

T/CMEEEA

团 体 标 准

T/CMEEEA XXXX—2025

新能源汽车用超高强度电机轴轻量化设计 规范

Specification for lightweight design of ultra-high strength motor shafts for new
energy vehicles

(征求意见稿)

2025 - XX - XX 发布

2025 - XX - XX 实施

中国机电设备工程协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 一般要求	1
4.1 材料	1
4.2 结构设计	2
4.3 热处理工艺	2
4.4 轻量化措施	3
5 技术要求	3
5.1 尺寸与公差	3
5.2 表面质量	3
6 试验方法	4
6.1 尺寸与公差	4
6.2 表面质量	4
附录 A（资料性） 缺陷磁痕分级	5
A.1 缺陷磁痕分级表见表 A.1。	5

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××××提出。

本文件由中国机电设备工程协会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

新能源汽车用超高强度电机轴轻量化设计规范

1 范围

本文件规定了新能源汽车用超高强度电机轴（以下简称“电机轴”）的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输与贮存。

本文件适用于纯电动、插电式混合动力汽车驱动电机系统中的实心或空心结构电机轴。

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 1800.2-2020 产品几何技术规范（GPS） 线性尺寸公差ISO代号体系 第2部分：标准公差带代号和孔、轴的极限偏差表

GB/T 3077 合金结构钢

GB/T 9286-2021 色漆和清漆 划格试验

GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验

GB/T 18842-2008 圆锥直齿渐开线花键

TB/T 1987 机车车辆轮对滚动轴承磁粉探伤方法

TB/T 2494.2 轨道车车轴探伤方法 第2部分：在役车轴超声波探伤

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

空心化结构 hollow structure

通过轴体内部掏空形成空腔，减少材料用量并优化应力分布的结构形式。

3.2

拓扑优化 topological optimization

基于有限元分析（FEA），在给定载荷和边界条件下，通过算法优化材料分布，实现“按需分配材料”的结构设计方法。

4 一般要求

4.1 材料

4.1.1 钢制材料

电机轴宜优先选用表1规定的高强度合金钢，其化学成分应符合GB/T 3077的要求，芯部硬度检测应在1/2直径处进行。

表1 合金钢牌号

序号	I	II	III	IV	V
牌号	20CrNiMoH	42CrMoH	30CrMnSiNi2A	20CrMoTi	42CrMo

4.1.2 复合材料

对于减重要求不低于30%的场景，可采用碳纤维增强复合材料（CFRP），性能应符合下列规定：

- a) 密度不应大于 1.8 g/cm³；
- b) 拉伸强度不应小于 2500 MPa；
- c) 弹性模量不应小于 180 GPa；
- d) 层间剪切强度不应小于 80 MPa。

4.2 结构设计

4.2.1 空心化设计

空心轴内径比：应根据扭矩需求计算确定，推荐范围为0.4~0.6（内径/外径），计算公式见式（1）：

$$\frac{d}{D} = \sqrt[4]{1 - \frac{T_{max}}{T_{solid}}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- d ——空心轴内径（mm）；
 D ——空心轴外径（mm）；
 T_{max} ——最大工作扭矩（N·m）；
 T_{solid} ——实心轴额定扭矩（N·m）。

注：宜采用阶梯式内孔，避免应力集中，孔壁表面粗糙度不应大于Ra1.6 μm。

4.2.2 拓扑优化

拓扑优化应符合下列规定：

- a) 轴体非关键受力区域应进行拓扑优化，采用网格划分法（单元尺寸≤2 mm）进行 FEA 仿真，优化后结构的应力集中系数不应大于 1.5；
- b) 优化区域包括：轴肩过渡处、键槽周边、非配合段。

4.2.3 减重孔设计

减重孔设计应符合下列规定：

- a) 可在轴端非受力区域可开设减重孔，孔径≤轴径的 30%，孔深≤轴长的 40%；
- b) 减重孔内壁应进行倒角处理（圆角半径≥2 mm），避免锐角导致的应力集中。

