露点温度对 PEMFC 电堆输出性能和电压一致性的影响

王淙进，狄亚格，缪雪龙，李培超，郑金保，杨 茁，陆 杰
（上海工程技术大学 机械与汽车工程学院，先进车用动力研究所，上海 201620）

摘 要：PEMFC 电堆输出性能主要与运行条件、控制策略、结构设计有关，而电堆电压一致性是电堆性能稳定性和可靠性的重要指标。文章通过搭建水冷型氢燃料电池电堆测试台架，对 8.5 kW 质子交换膜燃料电池电堆进行实验研究，以极化曲线与输出功率曲线作为性能参考指标，电压波动率作为一致性评价指标，考察反应气体露点温度对电堆输出性能与电压一致性的影响。结果表明：露点温度对电堆性能和电压一致性有很大影响；随着露点温度的增加，电堆输出性能得到提升，而当露点温度超过 57 ℃时，电堆输出性能下降；过高与过低的露点温度均会造成电堆内部水热分布不均匀，从而导致电压波动率增大，降低 PEMFC 一致性。

关键词：PEMFC 电堆；电堆性能；露点温度；电压一致性
中图分类号：TK91；TM911.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)11-1443-07

0 引言

质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell，PEMFC)作为一种高效、环境友好的能源转换装置，在新能源汽车、分布式发电等领域具有广阔的应用前景，在绿色能源利用领域受到广泛关注[1]。此外，PEMFC 是一个高度非线性多物理场耦合的复杂系统，为确保 PEMFC 的高效稳定运行，必须对其工作参数进行精确控制。

在推动绿色能源发展，实现 PEMFC 大规模商业化的进程中，研究其运行参数对输出性能的影响具有重要意义。近年来，众多学者研究了工况参数对 PEMFC 输出性能的影响规律。Miansari M[2]研究发现，增大气体压力会提高 PEMFC 的输出性能，且高湿度环境对性能提升效果更为显著。Kahveci E E[3]采用响应面法对 PEMFC 的运行参数进行优化，以获得最大输出功率密度。纪少波[4]通过 Matlab/Simulink 搭建了 PEMFC 分析模型，研究运行参数对单体电池的影响规律，发现适当增加空气湿度可改善电池性能。樊磊[5]通过 IHE 与 Fluent 模型对比分析了进气相对湿度对燃料电池的影响，发现加湿效率随着进气相对湿度的增加而减小。刘鑫桐[6]研究了进气相对湿度对 PEMFC 能量转换效率的影响，发现其随着进气相对湿度的增加而提高。

PEMFC 电压一致性是电堆性能稳定性和可靠性的重要指标。PEMFC 电堆通过串联多个单电池来增加输出功率，单片电池电压波动太大会导致局部电流异常，容易造成局部热点甚至极性反转，导致电堆寿命和性能下降[7]。因此，PEMFC 电压一致性对于电堆的稳定运行至关重要。Li Y[8]通过调节运行参数对电堆进行水管理，发现调节入口相对湿度和电堆温度可减少额外的电压波动，改变入口进气压力会导致电压突变。Cabello González G M[9]对 PEMFC 电堆的电压分布和非均匀性进行了分析，发现在所有电流密度下，电堆温度是影响电压不均匀性的主要因素。包敏杰[10]搭建了大功率 PEMFC 模型，研究了工作电流、冷却水进口温度及流量对燃料电池电压一致性的影响，发现工作电流对单电池电压一致性的影响更大。

露点温度(Dew Point Temperature，DPT)是指水蒸气含量与环境压力保持一定的条件下，气体中水蒸气冷却到水汽饱和的温度，即水蒸气开始凝结成液态水，形成露时的温度，DPT 是衡量气体中水蒸气含量的重要指标。DPT 与电堆温度直接决定了电堆内部水的饱和状态以及膜的水合情况，严重影响 PEMFC 内部水热分布特性和 PEM-

