

粘接技术在电机磁钢固定中的应用

欧阳美

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550081

【摘要】：本文针对电机磁钢固定的粘固技术，研究了新型清洗剂与新型单组份环氧胶的综合性能。新型清洗剂具备优异的净洗力，可高效清除磁钢表面杂质，且防锈性良好；新型单组份环氧胶自身粘接强度高，粘接磁钢后仍能保持可靠粘接性能，耐油等介质性能优异，同时具有较长贮存寿命。结合转子动平衡测试验证，采用该粘固技术的转子产品不平衡量符合技术指标，工艺稳定可靠，为电机磁钢粘固工艺升级提供了可行方案，具有较高工程应用与推广价值。

【关键词】：清洗；胶粘剂；粘接工艺；粘接强度

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.050

1 引言

在航空航天、工业自动化等领域快速迭代的背景下，永磁电机凭借高功率密度、高效率及宽调速范围等优势，已成为驱动系统的核心组件。磁钢作为永磁电机磁场生成的关键部件，其与基体的连接质量直接决定电机的运行稳定性、输出性能及使用寿命，精准牢固的粘接可减少磁场泄漏、降低振动噪声，而粘接失效则可能导致磁钢脱落、电机卡壳甚至设备损毁等严重后果。

磁钢粘接技术通过化学键与物理键的协同作用实现磁体与基体的牢固结合，是衔接材料特性与电机性能的关键工艺环节。随着电机向高速化、小型化、耐高温方向发展，传统粘接方案正面临多重严苛挑战，高速运转下磁钢承受的巨大离心力对胶层剪切强度提出极高要求，航空航天等场景中-40℃~150℃的宽温波动，会因磁钢与金属基体热膨胀系数差异引发界面应力集中；钕铁硼等主流磁钢的低表面能镀层进一步增加了粘接难度，而湿热、盐雾及高频振动等服役环境则持续侵蚀胶层稳定性。这些问题导致的粘接失效，已成为制约高端永磁电机可靠性提升的核心瓶颈。

鉴于此，本文针对电机磁钢粘接的核心技术痛点展开研究。系统分析表面处理质量、粘接剂性能及工艺参数对粘接强度的耦合影响，探究宽温域下胶层应力演化机制，提出兼顾强度与韧性的粘接优化方案。研究成果旨在为提升永磁电机粘接可靠性提供理论支撑与技术参考。

2 粘接基材脱脂处理

金属表面除油脱脂是粘接前的一道重要工序，常用的清洗剂有水基型和有机溶剂型清洗剂。水基清洗剂稳定性差，干燥慢，易引发金属生锈等问题。溶剂型清洗剂清洗效率高，干燥快，清洗方便。传统溶剂型清洗剂常含 ODS 类消耗臭氧层的氢氯氟烃类物质以及甲苯、甲缩醛等挥发性极强的危害人体健康的物质。

本文选择环保型溶剂复配制备的一种新型碳氢清洗剂 ES-40-1K 作为粘接基材清洗的介质，与传统溶剂型清洗剂相

比，该清洗剂主要成分为异构烷烃，清洗力强，使用方便，不含有 ODS 类物质，对人体黏膜的刺激性低、挥发性相对温和，人体且吸收后不易在体内积蓄，安全稳定性好。

2.1 混合油污制备

本文混合油污按照表 1 的配比搅拌 10min 制备而成。

表 1 混合油污配比

序号	材料	质量 (g)
1	极低温润滑油 7012	1
2	高低温润滑油 7016	1
3	宽温航空润滑油 7014	1
4	高温合成航空润滑油 4050	10
5	高温合成航空润滑油 4010	10
6	航空润滑油 7007	10
7	防锈油 4201	10

2.2 试板预处理

将 45# 钢、H62-Y 铜和 2A12-T4 铝合金制备成 Φ12mm×50mm 的圆柱体试棒，用 800 目砂纸打磨，擦拭干净后用无水乙醇浸泡 30min 除去表面脏污。

