

质子交换膜燃料电池热管理技术的进展

刘波，赵锋，李骁

(武汉众宇动力系统科技有限公司，湖北武汉430079)

摘要：介绍质子交换膜燃料电池（PEMFC）的产热特性，提出进行有效热管理重点关注反应区域最高温度和温度分布均匀性等指标。总结2种单相冷却方式和4种相变冷却方式的特点和进展。空气冷却和液体冷却方式存在温度分布不均，影响电池性能；蒸发冷却、流动沸腾冷却和热管散热等基于相变的冷却技术可提升电池的性能与功率密度，现处在研发初期。

质
子交换膜
燃料电池（PEMFC

）在车船用动力系统、无人机动力系统
及便携式电源等领域有广阔的应用前景^[1]

。实际运用过程中，PEMFC的燃料约有40%~60%的化学能可以转换为电能，其余的绝大多数能量会转换为热量。目前，运用较多的低温PEMFC的适宜工作温度为60~80℃，温度过高，会加速质子交换膜和催化剂的衰减^[2]。

热管理是PEMFC研究的一个重要课题。本文作者对PEMFC热管理技术与运用情况作详细介绍与分析。

1 PEMFC的产热特性

燃料电池在工作过程中热量的来源主要有：欧姆电阻的产热、反应产生的水蒸气冷凝放热、不可逆的反应热量和电化学反应的熵变^[3]

。热量中的80%~90%产生于

阴极侧催化剂层，只有约5%的废热能被空气尾气带出电堆^[4]
，即PEMFC工作时产生的热量，有95%依赖于冷却介质带走。

J.P.Owejan等^[5]

发现：PEMFC产热功率密度和有效功率密度随着电流密度的增加而增加，当电流密度大于一定的值时，产热功率密度会高于有效功率密度。燃料

电池在实际使用过程中，往往在高电流密度（ $0.8\text{A}/\text{cm}^2$

）下工作，因此电堆通常具有较大的

功率密度，产热功率密度可达 $2.5\sim 3.0\text{W}/\text{cm}^2$

。燃料电池电堆持续高效率的工作依赖于高效的热管理系统。一般而言，PEMFC热管理需要考察两个基本指标：反应区域最高温度和温度分布均匀性。

2 单相冷却方式

对于PEMFC，单相冷却方式主要有空气冷却和液体冷却等两种类型，也是目前运用最为广泛的两种冷却技术。

2.1 空气冷却

空气冷却的散热方式多用于具有零部件少、成本低、系统效率高等特点的小功率（ 5kW ）PEMFC系统中。空气冷却型燃料电池电堆有两种结构^[6]

：反应空气（或氧气）与散热空气分别设有流道，反应所需空气可由另外的空气输送设备提供，也可与散热用空气共用空气输送设备；反应空气（或氧气）与散热空气共用流道，燃料电池工作时，经过阴极反应区域的空气只有小部分起到提供反应所需要氧气的作用，其他部分则带走反应过程中生成的热量。

空气冷却型燃料电池的以下缺陷会影响功率密度：空气对流换热系数低，需要的换热面积大；空气在冷却流道进出口温差大，反应区域的温度分布不均匀，各处含水量差别大，局部电流密度分布也不均匀，影响燃料电池的整体性能^[7]；冷却用空气是通过风扇提供的，燃料电池迎风面各处的空气流速不一致，导致温度和性能分布不均^[8]。

反应空气和散

热空气共用流道的空气冷却型燃

料电池电堆，在工作过程中迎风面的温差可达近10^[8]

。采用该结构的燃料电池，在高温低湿环境下还存在水热耦合管理的问题，而反应空气和散热空气分开设置流道，能避免此问题。

2.2液体冷却

汽车、船舶及大型运输机等需要大功率（>5kW）动力系统的应用领域，对燃料电池的功率密度有更为严格的要求，对燃料电池环境温度适应性的要求也更高。液冷型燃料电池的比功率一般可达到2kW/kg，是空冷型的4~8倍，环境适应性也比空冷型好。液体的比热容比空气大，采用液体冷却方式，燃料电池的温度分布更为均匀。

液体冷却是在燃料电池阴、阳极板之间设计独立的冷却液流道，依靠冷却液强制对流换热，将燃料电池工作过程产生的热量带走。采用该冷却方式的燃料电池动力系统，零部件多、结构复杂，散热所用的附件功耗大，一般占有有效输出功率的10%左右。此外，液体冷却还存在以下缺点：