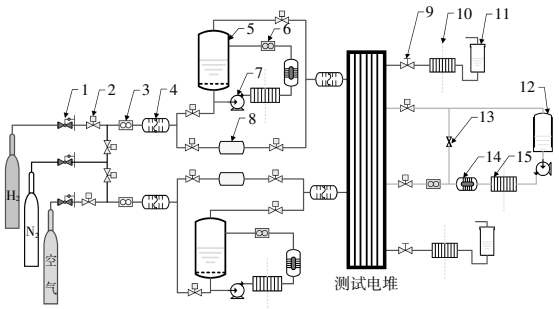
收稿日期：2024-05-21。
基金项目：上海市机械工程博士点培育专项(0231-A1-5300-23-06007)；上海工程技术大学高水平一流师资队伍建设项目(0231-A1-5300-24-0907006)；国家自然科学基金项目(12272217)。
通信作者：缪雪龙(1964-)，男，博士，教授，研究方向为燃料电池发动机系统。E-mail：2833732146@qq.com

FC 的输出特性。已有研究多是分析运行参数对电堆输出电压或电压一致性的影响，且多是针对单电池或单电池数较少的小功率电堆进行研究或数值模拟计算,鲜有对 DPT 进行研究。因此,本文通过实验对由 30 片单电池组成的千瓦级 PEMFC 电堆(更符合燃料电池的实际使用情况)的反应气体 DPT 进行研究,深入分析其对电堆输出性能及电压一致性的影响规律，从而为 PEMFC 内部水热管理控制策略的制定提供指导。

1 材料与方法

1.1 水冷型氢燃料电池电堆测试平台

燃料电池电堆测试台架为阴、阳极开放式水冷型测试系统(功率为 0~30 kW),系统原理如图 1 所示。



1-减压阀;2-电磁阀;3-气体流量计;4-气体防爆加热器;5-鼓泡加湿器;6-液体流量计;7-水泵;8-气体缓冲罐;9-背压阀;10-外围冷却机管路;11-尾排处理罐;12-去离子水箱;13-比例阀;14-液体加热器;15-板式换热器。

图 1 PEMFC 电堆测试系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the PEMFC stack test system

该测试台架主要由阴极空气路系统、阳极氢气路系统、氮气吹扫系统、电堆冷却系统、气体增湿系统构成。气路系统中氢气、空气侧均设有干/湿路,其流量由 ALICAT 流量计控制。电堆加湿方式为鼓泡式加湿。高压气瓶中的反应气体经减压阀、流量计、气动角座阀、前端气体加热器预热后进入加湿罐，湿气体又经过第二个气体加热器进入电堆。从第一个加热器至堆前端的气体管路外围缠有加热带,并用保温棉保温,以确保反应气体 DPT 的精确控制。多余未参与反应的气体以及反应生成的水经气动角座阀和板式换热器后进入尾排罐排出。由电磁阀控制氮气对氢气和空气侧的流量计前端管路进行吹扫。氮气吹扫的主要目的是在实验开始前、气体预热后以及实验结束后吹扫、排出管道中残留的反应气体,避免形成氢-氧过渡区引起横向甚至反向电流，从而导致催化层和质子膜的不可逆损害。冷却系统主要由冷却水泵、去离子水水箱、加热器及外围冷水机组成,由水泵驱动去离子水经过加热器对电堆进行实验前的预热或实验过程中经过板式换热器进行控温。

该测试台架还配备了电子负载、电压巡检仪(Cell Voltage Monitor,CVM)、氢气检测仪、电化学工作站、数据采集和控制系统等。电子负载可用于模拟外部运行工况,对电堆输出进行加、减载荷,其共有恒流、恒压、恒电阻、恒功率 4 种操作模式。CVM 有 160 个通道，可同时检测 160 片单电池,能满足本研究要求。由燃料电池数据采集和控制系统采集和处理数据，从而实现对气体流量、背压、气体温度、露点温度、干/湿管路选择、加热器启停、电子负载等条件的设定及控制。测试系统控制精度如表 1 所示。

表 1 测试系统控制精度

Table 1 Control accuracy of the test system

参数	数值
气体温度/℃	±0.5
气体流量	±(0.8%RD+0.2%FS)
背压/kPa	±2
露点温控/℃	±0.5
冷却水温度/℃	±2
每个 CVM 检测通道/mV	±1