2.3 净洗力测试

净洗力 (W1) 以洗去油污质量分数表示，计算公式如下。

$$W1 = (m_1 - m_2) / (m_1 - m_0) \times 100\%$$

式中， m_0 为圆柱体试棒用无水乙醇浸泡除去表面脏污后的质量； m_1 为圆柱体试棒涂抹混合油污后的质量； m_2 为圆柱体试棒涂抹混合油污后使用清洗剂 ES-40-1K 清洗后的质量。

使用超声清洗 2 次，每次 10min，清洗测试结果见表 2。

表 2 不同金属圆柱体试棒净洗力测试

序号	金属试板	m_0/g	m_1/g	m_2/g	$W1/\%$
1	45#钢	44.368	44.375	44.368	100.0
		44.372	44.380	44.372	100.0

		44.371	44.378	44.371	100.0
2	H62-Y 铜	47.476	47.485	47.476	100.0
		47.472	47.480	47.472	100.0
		47.471	47.477	47.471	100.0
		47.471	47.477	47.471	100.0
3	2A12-T4 铝合金	15.260	15.269	15.260	100.0
		15.263	15.272	15.263	100.0
		15.258	15.264	15.258	100.0

由表 2 可知，碳氢清洗剂 ES-40-1K 净洗能力良好，在钢、铜、铝金属表面的净洗力均值达到 100%。

2.4 防锈性

将金属圆柱体试棒放置在 40°C 烘箱中干燥 0.5h，取出后冷却至室温，将试棒完全浸入到碳氢清洗剂 ES-40-1K 中，168h 后取出放置在 35°C±2°C、相对湿度 90% 的环境中，240h 取出试棒观察外观，结果见图 1。



图 1 防锈性试验前后对比

由图 1 可见，试棒表面均无锈，铜片颜色轻微变深，这是空气中的氧气氧化所致，变色范围属 1 级，属于正常情况，未见金属试棒出现变形，质量前后无变化，说明碳氢清洗剂 ES-40-1K 对金属材料相容性好，无锈蚀且不腐蚀。

3 胶粘剂性能检测验证

电机中磁钢粘接用胶粘剂需具备高剪切强度和拉伸强度，确保磁钢在振动、冲击环境下不脱落，同时应能均匀覆盖磁钢与基材表面，保证粘接密封性，本文选择单组份环氧结构胶 215M 作为胶粘剂。

3.1 215M 胶的剪切强度测试

参考标准 GB/T 7124 制备铝板拉伸剪切样件。使用 ES-40-1K 清洗铝板后静置 0.5h，清洗剂挥发完全后涂胶装配，搭接面积为 25mm×12.5mm，在 120°C 下固化 1h，实物如图 2。



图 2 拉伸剪切铝板样件

使用 WDW-10 微控电子万能试验机按照 GB/T 7124 测试粘接样件的拉伸剪切强度，测试结果如表 3。

表 3 215M 胶铝板粘接样件拉伸剪切强度

胶液	环境试验	拉伸剪切强度 (MPa)					平均值 (MPa)	
215M	未进行	25.67	25.50	25.04	25.84	25.98	25.60	
	温度储存	150°C, 稳定时间 2h 后保持 48h	27.20	27.35	27.98	28.04	28.38	27.79
		180°C, 稳定时间 2h 后保持 48h	29.66	29.31	29.91	29.65	28.98	29.50
		200°C, 稳定时间 2h 后保持 48h	28.33	29.24	28.07	28.85	28.79	28.65
		-60°C, 稳定时间 2h 后保持 48h	25.09	25.11	25.34	25.56	25.67	25.37
	温冲	低温-55°C, 高温+150°C; 高低温各 30min, 转换时间不大于 1min, 循环 20 次	25.03	25.41	25.12	25.36	25.61	25.30
	湿热	高温高湿阶段的试验温度为 60°C、湿度为 95%，低温高湿阶段的试验温度为 30°C、湿度为 95%，试验周期数为 20 个（每个试验周期为 24h）	24.33	24.17	24.68	24.93	24.74	24.57

