

燃料电池极板过渡区结构的优化设计

赵明,李国祥,王桂华,白书战*

山东大学能源与动力工程学院,山东 济南 250061

摘要:为解决质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cells, PEMFC)反应区流道燃料分配不均匀性,采用计算流体力学方法对流道燃料流动进行仿真,采用变异系数对不同方案进行评价,研究过渡区中圆柱体积占比、圆柱排列方式、圆柱到流道距离、过渡区圆柱开孔率对燃料分配均匀性的影响。结果表明:采用圆柱导流的燃料分配均匀性优于导流道导流;过渡区圆柱采用正方形排列时燃料分配均匀性最佳;增加圆柱到流道的距离,各流道燃料分配均匀性呈现先升高后下降的趋势,距离为 3 mm 时均匀性较好;过渡区开孔率约为 11.4% 时燃料分配均匀性较好,过大过小都会造成分配均匀性恶化。

关键词:PEMFC;极板;数值模拟;流场设计;性能优化

中图分类号:TM911.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)02-0011-08

引用格式:赵明,李国祥,王桂华,等. 燃料电池极板过渡区结构的优化设计[J]. 内燃机与动力装置,2024,41(2):11-18.

ZHAO Ming, LI Guoxiang, WANG Guihua, et al. Optimal design of the transition zone structure of fuel cell plate[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(2): 11-18.

0 引言

为解决日益严峻的能源短缺和环境污染问题,发展清洁、低碳、安全、高效的能源刻不容缓,氢能具有高热值、无污染的优点,采用氢燃料的质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cells, PEMFC)成为研究热点。PEMFC 通过电化学反应将氢的化学能直接转换为电能,具有功率密度大、转换效率高、排放清洁等优点,被认为是下一代动力装置^[1]。PEMFC 由双极板、气体扩散层、催化剂层和质子交换膜等元件构成。双极板是 PEMFC 的重要组成部分之一,其作用包括燃料分配和运输、收集电流、水热管理、机械支撑等。双极板的结构决定了反应物的流场结构,合理的流场结构能够均匀地将燃料运输到反应区域,保证电流密度的均匀性,提高电池的寿命和性能^[2-3]。

目前,关于燃料电池流道设计的研究较多,如经典的平行、蛇形、交指形流道,以及各种仿生流道。对经典流道的研究主要集中在流道的形式和尺寸对电池性能的影响:季运康等^[4]运用计算流体力学分析了平行、网格形等经典流道的气体均匀性和阻力,发现网格流道的气体均匀性和流道阻力均优于平行流道;刘志祥等^[5]采用数值模拟和测试结合的方法对几种常见流道燃料电池的性能进行了评价,其中平行流场因燃料分配不均导致性能最差,而渐缩流场有利于增大扩散层中氧气的质量分数,性能最佳;刘海超^[6]对直型流道进行改进,提出了微流道渐压式平行流场,显著提高了平行流场燃料分配的均匀性,提高了电池的输出效率;余正锟^[7]在平行流场的基础上提出了波浪形平行流场,通过模拟分析发现较小的波浪长度和较大的波浪幅度可以有效改善传质和水淹问题,相较于平行流场,净输出功率提高 34.75%。在仿生流

收稿日期:2024-03-28

基金项目:山东省重点研发计划项目资助(2020CXGC010404)

第一作者简介:赵明(2000—),男,河南新蔡人,硕士研究生,主要研究方向为燃料电池,E-mail:zhaoming000709@163.com。

*通信作者简介:白书战(1979—),男,山东莘县人,工学博士,教授,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制技术、整机开发与可靠性技术、新能源汽车技术,E-mail:baishuzhan@sdu.edu.cn。

道研究方面:乔运乾^[8]基于树叶叶脉设计了5组仿生流道,比较了不同的操作条件对电池性能的影响,得出最佳操作电压为0.65 V;刘旺玉等^[9]提出了仿猪笼草结构的流道,仿真结果表明该流道能够增强流道内气体传质,减少水淹问题;贾赛赛^[10]设计了仿玉米叶脉筛板的流道结构并对开孔率和开孔数进行优化,优化后电池的净输出功率较平行流道提高了5.1%。

