

# 《滑动轴承 气体静压轴承用多孔质材料技术规范》

## 编制说明（征求意见稿）

### 一、工作简况

#### 1 任务来源

本项目是根据中国机械工业联合会“关于印发 2024 年第一批中国机械工业联合会团体标准制修订计划的通知”（机械标〔2024〕55 号）进行制定，计划编号 20240103，项目名称“滑动轴承 气体静压轴承用多孔质材料技术规范”，本标准由中国机械工业联合会提出并归口。主要起草单位：浙江长盛滑动轴承股份有限公司、中机生产力促进中心有限公司、湖南大学、中国工程物理研究院机械制造工艺研究所、洛阳轴承研究所有限公司、浙江欧拉动力科技有限公司等，计划应完成时间 2025 年 7 月。

本项目所属国家重点研发计划《高速精密滑动轴承产业国家质量基础设施关键技术体系研究与应用示范》项目的子课题 1“高速精密滑动轴承复合材料性能评价技术和标准研究”课题（课题编号 2021YFF0603001），重点围绕高速精密气体静压轴承用多孔质材料技术规范及其试验方法展开。

#### 2 主要工作过程

**起草（草案、论证）阶段：**计划下达前，2023 年 8 月 15 日标委会组织各起草单位成立了“滑动轴承 气体静压轴承用多孔质材料技术规范”起草工作组，由浙江长盛滑动轴承股份有限公司担任主要起草工作，确定了工作方案，提出了进度安排。起草工作组收集了国内外气体静压轴承用多孔质材料的技术资料和相关文献，对这些资料进行了认真仔细的分析和研究，在此基础上，确定了标准的起草原则。经过大量的研究分析、资料查证工作，结合实际应用经验，全面地总结和归纳，于 2023 年 9 月提出了《滑动轴承 气体静压轴承用多孔质材料技术规范》标准草案初稿，经 2023 年 11 月 9 日召开“高速精密滑动轴承产业国家质量基础设施关键技术体系研究与应用示范”项目推进会对《滑动轴承 气体静压轴承用多孔质材料技术规范》进行专题讨论，组织专家对标准中的主要内容进行多次研讨和认真修改。2024 年 3 月 7 日标准计划下达后，考虑到标准的适用性和实施效果，以指导工程技术人员合理设计、选用多孔质轴承材料，从而提高此类轴承产品的市场应用活力，故对标准内容进行相应调整。①增加引言内容；②增加对产品性能影响较大的石墨材料技术指标，规定石墨的肖氏硬度 $\geq 50$  HS，石墨的密度为  $1.70\text{g/cm}^3 \sim 1.77\text{g/cm}^3$ ，石墨的抗折强度 $\geq 40\text{MPa}$ ；③根据行业通用术语及解释，将“孔隙率”改为更为规范的“显气孔率”；④通过试验验证及资料查阅删去对性能影响不大的内部空隙尺寸要求；⑤圆柱形试样夹具及管状试样夹具图示删去气嘴；⑥标准内容进行编辑性修改。在 2024 年 4 月至 6 月的标准讨论稿审查中，对专家提出的修改意见和建议进行了认真修改：①完善试验工装安装要求，推荐粘接部位面积小于石墨接触面积的 50%，防止胶水过多导致试样表面微孔堵塞；②增加圆柱形试样工装及管状试样工装的

剖面图。③明确同一试样测试次数及渗透率结果对试样数量的要求。于 2024 年 7 月 2 日形成标准征求意见稿及编制说明。

**征求意见阶段：**起草工作组于2024年8月6日在浙江嘉善召开标准征求意见会议，组织相关利益方和领域专家对标准中的主要内容进行研讨，征求了专家组的意见形成了意见汇总表，并与起草单位专家多次研讨，最终全部采纳这些意见，并对标准征求意见稿进行了补充和修改。同时，上报中国机械工业联合会公开征求意见。

**审查阶段：**

**报批阶段：**

### 3 主要参加单位和工作组成员及其所做的工作等

本文件由浙江长盛滑动轴承股份有限公司、中机生产力促进中心有限公司、浙江欧拉动力科技有限公司、湖南大学、洛阳轴承研究所有限公司、中国工程物理研究院机械制造工艺研究所共同负责起草。

本标准主要起草人：李文俊、钱非非、樊学峰、黄刚、刘瑞璨、高奋武、王冬燕、崔海龙、邢纲。

所做的工作：樊学峰任起草工作组组长，全面协调标准起草工作。李文俊负责标准架构以及标准参数的确定。高奋武、崔海龙、邢纲主要负责标准内容和技术审核工作。钱非非、王冬燕主要负责标准文本的制定、编制意见汇总处理和标准编制说明的编写等工作。黄刚、刘瑞璨负责收集、分析国内外相关技术文献和资料，结合实际应用经验进行归纳、总结。

