

PEMFC 流道形式的研究

王红星 王宇新

天津大学精馏技术国家工程研究中心

PEMFC 流道形式的研究

Study on Flow Field of PEMFC

王红星 王宇新

(天津大学精馏技术国家工程研究中心, 天津大学化工学院)

摘要: 本文利用计算流体力学 (CFD) 软件 (STAR-CD) 建立了 PEMFC 完整流场的模拟方法, 并对 5 种常见形式的完整流场进行了模拟计算, 考察了其中流速以及电流密度等物理量的分布情况。模拟结果显示, 流道形式对电流密度分布影响很大。适当拉近上游和下游流道之间的距离可以促进电流密度的均匀分布。所建方法可以用来以电流密度分布和电池性能评价流场, 对流场形式的设计有指导作用。

关键词: 质子交换膜燃料电池 流道 STAR-CD 数学模型

Abstract: The influence of different flow channels including serpentine channel, parallel channels, parallel serpentine channels, spiral channels and mesh channels on the current density distribution of PEMFC was investigated by a computational fluid dynamics (CFD) model. The results show that significant improvements in current density distribution can be obtained by putting inlet channels and outlet channels closer.

Key words: Proton exchange membrane fuel cell, gas channels, STAR-CD, mathematical model

1 概述

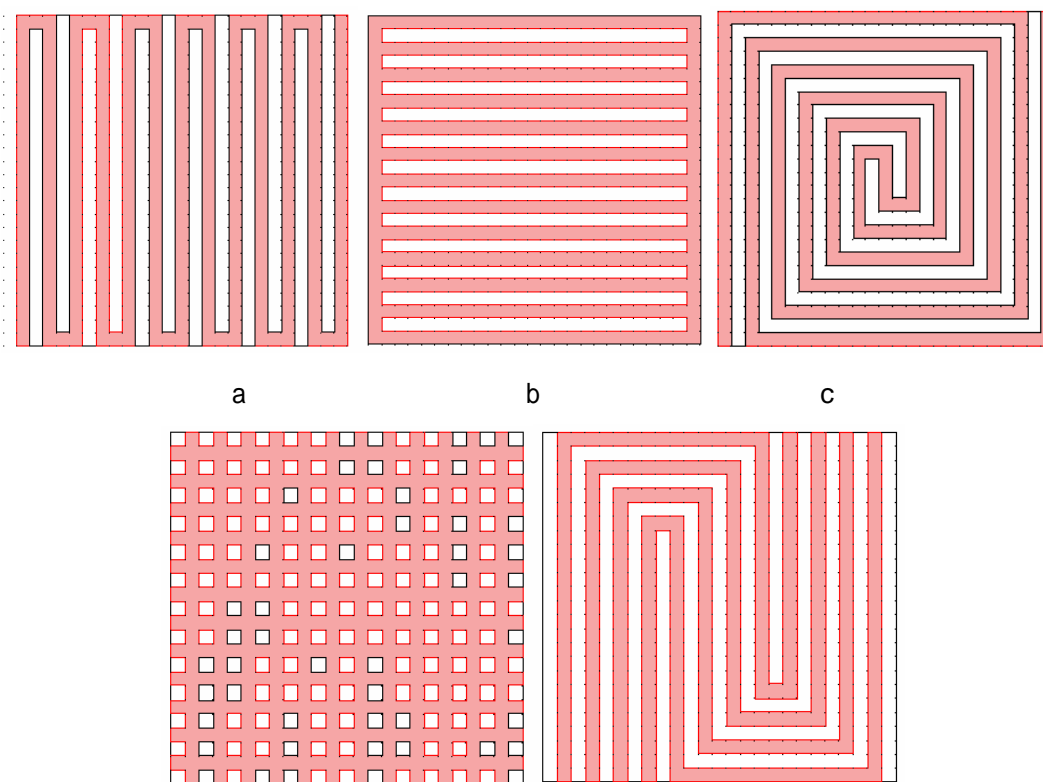
流场板是燃料电池的重要部件。流道设计是影响电池性能、运行效率以及成本的重要因素, 因此流道设计是各研究机构都非常重视的研究课题。研究者们通过实验[1-6]和数学模拟[7-10]的方法来研究流道对电池性能和效率的影响。在过去的十几年中, 许多研究机构进行了大量的实验研究, 采用的实验方法可分为“子电池法”[1-3]和“不介入电池法”[4-6]两大类。子电池法应用较为广泛, 这种方法是将单电池的一极(包含流场板和膜电极)分割成若干小块, 各小块之间相互绝缘, 于是形成若干子电池。在电池的运行过程中, 用传感器测量并记录各子电池的性能曲线, 由此得出流道中不同区域的电流密度分布、温度分布等信息。但这种方法对电池的制作工艺要求较高, 实验装置复杂, 子电池的数目有限, 并且此方法本身对电池运行也有一定的影响, 因此不能完整的反映电池内部情况。近年来, 不介入电池法受到许多研究者的关注。如核磁共振法[4]、中子成像法[5]以及激光多普勒法[6]等。这些方法对电池运行没有影响, 能够较准确的反映单电池或电池堆的运行情况。但这些实验