4.2.4 花键与键槽

花键与键槽应符合下列规定：

- a) 花键应采用渐开线齿形（压力角 30°），精度等级不低于 GB/T 18842-2008 中规定的 6 级；
- b) 键槽宽度公差为 H9，位置度公差≤0.02 mm（按最大实体原则），槽底圆角半径≥1 mm。

4.3 热处理工艺

4.3.1 钢制材料热处理

4.3.1.1 低碳合金钢

低碳合金钢热处理应符合下列规定：

- a) 预先热处理：正火（温度 920 °C~950 °C，保温 2 h~3 h），硬度 HB 190~220；
- b) 最终热处理：渗碳淬火（渗碳温度 900 °C~930 °C，碳势 0.8%~1.2%，淬火介质为油冷），表面硬度 HRC 58~63，有效硬化层深度 0.8~1.2 mm（按 550 HV 计算），芯部硬度 HRC 30~45。

4.3.1.2 中碳合金钢

中碳合金钢热处理应符合下列规定：

- a) 预先热处理：调质（淬火温度 840 °C~860 °C，回火温度 580 °C~620 °C），硬度 HRC 28~32；

- b) 最终热处理：感应淬火（频率 10 kHz~30 kHz，淬火温度 860 °C~900 °C），表面硬度 HRC 50~58，硬化层深度 1.5 mm~3.0 mm（按 500 HV 计算）。

4.3.2 复合材料成型工艺

碳纤维复合材料轴应采用树脂传递模塑（RTM）工艺：

- a) 纤维铺层方向：0° / ±45° / 90° 交替，0° 方向纤维占比 ≥60%；
- b) 固化温度：120 °C~140 °C，保温时间 2 h~3 h，压力 0.6 MPa~0.8 MPa；
- c) 成型后进行无损检测（超声探伤），内部缺陷面积 ≤0.5%。

4.3.3 工艺验证

热处理后应进行金相组织检验：

- a) 低碳合金钢表面组织：针状马氏体+残余奥氏体 ≤4 级。
- b) 中碳合金钢心部组织：回火索氏体 ≥90%，铁素体 ≤5%。

4.4 轻量化措施

4.4.1 材料替代

4.4.1.1 采用 CFRP 替代钢制材料时，应通过界面处理提高纤维与树脂的结合强度，界面剪切强度 ≥45 MPa。

4.4.1.2 钢制轴与 CFRP 的连接部位应设计金属嵌件，采用过盈配合（过盈量 0.02 mm~0.05 mm）。

4.4.2 结构集成

4.4.2.1 集成式设计：将轴端传感器安装座与轴体一体化锻造，减少连接件重量。

4.4.2.2 薄壁化处理：轴承配合段壁厚 ≥5 mm，非配合段壁厚 ≥3 mm（需通过 FEA 验证强度）。

4.4.3 减重效果验证

电机轴轻量化设计后，应满足：

- a) 重量较同规格实心轴降低 ≥20%；
- b) 转动惯量降低 ≥25%；
- c) 一阶固有频率 ≥500 Hz。

5 技术要求

5.1 尺寸与公差

5.1.1 关键尺寸公差

关键尺寸公差应符合下列规定：

- a) 轴承档直径公差：应采用符合 GB/T 1800.2-2020 中 h6 级公差的规定，圆度不应大于 0.005 mm，圆柱度不应大于 0.01 mm；
- b) 铁芯档直径公差：应采用 p6 级公差，表面粗糙度 Ra 不大于 0.8 μm；
- c) 轴长公差：当轴全长不大于 300 mm 时，公差为 ±0.1 mm；当轴全长大于 300 mm 时，公差为 ±0.2 mm，测量时应以轴端面为基准。