## 二、标准编制原则和主要内容

### 1. 标准编制的原则

本文件在修订工作中遵循“面向市场、服务产业、自主制定、适时推出、及时修订、不断完善”的原则，标准制定与技术创新、试验验证、产业推进、应用推广相结合，统筹推进。

本文件在结构编写和内容编排等方面依据 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》。在制定本标准时，坚持适用性和有效性为准则，综合考虑生产企业的能力和用户的利益，寻求最大的经济、社会效益，充分体现了标准在技术上的先进性和技术上的合理性，提高标准贯彻实施的实用性和可操作性。

### 2. 标准主要内容

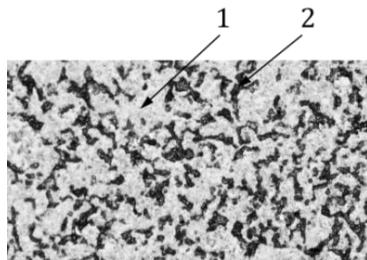
本文件共分 6 章，即范围、规范性引用文件、术语和定义、符号、结构特点、技术要求、试验方法、试验报告。

(1) 范围：本文件规定了气体静压轴承用多孔质材料的渗透率、显气孔率、肖氏硬度、体积密度、抗折强度的技术要求。本文件适用于气体静压轴承用多孔质材料的渗透率、显气孔率、肖氏硬度、体积密度、抗折强度的检测。

(2) 规范性引用文件：列出了滑动轴承及多孔质材料术语的规范性引用文件，并给出了体积密度、显气孔率、肖氏硬度的试验方法执行的国家标准。

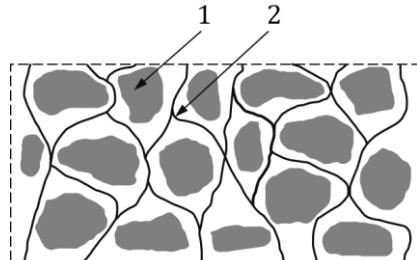
(3) 术语和定义：对本文件中适用的 GB/T 2889.1、GB/T 8718 标准进行了引用。

(4) 结构特点：气体静压轴承的多孔质材料内部的孔隙特征直接决定了多孔质材料的使用性能，因此第4章给出了材料的表面结构及截面结构特点，明确了石墨原材料的平均粒度小于10 μm。表面结构及截面结构见图表1和图表2。



标引序号说明：1——石墨基体；2——微孔

图表1 表面结构图



标引序号说明：1——石墨基体；2——微孔

图表2 截面结构示意图

(5) 技术要求：为保证产品质量，第5章明确给出了影响产品性能的关键技术要求，如多孔质石墨材料的渗透率、显气孔率、肖氏硬度、体积密度、抗折强度这五项技术要求。技术要求见表1。

图表3 多孔质材料的技术要求

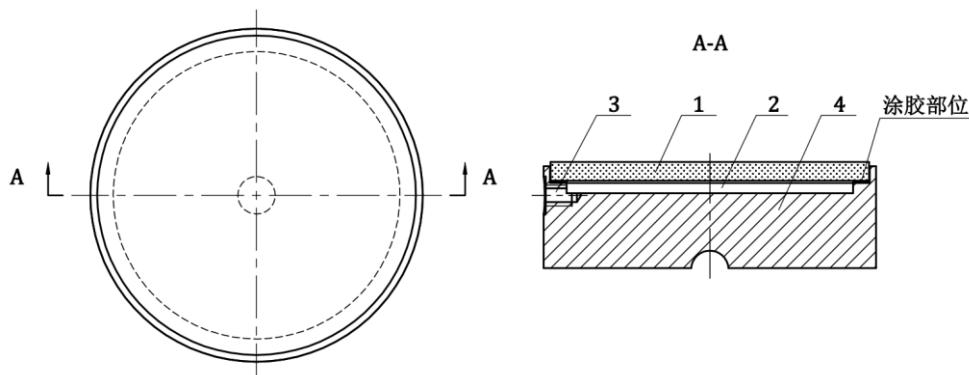
渗透率 m <sup>2</sup>	显气孔率 %	肖氏硬度 HS	体积密度/ g/cm <sup>3</sup>	抗折强度 MPa
10 <sup>-16</sup> ~10 <sup>-14</sup>	5~25	≥50	1.70~1.85	≥40

