

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—2026

低空经济用高频低铁损无取向硅钢性能测试方法

Performance testing method for high-frequency low iron loss non-oriented silicon steel for low altitude economy applications

（征求意见稿）

XXXX-xx-xx 发布

XXXX-xx-xx 实施

中国西部开发促进会 发 布

目 次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 试样制备 2

 4.1 总则 2

 4.2 试样尺寸 2

 4.3 试样处理 2

5 测试方法 2

 5.1 磁性能测试方法 2

 5.2 机械性能测试 3

 5.3 绝缘涂层性能测试 4

 5.4 微观结构测试 4

6 数据处理与结果分析 5

 6.1 数据修约 5

 6.2 结果分析 5

 6.3 数据报告 6

7 测试报告 6

前 言

本文件按照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》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由XXX提出。

本文件由XXX归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

低空经济用高频低铁损无取向硅钢性能测试方法

1 范围

本文件规定了低空经济用高频低铁损无取向硅钢的试验制备、测试方法、测试数据处理、测试结果分析、测试报告等内容。
本文件适用于低空经济用高频低铁损无取向硅钢。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法
- GB/T 232 金属材料 弯曲试验方法
- GB/T 2792 胶粘带剥离强度的试验方法
- GB/T 3655 用爱泼斯坦方圈测量电工钢带（片）磁性能的方法
- GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定
- GB/T 10129—2019 电工钢带（片）中频磁性能测量方法
- GB/T 13789 用单片测试仪测量电工钢带（片）磁性能的方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

无取向硅钢 non-oriented silicon steel

是一种低碳硅铁合金，其晶粒在形变和退火后呈无规则取向分布，主要用于制造电动机和发电机等电气设备。

3.2

高频铁损 high-frequency magnetic loss

在400 Hz至3000 Hz频率范围内，电工钢在单位质量内由于磁滞和涡流效应产生的能量损耗，单位为瓦特每千克（W/kg）。

3.3

磁极化强度 magnetic polarization

在给定的磁场强度下，材料内部的磁矩密度，单位为特斯拉（T）。

3.4

磁导率 magnetic permeability

磁感应强度增量与相应的磁场强度增量之比，反映材料导磁能力的物理量。

3.5

叠装系数 stacking factor

叠片铁芯的有效截面积与几何截面积之比，是反映硅钢片填充密实程度的重要指标。

4 试样制备

4.1 总则

试样应取自原始卷材或片材，取样方向应垂直于轧制方向，以保证测试结果的代表性。试样制备过程中应避免机械损伤、变形和污染，尤其是避免对材料表面绝缘涂层造成破坏。

4.2 试样尺寸

4.2.1 磁性能试样：应采用单片试样，尺寸为 300 mm×30 mm，允许偏差±0.5 mm。

4.2.2 机械性能试样：应按 GB/T 228.1—2021 的规定制备，厚度取实际厚度，宽度不小于 12.5 mm。

4.2.3 绝缘涂层试样：应按 GB/T 10129—2020 的规定制备，尺寸为 50 mm×50 mm。

4.3 试样处理

4.3.1 表面处理：测试前，试样表面应保持清洁，无油污、灰尘和氧化层。对于需要进行高频铁损测试的试样，应确保表面绝缘涂层完整无损。

4.3.2 冲裁模拟试样：用于评估加工应力对磁性能影响的试样，应使用线切割或精密冲床对退火态试样进行模拟冲裁，切口宽度不大于材料厚度的 1.2 倍，冲裁后未经去应力退火直接测试。

5 测试方法

5.1 磁性能测试方法

5.1.1 高频铁损测试

5.1.1.1 爱泼斯坦方圈法

应按照 GB/T 3655 的规定进行试验。

5.1.1.2 单片测试法

5.1.1.2.1 测试原理应符合 GB/T 13789 的规定。

5.1.1.2.2 测试设备应符合以下要求：

- a) 单片磁性能测试仪，频率范围覆盖 400 Hz～3000 Hz，最大磁场强度不应小于 5000 A/m。
- b) 试样夹持装置，应确保试样与磁路紧密接触，减少空气隙影响。

5.1.1.2.3 测试步骤：

- a) 将试样放入单片测试仪磁轭中，调整试样位置使其与磁轭贴合；
- b) 设置与方法 A 相同的频率和磁通密度参数；
- c) 采用 H 线圈法测量磁场强度、感应线圈法测量磁通密度，计算铁损值；
- d) 每个条件重复测量 3 次，取平均值。