方法需要较为复杂且昂贵的研究设备，目前应用不多。总之，通过实验研究流道对电池性能和效率的影响存在一定的难度，其加工和实验成本较高，得到的实验结果多是电池的整体性能，不能完全反映电池内各部分的实际情况。

近年来，随着计算机技术的不断发展，数学模拟方法在 PEMFC 的研究中起着越来越重要的作用，准确有效的数学模型能够得到许多实验难以得到的数据，如电流密度、浓度分布等。通过分析模拟结果，研究者可以更加深入的理解燃料电池中的各种过程；同时，通过数学模拟，研究者还可以简便的对电池流场板进行设计，考查各种设计和操作参数对电池性能的影响，缩短产品的研发周期。但是，多数 3 维模型计算量太大，不适于指导流道形式的整体设计。本文将采用 CFD 方法建立计算量较小的阴极流场数学模型，分别对蛇行流场、平行流场、多路蛇行流场以及网格流场进行模拟计算，并对得到的电流分布和电池性能进行讨论和分析。

2 数学模型的建立

模型的研究区域包含阴极流场和阴极扩散层，流道形式如图 1 所示。由于模型的计算区域较大，为了减少计算量，模型假设如下：1. 将阴极催化层视为扩散层底部界面，且反应的过电位各处相同，反应仅受氧气浓度的影响；2. 迁移到阴极和在阴极生成的水均为气态，液体水对传质的影响可略；3. 反应气体为理想气体；4. 质子和电子传递对电池性能的影响可略；5. 阳极对电池性能的影响可略。



d e

图1 模型计算采用的流道形式示意图

a. 蛇形流场 ; b. 平行流场 ; c. 螺旋流场 ; d. 网格流场 ; e. 平行蛇形流场

模型的控制方程为连续性方程、动量守恒方程和各组分质量守恒方程。这些方程归纳于表 1。

表 1 模型基本控制方程

方程名称	方程形式	控制区域	方程编号
连续性方程	$\nabla \cdot (\rho u) = 0$	流场 扩散层	(1)
动量守恒方程	$\nabla \cdot (\rho u u) = \nabla \cdot p + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot u)$	流场	(2)
动量守恒方程	$\nabla \cdot (\rho u u) = \nabla \cdot p + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot u) - \frac{\mu}{k} u$	扩散层	(3)
各组分质量守恒方程	$\nabla \cdot \left\{ -\rho \omega_i \sum_k \left\{ D_{ik}^{eff} \left\{ \begin{array}{l} \nabla x_k + \\ (x_k - \omega_k) [(\nabla p) / p] \end{array} \right\} \right\} \right\} = -(\rho u \cdot \nabla \omega_i)$	流场 扩散层	(4)

对方程控制区域的边界条件设置如下：

流道入口边界：设各种形式的流道入口流量相同，即采用相同的设计化学计量比，设计化学计量比的计算公式为：

$$\chi = \frac{Q_{in} c_{O_2,0}}{\frac{I_{ref} A}{4F}} \quad (5)$$

其中 Q_{in} 为流场入口体积流量， A 为电极面积， I_{ref} 为设计参考电流密度， $c_{O_2,0}$ 为氧气入口浓度。

流道出口边界：假设气体在出口无扩散过程，应用充分发展和纯对流边界条件，即：

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad \frac{\partial c_i}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

壁面 (wall) 边界：各壁面 (扩散层底部边界除外) 无流体滑移，无组分垂直向扩散，亦无垂直向流动。故分别有：

$$u = 0 \quad \frac{\partial c_i}{\partial n} = 0 \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