注:RD(Reading)为读数值,表示实际测量出来的数据,0.8%RD 表示误差为实际读数值的 0.8%;FS(Full Scale)为满量程,表示仪器的最大测量范围,0.2%FS 表示误差为满量程的 0.2%。

1.2 实验方案

实验所用电堆的参数如表 2 所示。

表 2 电堆基本参数

Table 2 Basic parameters of the fuel cell stack

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	8.5	额定电流/A	500
单电池数/片	35	活化面积/cm^2	250
电堆长度/mm	418	H_2 进、出口直径/mm	25
电堆宽度/mm	159	空气进、出口直径/mm	48
电堆高度/mm	198	冷却剂进、出口直径/mm	38

电堆采用石墨双极板，阳极流道为平行直流道,阴极流道为梯形流道。采用 Nafion 全氟磺酸质子交换膜，膜厚度为 12 μm，有效活化面积为 250 cm^2。采用 PtCo/C 作为催化剂,载量约为 0.3 mg/cm^2。该电堆由 35 片单体电池组成,其中,工作

电池为 30 片,假电池为 5 片。假电池不产生电流、电压,仅为了满足工程设计需求。假电池仅做了单腔开孔，即一端假电池仅通入空气而另一端仅通入氢气,能改善电堆两端的气体分配,优化气体流动,均匀流道内的反应气体压差。氢气与空气采用对流设计，提高了流道中水的去除率和氧气的扩散率,反应气体能够更加充分地反应。对流设计还可以通过燃料电池内部水的循环来实现膜电极表面的水平衡,一定程度上实现电堆的自增湿。

实验所用压缩氢气、空气和氮气的纯度均为 99.999 9%。在电堆长时间未使用的情况下,会导致给定工作点的电堆输出功率的可逆性损失,即“非操作性能损失”。因此,在电堆使用前有必要对电堆进行活化。在对电堆完成活化后,采用控制变量法进行反应气体 DPT 对电堆性能敏感性研究实验。PEMFC 电堆运行参数如表 3 所示。

表 3　PEMFC 电堆基本运行参数

Table 3 Basic operating parameters of the PEMFC stack

参数	数值
电堆温度/℃	70
阳极/阴极的化学计量比	1.5/2.1
阳极/阴极背压/kPa	60/50
露点温度/℃	32~65
气体加热温度/℃	65
单电池的负载电流/A	0~500
阴极气体流速/L·min^{-1}	0~550

根据电堆制造商的使用建议，单片电池稳态工作电压不能低于 0.55 V 且不能高于 0.85 V,当平均单片电压接近 0.55 V 时将停止负载的拉载,此时拉载的电流为该工况下电堆输出的最大工作电流。实验开始前,先对系统进行氮气吹扫,然后进行电堆的预热，待各项参数到达设定好的实验边界条件后,电子负载选择恒流模式,控制电子负载以 50 A 的步长加载负载电流，以 1 Hz 的采样频率对各工况下电堆的各项实验数据进行采集。数据采集完成后,将电堆电压降至 0,同时进行氮气吹扫,以消除管道中残余的空气与氢气,避免造成电堆的损害。

本文以功率为 8.5 kW 的水冷型 PEMFC 电堆为研究对象，探究反应气体 DPT 对 PEMFC 电堆输出电压、输出功率、最大工作电流以及电堆各单电池电压一致性的影响，以极化曲线与输出功率曲线作为性能参考指标,采用电压波动率(C_v)对实验中各单电池的电压一致性进行评价。本文结合图解法和电压波动率对电堆输出电压一致性进行分析。

C_v 是各单电池电压标准偏差与电压平均值的比值,反映了电堆中各单电池电压的偏离程度,C_v 越大,说明单电池偏离电压均值越大,各单电池电压的一致性就越差。C_v 的计算式为

$$C_v=\sqrt{\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\left(\frac{V_k-\overline{V}}{\overline{V}}\right)^2} \tag{1}$$