限制于PEMFC的理想工作温度60~80℃，冷却液流出电堆的温度一般控制在75℃以内，冷却液和空气的平均温差小，在相同输出功率的情况下，燃料电池冷却系统中的散热水箱体积比传统内燃机的大2~4倍，给整车集成带来很大的挑战[9]；

为使燃料电池电流分布一致性好，需要控制冷却液进出口温差在10℃以内，甚至要控制在5℃，要较大的冷却液流量，而燃料电池冷却流道尺寸较小，更大的冷却液流量意味着冷却液流经燃料电池时的阻力更大，冷却水泵的功耗也更大；

燃料电池对冷却液的离子浓度有严格的要求，当离子浓度超过一定值后，会影响燃料电池的性能，甚至影响运行安全。燃料电池冷却液需选用去离子水或专用的防冻液。

为了从热管理方面提升燃料电池的性能、延长使用寿命，人们在燃料电池极板冷却流道结构上开展了一系列的研究，以获得更低的最高温度，提高极板的温度均匀性^[10-13]

。直流道和蛇形流道是液体冷却方式中最

常用的两种原始结构，Y.Lasbet等^[10]

通过CFD模拟得出：蛇形流道的对流交换

系数是直流道的2倍。F.C.Chen等^[11]

在这两种基础流道的基础上，提出了5种流道结构，发现改进型蛇形流道结构的温度均匀性最好，最高温度比其他几种结构的低。E.Alizadeh等^[12]

提出了9种基于平行流道的改进型结构，可使燃料电池反应区域的温度得到均匀的分布。石墨材质的极板因加工工艺的局限，冷却液在流道内一般为二维流动。随着极板设计能力和加工工艺水平的提高，采用冲压工艺成型的极板，可使冷却液在流道中呈三维流动，具有比二维流动更高的强制对流换热系数，可提高燃料电池电堆的功率密度。

N.Satio等^[14]

分析了本田

Clarity汽车的液冷式燃

料电池冷却液的流道形式，发现流道呈复杂交

错的三维形式。W.K.Li等^[15]

采用实验和模拟的手段，得出底部呈波浪状的蛇形流道比传统的蛇形流道，最大能将电池的功率密度提升17.8%。在今后的研究中，三维冷却流道的设计与运用将会越来越广泛。

3相变冷却方式

单相冷却方式是利用冷却介质的显热带走燃料电池工作过程产生的热量；而相变冷却方式则是利用物体相变时会吸收大量的热量的特性来对热源进行冷却。常用的相变冷却有蒸发、流动沸腾、热管散热和相变材料等4种。

3.1蒸发冷却

蒸发冷却是指冷却液在低于沸点的条件下从液态转变为气态，带走热源热量的冷却方式。一般而言，燃料电池的蒸

发冷却是将冷却液和空气一起从阴极侧进入系统。冷却液可以加湿空气,提升质子交换膜含水量,提升燃料电池性能;同时,很大一部分的冷却液会被空气带入反应热源核心区域被蒸发掉,带走反应中生成的热量,使反应区域保持合适的温度。综上所述,蒸发冷却中一般选用去离子水为冷却液。蒸发冷却的燃料电池系统无需加湿器,由于蒸发和冷凝换热比单相对流换热更高效,可大幅度降低冷却水泵的负荷,散热器的体积也会小很多。

D.L.Wood等^[16]

在交错型流场板结构的PEMFC中,研究液态水直接注入阴极或阳极对电池性能的影响,发现注入的液态水能在很大程度上起到散热的作用。S.H.Hwang等^[17]设计了一种阴极侧雾化器-空气补给管组件,发现在加湿空气相对湿度和流速一定的条件下,改变注入冷却水的流量,燃料电池性能得到提升。这主要是由于注入的水会进一步加湿空气;当燃料电池电流密度提升至 $1.2\text{A}/\text{cm}^2$ 时,通过增加冷却水注入流量,可在 70°C 下正常运行。

P.Adcock等^[18]采用此技术路线,为PSA公司设计了适用于燃料电池-电池混合动力汽车用的燃料电池动力系统,净输出功率为 10kW 。Intelligent Energy公司开发了额定功率为 100kW 的燃料电池单元,功率密度达 $3.5\text{kW}/\text{L}$ ^[19],证明了该技术在燃料电池热管理中的可行性和高效性。

3.2流动沸腾冷却

流动沸腾冷却是指冷却液在达到沸点的条件下从液态转变为气态,带走热源热量的冷却方式。流动沸腾冷却过程中,冷却液的温度恒定在沸点不变,可满足燃料电池反应区域均温性的要求。与传统液体冷却方式类似,该冷却方式需要设计独立的冷却液流道。目前,PEMFC的适宜工作温度不超过 80°C ,因此冷却液不能用去离子水或乙二醇水溶液,需要选用具有低沸点、高汽化潜热及凝点低等特点的液体。P.T.Garrity等^[20]