反应边界：扩散层底部边界为反应边界，通过此边界的各组分的通量与电流有关系：

$$N_{O_2} = -\frac{i_c}{4F} \quad N_{H_2O} = \frac{i_c}{F(2+\alpha)} \quad (8)$$

其中 i_c 为阴极电流密度，由Butler Volmer方程计算。 α 为水迁移系数。

流道结构参数见表 2。模型采用 STAR-CD 计算流体力学软件求解。

表 2 PEMFC 阴极流场结构参数

参数名称	符号	取值	单位
流道深度	H	2	mm
流道宽度	$W_{channel}$	2	mm
脊宽度	W_{rib}	2	mm
阴极扩散层厚度	h_{dl}	300	μm
电极面积	A	25	cm^2

3 结果与讨论

3.1 流道形式对电流密度分布的影响

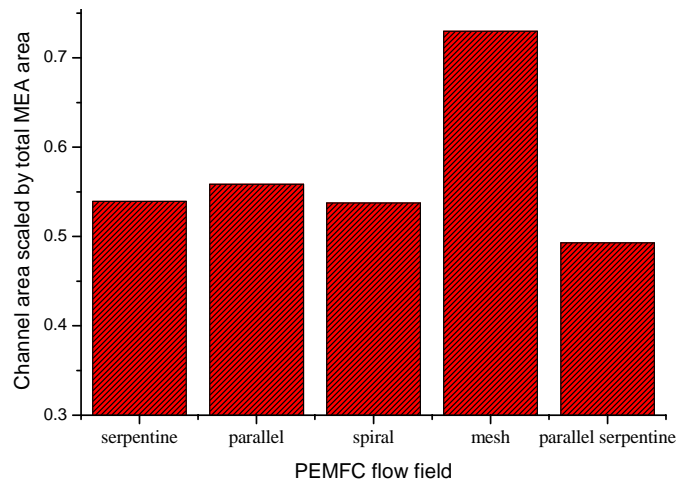


图2 模型采用的不同流道形式的开槽率

我们称流道下的电极面积占总体膜电极面积的分率为流场板的开槽率，不同流道形式的开槽率各不相同，如图 2 所示。其中网格流场的开槽率最高，平行蛇行流场开槽率最低，其它形式的流场开槽率接近，均在 0.55 左右。

输出电压为 0.5V 时，不同流道形式的电流密度分布情况示于图 3。流道形式对应的电流密度最大值、最小值以及积分平均值的影响示于图 4。由图 3 和 4 所显示的模拟结果可以看出，蛇行、螺旋、网格以及多路蛇形流道的平均电流密度相差不大，但平行流道大约比其它流道下的平均电流密度低 30%，即平行流场的整体电池性能较差。

从电流密度分布的角度来看，电流密度最均匀的流场为螺旋流场（图 3c）。其原因是螺旋流场的上游流道和下游流道相邻，上游流道中的氧气通过扩散层补充到下游流道，使得氧气浓度分布较为均匀，从而产生均匀的电流密度分布。

电流密度分布最不均匀的是平行流场，原因是反应气体在各流道中的流速分布不均（图 5a），处于中间部位的流道中流速较低，得不到充分的氧气，造成其电流密度很低。

网格流场的电流密度分布也不十分均匀，但是其平均电流密度不低。原因是网格流场具有较高的开槽率（图 2），MEA 暴露在流道下的面积较大，有效地补充了其因流速分布不均（图 5b）造成的损失。

蛇行和多路蛇形流场的电流密度分布较为相似，多路蛇形流场的性能稍好于蛇形流场。但是在本计算实例中，采用的多路蛇形流场的开槽率较低，如果适当提高其开槽率，这种流道形式将达到更均匀的电流分布和更好的电池性能。