针对燃料电池流道设计研究较多,但对燃料电池极板中过渡区域结构的研究较少。在单片燃料电池实际工作中,若内部流道分配的反应物不均匀,将导致各流道温度不均匀,产生较大的热应力,降低燃料电池寿命,因此研究极板中过渡区域结构对燃料分配的影响十分必要。本文中以某型燃料电池双极板为研究对象,采用STAR CCM+软件进行计算流体力学仿真,分析不同过渡区结构对反应区流道中燃料分配的影响,为双极板燃料电池的过渡区设计提供依据和参考。

1 模型建立与验证

1.1 几何模型

PEMFC 双极板的基本尺寸为 391 mm×131.5 mm×0.3 mm,面积为 380 cm²,几何模型如图 1 所示。该极板包含了氢气流道(正面)、氧气流道(背面)、冷却水流道(中间夹层)。氢气侧极板分为入口、出口、过渡区和反应区(平行流场区)。过渡区域采用圆柱导流和导流道结合的方式,圆柱直径为 1.5 mm。为了能够深入研究不同结构过渡区对气体在流道中分配均匀程度的影响,以及尽可能降低重复冗杂的计算量,本次计算仅使用氢气侧气体流道作为仿真计算区域,计算区域如图 2 所示。

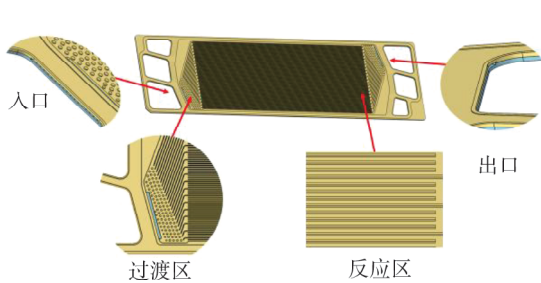


图1 双极板三维模型

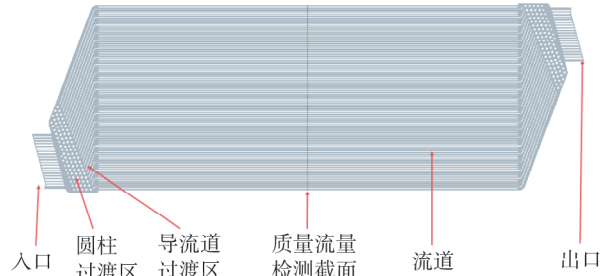


图2 极板流体计算域

1.2 数学模型

简化计算过程,仅考虑气体在流道中的流动。假设气体为理想气体,满足理想气体状态方程;气体的流动为层流,流动处于稳态。基于以上假设,PEMFC 数学模型的控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程^[11-14]。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

式中: ρ 为气体密度; $\mathbf{v}$ 为速度矢量;方程右边为质量源项,质量源项为 0。

运用不可压缩流体的斯托克斯定律得到动量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \mathbf{v}) + S_m, \quad (2)$$

式中: p 为流体压力; μ 为气体黏度; S_m 为动量源项, $S_m = 0$ 。

能量守恒方程为:

$$(\rho c_p) \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)(\mathbf{v} \nabla T) = \nabla(k \nabla T) + S_e, \quad (3)$$

式中: c_p 为混合物平均比热容; T 为温度; k 为热导率; S_e 为能量源项, $S_e = 0$ 。

1.3 边界条件及网格划分

根据实际工况,氢气侧入口气体质量流量为 $1.1535 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$,出口压力为 200 kPa、温度为 70°C 。

选择 STAR CCM+软件内置自动网格中的多面体、薄体网格划分计算域网格,并在壁面处添加边界层网格,结果如图 3 所示。



图3 计算域网格

采用多面体网格可以降低网格数量,提高收敛速度。网格无关性验证能够保证计算精度,减少计算资源。PEMFC 模型网格无关性分析结果如图 4 所示。由图 4 可知:网格数量达到 532 万后,流道燃料质量流量趋于稳定,其他优化模型的网格数量应与其一致。

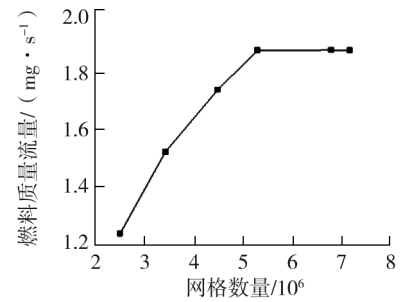


图4 流体仿真网格无关性验证

2 评价指标及优化思路

2.1 评价指标

燃料能否被均匀地分配给每一条流道对提高 PEMFC 整体性能有重要影响。可用标准偏差 S_D 和变异系数 C_V 2 个无量纲指标评价不同方案反应区各流道燃料质量流量分配的均匀程度^[15-17]。

