

# 化工用磁悬浮搅拌装置应用研究

张良光<sup>1</sup> 陈阿龙<sup>2</sup>

1.温州市中伟磁传密封设备厂 浙江 温州 325000

2.欧拉姆阀门科技有限公司 浙江 温州 325000

**【摘要】**：本文对一套额定功率为15kW、设计转速是3000r/min、罐体有效容积为50L的磁悬浮搅拌装置的运行性能、应用效果进行系统的研究工作。经过对材料参数进行优化、对结构进行设计，该装置实现了径向跳动量小于0.05mm的较高机械稳定性，使得能耗、温升有所降低，在1200r/min的时候功耗为2.35kW，相较于传统机械搅拌节能8.9%，温升降低至28℃。不同介质物性的实验表明，临界悬浮转速会随着粘度、固含量的增加而升高，并且还建立了拟合度较高的经验模型（ $R^2=0.96$ ）。翼型组合桨在1600r/min的情况下传质系数达到 $0.042\text{ s}^{-1}$ 。在高粘度聚合反应当中均匀性指数提高至0.97，单体转化率达到93.8%，在催化加氢模式中气固相悬浮指数降低至0.08，气含率提高至22.5%，反应速率提高112.5%，在结晶过程中晶体粒径增大而且分布更加集中，纯度得以提高。

**【关键词】**：磁悬浮搅拌装置；机械稳定性；流场特性；混合效率；化工反应体系

DOI:10.12417/3083-5526.25.08.024

## 1 引言

传统的机械搅拌装置在化工生产进程中，常常会碰到一些关键技术难题，像是机械轴封出现泄漏情况、轴承产生摩擦进而造成污染、混合不均匀等<sup>[1]</sup>。轴承摩擦所产生的金属微粒会对高纯度产品的质量构成威胁，使得它在精细化工领域的应用受到限制。在高粘度或者高固含量的模式当中，搅拌死区的存在会让混合效率变得很低，难以满足复杂化工反应对于均匀性的严苛要求<sup>[2,3]</sup>。在这种背景下，磁悬浮搅拌技术依靠无轴封、无接触的运行特点展现出了优势，成为解决上述问题的一种可能途径。对于一套额定功率为15kW、设计转速是3000r/min、罐体有效容积为50L的磁悬浮搅拌装置，本文对其运行性能展开系统分析，结合流场可视化技术深入探究混合机理，并且在聚合、加氢、结晶这三类典型化工模式中进行性能验证。

## 2 磁悬浮搅拌装置运行特性与悬浮稳定性实验研究

### 2.1 磁悬浮搅拌装置本体结构与关键部件材料参数选定

从图1能够看出，此装置采用的是立式结构，罐体的容积为50L，选用的是316L不锈钢材料，搅拌轴跟叶轮采用的是高强度TC4钛合金，其屈服强度达到了830MPa，以此确保在最大扭矩为 $150\text{ N}\cdot\text{m}$ 的作用下有足够的机械强度、疲劳寿命。永磁体转子组件选用的是N52级钕铁硼，有着1.45T的高剩余磁感应强度、900kA/m的矫顽力，能够保证磁悬浮系统稳定地输出磁场，同时将其工作温度上限设定为120℃。内外两层密封隔离套采用的是非导磁的哈氏合金C-276，厚度是2.5mm，在承受1.6MPa设计压力的条件下，磁路损失能够控制在8%以

内。轴向磁轴承部分采用的是0.35mm厚的冷轧无取向硅钢片，叠压系数达到了0.97。整体的机械结构设计可以确保装置在3000r/min高速运行的时候，径向跳动量控制在0.05mm以下。

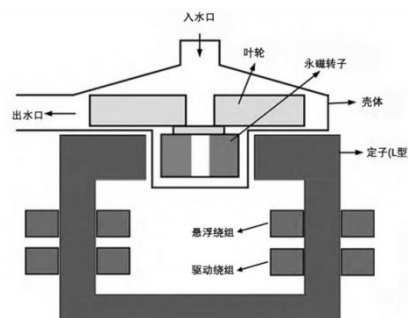


图1 磁悬浮搅拌装置图

### 2.2 磁悬浮搅拌装置与机械密封搅拌装置的功耗对比与温升特性

进行了磁悬浮搅拌装置和机械密封搅拌装置的功耗、温升对比实验，借助高精度功率分析仪来测量在不同转速（从800r/min到2400r/min）情况下的输入功率。实验得出的结果显示，磁悬浮搅拌装置在各个转速工况下都具备节能方面的优势。详细来讲，当转速是1200r/min的时候，磁悬浮装置的功耗为2.35kW，机械密封装置的功耗是2.58kW，节能大概8.9%，在2400r/min的高转速时，磁悬浮装置的功耗降低到4.82kW，机械密封装置的功耗为5.67kW，节能幅度提高到15.0%。关于温升测试，采用贴片式热电偶来监测关键部位的温度变化，结果表明L型定子线圈部位的温升只有28℃，明显低于机械密封装置轴承部位42℃的温升。