5.1.2 磁极化强度测试

5.1.2.1 测试原理

5.1.2.1.1 磁极化强度 J 是表征电工钢材料磁化能力的核心物理量，见公式（1）：

$$J = B - \mu_0 H \dots\dots\dots (1)$$

式中：

J ——磁极化强度，单位为特斯拉（T）；

B ——磁感应强度，单位为特斯拉（T）；

μ_0 ——真空磁导率，取 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ；

H ——磁场强度，单位为安培每米（A/m）。

5.1.2.1.2 应按照 GB/T 13789—2022 的规定，通过测量 400 Hz 交变磁场下的磁滞回线，获取给定磁场强度下的磁极化强度值，反映材料在强磁场下的饱和磁化能力，为低空飞行器电机的轻量化、高功率密度设计提供依据。

5.1.2.2 测试设备

应符合本文件5.1.1.2.2的要求。

5.1.2.3 测试步骤

- 5.1.2.3.1 将试样安装在测试仪夹具中。
- 5.1.2.3.2 设置测试频率为 400 Hz，磁场强度从 0 逐步增加至 5000 A/m，记录磁滞回线。
- 5.1.2.3.3 读取磁场强度 $H=5000\text{ A/m}$ 时对应的磁极化强度 B 值，按公式（1）进行计算，磁极化强度 J_{5000} 。
- 5.1.2.3.4 重复测量 3 次，取平均值作为最终结果。

5.1.2.4 数据处理

磁极化强度 J_{5000} 应不低于 1.60 T，以满足低空飞行器电机高效率、轻量化的要求。

5.1.3 磁导率测试

5.1.3.1 测试原理

磁导率是表征电工钢导磁能力的核心物理量，电工钢中常用微分磁导率表示，定义为磁感应强度增量与对应磁场强度增量之比，见公式（2）：

$$\mu = \frac{dB}{dH} \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 μ ——磁导率；
 B ——磁感应强度，单位为特斯拉（T）；
 H ——磁场强度，单位为安培每米（A/m）。

5.1.3.2 测试设备

应符合本文件5.1.1.2.2的要求。

5.1.3.3 测试步骤

- 5.1.3.3.1 将试样安装在测试仪夹具中。
- 5.1.3.3.2 设置测试频率为 400 Hz，磁场强度在 0~5000 A/m 范围内扫描，记录磁滞回线。
- 5.1.3.3.3 计算磁滞回线在初始段的斜率，得到初始磁导率 μ_i 。
- 5.1.3.3.4 计算磁滞回线在工作段的平均斜率，得到有效磁导率 μ_e 。
- 5.1.3.3.5 重复测量 3 次，取平均值作为最终结果。

5.1.3.4 数据处理

5.1.3.4.1 磁导率结果以相对磁导率（无量纲）表示，按公式（3）计算：

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 μ_r ——相对磁导率；
 μ ——实测磁导率，单位为H/m；
 μ_0 ——真空磁导率，取 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

5.1.3.4.2 低空经济用高频低铁损无取向硅钢的磁导率指标应满足以下要求：

- a) 初始相对磁导率 $\mu_{ri} \geq 5000$ ；
- b) 有效相对磁导率 $\mu_{re} \geq 1000$ 。

5.2 机械性能测试

5.2.1 拉伸试验

应按照 GB/T 228.1-2021 的规定进行试验。试样应在指定的方向（纵向或横向）上截取，并施加轴向拉力，分别测定其抗拉强度、下屈服强度和断后伸长率。

5.2.2 弯曲试验

应按照GB/T 232的规定进行试验。

5.3 绝缘涂层性能测试

5.3.1 表面绝缘电阻测试

5.3.1.1 测试原理

应按照GB/T 10129—2020的规定，在试样表面施加直流电压，测量其表面漏电流，计算表面绝缘电阻。

5.3.1.2 测试设备

5.3.1.2.1 绝缘电阻测试仪：输出直流电压为 500 V DC，测量范围不低于 $1 \times 10^9 \Omega$ ，测量精度不低于 $\pm 5\%$ ；

5.3.1.2.2 测试电极：一对平整铜电极，电极尺寸不小于试样尺寸，表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu m$ ；

