比或许对PEMFC也存在影响,为提高 PEMFC综合性能提供了一定的思路。

参考文献:

- [1]郭天民. 准对称固体氧化物燃料电池电极材料的研究与 表征[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.
- [2]胡小夫,汪洋,田立,等.中高温SOFC/MGT联合发电技术 研究进展[J].华电技术,2019,41(8):1-5.

HU Xiaofu, WANG Yang, TIAN Li, et al. Progress in intermediate and high temperature SOFC/MGT combined power generation technology [J]. Huadian Technology, 2019, 41(8): 1–5.

[3]郭雅婷,邓甜音,刘艳莹,等.碱性电解水制氢隔膜和阳极材料性能研究[J].综合智慧能源,2022,44(5):64-68.

GUO Yating ,DENG Tianyin, LIU Yanying ,et al. Research on the performance of membranes and anode materials in alkaline water electrolysis[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(5): 64-68.

[4]刘旺玉,何芋钢,罗远强,等.仿猪笼草结构的质子交换 膜燃料电池流道设计[J].电源技术,2022,46(3): 280-283.

LIU Wangyu, HE Yugang, LUO Yuanqiang, et al. Design of PEMFC flow channel imitating Nepenthes alata structure [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46 (3) : 280–283

[5]于建平,魏慧利,许思传.PEMFC蛇形流道几何结构的 多目标优化[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2022, 40(1):63-68.

YU Jianping, WEI Huili, XU Sichuan. Multi - objective optimization of PEMFC serpentine flow channel geometry structure[J]. Journal of Jianusi University (Natural Science Edition), 2022, 40(1): 63–68.

- [6]陈佳浩,苏丹丹,梁玉娇,等.基于多物理场的PEMFC 流场结构优化[J].电池工业,2021,25(6):285-290.
 CHEN Jiahao, SU Dandan, LIANG Yujiao, et al. Optimization of flow field structure of PEMFC based on multiple physical fields[J].Chinese Battery Industry, 2021, 25(6):285-290.
- [7]梁凤丽,闻冉冉,毛军逵,等.PEMFC流道结构研究现 状及发展趋势[J].南京航空航天大学学报,2021,53 (4):477-503.
 - LIANG Fengli, WEN Ranran, MAO Junkui, et al. Status and development trend of PEMFC flow channel structure [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 53(4): 477–503.
- [8]KURNIA J C, SASMITO A P, SHAMIM T. Performance evaluation of a PEM fuel cell stack with variable inlet flows under simulated driving cycle conditions [J]. Applied Energy, 2017, 206: 751-764.
- [9]SURESH P V, JAYANTI S, DESHPANDE A P, et al. An improved serpentine flow field with enhanced cross-flow for fuel cell applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(10) : 6067–6072.
- [10]董琪琪.质子交换膜燃料电池流道内促排水方法研究 [D].西安:西北工业大学,2019.
- [11]王季康,李华,彭宇飞,等.PEMFC建模及性能分析控制
 [J].电子测量技术,2022,45(8):27-34.
 WANG Jikang, LI Hua, PENG Yufei, et al. PEMFC modeling and performance analysis control [J]. Electronic Measurement Technology,2022,45(8):27-34.
- [12]张立栋,陈怡冰,龚明,等.质子交换膜电解水制氢影 响因素的过程模拟[J].综合智慧能源,2022,44(5): 88-94.

ZHANG Lidong, CHEN Yibing, GONG Ming, et al. Process simulation of factors affecting proton exchange membrane water electrolysis for hydrogen production [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(5): 88–94.

[13]邹雨廷.质子交换膜燃料电池动热质电耦合仿真研究 与优化设计[D].镇江:江苏科技大学,2021.

(本文责编:张帆)

作者简介:

胡翀(1997),男,在读硕士研究生,从事燃料电池技术、 新能源工程技术等方面的研究,hcspecial@163.com;

*为通信作者。

陈代芬*(1982),男,教授,博士,从事燃料电池技术、新 能源工程技术等方面的研究,dfchen@just.edu.cn。