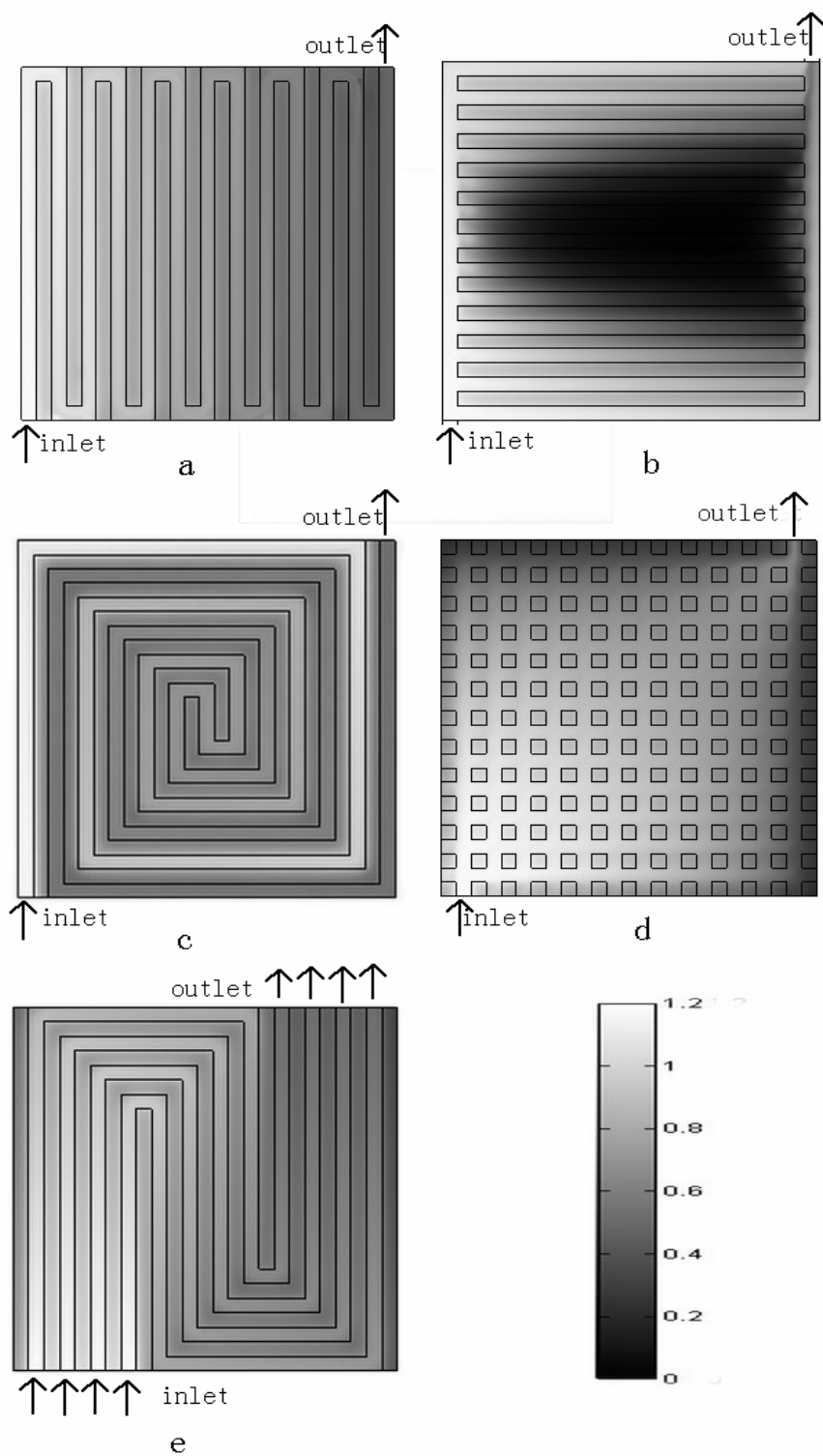


图3 不同流道形式的电流密度分布 (A/cm^2)

a. 蛇形流场 ; b. 平行流场 ; c. 螺旋流场 ; d. 网格流场 ; e. 平行蛇形流场

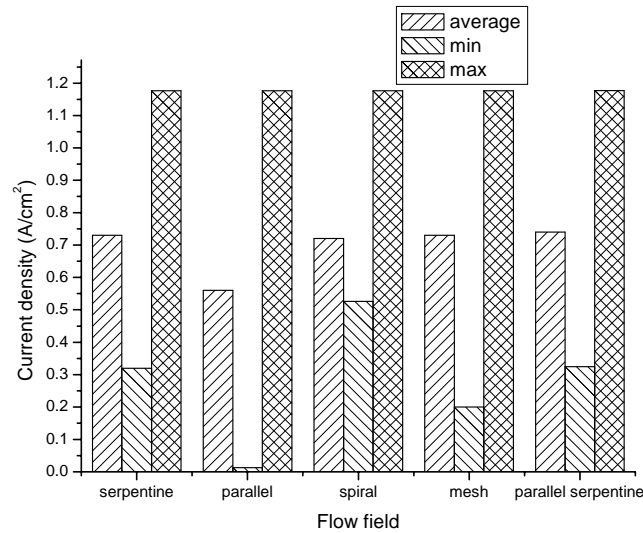


图4 流道形式对电流密度分布的影响

3.2 流道形式对气体流速分布的影响

图 5 为流道深度为总深度 1/2 处的流速分布情况。由图 5 的模拟结果可以看出，平行流道和网格流场的流速分布较不均匀。平行流道的中间流道流速较低，靠近入口和出口的流道流速较高。对于网格流场而言，与流场的出入口连线接近区域流速较大，而远离出入口连线的角落流速较低。通过模拟结果还能看出，因为平行和网格流场的流道数目太多，所以平均每一流道的流速较低。