式中:K 为单电池数；$\overline{V}$为各单电池的平均电压,mV;V_k 为 K 通道的单电池电压,mV。

2　结果讨论

2.1　露点温度对 PEMFC 输出性能的影响

DPT 与气体加热温度共同决定反应气体进入电堆前的相对湿度，与电堆温度共同决定电堆内气体的相对湿度。DPT 直接决定质子膜的水合程度,从而影响质子膜的电导率及内部阻抗。因此,研究 DPT 对 PEMFC 输出性能和均匀性的影响具有重大意义。实验过程中反应气体的 DPT 由维萨拉(VAISALA)湿度传感器监测。不同露点温度下 PEMFC 电堆的极化曲线如图 2 所示。

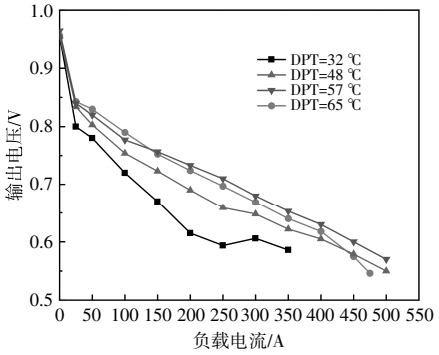


图 2　不同露点温度下 PEMFC 电堆的极化曲线

Fig.2 Polarization curves of PEMFC stack under different DPT

从图 2 可以看出:随着 DPT 的改变,各工况下电堆的开路电压（无外接负载时电堆两端的电压,用于表征电堆的热力学可逆电势)几乎没有变化;随着 DPT 从 32 ℃升高到 57 ℃,电堆的输出电压显著增加，同时，电堆最大负载电流也显著变化;当 DPT 为 32 ℃时,在低负载电流阶段,输出电压迅速下降,压降急剧增大。造成这个现象的原因是,在此 DPT 下,反应气体的水蒸气含量很少,

相对湿度非常低，质子膜湿润度不足造成阳极质子不能有效水合,质量传输变差;较低的含水量导致质子膜的阻抗变大,压降增大,极化曲线斜率变大。当负载电流为 200~300 A 时,可观察到一个明显的拐点,文献[11]中也观察到了类似现象。这可能是因为,随着负载电流的增大,电极处的反应加快，产生的水增多，由于阴极生成水的反扩散作用,部分水从阴极转移到阳极,增加阳极电极处的液态饱和水含量，一定程度上改善了阳极质子的水合能力,从而改善了电池的输出性能。输出电压在负载电流为 300 A 时并未表现出随着负载电流的增大而降低,反而出现了略微升高。

随着 DPT 由 32 ℃升高到 57 ℃，电堆的输出电压也随之升高,尤其是在中、低负载电流阶段。当负载电流为 200~300 A 时，输出电压的差异最为显著,与 DPT 为 32 ℃时相比,DPT 为 57 ℃时的电堆输出电压增加了 19%。随着负载电流的持续增大,输出电压的差异逐渐减小,主要是因为随着反应的加快，产生的液态水一定程度改善了质子膜的干燥情况,降低了膜两侧的阻抗,提高了电导率，加快了电化学反应速率,PEMFC 电堆输出性能得到有效改善。

不同露点温度下 PEMFC 电堆的输出功率如图 3 所示。

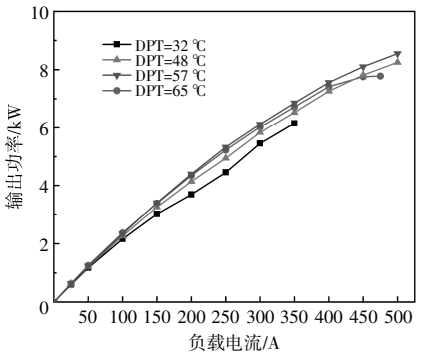


图 3　不同露点温度下 PEMFC 电堆的输出功率

Fig.3 Power output of the PEMFC stack under different DPT

从图 3 可以看出，随着 DPT 由 32 ℃升高到 65 ℃,电堆输出功率并未表现出持续增加,其最大负载电流(475 A)与最大输出功率(7.78 kW)均小于 DPT 为 57 ℃时。这是因为,随着 DPT 的持续升高,反应气体中的饱和水蒸气压也增大,水含量增大，所以在负载电流为 50~150 A 的小负载阶段,电堆表现出较低的压降。而随着负载电流的持续增加,DPT 为 65 ℃时的输出电压略低于 DPT 为 57 ℃时。这是因为,虽然水蒸气含量增多降低了质子膜的阻抗、提高了电导率,但是,反应气体在自身水蒸气含量增多、阳极电子拖曳和水力渗透多重作用下,加之反应自身产生的水,阴极催化层/气体扩散层处饱和液态水显著增加,阻碍了气体进入气体扩散层和催化剂反应位点[12],造成部分单电池供气不足,性能下降。