环境试验对 215M 胶粘接强度的影响曲线见图 3。

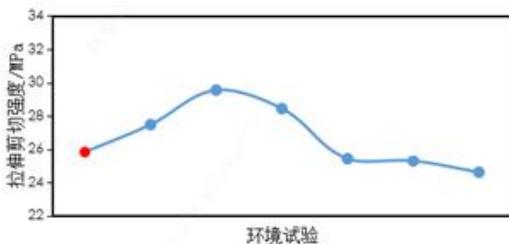


图 3 温度储存、温冲及湿热对 215M 胶粘接强度的影响

通过表 3 及图 3 得出，215M 胶具有良好的常态粘接性能以及耐高温性能。215M 胶做完高温试验后粘接强度略微上升，这是由于高温促使分子链进一步交联，形成更致密更坚固的三维网络结构，而低温、温冲及湿热则会抑制分子运动，导致强度略微下降，但仍保持较高的粘接强度。

3.2 磁钢粘接静剪切强度

磁钢材质为钕铁硼钢，尺寸为 D17.2 (M)×D10.4×30×63°，在磁钢表面分别镀镍、镀锌及电泳。使用 2Cr13 不锈钢棒制备

粘接轴（磁钢粘接端轴直径为 10.4mm），粘接轴不喷砂，通过车工保证粗糙度在 1.6μm~3.2μm。

将粘接轴放在超声波中用 ES-40-1K 清洗 10min 后置于干净工作台面晾晒 20min，磁钢表面使用等离子清洗。用 5#画笔在轴和磁钢胶接面均匀涂 215M 胶，然后将磁钢从轴顶部推入，每个轴上对称粘接两块磁钢，磁钢高度相差约 2mm，便于后期测试静剪切强度，将溢出胶液擦拭干净后在 120°C 下固化 1h，实物如图 4。



图 4 磁钢粘接实物图

（从左到右依次为镀镍磁钢、镀锌磁钢、电泳磁钢粘接样件）

使用压力机，样件一端放置在空心的支撑圆筒上，启动压力机，活塞以 0.02mm/s 的速度加力至磁钢上，记下磁钢沿轴向下移动时的峰值压力，测试结果见表 4。

表 4 磁钢粘接轴的静剪切强度

磁钢镀层	粘接轴	静剪切强度 (MPa)					平均静剪切强度 (MPa)
镀镍	不喷砂	37.53	37.42	37.15	37.29	37.03	37.28
镀锌		49.50	49.02	49.32	49.21	49.19	49.24
电泳		45.55	45.08	45.23	45.19	45.39	45.28
镀镍	喷砂	47.39	47.63	48.23	47.82	48.09	47.83

通过表 4 得出，使用环氧胶 215M 粘接带镀层的磁钢时，粘接强度为镀锌>电泳>镀镍，镀镍磁钢粘接强度最小，磁钢脱落后的表面状态如图 5。



图 5 磁钢脱落时表面状态

从图 5 可看出磁钢表面的镀层被破坏，镀层先破坏导致磁钢脱落，说明 215M 胶的内聚强度大于镀层与磁钢本体的附着

力。

3.3 耐介质性能研究

航空航天产品需抵抗润滑油、航空煤油等的化学侵蚀，胶粘剂应避免溶胀、分解或性能退化，为了评估 215M 胶在油污的情况下剪切强度是否有变化，将镀镍磁钢粘接在喷砂粘接轴上制备的样件分别浸泡于 150°C 的 4050 航空润滑油和室温航空煤油中，分别浸泡 200h 后再测试常温下的静剪切强度。测试结果见表 5。

表 5 浸泡试验后测试静剪切强度

浸泡介质	静剪切强度 (MPa)					平均静剪切强度 (MPa)
不浸泡	47.39	47.63	48.23	47.82	48.09	47.83
4050 航空润滑油	22.11	22.66	22.54	22.36	22.78	22.49
航空煤油	28.58	28.07	28.34	28.36	28.63	28.39