标准偏差

$$S_D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{m,i} - \bar{q}_m)^2 / n}, \quad (4)$$

式中: $q_{m,i}$ 为第 i 个流道的燃料质量流量, mg/s , $i=1, 2, \dots, n$; $\bar{q}_m$ 为所有流道燃料的平均质量流量, mg/s ; n 为总流道数, $n=92$ 。

变异系数

$$C_V = S_D / \bar{q}_m. \quad (5)$$

S_D 或 C_V 越接近 0,流道燃料质量流量分配越均匀。本文中主要采用 C_V 作为燃料分配均匀性的评价指标。

2.2 优化思路

采用控制变量法设计优化方案,只改变过渡区结构,其余结构均保持不变。控制的变量包括 PEMFC 过渡区圆柱与导流道的体积占比、圆柱的排列方式、圆柱到反应区流道的距离、过渡区圆柱开孔率。优化思路为:依次改变过渡区圆柱与导流道体积占比、圆柱排列方式、圆柱到反应区流道的距离、过渡区圆柱开孔率;优化一个变量,形成若干新结构,选择其中最优的一个结构作为优化下一个变量的基础结构,依次类推,直至优化完所有变量,得到最优结构。

3 计算结果及分析

3.1 改变过渡区圆柱体积占比

原始 PEMFC 过渡区圆柱体积占比为 3.5%(方案 1),将过渡区圆柱体积占比分别设置为 4.5%、5.5%、6.5%、7.5%、8.5%、9.5%,形成 7 组开孔率相同但圆柱与导流道占比不同的结构(方案 2~7),如

图5所示。经过计算,方案1~7的变异系数分别为0.059 8、0.059 4、0.051 3、0.042 2、0.032 8、0.031 2、0.030 9。随着过渡区中圆柱体积占比逐渐增大,变异系数逐渐减小,燃料在流道中分配趋于均匀。

