车用陶瓷气体传感器性能影响因素探究*

齐丹　董昊旻　高宏宇　王佩玺　王金兴　商安琪　丛鑫

（中国第一汽车股份有限公司高端汽车集成与控制全国重点实验室，长春 130013）

【欢迎引用】齐丹，董昊旻，高宏宇，等．车用陶瓷气体传感器性能影响因素探究[J]．汽车文摘，2026(2)：52-56.

【Cite this paper】QI D, DONG H M, GAO H Y, et al. Exploration of Factors Affecting the Performance of Automotive Ceramic Gas Sensors[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(2): 52-56.

【摘要】为探究温度对窄域氧传感器性能的影响，通过调控加热器电阻厚度，分析其对传感器工作内阻及工作温度的影响规律。结果表明：加热器电阻厚度与传感器工作内阻呈正相关，厚度增加会使工作内阻逐渐降低，进而导致传感器工作温度升高。结合EDS、ICP成分检测及响应时间、输出电压性能测试发现，工作温度升高是传感器性能衰减的关键诱因。反之，降低加热器电阻厚度可有效提升传感器的富燃电压输出，并显著缩短富贫燃、贫富燃工况下的响应时间，实现传感器性能的优化。

关键词：气体传感器；陶瓷材料；制备工艺；传感器性能

中图分类号：U465.3　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250090

Exploration of Factors Affecting the Performance of Automotive Ceramic Gas Sensors

Qi Dan, Dong Haomin, Gao Hongyu, Wang Peixi, Wang Jinxing, Shang Anqi, Cong Xin

（State Key Laboratory of Advanced Vehicle Integration and Control，China FAW Corporation Limited, Changchun 130013）

【Abstract】To clarify the regulatory mechanism of temperature on the performance of narrow-range oxygen sensors, this paper takes the thickness of the heater resistor as the regulatory carrier, systematically investigates its influence on the operating internal resistance and operating temperature of the sensor, and explores the correlation characteristics between temperature and performance by combining EDS, ICP composition analysis and performance tests such as response time and output voltage. The results show that there is a positive correlation between the thickness of the heater resistor and the operating internal resistance of the sensor; as the resistor thickness increases, the operating internal resistance gradually decreases, which in turn causes the operating temperature of the sensor to rise. Elevated operating temperature is the core inducement leading to the performance degradation of narrow-range oxygen sensors. On the contrary, reducing the thickness of the heater resistor can optimize the sensor performance, which is specifically manifested in the significant improvement of the rich-burn voltage output and the obvious shortening of the response time under rich-lean combustion and lean-rich combustion conditions.

Key words: Gas sensors, Ceramics, Preparation technology, Sensor performance

0　引言

随着汽车工业的发展和汽车保有量持续增加，汽车尾气对大气环境造成的污染日益凸显。汽车尾气中所含碳氢化合物（HC）、氮氧化合物（NO_x）、二氧化硫（SO_2）等气体，是大气污染的重要来源。为应对上述环境问题，各国相继出台一系列日益严格的排放法规，以限制汽车尾气排放[1-3]。为此，现代汽车需借助陶瓷气体传感器实时监测尾气成分，并将检测信号反馈至发动机电子控制单元（Electronic Control Unit, ECU）完成闭环控制，从而实现整车的节能减排。

陶瓷气体传感器主要由陶瓷片芯和封装壳体构

*基金项目：2024年高介电/导电性能××材料项目（CEIEC-2024-ZM02-0052）。

成，陶瓷片芯作为陶瓷气体传感器的核心气敏元件，承担将气体浓度信号转换为电信号的关键功能。该元件需长期在高温、振动等严苛的尾气环境下工作，对材料的综合性能要求较高。稀土陶瓷材料氧化钇稳定氧化锆（Yttria-Stabilized Zirconia, YSZ）具有高熔点、高断裂韧性、高离子电导率、良好的化学稳定性等特点[4-8]，在车用陶瓷气体传感器的陶瓷片芯中得到了广泛的应用。

在材料组成方面，陶瓷片芯除了YSZ材料，还包括贵金属浆料、氧化铝绝缘材料等多种材料；在结构方面，陶瓷片芯具有多层多腔室的结构；在制备工艺方面，陶瓷片芯采用高温陶瓷共烧工艺（High-Temperature Cofired Ceramics, HTCC），通过在YSZ膜带表面使用丝网印刷技术印刷电极图形，将多层膜带经过叠片、静压，在高温下烧结而成。