(6) 试验方法：针对5章给出的材料技术要求，第6章给出了对应的证实方法，为产品设计、材料选用、性能评价、产品检验和质量保证提供可靠的测试方法和依据。

在6.1 渗透率试验，明确了试验原理，给出了试验装置及量具、试样及试样工装、试验程序、试验数据处理等试验要求。

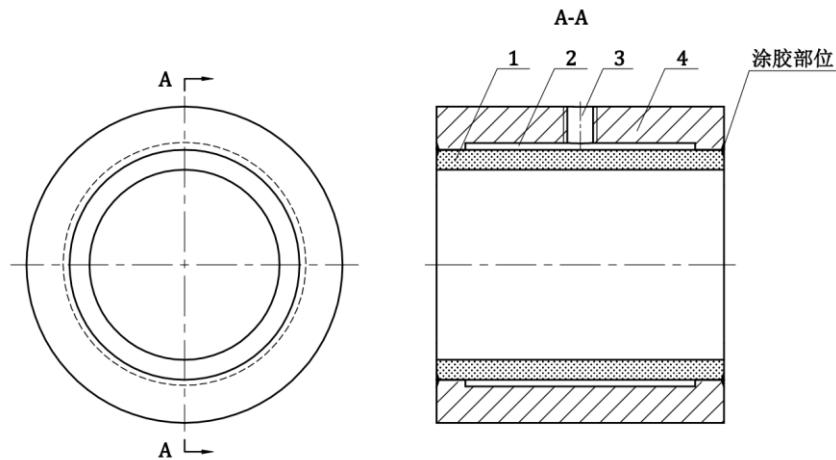
在6.1.2 明确了供气装置的组成及供气压力范围，明确了压力表示值相对误差应不大于±2%，气体质量流量计示值相对误差应不大于±1%，给出量具及分析天平精度和误差要求。

在6.1.3 试样及试样工装，给出了平板式气体静压轴承及气体静压轴套的测试试样尺寸及要求，同时规定了试样的试验通气方向应与气体静压轴承成品使用时介质渗透表面的法向一致，保证试验数据的准确率。明确了试样取样前后应采用压缩空气吹扫，保持表面的洁净度，防止孔隙堵塞。明确了试样工装安装要求，推荐粘接部位面积小于石墨接触面积的50%，防止胶水过多导致试样表面微孔堵塞，并给出试验工装示意图。



标引序号说明：1——试样；2——环形气道；3——供气孔；4——轴承壳体

图表4 圆柱形试样工装



标引序号说明：1——试样；2——环形气道；3——供气孔；4——轴承壳体

图表 5 管状试样工装

在 6.1.4 试验程序中明确了试验环境及试验方法，试验开始前试样应进行干燥处理，烘干冷却至室温后间隔 1h 的两次连续称量之差应小于 0.1%，同时要求同一试样至少读取 3 组不同压差的流量值，以确保试验数据的准确率。

在 6.1.5 试验数据处理中明确渗透率结果采用 3 个及以上试样的平均值，结果保留两位小数。规定了试样在 3 组不同压差的渗透率之差大于平均渗透率值 5% 时，试验数据无效。

在 6.1.5.3 中给出了圆柱形试样的渗透率计算公式(1)和管道内气体的密度计算公式(2)。

$$k = 2 \times \frac{\mu r_s}{A} \times \frac{Q \rho R_a T}{(P_s^2 - P_a^2)} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$\rho = \frac{P_1 + P_2}{2R_a T} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

式中：

$\mu$ ——试验温度下气体的运动粘度，25℃时  $\mu=18.5 \times 10^{-5}$ , Pa·s;

$r_s$ ——多孔质材料的厚度, m;

$A$ ——多孔质材料的横截面积, m<sup>2</sup>;

$Q$ ——流过的气体体积流量, m<sup>3</sup>/s;

$\rho$ ——气体的密度, kg/m<sup>3</sup>;

$R_a$ ——理想气体常数,  $R_a=287.14$ , J/(kg·K);

$T$ ——试验温度, 25℃时  $T=298$ , K;

$P_s$ ——相对供气压力, Pa;

$P_a$ ——相对大气压力, Pa;

$P_I$ ——绝对供气压力, Pa;

$P_2$ ——绝对大气压力, Pa;

$k$ ——多孔质材料的渗透率, m<sup>2</sup>。

在 6.1.5.4 中给出了管状试样的渗透率计算公式。当  $\frac{D-d}{2} \leq 0.1d$  时，用公式 (5) (6) 计算试样的壁厚和渗透率。

$$L = \frac{D \times (\ln r)^2}{2(r-1)} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$A = \frac{\pi \times D \times L \times \ln r}{r-1} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$r = D/d \quad \dots \quad (4)$$

$$L = \frac{D-d}{2} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$A = \frac{\pi L(D+d)}{2} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

式中：

$L$ —管状试样的壁厚, m;

$A$ —渗透面积,  $\text{m}^2$ ;

$D$ —管状试样的外径, m;

$d$ —管状试样的内径, m;