5.3.1.2.3 加压装置：可对试样施加均匀压力，压力可调范围为 0 MPa~0.5 MPa，控制精度 $\pm 0.02 MPa$ 。

5.3.1.3 测试步骤

5.3.1.3.1 应将试样放置在测试平台上，确保表面清洁、干燥。

5.3.1.3.2 将一组试样整齐叠放于上下电极之间，启动加压装置，施加 0.2 MPa 的均匀压力，确保电极与试样接触良好、无间隙。

5.3.1.3.3 对试样进行短路放电处理，消除残余电荷影响，放电时间不少于 10 s。

5.3.1.3.4 设置测试参数：输出直流电压为 500 V DC，电压上升时间不超过 5 s。

5.3.1.3.5 施加电压并保持 60 s，待漏电流读数稳定后，记录漏电流值 I_s 。

5.3.1.3.6 测试完成后，对试样再次短路放电，取出试样。重复测试 3 次，取平均值作为最终结果。

5.3.1.4 数据处理

表面绝缘电阻应不低于 $100 M\Omega$ ，应确保电机铁芯在运行中不会发生短路或局部过热。

5.3.2 涂层附着性测试

5.3.2.1 测试原理

应按照GB/T 10129—2020，通过胶带粘贴和剥离，检查涂层是否被剥离或脱落。

5.3.2.2 测试设备

透明胶带（宽度 10 mm），胶带剥离力应符合GB/T 2792的规定。

5.3.2.3 测试步骤

5.3.2.3.1 将试样表面擦拭干净，无油污、灰尘。

5.3.2.3.2 将胶带粘贴在试样表面，压紧排除气泡，然后快速剥离。

5.3.2.3.3 观察试样表面是否有涂层剥离或脱落。

5.3.2.3.4 重复测试 3 次，取平均值作为最终结果。

5.3.2.4 数据处理

胶带剥离后，试样表面应无明显涂层脱落，涂层附着性应符合GB/T 10129—2020中规定的“良好”等级。

5.4 微观结构测试

5.4.1 金相组织观察

5.4.1.1 试验原理

应通过金相显微镜观察材料的晶粒大小、形状和分布，评估其微观组织是否均匀。

5.4.1.2 测试设备

金相显微镜，放大倍数不应低于500倍。

5.4.1.3 测试步骤

5.4.1.3.1 制备金相试样，经过打磨、抛光和腐蚀处理。

5.4.1.3.2 在显微镜下观察晶粒大小和形状。

5.4.1.3.3 进行晶粒度评级。

5.4.1.3.4 重复观察3次，取平均值作为最终结果。

5.4.1.4 数据处理

晶粒度等级应不低于8级，以保证材料具有良好的磁性能和机械性能。

5.4.2 织构分析

5.4.2.1 测试原理

应通过X射线衍射法测量材料的织构强度和分布，评估其磁各向异性。

5.4.2.2 测试设备

X射线衍射仪，扫描范围 $2\theta = 40^\circ \sim 60^\circ$ 。

5.4.2.3 测试步骤

5.4.2.3.1 将试样固定在样品台上，确保表面平整。

5.4.2.3.2 进行X射线衍射扫描，记录衍射峰强度。

5.4.2.3.3 计算织构系数，评估磁各向异性程度。

5.4.2.3.4 重复测量3次，取平均值作为最终结果。

5.4.2.4 数据处理

织构系数应接近1，表明材料磁各向异性较小，有利于电机的高效运行。

6 数据处理与结果分析

6.1 数据修约

所有测试数据应按照GB/T 8170的规定进行修约，修约间隔应符合以下要求：

- a) 磁性能：比总损耗、磁极化强度等参数的最终结果应保留两位有效数字；
- b) 机械性能：抗拉强度、屈服强度的最终结果应修约至10 MPa的倍数（即保留至十位数）断后伸长率的最终结果应保留一位小数；
- c) 绝缘涂层性能：应保留两位有效数字。

6.2 结果分析

6.2.1 磁性能分析

应对比不同频率下的比总损耗和磁极化强度，评估材料在高频工况下的性能表现。

6.2.2 机械性能分析

抗拉强度和伸长率应满足电机铁芯冲压和叠片工艺的要求。

6.2.3 绝缘涂层性能分析

表面绝缘电阻和涂层附着性应保证电机铁芯在运行中的安全性和可靠性。

6.3 数据报告

测试报告应包括以下内容：

- d) 试样信息（牌号、厚度、取样位置、热处理状态）；
- e) 测试设备信息（型号、编号、校准有效期）；
- f) 测试条件（频率、磁场强度、温度、湿度）；
- g) 测试结果（磁性能、机械性能、绝缘涂层性能、微观结构）；
- h) 数据修约说明；
- i) 结论（是否符合标准要求）；
- j) 测试人员、审核人员、批准人员签字及日期。

7 测试报告

测试报告内容应包括但不限于以下内容：

- a) 报告编号、测试日期、测试机构名称；
 - b) 试样基本信息（牌号、厚度、尺寸、数量）；
 - c) 测试项目及依据标准；
 - d) 测试结果及数据表；
 - e) 数据分析与结论；
 - f) 附件（原始数据记录、测试照片、图表等）。
-