采用沸点为 61°C 的甲基九氟丁醚(HFE-7100),并针对燃料电池设计了一种微通道冷却板结构,通过实验测得散热能力能达到 $3.2\text{W}/\text{cm}^2$ 。U.Soupremanien等^[21]

使用五氟丁烷(HFC-365mfc)和十氟戊烷(HFC-4310mee)的混合物,发现在相同流动阻力下,流动沸腾带走热量的能力是单相换热的 $2\sim 3$ 倍;最大临界热流密度可达到 $7.7\text{W}/\text{cm}^2$ 。

流动沸腾冷却在制冷、电子设备及航空航天领域的应用广泛,在燃料电池领域的应用值得进一步研究,尤其是当高温PEMFC的技术成熟之后。

3.3热管散热技术

热管散热主要依赖于蒸发段的液体汽化,将热量转移到冷凝段,然后从冷凝段散出到外界。热管的材质一般为铜或铝合金,能保证热源面温度保持较好的均布性。另外,冷却液在热管内的循环不依赖于外界动力元件。

目前,该技术在燃料电池中的应用仍然处于实验阶段。M.V.Oro等^[22]

将热管集成于燃料电池中,测得的散热能力可达到 $1.8\text{W}/\text{cm}^2$ 。A.P.Silva等^[23]

将毛细管抽吸两相流体回路(CPL)与热管结合,热管蒸发段置于燃料电池外部,工作时,热管先将热量传导至燃料电池外部,冷凝段和CPL的蒸发段接触,热量传导给CPL,最后由CPL的冷凝段散掉。实验中,可将净输出功率为 50W 的燃料电池电堆温度控制在合理范围。

热管散热技术在燃料电池领域的应用研究刚起步,需要进一步研发,将热管散热技术与燃料电池有效地结合。

3.4相变材料散热技术

近几年,相变材料(PCM)散热技术倍受关注,它是利用材料发生相变时的潜热带走热源热量。相变材料在燃料电池方面的应用研究极少,在其他领域的应用大多数也处于初期阶段。相变材料运用热管理领域具有温度分布均匀、节能、结构简单和维护成本低等优点^[24-25]。

陈思彤等^[26]

[27] 提出可将相变材料的储能功能运用于热管理系统中，提高能源利用率。按此思路，A.P.Sasmito等[28]提出低温条件下（低于0℃），采用相变材料和绝热材料将燃料电池动力系统包覆，可延长电堆在停止运行后温度降低到低于0℃的时间，缩短了燃料电池在低温条件下的冷启动时间。遗憾的是，他们仅运用模拟的手段对此方案进行分析。

燃料
电池电堆内部
空间狭窄，依赖相变材料带走反应过程生成的热量，不是特别的有意义，但A.P.Sasmito等^[28]提出的将相变材料用于燃料电池电堆的保温，利用相变材料对燃料电池的废热进行回收利用，将是一个值得研究的方向。

4结语与展望

热管理技术的进展对燃料电池的发展起着非常重要的作用，影响燃料电池的效率、寿命和安全等。

本文作者分析了各种散热技术在燃料电池热管理领域的研究和应用现状，单相冷却依旧是目前燃料电池领域运用得最为广泛的技术，但基于相变冷却的热管理技术在燃料电池的热管理领域有着非常重要的意义和前景，值得相关从业者去研究。