在 6.2 至 6.5 显气孔率、肖氏硬度试验、体积密度试验、抗折强度的试验方法中分别规定按 GB/T 24529 炭素材料显气孔率的测定方法、GB/T 39535 炭素材料肖氏硬度测定方法、GB/T 24528 炭素材料体积密度测定方法、GB/T 3074.1 炭素材料抗折强度测定方法的标准要求执行。

### 3. 解决的主要问题

气体静压轴承是以气体作为润滑介质、以静压支承作为承载机制的一种滑动轴承，具有摩擦小、运动精度高、寿命长、适用温度范围大和环境友好等突出优点，可用于金刚石车削机床、超高精度磨床、高精度锯床等精密与超精密加工机床，圆度测试仪、三坐标测量仪等精密测量装置，以及各类光学仪器和高端医疗设备中。

多孔质气体静压轴承作为气体静压轴承的一种，所用的多孔质材料表面均匀分布成千上万的小孔，轴承运行时，表面会产生均匀的压力分布，与小孔节流相比，供气面积大，压力场分布均匀，因而具有承载大、刚度高、结构简单、稳定性和阻尼特性好等诸多优点。多孔质材料内部的孔隙特征直接决定了多孔质材料的渗透性能，而多孔质气体静压轴承的承载力、刚度、阻尼、回转精度等静态特性直接取决于多孔质材料的渗透性能，因此多孔质材料孔隙特征与渗透性能的检测对保证轴承产品最终性能来说至关重要。

目前国内外虽然已围绕多孔质节流静压轴承形成了一定的产业规模,但对于多孔质轴承材料性能要求及检测方法并未有统一的规范,多为企业内部规定,尚未形成行业共识,对于主机配套选用有一定的局限性,易出现生产者与使用者之间技术不透明、交流成本高、技术维护困难等问题,为此,迫切需要制定相关标准,以指导工程技术人员合理设计、选用多孔质轴承材料,从而提高此类轴承产品的市场应用活力。

本标准针对以上问题，对多孔质气体静压轴承材料的渗透率、孔隙率、石墨材料性能等技术要求进行了规范，并给出了相应的检测方法，该标准有助于为我国相关行业从业人员提供较为精准的轴承材料选用，提升轴承的寿命方法的效率和可靠性，对推动我国气体静压轴承的发展意义重大。

本标准依托国家重点研发计划“高速精密滑动轴承产业国家质量基础设施关键技术体系研究与应用示范”提出，拟填补高端滑动轴承标准体系空白，促进高端滑动轴承产业发展，提升核心零部件与高端设备主机的配套性。

### 三、是否有对应的国家标准或行业标准

没有对应的国家标准或行业标准。

采用多孔质材料的气体静压轴承主要应用于高精密装备领域，属于高端装备的核心部件，中国在此领域的科研机构和企业主要有中国工程物理研究院、湖南大学、哈尔滨工业大学、浙江长盛滑动轴承有限公司等，目前正处于科技研发向工程应用过渡的重要阶段，此领域暂未有相关标准。

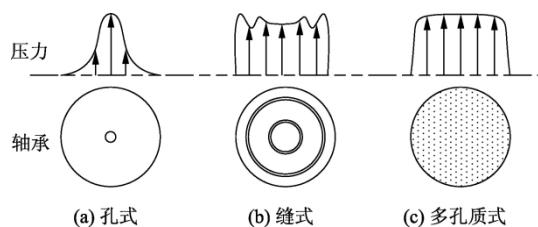
### 四、主要试验（或验证）情况

#### 1. 标准中主要技术指标确定的依据

高速精密滑动轴承因具有高转速、高精度、高刚度等技术优势，早已作为先进制造装备核心零部件，在美、德、日、英等发达国家广泛应用。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中提出“培育先进制造业集群，推动集成电路、高端数控机床、医药及医疗设备等产业创新发展”及“实施产业基础再造工程，加快补齐基础零部件产业技术基础等瓶颈短板”，高速精密滑动轴承作为精密测量装置、高端数控机床、医用 CT 机等先进制造装备的核心零部件，其技术与产业发展水平直接决定着我国高端装备的自主化水平。随着我国轴承设计理论、测试技术和制造水平的提升，部分高速精密滑动轴承产品已在先进制造设备中实现应用，但关键技术标准缺失，导致轴承质量一致性无法满足主机要求，检测装置和检测方法不统一，导致产品性能评价结果难以获得广泛认可。为解决上述问题，迫切需要建立相关标准和检测方法，完善国家质量基础设施技术体系，推动高速精密滑动轴承产业高质量发展。

空气轴承作为高速精密滑动轴承的典型代表，常应用于高精度、高转速、极端工况。根据润滑原理分为动压、静压、动静压，其中气体静压润滑是指外部气源供给加压气，内部节流器调控压力分布，实现支承和定位作用。节流器是关键零件之一，常见节流器有多孔质式、孔式、缝式等。多孔质气体静压轴承是利用多孔材料制造轴衬，供气后在多孔质轴衬表面形成承载气膜。