窄域氧传感器是一种适用于汽油发动机系统的车用陶瓷气体传感器，广泛应用于传统燃油车、插电式混合动力汽车（Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV）等车型。该传感器通常安装在三元催化器下游，主要用于监测经过三元催化器净化后尾气中的氧气含量，并向发动机ECU提供反馈信号，协助其精确控制空燃比，同时实现对排放系统和三元催化器的故障诊断。

窄域氧传感器基于陶瓷片芯实现氧浓度检测。其工作原理是通过加热器电阻给陶瓷片芯进行加热，在高温状态下，利用YSZ材料可以传导氧离子的特点，和内外电极组成浓差电池，通过浓差电势的变化来监测氧浓度的变化。

窄域氧传感器核心性能包括富燃电压、贫燃电压、富贫响应时间、贫富响应时间，性能影响因素包括材料性能、工作温度、封装结构等。根据陶瓷片芯的工作原理可知，片芯工作温度对于传感器的核心性能具有十分重要的影响。本文通过改变加热器电阻印刷厚度，改变陶瓷片芯的工作温度，研究不同工作温度对窄域氧传感器性能的影响，并对其作用原理进行探究。

1 试验

1.1 窄域氧传感器制备

1.1.1 陶瓷片芯制备与测试

采用YSZ膜为基体材料，依次经过裁片、打孔后，进行丝网印刷。其中，加热器电阻采用铂（Pt）浆料印制。通过调节丝网印刷参数，将加热器电阻厚度设置为6个梯度，并采用激光膜厚仪测量其厚度。印刷完成的YSZ膜片经叠片、静压、热切等工序，在高温下烧结76 h，制备成窄域氧传感器陶瓷芯片，制备工艺流程如图1所示，烧结后的陶瓷片芯如图2所示。采用万用表测量陶瓷片芯加热器的冷态电阻。

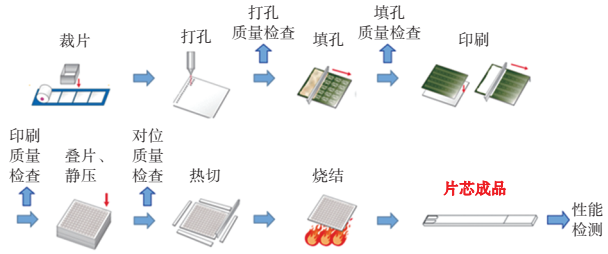


图1 陶瓷片芯制备工艺

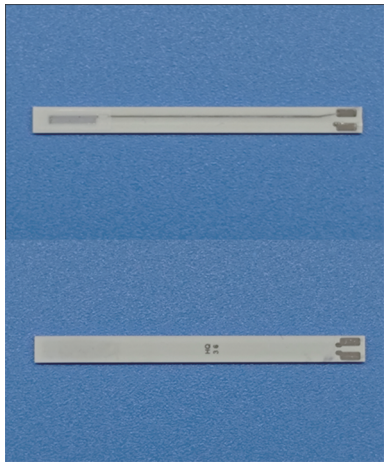


图2 窄域氧传感器陶瓷片芯

1.1.2 窄域氧传感器封装

将烧结后的陶瓷片芯进行封装，封装后的窄域氧传感器总成如图3所示，对窄域氧传感器总成进行性能测试。



图3 窄域氧传感器总成

1.2 物理表征

使用能谱仪（Energy Dispersive Spectrometer, EDS）和电感耦合等离子体光谱仪（Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, ICP-OES）对YSZ陶瓷材料进行元素分析。

1.3 窄域氧传感器性能测试

在燃烧测试台上，对窄域氧传感器总成进行性能

测试。窄域氧传感器加热电压设置为13 V，测试气体流速≥0.5 m/s。预加热2~5 min后，测量窄域氧传感器信号端引脚之间的内阻。调节窄域氧传感器加热器电压，使用红外线测温仪测量陶瓷片芯表面温度，测量窄域氧传感器信号端引脚之间的内阻。调节过量空气系数(λ)，控制尾气气氛在1.10≥λ≥0.97范围内切换，将λ=0.97时窄域氧传感器输出电压记为富燃电压，λ=1.10时窄域氧传感器输出电压记为贫燃电压。将输出电压从300 mV上升到600 mV的时间记为贫富响应时间，将输出电压从600 mV下降到300 mV的时间记为富贫响应时间。