2.2　露点温度对 PEMFC 输出电压一致性的影响

在输出较高功率的同时，保证良好的电压一致性对于燃料电池堆的耐久性和性能输出至关重要。PEMFC 膜电极须要充分湿润以维持良好的电导率,而 DPT 直接影响进入电堆内气体的相对湿度，对维持电池水管理平衡和质子传导有着重要作用。质子膜的膜干造成的欧姆阻抗增大会加剧单电池电压输出的不均匀性,因此,良好的膜内水分布平衡是维持电堆输出电压一致性的关键。不同露点温度下的电压波动率变化如图 4 所示。

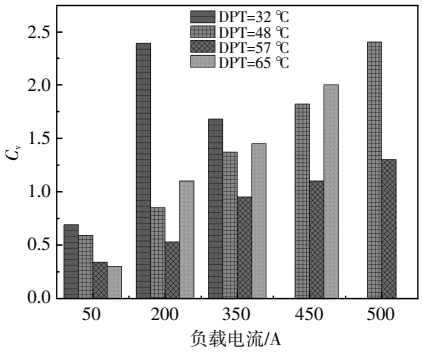


图 4　不同露点温度下的电压波动率变化

Fig.4 Variation of voltage fluctuation rate under different DPT

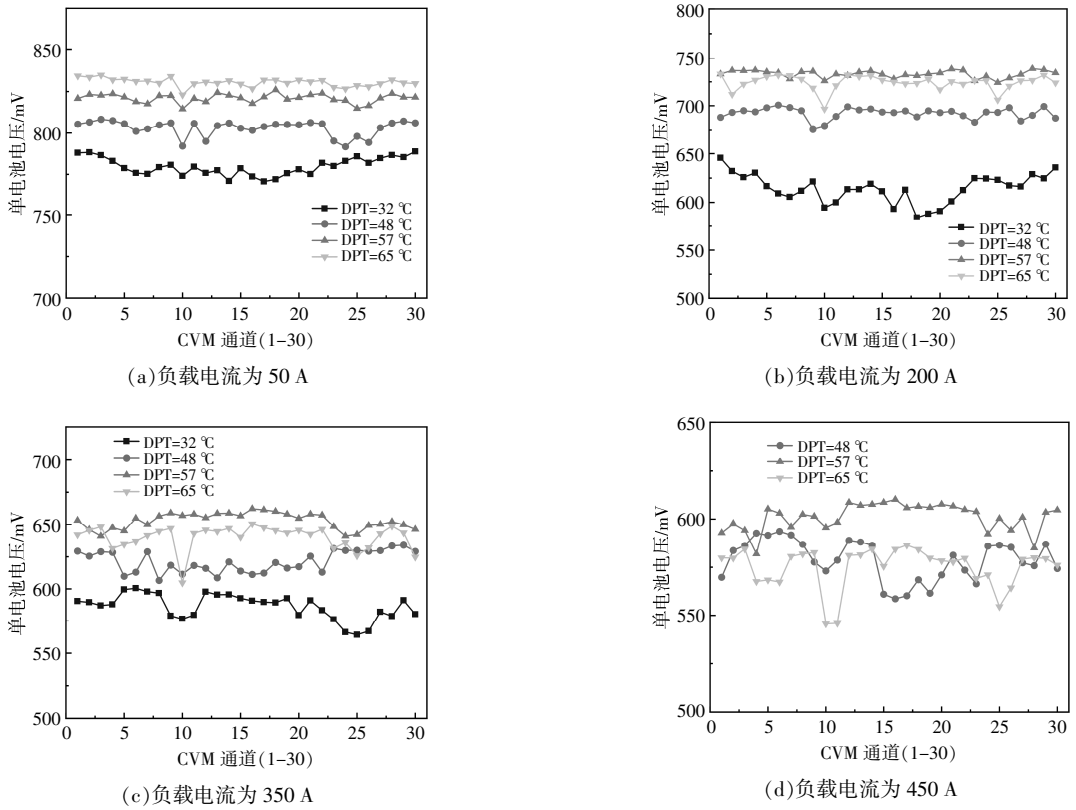
从图 4 可以看出,在低负载电流(50 A)条件下,随着 DPT 的升高,C_v 呈现出逐渐减小的趋势,因为在此负载电流下，质子膜主要通过外部鼓泡加湿器增湿,较高的 DPT 改善了质子膜的水合能力,提高了阳极氢离子的电渗透能力,质子电导率增加,C_v 较小。随着负载电流的增大,C_v 并没有随着 DPT 的升高继续保持逐渐减小的趋势,当 DPT 超过 57 ℃后,C_v 显著增加。这是因为,随负载电流的增大,进气量也随之增大,电极处的电化学反应加快，又由于电渗透拖曳和电化学反应产生的水的共同作用，阴极催化剂层中的含水量在短时间内迅速增加。与上节阐述的造成输出性能下降原