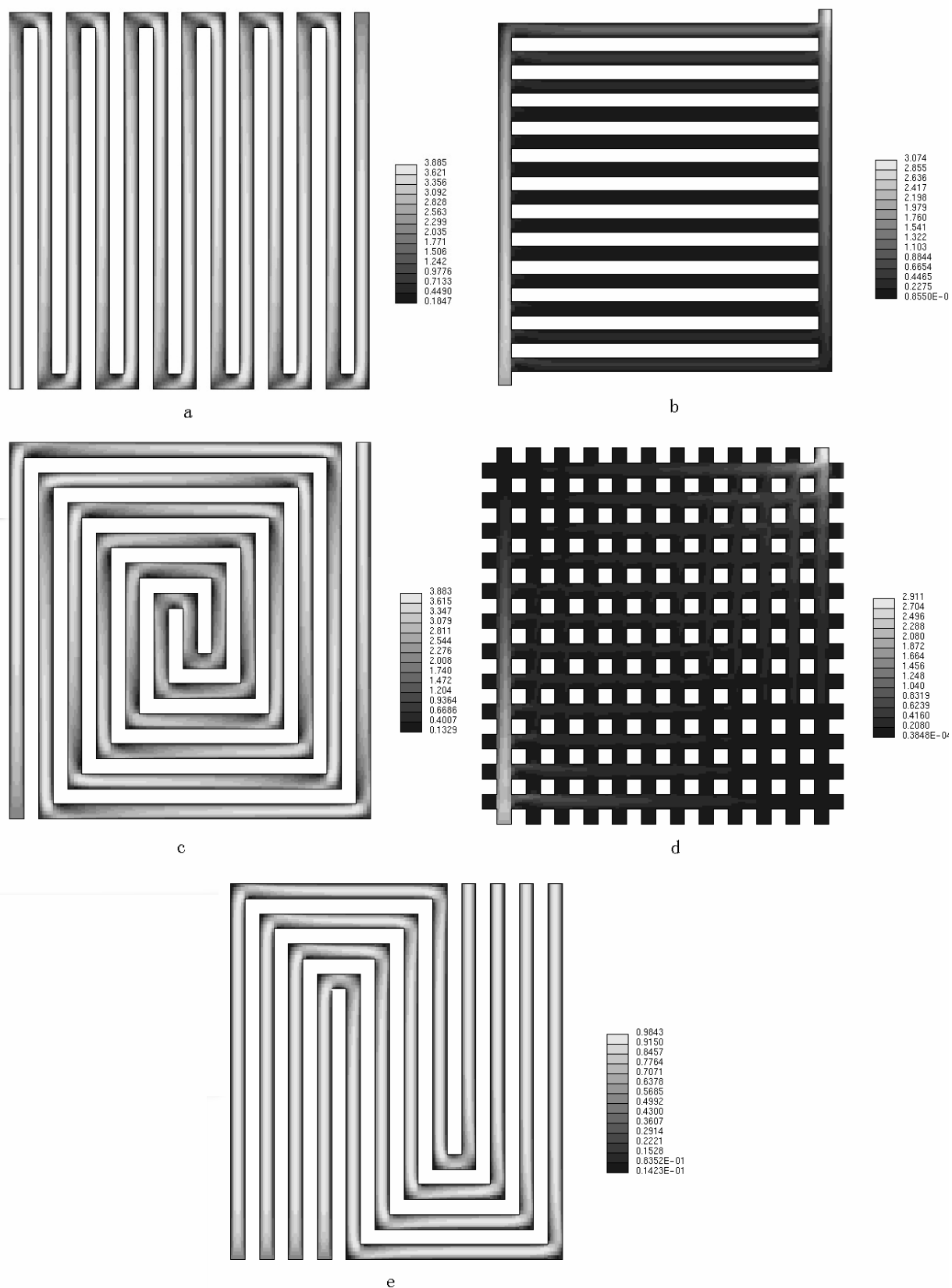


图 5 不同流道形式的流速分布 (m/s)