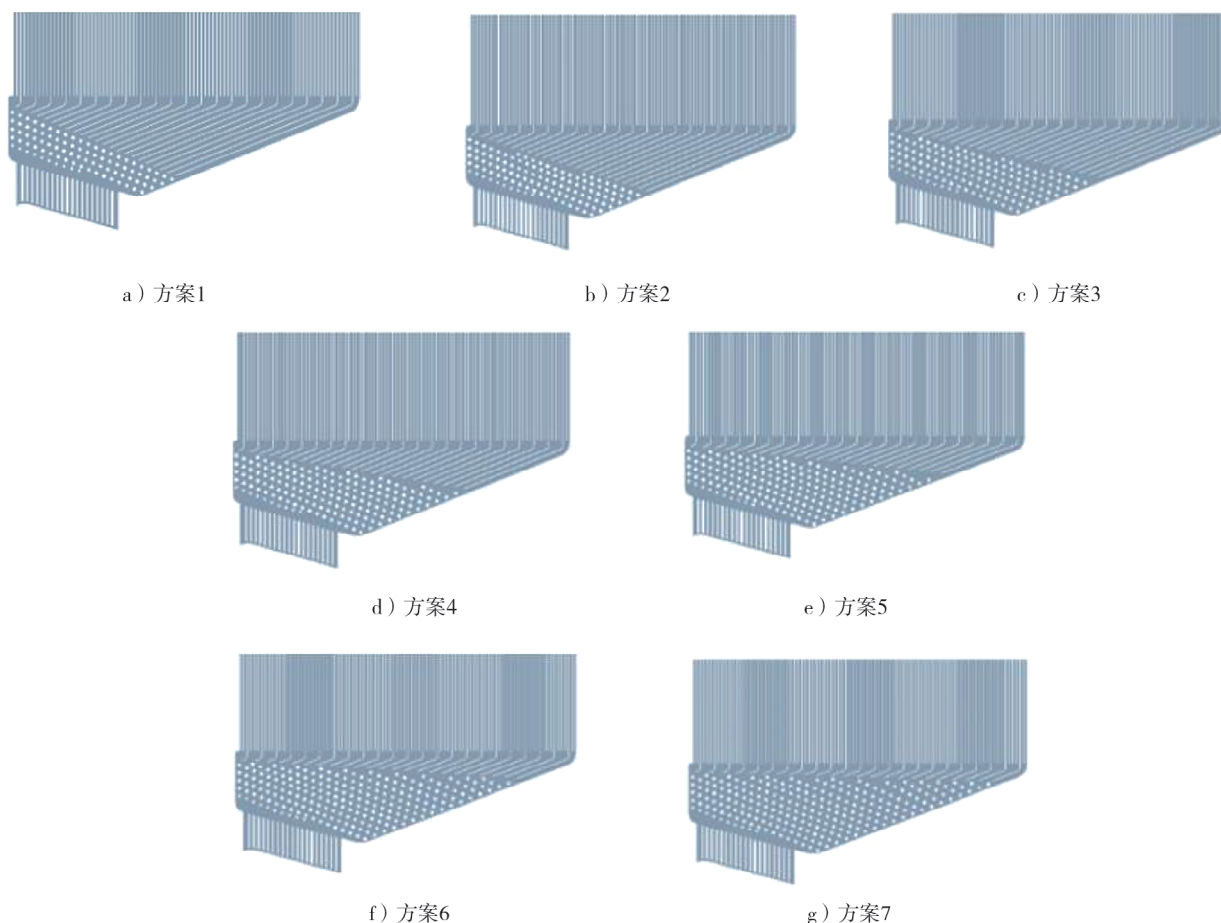


图5 不同圆柱体占比方案

为了进一步验证过渡区中圆柱导流是否优于导流道导流,取消导流道,仅采用圆柱作为过渡区导流结构,记为方案8,其结构示意图如图6所示。方案8双极板各支流道中间位置的质量流量分布如图7所示。由图7可知:各支流道燃料分配不均匀。经计算,方案8的变异系数为0.016 2,远小于方案1~7的变异系数,表明圆柱导流优于导流道导流。

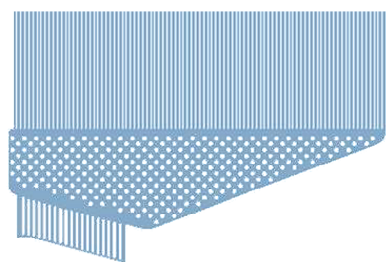


图6 方案8的结构示意图

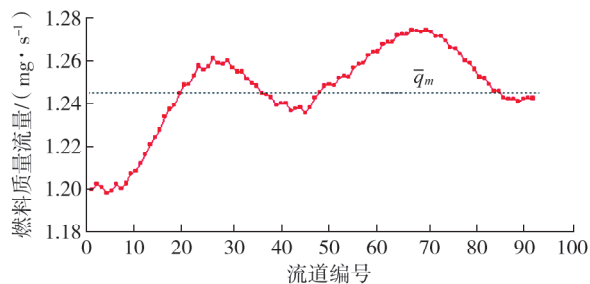


图7 方案8各流道燃料质量流量分布

3.2 改变圆柱的排列方式

在方案8的基础上改变圆柱的排列方式,分别采用正方形、正六边形、菱形的排列方式,形成方案9~11,其中方案8、11的圆柱均为菱形排列,但方案8、11的菱形边分别平行于流道、入口。方案8~11结构示意图如图8所示。