另外，研究能耐更高温度的PEMFC是一个非常有意义的方向，它对于燃料电池热管理技术的发展也会有着很大的影响。

参考文献：

- [1] 衣宝廉. 燃料电池——原理·技术·应用 [M]. 北京:化学工业出版社,2003. 1-4.
- [2] RODATZ P, BUCHI F, ONDER C, *et al.* Operational aspects of a large PEMFC stack under practical conditions [J]. *J Power Sources*, 2004, 128 (2) :208-217.
- [3] KANDLIKAR S G, LU Z J. Thermal management issues in a PEM-FC stack——A brief review of current status [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29 (7) :1 276-1 280.
- [4] 周奕, 陈建利, 赵阳, *et al.* 燃料电池客车散热系统设计分析 [J]. *上海汽车*, 2010 (1) :19-20.
- [5] OWEJAN J P, OWEJAN J E, GU W B, *et al.* Water transport mechanisms in PEMFC gas diffusion layers [J]. *J Electrochem Soc*, 2010, 157 (10) :1 456-1 464.
- [6] SOHN Y J, PARK G G, YANG T H, *et al.* Operating characteristics of an air cooling PEMFC for portable applications [J]. *J Power Sources*, 2005, 145 (2) :604-609.
- [7] METER Q, RONASZEGI K, ROBINSON J B, *et al.* Combined current and temperature mapping in an air-cooled, open cathode polymer electrolyte fuel cell under steady-state and dynamic conditions [J]. *J Power Sources*, 2015, 297 (31) :315-322.
- [8] 卜庆元, 李奇, 陈维荣, *et al.* 空冷型 PEMFC 电堆阴极风扇系统实验与模拟 [J]. *化工学报*, 2015, 66 (10) :4 211-4 217.
- [9] ROGG S, HOLINGER M, ZWITTIG E, *et al.* Cooling modules for vehicles with a fuel cell drive [J]. *Fuel Cells*, 2003, 3 (3) :153-158.
- [10] LASBET Y, AUVITY B, CASTEKAIN C, *et al.* A chaotic heat-exchanger for PEMFC cooling applications [J]. *J Power Sources*, 2006, 156 (1) :114-118.
- [11] CHEN F C, GAO Z M, LOUTFY R O, *et al.* Analysis of optimal heat transfer in a PEM fuel cell cooling plate [J]. *Fuel Cells*, 2003, 3 (4) :181-188.
- [12] ALIZADEH E, RAHGOSHAY S M, RAHIMI-ESBO M, *et al.* A novel cooling flow field design for polymer electrolyte membrane fuel cell stack [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2016, 41 (20) :8 525-8 532.
- [13] SATIO N, KIKUCHI H, NAKAO Y. New fuel cell stack for FCX Clarity [J]. *Honda R&D Technical Review*, 2009, 21 (1) :16-23.
- [14] LIM B H, MAJLAN E H, DAUD W R W, *et al.* Numerical analysis of modified parallel flow field designs for fuel cells [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2017, 42 (14) :9 210-9 218.

- [15] LI W K, ZHANG Q L, WANG C, *et al.* Experimental and numerical analysis of a three-dimensional flow field for PEMFCs [J]. *Applied Energy*, 2017, 195:278 – 288.
- [16] WOOD D L, JUNG S Y, NGUYEN T V. Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells [J]. *Electrochim Acta*, 1998, 43 (24) :3 795 – 3 809.
- [17] HWANG S H, KIM M S. An experimental study on the cathode humidification and evaporative cooling of polymer electrolyte membrane fuel cells using direct water injection method at high current densities [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 99:635 – 644.
- [18] ADCOCK P, KELLS A, JACKSON C. PEM fuel cells for road vehicles [A]. *EET 2008 European EleDrive Conference International Advanced Mobility Forum* [C]. Geneva, 2008. 1 – 16.
- [19] Intelligent energy for high-performance 100 kW automotive fuel cell architecture [J]. *Fuel Cell Bulletin*, 2015, (4) :4.
- [20] GARRITY P T, KLAUSNER J F, MEI R. A flow boiling micro-channel evaporator plate for fuel cell thermal management [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2007, 28 (10) :877 – 884.
- [21] SOUPREMANIEN U, LE PERON S, FAVRE-MARINET M, *et al.* Tools for designing the cooling system of a proton exchange membrane fuel cell [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 40:161 – 173.
- [22] ORO M V, BAZZO E. Flat heat pipes for potential application in fuel cell cooling [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 90:848 – 857.
- [23] SILVA A P, GALANTE R M, PELIZZA P R, *et al.* A combined capillary cooling system for fuel cells [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 41:104 – 110.
- [24] 高学农, 刘欣, 孙滔, *et al.* 基于复合相变材料的电子芯片热管理性能研究 [J]. *高校化学工程学报*, 2013, 27 (2) :187 – 192.
- [25] 王彦红, 张成亮, 俞会根, *et al.* 相变材料在动力电池热管理中的应用研究进展 [J]. *功能材料*, 2013, 44 (22) :3 213 – 3 217.
- [26] 陈思彤, 李微微, 王树博, *et al.* 相变材料用于质子交换膜燃料电池的热管理 [J]. *化工学报*, 2016, 67 (S1) :1 – 6.
- [27] 叶锋, 曲江兰, 仲俊瑜, *et al.* 相变储热材料研究进展 [J]. *过程工程学报*, 2010, 10 (6) :1 231 – 1 241.
- [28] SASMITO A P, SHAMIM T, MUJUMDAR A S. Passive thermal management for PEM fuel cell stack under cold weather condition using phase change materials (PCM) [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 58 (1 – 2) :615 – 625.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/163689.html>