与小孔式、缝式节流器相比，多孔质节流器能够产生更加均匀的气膜压力，如图表 6 所示，这不仅提升了承载力，而且有助于使被支承部件保持平稳。多孔质气体静压轴承具有承载大、刚度高、结构简单、稳定性和阻尼特性好等优点。这些优势使多孔质气体静压轴承被越来越多地应用到精密加工机械、高速旋转机械以及其他特殊应用场合。



图表 6 不同节流器的气膜压力分布

研发多孔材料及确定多孔质材料技术要求是制造多孔质轴承的关键步骤之一，显著影响了轴承静动特性、工作寿命、加工工艺等。制造多孔质轴承的材料有石墨类、陶瓷类、金属类等，但采用冷等静压技术制备的碳石墨多孔材料具有相对优势，不仅加工性能良好，而且润滑及运行性能突出，已逐渐地被国内外学者和工程技术人员所研究并被成功应用于精密超精密仪器、空间技术、医疗器械及微细工程等领域。

多孔质气体静压轴承的承载力、刚度、阻尼、回转精度等特性直接取决于多孔质材料的渗透性能，多孔质材料内部的孔隙特征直接决定了多孔质材料的渗透性能，而本文件规定的多孔质材料的渗透率、显气孔率、平均粒度、体积密度和抗折强度等技术要求直接影响多孔质材料的渗透性能和承载能力，其标准化对确保多孔质气体静压轴承产品制造水平和保证产品性能起着十分重要的作用。

经调研国内科研机构及生产厂家，用于制造轴承的多孔质渗透率多在  $10^{-16} \text{ m}^2 \sim 10^{-14} \text{ m}^2$ 。如果多孔质渗透率过大，间隙内不能形成有效压差，则既失去承载力、增大供气功耗，也会增大气容量、诱发气锤现象。如果多孔质渗透率过小，甚至无透气性，静压润滑将会转变为动压。因此，多孔质渗透率对气体静压润滑性能具有显著影响。

显气孔率也是重要的多孔质参数，又叫有效孔隙率，是指在多孔材料中连通且流通的孔隙总体积与多孔材料总体积之比。显气孔率对渗透率、导电率、强度有着重要影响，一般材料制造工艺就是通过显气孔率调控其他关联物性参数，一般显气孔率需要控制在 5%~25%。

2003 年，HUANG 等研究了 NEWWAY 公司的气体静压轴承，认为测试设备及方法对显气孔率影响较大，指出 NEWWAY 公司采用的碳石墨多孔材料的显气孔率 10%-20%。2010 年，吴定柱说明了碳石墨多孔材料的制备方法并搭建了渗透率试验台，考虑多孔质流动惯性作用，采用 Darcy—Forchheimer 方程拟合试验数据，得出显气孔率 18% 下的渗透系数分别约为  $7.877 \times 10^{-15}$ ,  $2.616 \times 10^{-8} \text{ m}$ 。

当多孔材料达不到足够小的渗透率，而且显气孔率及气容量也较大时，容易出现气锤现象。为解决气锤不稳定问题，可在轴衬内表面设置渗透率更小的限制层，也可使用喷涂技术封闭部分表面孔隙，故渗透率及显气孔率控制在一定范围。

多孔质石墨气体静压轴承的承载能力是评价轴承性能的重要指标，而多孔质石墨材料的肖氏硬度、体积密度及抗折强度影响其承载能力。2017 年，冯凯等研究了分析了多孔质石墨密度、表面限制层、供气压力以及气体质量流量等因素对多孔质石墨静压气体推力轴承静态特性的影响。理论计算结果表明轴承承载力与石墨体积密度成负相关、与供气压力成正相关；气体质量流量与石墨体积密度成负相关、与供气压力成正相关。在改进轴承中体积密度为  $1.70 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.73 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.75 \text{ g/cm}^3$  的三种多孔质轴承的渗透率分别对应为  $7 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ,  $7 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ,  $7 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ , 1 气膜厚度均为  $10 \mu \text{m}$ 。

本标准的制定，符合高速精密滑动轴承产业化发展需求，并将填补气体静压轴承类标准的空白。本标准的制定参考 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》及 GB/T 20000《标准化工作指南》编写规则，结合国内产业发展的实际情况，制定出符合我国国情的技术规范，充分考虑标准的先进性和可操作性。