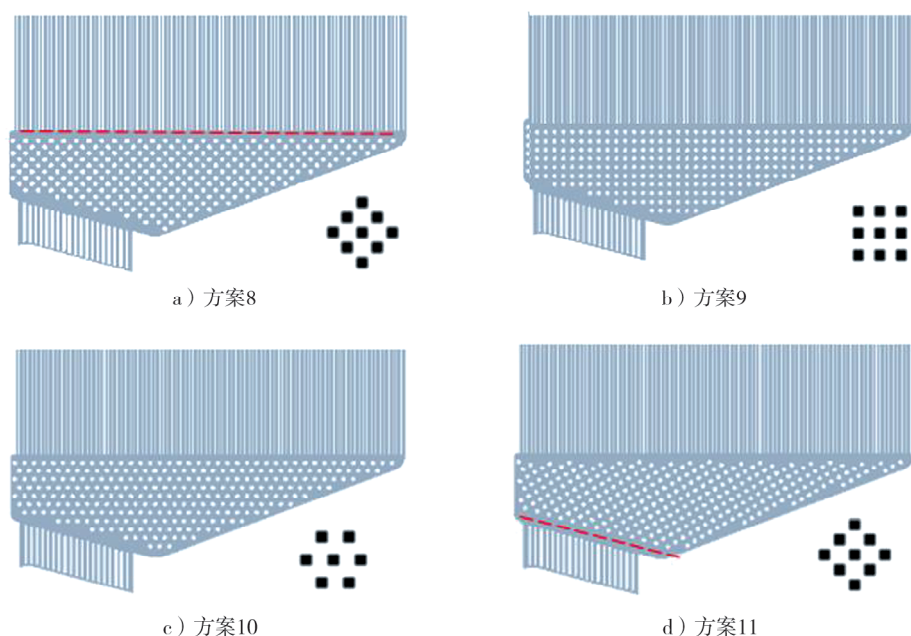


图8 方案8~11的结构示意图

经计算,方案8~11的变异系数分别为0.016 2、0.006 4、0.009 2、0.018 9。可见4种不同排列方式的优选顺序分别为:正方形、正六边形、菱形(平行于流道)、菱形(平行于入口)。

方案8、9过渡区燃料流线图对比如图9所示。由图9可知:正方形排列拥有更好的圆柱扰流效果,而菱形排列中很大一部分圆柱的扰流效果较差,导致燃料分配不均匀。

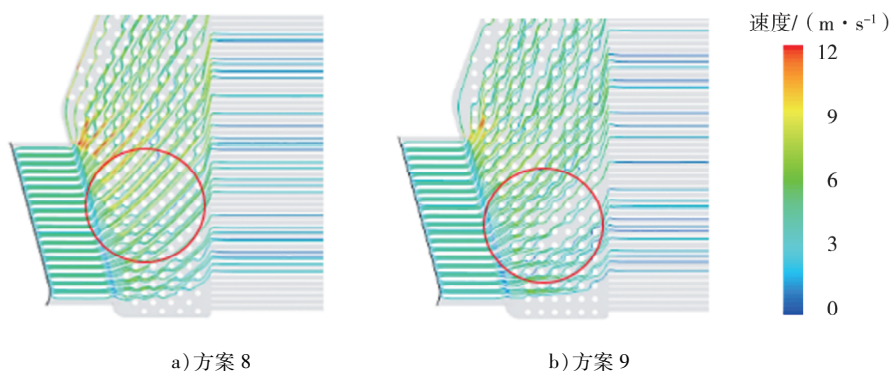
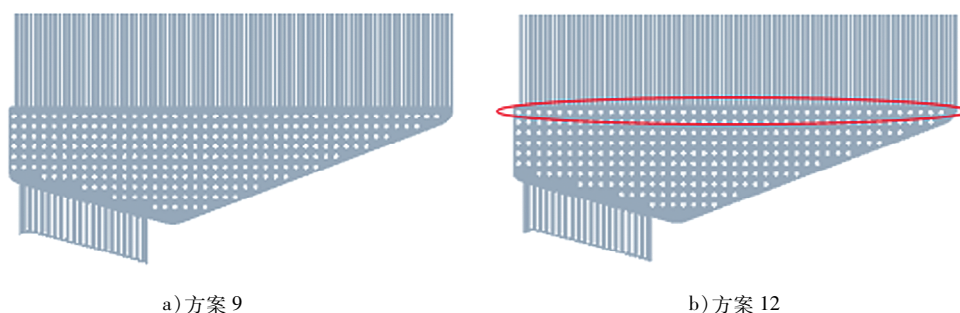


图9 方案8、9过渡区燃料流线图对比

3.3 改变过渡区到流道距离

改变圆柱到流道距离(最靠近流道的一排圆柱到流道的距离),在方案9的基础上(距离为3 mm)进行调整,分别设置为2、4、5 mm,形成方案12~14,结构示意图如图10所示。