5.1.2 形位公差

形位公差应符合下列规定：

- a) 轴承档位置不大于 0.01 mm，铁芯档位置不大于 0.02 mm。测量时，轴应支撑在 V 形块上，旋转一周读取最大值；
- b) 端面垂直度：每 100 mm 长度上不大于 0.02 mm，以确保轴端与其他部件的平行度；
- c) 键槽对称度：不大于 0.03 mm，键槽宽度公差为 H9，槽底圆角半径不小于 1 mm。

5.2 表面质量

5.2.1 外观

外观应符合下列规定：

- a) 表面不应有裂纹、折叠、凹陷等缺陷，磁粉探伤（MT）结果应符合附录 A 的 I 级要求；
- b) 花键齿面不应有毛刺，齿侧表面粗糙度 $Ra\ 1.6\ \mu m$ 。

5.2.2 涂层

涂层宜复合下列规定：

- a) 为提高耐腐蚀性，可采用达克罗涂层（厚度 $5\ \mu m\sim 8\ \mu m$ ），中性盐雾试验（NSS） $\geq 500\ h$ 无红锈；
- b) 涂层附着力应符合 GB/T 9286-2021 规定的 1 级（划格法）。

6 试验方法

6.1 尺寸与公差

6.1.1 关键尺寸公差

关键尺寸公差应使用数显千分尺等工具测试。

6.1.2 形位公差

形位公差应使用百分表等工具测试。

6.2 表面质量

6.2.1 外观

试验方法应复合 TB/T 1987、TB/T 2494.2 的规定。

6.2.2 涂层

试验方法应按 GB/T 10125、GB/T 9286 的规定执行。

附 录 A
(资料性)
缺陷磁痕分级

A.1 缺陷磁痕分级表见表 A.1。

表 A.1 缺陷磁痕分级表

项目		质量等级	指标		
不考虑的最大缺陷显示迹痕, mm		I	≤ 0.3		
		II	≤ 1.0		
		III	≤ 1.5		
		IV	≤ 1.5		
缺陷显示迹痕的类型及缺陷性质	线型缺陷	裂纹	I	不允许	
			II		
			III		
			IV		
		未焊透	I	不允许	
			II		
			III		允许存在的单个缺陷显示迹痕长度 $\leq 0.16\delta$ 且 ≤ 2.5 mm 100 mm焊缝长度范围内允许存在的缺陷显示迹痕总长 ≤ 25 mm
			IV		允许存在的单个缺陷显示迹痕长度 $\leq 0.2\delta$, 且 ≤ 3.5 mm 100 mm焊缝长度范围内允许存在的缺陷显示迹痕总长 ≤ 25 mm
	夹渣或气孔	I	不允许		
		II		$\leq 0.3\delta$ 且 ≤ 4 mm 相邻两缺陷显示迹痕的间距应不小于其中较大缺陷显示迹痕长度的6倍	
		III		$\leq 0.3\delta$ 且 ≤ 10 mm 相邻两缺陷显示迹痕的间距应不小于其中较大缺陷显示迹痕长度的6倍	
		IV		$\leq 0.3\delta$ 且 ≤ 10 mm 相邻两缺陷显示迹痕的间距应不小于其中较大缺陷显示迹痕长度的6倍	
	圆形缺陷	夹渣或气孔	I	不允许	
			II		任意50 mm焊缝长度范围内允许存在显示长度 $\leq 0.15\delta$, 且 ≤ 2 mm的缺陷显示迹痕2个 缺陷显示迹痕的间距应不小于其中较大显示长度的6倍
			III		任意50mm焊缝长度范围内允许存在显示长度 $\leq 0.3\delta$ 且 ≤ 3 mm的缺陷显示迹痕2个 缺陷显示迹痕的间距应不小于其中较大显示长度的6倍
			IV		任意50mm焊缝长度范围内允许存在的显示长度 $\leq 0.4\delta$ 且 ≤ 4 mm的缺陷显示迹痕2个 缺陷显示迹痕的间距应不小于其中较大显示长度的6倍

注： δ 为焊缝母材的厚度。当焊缝两侧的母材厚度不相等时，取其中较小的度值作为 δ 。