## 2. 标准起草后使用（或试用）的验证情况

标准起草工作组对国内该类产品和技术发展趋势进行了全面调研，经过大量查证并结合实际应用经验，全面总结和归纳出了产品技术指标。

### (1) 技术指标验证

本标准为新制定的团体标准，为了验证本标准技术指标的科学性及合理性，搜集国内外多家性能优良的产品样件进行了测试和验证工作，其技术指标范围与实测数据如下表所示，目前正在指标验证阶段。

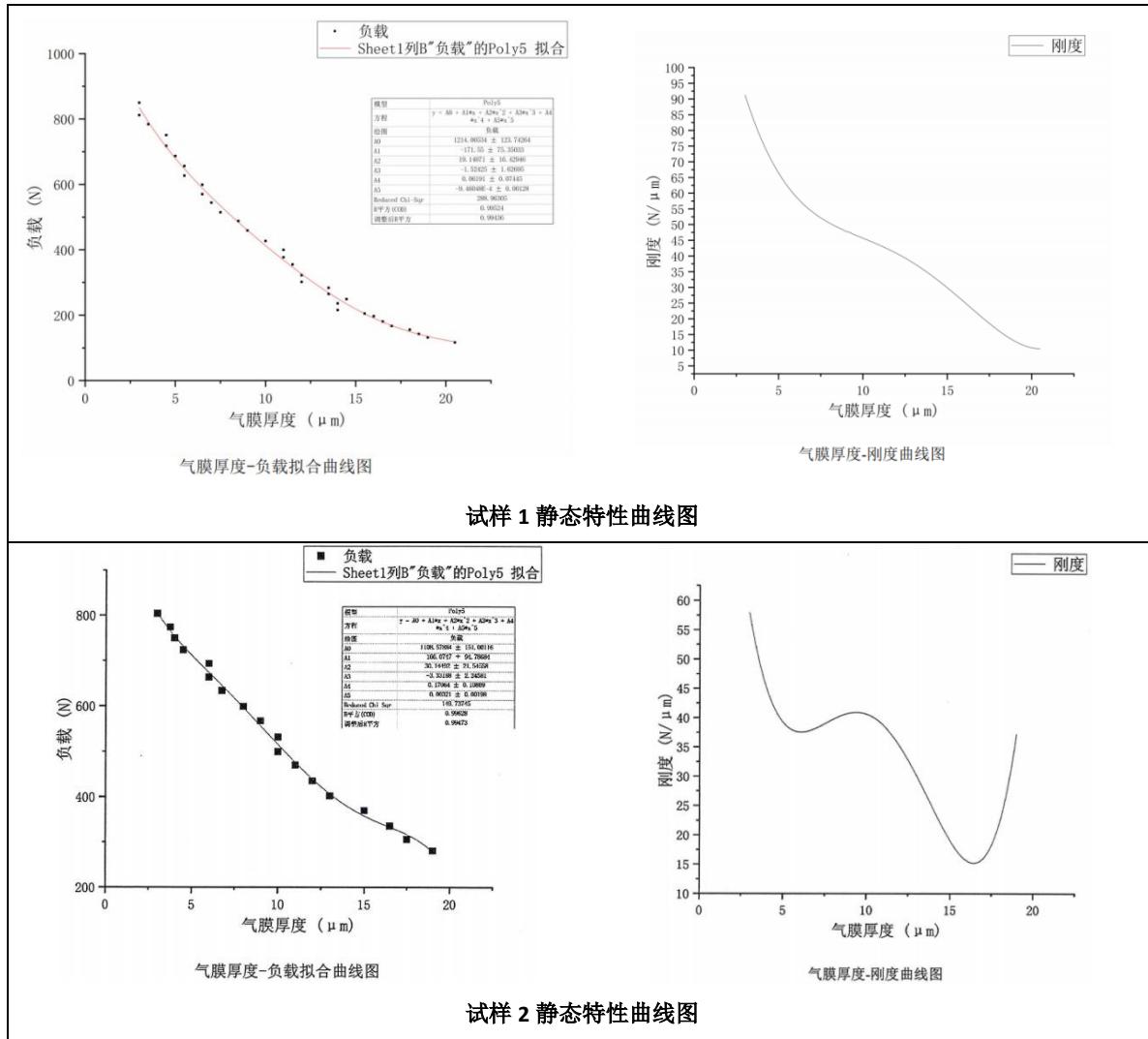
序号	检测项目	技术指标	实测值			
			长盛轴承	欧拉动力	中国工程物理研究院	NEW WAY
1	渗透率 / $\text{m}^2$	$10^{-16}$ $\sim 10^{-14}$	$7.5 \times 10^{-15} \sim 9 \times 10^{-15}$	$1.36 \times 10^{-15}$	$10^{-16} \sim 10^{-14}$	$3 \times 10^{-15} \sim 4 \times 10^{-15}$
2	显气孔率 /%	5~25	10~15	7.17		10~20
3	肖氏硬度 /HS	$\geq 50$	60	80		
4	体积密度 /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.70~1.85	1.80	1.82		
5	抗折强度 / $\text{MPa}$	$\geq 40$	54	76		