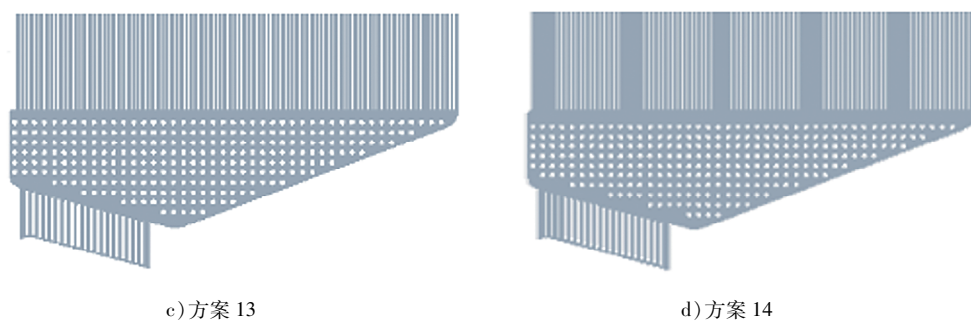


图10 方案9、12~14的结构示意图

方案9、12~14的流道燃料质量流量如11所示。

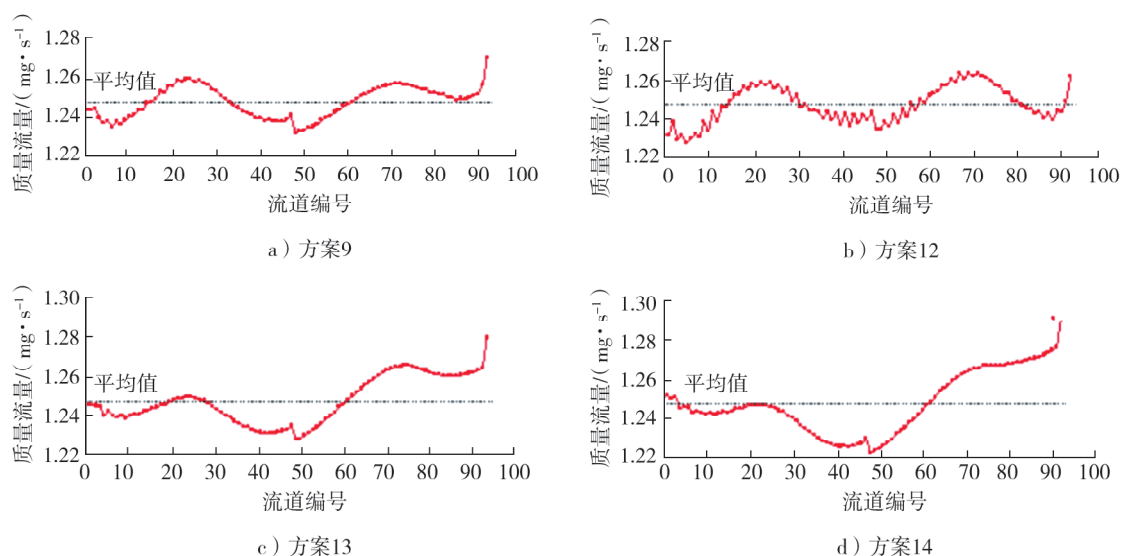


图11 方案9、12~14的流道燃料质量流量

由图11可知:方案9流道燃料分配最均匀;方案12流道燃料质量流量呈锯齿状,这是由于圆柱过渡区距离流道过近,燃料在流经圆柱后未混合均匀就已经流入流道,从而导致该流道质量流量较大,相邻流道质量流量较小。经计算,方案9、12~14的变异系数分别为:0.006 4、0.007 7、0.009 7、0.012 8,方案9最优。