通过表 5 得出，215M 胶在典型介质（4050 航空润滑油和室温航空煤油）中表现出良好的耐介质性。航空煤油以非极性烃为主，与 215M 胶的化学相容性好，浸泡过程中，煤油分子渗透到胶层内部，未对 215M 胶的交联网络结构产生破坏性溶胀，反而通过应力重新分布效应使 215M 胶内部残余应力分布更均匀，界面粘接强度进一步提升。而 4050 航空润滑油含有极性基团，对 215M 胶的交联网络结构产生轻微溶胀，但由于 215M 胶本身具有较好的耐热性，溶胀破坏程度有限，因此强度虽有所下降但仍维持在较高区间。

3.4 贮存寿命评估

产品失效从根本上讲都是基本的物理/化学过程，而温度对于许多物理/化学过程来讲都是一个重要因素，因此在加速退化试验中温度常常被用作加速应力，用来加速腐蚀、电迁移、绝缘破坏等退化过程。19 世纪阿伦尼斯研究了温度应力激发类化学过程，在大量数据的基础上提出了阿伦尼斯加速模型，并在机电、电子产品的加速贮存寿命试验中得到了广泛的应用，阿伦尼斯模型如下：

$$t_L = C * e^{\frac{E_a}{kT}} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

t_L—产品平均寿命，h；

T—绝对温度，K；

C—常数；

e—2.71828；

E_a—失效机理的激活能，eV；

k—Boltzman 常数，8.617×10⁻⁵eV/K。

要计算加速寿命试验的时间，须确定阿伦尼斯模型中的激

活能 E_a 。在同一个失效模式下，激活能 E_a 和产品的工艺材料等密切相关，不同的产品的 E_a 不尽相同，范围大多在 $0.45\text{eV}\sim 1.0\text{eV}$ 之间，因此本文从保守角度考虑，选择激活能值为 0.45eV 。

加速应力的选择，应在不改变失效机理的条件下尽量增大产品的应力，使试验时间尽可能缩短。产品的库房正常贮存环境温度 T_0 为 30°C （绝对温度为 303K ），恒定应力加速试验的最高应力 T_i 设定为 180°C （绝对温度为 453K ）。根据公式（1）阿伦尼斯模型，正常贮存环境温度时产品平均寿命 $t_{L0} = C * e^{\frac{E_a}{kT_0}}$ ；在加速应力环境温度时产品平均寿命 $t_{Li} = C * e^{\frac{E_a}{kT_i}}$ ；加速

$$\text{因子 } AF_i = \frac{t_{L0}}{t_{Li}} = \frac{C * e^{\frac{E_a}{kT_0}}}{C * e^{\frac{E_a}{kT_i}}} = \exp\left\{\frac{E_a}{kT_0} - \frac{E_a}{kT_i}\right\}。$$

根据上述公式可算出加速因子为 300.96 ，因此在 30°C 下储存 30 年相当于在 180°C 下储存 36.4 天。将 6 件镀镍磁钢粘接样件置于 180°C 的烘箱中保温 36.4 天后，复测静剪切强度，结果如表 6。

表 6 加速贮存试验时间表及静剪切强度值

贮存条件	等效		等效	
	正常	加速	正常	加速
温度 ($^\circ\text{C}$)	30	180	30	180
贮存时间 (天)	10950	36.4	10950	36.4
静剪切强度 (MPa)	3.43		13.43	
	4.01		13.26	
	3.89		13.19	
	3.72		13.41	
	3.55		13.55	
	3.68		13.68	
平均静剪切强度 (MPa)	3.71 磁钢粘接样件		13.42 铝板粘接样件	

通过表 6 得出， 215M 胶 180°C 储存 36.4 天，也即等效室温储存 30 年，静剪切强度在 3MPa 以上，脱落时为磁钢碎裂，说明镀镍磁钢不能在 180°C 下长期使用时。铝板标准样件贮存 30 年后拉伸剪切强度仍保持在 13MPa ，说明 215M 胶具有较好的贮存性能。