2 结果与讨论

2.1 陶瓷片芯测试结果

加热器电阻测试结果如表1所示。由表1可知，随着加热器电阻厚度的增加，陶瓷片芯加热器冷态电阻逐渐减小。

表1 加热器电阻测试结果

序号	电阻厚度/μm	冷态电阻/Ω
1	12.741	9.8
2	13.698	9.3
3	14.593	8.8
4	15.295	8.2
5	16.112	7.7
6	17.145	7.1

2.2 物理表征结果

对传感器陶瓷片芯使用的YSZ材料进行EDS检测，检测结果如图4所示。除氧元素和锆元素外，未检测出其他元素。YSZ材料的主要成分为氧化锆，实际材料中常含有难以完全去除的杂质元素，这些杂质主要取决于原材料纯度和生产工艺[9]。

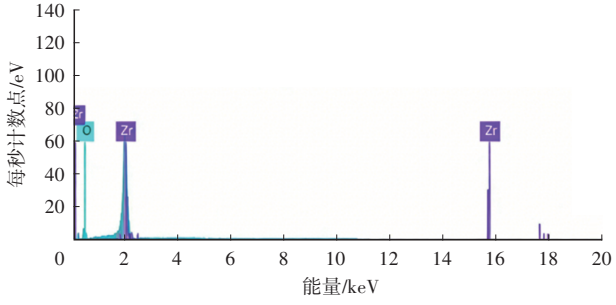


图4 EDS检测结果

进一步采用ICP-OES对YSZ材料进行检测，检测结果如表2所示。检测表明YSZ中含有Hf、Ti、Fe等杂质元素。

表2 ICP测试结果

元素	质量分数/%
Zr	45.89
Y	4.63
Hf	1.01
Fe	0.08
Ti	0.18

2.3 窄域氧传感器性能测试结果

窄域氧传感器内阻测试结果如表3所示，随着加热器电阻厚度的增加，陶瓷片芯加热器冷态电阻逐渐减小，窄域氧传感器工作时的内阻逐渐降低。

表3 内阻测试结果

序号	电阻厚度/μm	冷态电阻/Ω	内阻/Ω
1	12.741	9.8	91.13
2	13.698	9.3	85.49
3	14.593	8.8	76.52
4	15.295	8.2	63.34
5	16.112	7.7	55.68
6	17.145	7.1	41.67

将窄域氧传感器内阻和温度测试结果拟合成曲线如图5所示。由图5可知，窄域氧传感器内阻和片芯温度成反比关系，结合表3的结果可知，增加加热器电阻的厚度最终会导致窄域氧传感器工作温度升高。

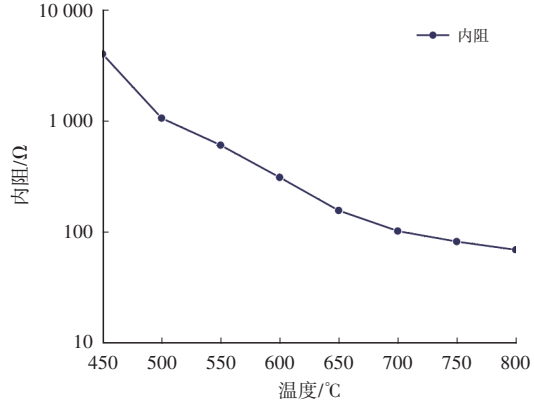


图5 内阻-温度曲线

贫燃/富燃电压测试结果如图6所示，富贫响应时间测试结果见图7，贫富响应时间测试结果见图8。通过测试结果可以看出，随着工作温度的上升，窄域氧传感器的富燃电压逐渐降低，贫燃电压并没有明显的变化趋势，富贫响应时间和贫富响应时间呈现升高的趋势。理想的窄域氧传感器应该具有较高的富燃电压和较低的贫燃电压，使窄域氧传感器在实际工作中具有较宽的电压范围，更准确地判断尾气中氧气浓度