方案9、14过渡区压强对比如图12所示。

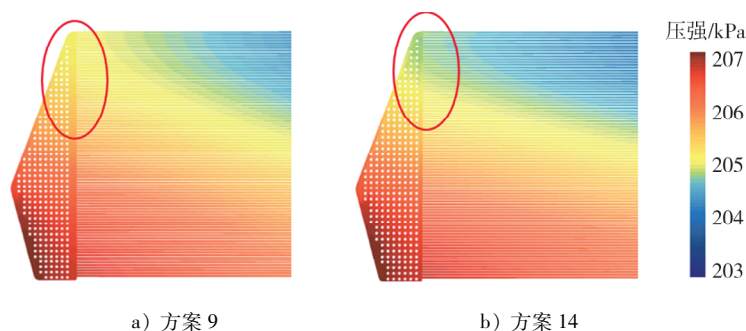


图12 方案9、14过渡区压强对比

由图12可知:开孔率不变时,气体流动的阻力随圆柱到流道距离增加而增大,导致图12红圈所示位置压强下降,燃料分配不均匀。

总体来说,随着圆柱到流道距离的增加,流道燃料质量流量分配的均匀性先升高后下降,在距离为3 mm 时分配效果最佳,过渡区结构距流道不宜过近或过远。

3.4 改变开孔率

过渡区圆柱开孔率为过渡区开孔面积与过渡区总面积的比。改变过渡区圆柱开孔率,在方案9(开孔率为11.4%)的基础上再选择开孔率分别为13.4%、9.4%、7.4% 3种情况,形成方案15~17,进行方案比选。方案9、15~17的结构示意图如图13所示。随着开孔率减小,圆柱数量减少,分布稀疏。

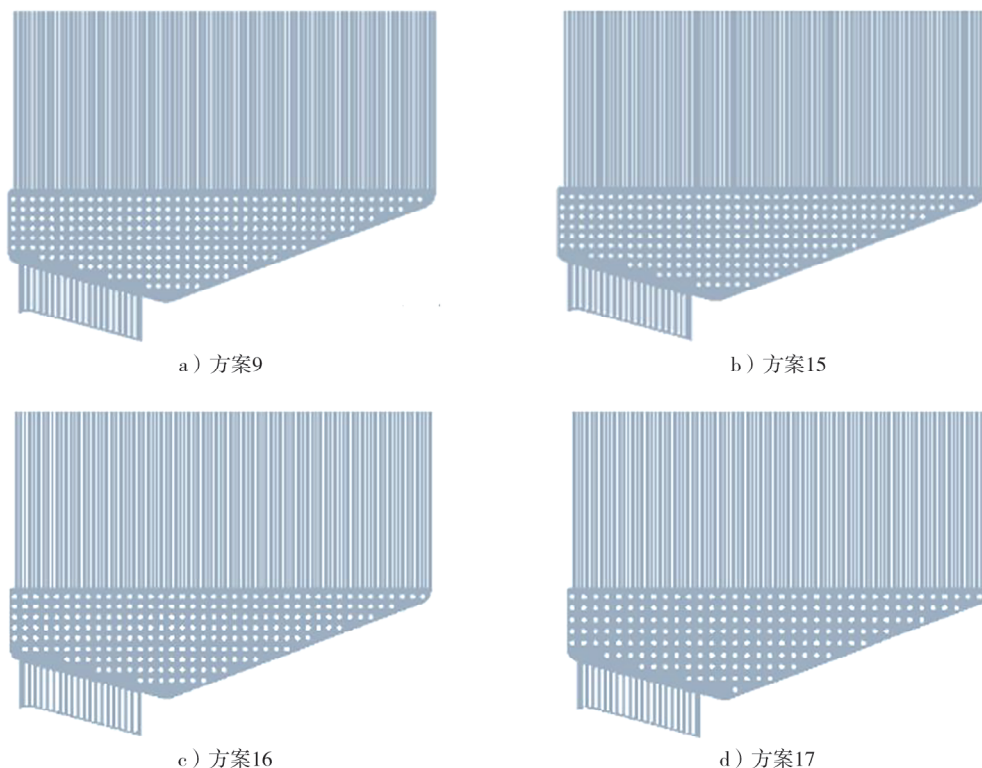


图13 方案9、15~17的结构示意图

方案9、15~17的变异系数分别为:0.006 4、0.009 8、0.006 6、0.008 0,表明过渡区圆柱开孔率过大过小都会造成流道燃料分配效果恶化,在开孔率为11.4%左右时流体的分配均匀性较好。原因为:开孔率减小,扰流效果变差,流道中燃料质量流量变化大,分配效果差;开孔率过大,气体流动阻力大,导致原本高质量流量流道分配的燃料进一步增多,低质量流量流道分配的燃料进一步减少,分配均匀性下降。