因相同，过量的水会导致电堆内部泛水并阻碍气体进入气体扩散层到达催化剂活性位点。由于液态水传输的滞后效应，需要较长的时间来平衡电堆中的水和热的状态并建立气体传输通道 [13]，由此导致电堆输出电压一致性变差。

从图 4 还可以看出，当 DPT 为 32 ℃时，C_v 在负载电流为 200 A 时急剧增加，而在负载电流增大到 350 A 时出现下降。这是由于后期生成水的扩散作用，一定程度上改善了由于 DPT 过低而不能对质子膜进行有效湿润而造成的膜干情况，从而优化了电堆输出电压的一致性，使得 C_v 降低。

不同露点温度下各负载电流对应的单电池电压分布如图 5 所示。

从图 5 可以看出，不同 DPT 对应的单电池电压分布存在明显差异。在低负载电流下，当 DPT 较低时，低电压单电池分布在中间位置，在高负载



(a)负载电流为 50 A　(b)负载电流为 200 A

(c)负载电流为 350 A　(d)负载电流为 450 A

图 5　不同露点温度下各负载电流对应的单电池电压分布

Fig.5 Distribution of single-cell voltages at various load currents under different DPT

电流下，高、低电压单电池的分布无明显规律。在较高 DPT 下，高电压单电池多分布在中间位置，这是因为更多的湿气体被传送到中间位置的单电池，导致该位置的单电池内部电阻降低[14]。

综上所述，电堆内部水管理对电堆输出电压一致性有着重要影响。缺水造成膜干会使阻抗增大，电导率下降，加剧输出电压的不均匀性；而水含量过大，容易造成气体传输通道堵塞，气体在电极处传输受阻，反应气体无法到达催化剂活性位点，也会加剧输出电压的不均匀性。

3　结论

本文搭建了 PEMFC 电堆测试平台，通过实验研究了反应气体露点温度对 PEMFC 电堆输出性能与电压一致性的影响。对不同反应气体露点温度下电堆输出电压、输出功率，电压波动率及电压分布进行研究分析，得出如下结论。

①反应气体露点温度的升高改善了质子膜的水合情况，能够提高电堆的输出性能，尤其在低负载电流阶段表现显著。当露点温度超过 57 ℃后，会造成气体传输受阻、水淹等问题进而导致电堆输出性能下降。

②露点温度直接决定质子膜的水合情况，影响电堆内部的水管理，露点温度过低会造成质子膜水合不足，露点温度过高会造成电堆内部泛水，

两者均会导致电压波动率过高,电压一致性变差。合适的露点温度可改善电堆内部气体分布的均匀性,提高电压一致性,保证电堆的稳定性和耐久性。

③改变反应气体露点温度,对电堆开路电压几乎无影响。随着露点温度的升高,高电压的单电池多分布在中间位置。

参考文献:

[1] Wang Y,Seo B,Wang B,et al. Fundamentals,materials,and machine learning of polymer electrolyte membrane fuel cell technology[J].Energy and AI,2020,1:100014.