### (2) 渗透率试验方法验证

渗透率试验方法的可行性验证在由长盛轴承联合湖南大学搭建的符合标准要求的试验台架上进行，以下为按标准要求进行的渗透率测试结果对比。试样 1 为 CSB 正式产品，试样 2 为 CSB 研发过程试件。

空气轴承渗透率记录计算表格														
试样 1														
序号	产品编号	尺寸 (mm)	运动粘度 $\mu$ ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	多孔质厚度 $r_s$ (m)	多孔质横截面积 $A$ ( $\text{m}^2$ )	气体体积流量 $Q$ (SLPM)	供气压力 $P_s$ (Pa)	大气压力 $P_a$ (Pa)	理想气体常数 $R_a$ ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )	实验温度 $T$ (K)	气体密度 $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	多孔质渗透率 $k$ ( $\text{m}^2$ )	渗透率平均值 ( $\text{m}^2$ )	备注
1	试样 1	40*80	1.85E-05	4.50E-03	2.96E-03	3.153	2.00E+05	1.01E+05	287	298	2.350174216	7.37987E-15	8.87607E-15	
2	试样 1	40*80	1.85E-05	4.50E-03	2.96E-03	4.382	2.50E+05	1.01E+05	287	298	2.64249468	8.20516E-15		
3	试样 1	40*80	1.85E-05	4.50E-03	2.96E-03	5.77	3.00E+05	1.01E+05	287	298	2.934815144	9.00346E-15		
4	试样 1	40*80	1.85E-05	4.50E-03	2.96E-03	7.216	3.50E+05	1.01E+05	287	298	3.227123916	9.65124E-15		
5	试样 1	40*80	1.85E-05	4.50E-03	2.96E-03	8.665	4.00E+05	1.01E+05	287	298	3.519432687	1.01406E-14		
试样 2														
序号	产品编号	尺寸 (mm)	运动粘度 $\mu$ ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	多孔质厚度 $r_s$ (m)	多孔质横截面积 $A$ ( $\text{m}^2$ )	气体体积流量 $Q$ (SLPM)	供气压力 $P_s$ (Pa)	大气压力 $P_a$ (Pa)	理想气体常数 $R_a$ ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )	实验温度 $T$ (K)	气体密度 $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	多孔质渗透率 $k$ ( $\text{m}^2$ )	渗透率平均值 ( $\text{m}^2$ )	备注
1	试样 2	40*80	1.85E-05	4.50E-03	2.96E-03	3.255	2.00E+05	1.01E+05	287	298	2.350174216	1.01581E-14	1.21346E-14	
2	试样 2	40*80	1.85E-05	4.50E-03	2.96E-03	4.833	2.50E+05	1.01E+05	287	298	2.64249468	1.13121E-14		
3	试样 2	40*80	1.85E-05	4.50E-03	2.96E-03	6.634	2.50E+05	1.01E+05	287	298	2.934815144	1.2422E-14		
4	试样 2	40*80	1.85E-05	4.50E-03	2.96E-03	8.522	3.00E+05	1.01E+05	287	298	3.227123916	1.32977E-14		

空气轴承台架检测结果						
编号	尺寸 (mm)	通气压力 (MPa)	气膜厚度 ( $\mu\text{m}$ )	载荷 (N)	气体流量 (SLPM)	刚度 (N/ $\mu\text{m}$ )
试样 1	40×80	0.41	5	680	8.8	66.4
试样 2	40×80	0.41	5	712	12.5	39.2
NEW WAY	40×80	0.41	5	666	1.89~3.21	58



通过以上试样的渗透率测试，及与 NEW WAY 对标产品的静态特性对比可知，试样 2 在无负载情况下气流流量较大，计算出的多孔质渗透率较大。同时静态力学性能验证结果显示，相同气膜下试样 2 负载能力比对标产品高，刚度要低，且在较大大气膜厚度下有一定的气锤振动现象，符合渗透率过大的理论状态。而试样 1 与 NEW WAY 对标产品性能满足要求。故需降低试样 2 的多孔质材料的渗透率或在表面添加限制层，以满足轴承性能要求。

### (3) 渗透率数据有效性验证

渗透率计算示例：试样尺寸  $\Phi 36.7 \times 4.5\text{mm}$

$$k = 2 \times \frac{\mu r_s}{A} \times \frac{Q \rho R_a T}{(P_s^2 - P_a^2)} \quad \dots \quad (1)$$

式中：

$\mu$ ——试验温度下气体的运动粘度， $25^\circ\text{C}$ 时  $\mu=18.5 \times 10^{-5}$ ,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;