张良光（1969.8-），男，汉族，籍贯：浙江省温州市，学历：高中，单位：温州市中伟磁传密封设备厂，研究方向：机械自动化、磁力密封。

陈阿龙（1988.12-），男，汉族，籍贯：浙江省温州市，学历：本科，单位：欧拉姆阀门科技有限公司，职称：高级工程师，研究方向：机械设计，自动化。

### 3 磁悬浮搅拌装置流场特性与混合性能实验

#### 3.1 不同介质物性下的临界悬浮转速与混合时间实验研究

针对不同介质物性对磁悬浮搅拌装置临界悬浮转速、混合时间的影响展开实验。所选取的牛顿流体，其黏度范围处在 50mPa·s 至 500mPa·s 之间，而石英砂悬浮液的固含量为 10% 至 30%，粒径是 75 μm，以此确保固体颗粒在罐底的停留时间不会超过 1 秒。实验结果表明，随着介质黏度不断增加，临界悬浮转速也在明显上升，当介质黏度为 50mPa·s 的时候，临界悬浮转速是 820r/min，而当介质黏度提高到 500mPa·s 时，临界悬浮转速达到了 1450r/min，这说明高粘度介质对于搅拌动力的需求显著增强。在含固模式当中，当固含量为 30% 时，临界转速进一步升高到了 1680r/min，这反映出固体颗粒对流体阻力有着比较显著的影响。混合时间是通过电导率法来测定的，在转速为 1200r/min 的情况下，低粘度介质的混合时间为 42 秒，当黏度增加到 500mPa·s 时，混合时间延长至 105 秒。

#### 3.2 搅拌桨叶结构与转速对剪切力分布及传质系数的影响

搅拌桨叶的结构、转速，会对磁悬浮搅拌装置的剪切力分布和传质性能产生影响。从实验结果能够看出，三种桨叶结构在不同转速下，其剪切力、体积传质系数 (kLa) 展现出了差异。标准四斜叶桨在转速为 800r/min 时，平均剪切力是 5.8 Pa，当转速升高到 1600r/min 的时候，剪切力增加到 11.4 Pa，传质系数从 0.012 s<sup>-1</sup> 提高至 0.026 s<sup>-1</sup>，这说明转速升高以后，流场的剪切作用、气液传质效率都得到了增强。六直叶涡轮桨产生的剪切力比标准桨叶高很多，在 1600r/min 时达到 20.8 Pa，传质系数是 0.034 s<sup>-1</sup>，不过它的剪切力分布变异系数比较大（超过 40%），这反映出流场的均匀性不太好。翼型组合桨经过针对磁悬浮装置的优化设计，其剪切力处于两者之间，在 1600r/min 时是 18.2 Pa，但其剪切力分布变异系数是最低的（约 20%），在传质系数方面，翼型组合桨在 1600r/min 时达到了最高的 0.042 s<sup>-1</sup>。

表 1 搅拌桨叶结构与转速对剪切力分布及传质系数的影响

搅拌桨类型	转速 (r/min)	平均剪切力 (Pa)	剪切力分布变异系数 (%)	体积传质系数 kLa (s <sup>-1</sup> )
标准四斜叶桨	800	5.8	28.5	0.012
标准四斜叶桨	1200	8.2	29.2	0.019
标准四斜叶桨	1600	11.4	30.1	0.026
六直叶涡轮桨	800	9.2	42.3	0.014
六直叶涡轮桨	1200	14.5	44.8	0.024
六直叶涡轮桨	1600	20.8	46.5	0.034
翼型组合桨	800	7.5	18.2	0.015