a. 蛇形流场 ; b. 平行流场 ; c. 螺旋流场 ; d. 网格流场 ; e. 平行蛇形流场

不同的流道形式造成的压降各不相同，流体压降可折合成流经单位面积的功率消耗(式 9)。不同流道形式在输出电压为 0.5V 时，产生的功率和压降消耗功率的柱状示于图 6。由图 6 可以看出，蛇行和螺旋流场产生的压降较大。原因是流道数目较少，使得流程长、流量大，从而压降高。其它几种形式的流场均具有多流道，产生的压降损失相对较小。另外，由于本文计算的流道截面面积较大，所以压降损失占电池放电功率的比率相对较小。

$$W_{loss} = \frac{Q_{in} \Delta p}{A} \quad (9)$$

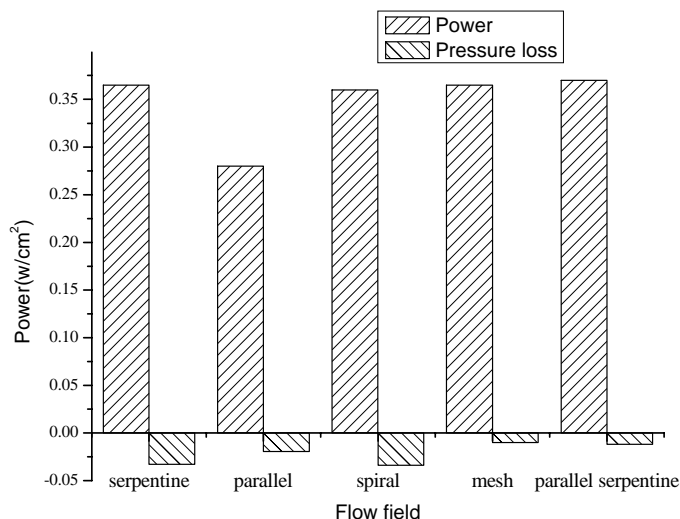


图6 流道形式对输出功率和压降损失的影响

4 结论

1. 建立了能够考查不同流道形式下的电流密度分布情况的数学模型，此模型为流道的设计和优化提供了有力的工具。
2. 流道形式对电池性能有较大影响。虽然计算得到的螺旋、蛇行、网格以及多路蛇行流场的平均电流密度相差不多，但是电池内部的电流密度分布确有较大差异，其中螺旋流场的电流分布最为均匀，网格流场和平行流场电流密度分布均匀性较差。
3. 流道形式对流道出入口压降有较大影响。流道数目较多的流道形式（网格、平行流道）压降较小，流道数目较少的流道形式（蛇行、螺旋流道）压降则较高。

5 参考文献

- [1] Hakenjos A, Muentner H, Wittstadt U, et al., A PEM fuel cell for combined measurement of current and temperature distribution, and flow field flooding, *J. Power Sources*, 2004, 131: 213-216
- [2] Yoon Y G, Lee W Y, Yang T H, et al., Current distribution in a single cell of PEMFC, *J. Power Sources*, 2003, 118: 193-199
- [3] Natarajan D, Nguyen T V, Effect of electrode configuration and electronic conductivity on current density distribution measurements in PEM fuel cells, *J. Power Sources*, 2004, 135: 95-109
- [4] Feindel K W, LaRocque L P A, Starke D, et al., In Situ Observations of Water Production and Distribution in an Operating H₂/O₂ PEM Fuel Cell Assembly Using 1H NMR Microscopy, *J. Am. Chem. Soc.*, 2004, 126: 11436-11437
- [5] Satija R, Jacobson D L, Arif M, et al, In situ neutron imaging technique for evaluation of water management systems in operating PEM fuel cells, *J. Power Sources*, 2004, 129: 238-245
- [6] Kucernak A, Ladewig B, Blewitt R, et al, Laser doppler anemometry study of reactant flow in fuel cell channels, 3rd European PEFC Forum, 2005
- [7] Kulikovskiy A A, Quasi three-dimensional modelling of the PEM fuel cell: comparison of the catalyst layers performance, *Fuel cells*, 2001, 1(2):162-169
- [8] Dutta S, Shimpalee J W, Zee V, Numerical prediction of mass-exchange between cathode and anode channels in a PEM fuel cell, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, 44(11):2029-2042
- [9] Kimble M C, Vanderborgh N E, Reactant gas flow fields in advanced PEM fuel cell designs, *Proc. Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf.*, 1992, 27(3):3.413-3.417
- [10] Thirumalai D, White R E, Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cell stacks, *J. Electrochem. Soc.*, 1997, 144(5):1717-1723