$r_s$ ——多孔质材料的厚度，示例式样厚度  $4.5 \times 10^{-3}\text{m}$ ;

$A$ ——多孔质材料的横截面积， $1.057 \times 10^{-3}\text{m}^2$ ;

$Q$ ——流过的气体体积流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\rho$ ——气体的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；对于管道内气体密度  $\rho = \frac{P_1 + P_2}{2R_a T}$

$R_a$ ——理想气体常数， $R_a=287.14$ ,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;

$T$ ——试验温度, 25℃时 $T=298$ , K;

$P_s$ ——相对供气压力, Pa;

$P_a$ ——相对大气压力, 0Pa;

$P_I$ ——绝对供气压力,  $P_s+P_2$ Pa;

$P_2$ ——绝对大气压力,  $1.01 \times 10^5$ Pa;

$k$ ——多孔质材料的渗透率,  $m^2$ 。

相对供气压力 $P_s$ /Pa	气体流量 $Q$ /slpm	气体密度 $\rho$ /kg/m <sup>3</sup>	渗透率 $k$ /m <sup>2</sup>
$2 \times 10^5$	0.685	2.358	$9.04 \times 10^{-15}$
$3 \times 10^5$	1.219	2.945	$8.93 \times 10^{-15}$
$4 \times 10^5$	1.835	3.531	$9.06 \times 10^{-15}$

渗透率之差=  $(9.06 \times 10^{-15} - 8.93 \times 10^{-15}) / ((9.04 \times 10^{-15} + 8.93 \times 10^{-15} + 9.06 \times 10^{-15}) / 3)$   
 $\times 100\% = 1.4\% < 10\%$ , 数据有效。

综上可知, 本标准渗透率试验及数据处理具有一定可操作性, 渗透率测试结果数据可靠, 该方法可适用于各类气体静压轴承的渗透率检测。

## 五、标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利问题。

## 六、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

高速精密滑动轴承作为我国高端装备“卡脖子”技术之一, 是先进制造业的重要组成部分。气体静压轴承是利用高压气体作为润滑介质的滑动轴承, 在静止状态下可以建立承载膜, 保证在启动阶段摩擦副不直接接触, 具有较高的旋转精度。所以, 气体静压轴承在高精密及超高精密装备领域应用广泛, 如圆度仪、三坐标、超精密加工机床等。

气体静压轴承用多孔质材料技术要求决定了多孔质气体静压轴承产品的关键性能, 其标准化对确保多孔质气体静压轴承产品制造水平和保证产品性能起着十分重要的作用。本标准对多孔质气体静压轴承材料的渗透率、显气孔率等技术要求进行了规范, 并给出了相应的检测方法, 该标准有助于为我国相关行业从业人员提供较为精准的轴承材料选用, 提升轴承的寿命方法的效率和可靠性。

该标准产品市场长期被国外品牌占据, 国内的相关高端需求涉及诸多高精密应用行业, 本标准的制定和实施可以为高速精密滑动轴承产业发展提供强有力的技术支撑, 同时为国内多孔质气体静压轴承生产商和使用者提供相应的产品设计指导, 全面提升该领域国内产品的竞争力, 真正开创了国产高速精密多孔质气体静压轴承的先例, 填补该类产品的标准空白, 对推动我国气体静压轴承的发展意义重大。

本标准依托国家重点研发计划“高速精密滑动轴承产业国家质量基础设施关键技术体系研究与应用示范”提出, 拟填补高端滑动轴承标准体系空白, 促进高端滑动轴承产业发展, 提升核心零部件与高端设备主机的配套性。

## 七、采用国际标准和国外先进标准情况

本标准没有采用国际标准。

采用多孔质材料的气体静压轴承主要应用于高精密装备领域，属于高端装备的核心部件，以美国、德国、日本等发达国家为首的国际龙头企业已将多孔质气体静压轴承产品规模化应用于三坐标、圆度仪等高精密装备领域，如美国的 NEW WAY 公司，德国的 AEROLAS air bearing 公司、日本的 Oiles 公司，作为核心零部件的轴承产品及相应材料为各公司的技术核心，本标准在制定过程中未查到同类国际、国外标准。

本标准技术水平为国内先进水平。

#### 八、与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本标准属于“滑动轴承”标准体系“材料、润滑剂及其性能、特性、试验方法和试验条件”小类。

本标准项目为首次制定，与现有标准、制定中标准没有矛盾，符合国家有关的现行法律、法规和强制性国家标准，本标准的制定是滑动轴承领域的进一步扩展和延伸，有助于更好地贯彻国家重点支持的高新技术领域的相关法规和政策。

#### 九、重大分歧意见的处理经过和依据

无重大分歧意见，无废止相关现行标准的建议。

#### 十、其他应予说明的事项

无其他应予说明的事项。