4 产品应用

本文选择 1 台电机产品，转子上磁钢及磁轭槽表面脱脂处理均采用 ES-40-1K 进行手工擦洗，磁钢使用 215M 胶进行粘接，对转子进行动平衡测试，电机组装后进行例行试验测试，评估采用 ES-40-1K 清洗剂及 215M 胶后，产品各项性能的稳定性及可靠性。粘接后的实物如图 6。

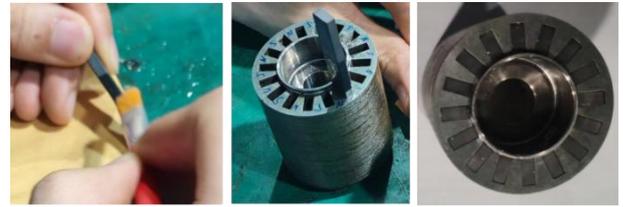


图 6 JF-0.27A 的电机产品转子磁钢粘接

4.1 转子动平衡测试

对粘接磁钢后的转子进行 3 次动平衡量测试，动平衡转速设置为 2200r/min ，动平衡胶质量配比为甲：乙= $1.9 : 2.1$ ，技术指标为不平衡量不大于 20mg ，其测量数据见表 7。

表 7 转子动平衡量测试数据

转子动平衡量测试结果		
测试数值	传动端不平衡量 (mg)	非传动端不平衡量 (mg)
	17.4	5.42
	16.3	8.13
	15.6	7.70
	17.9	8.67
	14.5	6.32
差值	3.4	3.25
均值	16.34	7.24
方差	1.4984	1.4414

通过表 7 得出，传动端和非传动端的历次动平衡测试数值均小于技术指标要求的 20mg ，完全符合不平衡量的控制标准，且数据非常稳定，方差相对很小（这个变化基本上可以认为是设备测试波动），表明磁钢粘接后的转子动平衡工艺可靠，产品质量符合预期。

5 结论

本研究聚焦磁钢固定的粘固技术，针对工件及磁钢表面脱脂处理与粘接环节的关键需求，系统探究了新型清洗剂与新型单组份环氧胶的综合性能，为磁钢粘固工艺的优化提供了有力支撑。

在新型清洗剂性能方面， ES-40-1K 展现出优异的净洗力，可高效去除工件及磁钢表面的油污，为后续粘接工序营造了洁净的界面环境；同时，该清洗剂具备良好的防锈性，能在磁钢表面形成保护性薄膜，有效抑制金属锈蚀，显著提升了磁钢表面预处理的质量与稳定性，为粘接强度的保障奠定了基础。

对于新型单组份环氧胶 215M ，其自身粘接强度表现突出，为磁钢与转子基体的可靠连接提供了核心性能支撑；在粘接磁钢后，胶层的粘接强度完全满足电机转子等工况下的力学要求，确保磁钢在高速运转、振动等复杂环境中不发生脱落；耐介质性能方面，该环氧胶具备良好的耐油（润滑介质）等特性，可适应电机内部的介质环境，保障长期使用过程中粘接性能的

稳定性；此外，其贮存寿命较长，便于生产环节的仓储管理与工艺调度，降低了因胶料失效带来的成本损耗。

结合转子动平衡测试等应用验证，采用 ES-40-1K 脱脂处理与 215M 胶粘固技术，不仅实现了磁钢的可靠固定，还保障

了转子产品的动平衡性能与长期稳定性，充分体现了技术方案
的实用性与优越性。综上，本文提出的磁钢粘固技术解决方案，
在清洁效果、粘接性能、环境适应性及生产便利性等方面均表现
优异，为电机行业磁钢粘固工艺的升级提供了可行路径，具
有较高的工程应用价值与推广前景。

参考文献：

- [1] 周锦添.永磁直流微电机磁钢高速粘接技术研究[J].微电机,2015,48(03):100-103.
- [2] 杨家明.起动电机磁钢粘接技术[J].中国胶粘剂,2000,(04):35-38.