的变化。贫燃/富燃电压测试结果表明，随着工作温度的上升窄域氧传感器的富燃电压逐渐降低，贫燃电压并无明显的变化趋势。

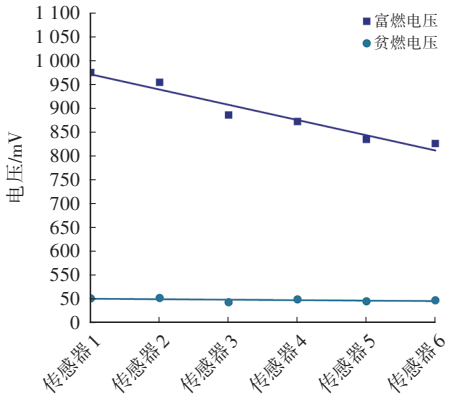


图6　贫燃/富燃电压测试结果

富贫/贫富响应时间反映了窄域氧传感器在瞬态工况下信号跟随的能力，富贫/贫富响应时间越短，窄域氧传感器在瞬态工况下的性能表现越好。富贫/贫富响应时间测试结果表明，随着工作温度的上升，窄域氧传感器的富贫/贫富响应时间逐渐升高。

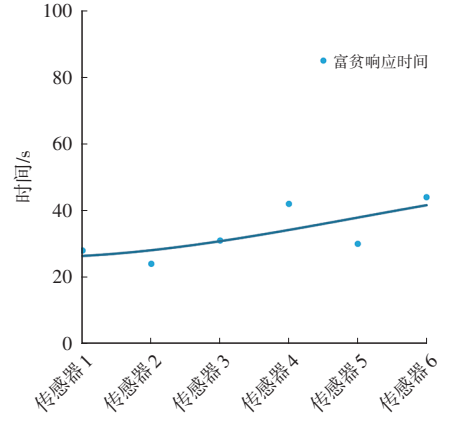


图7　富贫响应时间测试结果

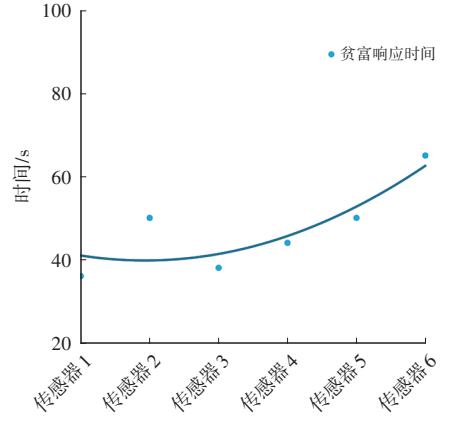


图8　贫富响应时间测试结果

综合窄域氧传感器性能测试结果可知，随着工作温度的升高，窄域氧传感器的富燃电压、富贫响应时间和贫富响应时间3项关键性能呈现下降趋势。

2.4　原理探究

窄域氧传感器的输出电压符合能斯特方程[10]，根据能斯特方程，在其他条件不变的情况下，温度越高窄域氧传感器输出的电压应该越高，然而实际的富燃电压测试结果与之相反。

$$E = \frac{RT}{ZF}\ln\left(\frac{P_r}{P_S}\right) \quad (1)$$

式中：E为输出电压；R为气体常数，8.314 J/(mol·K)；T为温度；P_r为空气中氧气分压；P_S为尾气中氧气分压。

在富燃的尾气环境下，氧气浓度处于极低的状态，陶瓷片芯表面存在极高的温度，YSZ中存在的少量杂质金属氧化物可催化水分子分解成氧气（图9）[11-13]。在极低的氧浓度下，即使少量的氧气产生也会使得P升高，该效应可能超过温度对输出电压的贡献，从而导致传感器富燃电压降低。这可能是工作温度升高引起富燃电压下降的主要原因。随着窄域氧传感器富燃电压降低，在贫燃电压不变的情况下，由窄域氧传感器的特性曲线可知，窄域氧传感器的富贫/贫富响应时间会逐渐升高。