翼型组合桨	1200	12.8	19.5	0.028
翼型组合桨	1600	18.2	20.3	0.042

### 4 磁悬浮搅拌装置在典型化工体系中的应用性能表征

#### 4.1 在高粘度聚合反应体系中的均匀性指数与聚合转化率分析

以丙烯酸丁酯-苯乙烯共聚反应当作模型，此反应模式开始的黏度大概是 15mPa·s，反应时黏度逐渐上升，到中期是 650mPa·s，后期到了 950mPa·s，这体现出模式流动性下降，传统机械搅拌在这种状况下容易出现混合不均匀的情况。测定反应釜上、中、下三个取样点的聚合物分子量分布系数 (PDI)，磁悬浮搅拌模式反应 2 小时后呈现出较均匀分布，三层 PDI 分别是 1.68、1.65、1.63，均匀性指数为 0.97，比传统机械搅拌模式的 0.85 高很多，磁悬浮搅拌模式 4 小时达到 93.8% 的单体转化率，比传统机械搅拌的 89.2% 要好得多。

#### 4.2 在催化加氢体系中的固相悬浮状态与气含率测定

在此次实验中所运用的是 50L 体积的不锈钢高压反应釜，里面所使用的催化剂为 Pd/C，将固含率设为 5%，反应温度规定为 100℃，氢气压力是 1.2MPa，通气速率是 0.6vvm。借助光纤浓度探头去测定反应釜内不同高度处催化剂的浓度，并且据此来计算固相悬浮指数 SI。实验结果显示，当搅拌转速从 800r/min 提高至 1600r/min 时，SI 由 0.24 下降到 0.08，这意味着催化剂颗粒达到了更为均匀的悬浮状况。在这个过程当中，采用压差法测得的全釜平均气含率也从 14.2% 提高到 22.5%，气液传质条件得以改善。表观反应速率常数也从 0.032 min<sup>-1</sup> 提高至 0.068 min<sup>-1</sup>，提高幅度是 112.5%。

表 2 磁悬浮搅拌在不同转速下的固相悬浮与气液传质性能参数

转速 (r/min)	固相悬浮指数 (SI)	全釜平均气含率 (%)	表观反应速率常数 k (min <sup>-1</sup> )
800	0.24	14.2	0.032
1200	0.15	18.6	0.051
1600	0.08	22.5	0.068

#### 4.3 在精细化工结晶过程中的晶体粒度分布与形貌调控效果

拿 L-谷氨酸冷却结晶当作例子，选用磁悬浮搅拌模式，在降温速率是 0.4℃/min、搅拌转速 800r/min 的状况下，最终产品的体积平均粒径达到了 312 μm，这可比传统机械搅拌模式的 198 μm 大很多，从传统模式的 1.45 缩小到了 1.08，这表明晶体粒径分布变得更集中了。粒度累积分布进一步表明，磁悬浮搅拌模式的 D10、D50、D90 分别是 125 μm、285 μm 和 485 μm，都比传统模式高不少，这说明二次成核被有效抑制住了，

促使晶体能够均匀生长。磁悬浮搅拌条件下晶体呈现出来规则的棱柱状，晶面完整又光滑，长径比大概是 2.8:1，而传统搅拌制备的晶体表面很粗糙，有大量碎片和裂纹。热重分析结果表明，磁悬浮搅拌产品的溶剂残留量降到了 0.12%，明显低于传统模式的 0.28%。

## 5 总结

本文聚焦于化工用磁悬浮搅拌装置展开相关研究内容，对

其运行性能、流场特性、在典型化工模式中的应用效果予以探讨。当该装置处于高转速状态的时候，其径向跳动量相较于机械搅拌标准而言要低不少，这体现出了良好的机械稳定性、抗扰动能力，取得了节能、控制温升的效果。借助 PIV 技术进行流场分析可以表明，在高转速状况下轴向流速、湍流强度有了一定程度的提高，验证了翼型组合桨在传质效率和剪切均匀性方面具有比较优越的性能，相比传统桨型设计更为突出。

## 参考文献：

- [1] 孙永伟. 基于 CFD 的化工反应器流场优化研究 [J]. 化工管理, 2026, (03): 98-101.
- [2] 陈鸿福,余锋,罗道盛. 化工特殊工况的磁悬浮冷水机组能效优化与实证分析 [J]. 化工生产与技术, 2025, 31 (03): 45-48+10.
- [3] 龚峻松. 三叶式后掠桨用于悬浮聚合时的搅拌特性和设计原则 [J]. 舰船科学技术, 2006, (02): 64-66+71.