方案9、15的燃料压强对比如图14所示。由14可知:方案15的压强在红圈所示区域较方案9减小,变异系数增大,但差异不大。

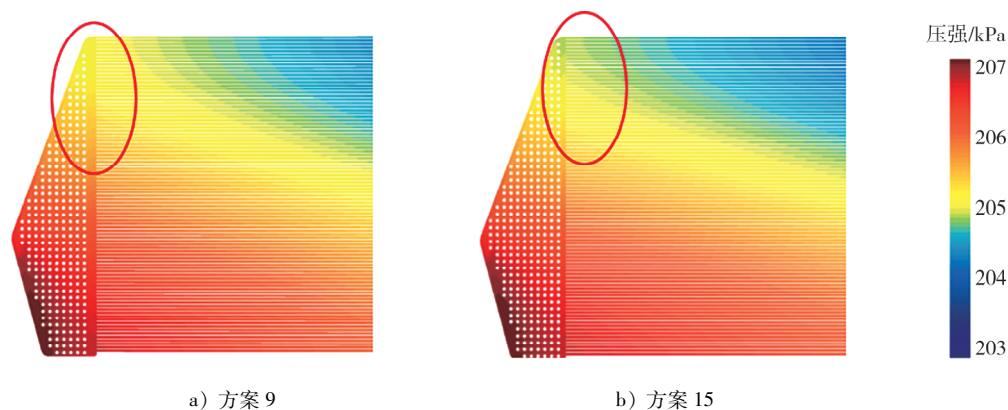


图14 方案9和15的燃料压强对比

4 结论

采用计算流体力学的方法对某 PEMFC 各流道燃料流动进行仿真,研究双极板过渡区中圆柱体积占比、圆柱排列方式、圆柱到流道距离、圆柱开孔率对各流道燃料分配均匀性的影响。

1) 过渡区导流流道体积占比越小,圆柱体积占比越大,反应区各流通燃料分配越均匀,即采用圆柱过渡的导流效果好于导流道。

2) 对于选择测试的 4 种不同的圆柱排列方式,燃料分配均匀性优选次序为:正方形、正六边形、菱形(平行于流道)、菱形(平行于入口)。

3) 过渡区结构的体积占比固定,燃料在流道中分配的均匀性随着圆柱到流道距离递增时,分配效果呈现先升高后下降的趋势,距离为 3 mm 时分配效果较好。

4) 过渡区采用正方形排列的 1.5 mm 圆柱并改变开孔率,过渡区圆柱开孔率过大过小都会造成燃料分配效果恶化,在开孔率为 11.4% 时的分配效果较好。

参考文献:

- [1] WANG Y, PANG Y, XU H, et al. PEM fuel cell and electrolysis cell technologies and hydrogen infrastructure development-a review[J]. Energy and Environmental Science, 15(6): 2288-2328.
- [2] 刘洪建. PEMFC 水热管理及性能优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [3] 戴刘亮. 燃料电池水热管理的三维仿真及优化[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [4] 季运康, 丁大增. 质子交换膜燃料电池双极板流场分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2018, 36(2): 236-240.
- [5] 刘志祥, 王诚, 毛宗强, 等. 质子交换膜燃料电池空气流场的优化设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006(12): 2081-2085.
- [6] 刘海超. 质子交换膜燃料电池流道设计与流体管理[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [7] 余正锐. 质子交换膜燃料电池波浪形流场设计及优化[D]. 长沙: 湖南理工学院, 2020.
- [8] 乔运乾. 基于树叶形态的 PEMFC 双极板结构设计与优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [9] 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.
- [10] 贾赛赛. 基于玉米叶脉筛板结构的 PEMFC 双极板流道设计及研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [11] 王文斌, 官镇, 朱晓春, 等. 基于热-机耦合的燃料电池极板结构优化[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(4): 44-54.
- [12] 张馨予. 质子交换膜燃料电池多物理场数值模拟研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2016.
- [13] 刘小波. 质子交换膜燃料电池热分布及性能研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019.
- [14] 钱彩霞. 高温质子交换膜燃料电池的模拟与优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [15] 陈耀. 面向强化传质的燃料电池双极板进气流场设计[D]. 长沙: 湖南理工学院, 2021.
- [16] 邱成. 质子交换膜燃料电池平行流场水管理研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [17] 刘斌, 白书战. 流道宽度和脊宽度对燃料电池极板流通特性的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(2): 36-41.

Optimal design of the transition zone structure of fuel cell plate

ZHAO Ming, LI Guoxiang, WANG Guihua, BAI Shuzhan *

School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

Abstract: To solve the problem of uneven fuel distribution in the reaction zone flow channel of proton exchange membrane fuel cells (PEMFC), computational fluid dynamics method is used to simulate the fuel flow in the

(下转第 27 页)