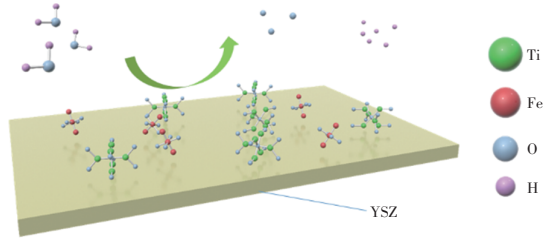


图9　反应机理

3　结论

工作温度是窄域氧传感器性能的重要影响因素。物理表征和测试结果表明，工作温度升高会导致窄域氧传感器性能降低。在制备窄域氧传感器时，通过降低加热器电阻的厚度，可以提高窄域氧传感器的富燃电压，缩短窄域氧传感器的富贫/贫富响应时间，这不仅可以使陶瓷片芯成本降低，对提升窄域氧传感器的实际应用性能也具有重要意义。

参　考　文　献

[1] 朱旭，谢光远，杨开武，等. 闭腔型氧泵测氧芯片结构参数对特征时间t_(d)的影响研究[J]. 传感技术学报，2024，37(7)：1120-1125.

[2] 孙东睿，高宏宇，王金兴，等. 车用氧传感器失效案例分析及微裂纹检测方法研究[J]. 汽车工艺与材料，2024(5)：64-67.

[3] 常包虎，姚辉，刘果莹，等. 轻型车蒸发和加油污染物排放法规解析[J]. Advances in Environmental Protection,

2025, 15(1): 28-37.
[4] 钟宛余, 杨淑玲, 琚裕强. 氧化锆氧传感器特性及偏移研究[J]. 电子产品世界, 2023, 30(5): 57-61.
[5] 曾佳, 黄海琴, 邹杰, 等. 一种基于高温宽域氧传感器湿度测量工作机理的研究[J]. 传感技术学报, 2021, 34(6): 742-748.
[6] 章晓娟, 周坤, 谢建军, 等. 基于宽域氧传感器的空燃比分析仪设计与实现[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(12): 80-83.
[7] 张帆, 谢建军, 刘萍, 等. 基于广域氧传感器的λ分析仪设计[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(2): 61-64.
[8] 马可贞, 张靖松. 可用于氧气传感器的新型高离子电导YSZ薄膜制备方法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2024, 61(6): 24-30.
[9] 陈德平, 左萍, 许立宪, 等. ICP-AES测定氧化锆中杂质元素含量的研究[J]. 检验检疫科学, 2008, 18(5): 36-38.
[10] 邹杰. 致密扩散障型氧传感器的基础[D]. 宁波: 宁波大学, 2025.
[11] ABANADES S, FLAMANT G. Thermochemical Hydrogen Production from a Two-Step Solar-Driven Water-Splitting Cycle Based on Cerium Oxides[J]. Solar Energy, 2006, 80(12): 1611-1623.
[12] KODAMA T, KONDOH Y, YAMAMOTO R, et al. Thermochemical Hydrogen Production by A Redox System of ZrO2-Supported Co(II)-Ferrite[J]. Solar Energy, 2005, 78(5): 623-631.
[13] WANG C, ZINKEVICH M, ALDINGER F. On the Thermodynamic Modeling of the Zr-O System[J]. Calphad-Computer Coupling of Phase Diagrams & Thermochemistry, 2004, 28(3): 281-292.

（责任编辑　**明慧**）

《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊，为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库（CSCD）来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊（A）、Scopus数据库收录期刊、俄罗斯《文摘杂志》（AJ）收录期刊、日本科学技术振兴机构数据库入选期刊、EBSCO学术数据库收录期刊、欧洲学术出版中心（EuroPub）数据库收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主，并兼有理论研究内容，是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的指引下，把握《节能与新能源汽车技术路线图》和“低碳化、信息化、智能化”的汽车技术主流发展趋势，努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域，新能源汽车和互联智能汽车技术领域，大力吸收优质稿源，为广大科研和工程技术人员服务，为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿，反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求：

1. 文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内；

2. 请按科技论文要求撰写文章摘要，摘要中文字数控制在180字左右；

3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献，且在文中应标注文献引用处；

4. 文章主要作者应提供其简介，包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等；

5. 来稿的保密审查工作由作者单位负责，确保署名无争议，文责自负；

6. 请勿一稿多投；

7. 本刊使用网站投稿，请先登陆网站注册成功后投稿，详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏的“作者指南”，网址：http://qcjs.cbpt.cnki.net。

《汽车技术》编辑部