[2] Miansari M,Sedighi K,Amidpour M,et al. Experimental and thermodynamic approach on proton exchange membrane fuel cell performance [J].Journal of Power Sources,2009,190(2):356-361.

[3] Kahveci E E,Taymaz I. Experimental investigation on water and heat management in a PEM fuel cell using response surface methodology[J].International Journal of Hydrogen Energy,2014,39(20):10655-10663.

[4] 纪少波,马荣泽,赵同军,等.质子交换膜燃料电池运行参数影响规律研究[J].汽车安全与节能学报,2021,12(2):251-256.

[5] 磊樊,刘永峰,裴普成,等.两种工况下进气相对湿度对燃料电池性能影响的研究[J].可再生能源,2018,36(8):1163-1167.

[6] 刘鑫桐,刘永峰,裴普成,等.进气相对湿度对 PEMFC 能量效率的影响特性分析 [J]. 可再生能源,2022,40(7):853-859.

[7] Hu Z,Xu L,Li J,et al. The uniformity and consistency analysis of a fuel cell stack with multipoint voltage-monitoring method [J].Energy Procedia,2019,158:2118-2125.

[8] Li Y,Pei P,Wu Z,et al. Approaches to avoid flooding in association with pressure drop in proton exchange membrane fuel cells [J].Applied Energy,2018,224:42-51.

[9] Cabello González G M,Toharias B,Iranzo A,et al. Voltage distribution analysis and non-uniformity assessment in a 100 cm^2 PEM fuel cell stack[J].Energy,2023,282:128781.

[10] 包敏杰,俞小莉,黄瑞,等.大功率燃料电池建模与电压一致性分析[J].储能科学与技术,2024,13(3):952-962.

[11] Ji X,Wang X, Li Y,et al. Sensitivity analysis of operating parameters on a 65 kW proton exchange membrane fuel cell stack performances [J].Energy Reports,2022,8:521-527.

[12] Iranzo A,Boillat P,Biesdorf J,et al. Investigation of the liquid water distributions in a 50 cm^2 PEM fuel cell: Effects of reactants relative humidity, current density, and cathode stoichiometry[J].Energy,2015,82:914-921.

[13] Wei T,Chang G,Dai H,et al. Understanding the transient behavior and consistency evolution of PEMFC from the perspective of temperature [A].SAE World Congress Experience [C].Detroit:SAE Technical Paper Series,2022.

[14] Jang J H,Chiu H C,Yan W M,et al. Effects of operating conditions on the performances of individual cell and stack of PEM fuel cell [J].Journal of Power Sources,2008,180(1):476-483.

Effect of dew point temperature on the output performance and voltage consistency of PEMFC stack

Wang Congjin, Di Yage, Miao Xuelong, Li Peichao, Zheng Jinbao, Yang Zhuo, Lu Jie
(Advanced Automotive Power Research Institute, School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China)

Abstract: The output performance of PEMFC stack is mainly related to operating conditions, control strategies, and structural design, while the voltage consistency of the stack is an important indicator of the stability and reliability of the stack performance. This study conducted experimental research on an 8.5 kW proton exchange membrane fuel cell stack by constructing a water-cooled hydrogen fuel cell stack test bench. The polarization curve and output power curve were used as performance reference indicators, and the voltage fluctuation rate C_v was used as a consistency evaluation indicator to investigate the effect of different dew point temperatures of reactive gases on the output performance and voltage consistency of the stack. The results indicate that the dew point temperature has a significant impact on the performance and voltage consistency of the stack. As the dew point temperature increases, the output performance of the fuel is improved, and the performance decreases when the dew point temperature exceeds 57 ℃. Both high and low dew point temperatures can cause uneven distribution of water and heat inside the fuel cell stack, leading to an increase in voltage fluctuation rate and a decrease in PEMFC consistency.

Keywords: PEMFC stack; stack performance; dew point temperature; voltage consistency