

1 市场现状

对于那些购买稀土氧化物、稀土金属或产品中含有稀土元素的公司来说，2011年是具有挑战性的一年，这次空前的、无法预见的稀土元素价格增长直接导致了贯穿多种行业供应链的巨大成本增长。自2011年伊始，在稀土元素价格达到顶峰时，钕和镨元素的价格增长了4.6倍。甚至某些充裕的稀土元素，如铈和镧元素，也没能幸免，价格分别增长了4倍和3倍（见图1）。

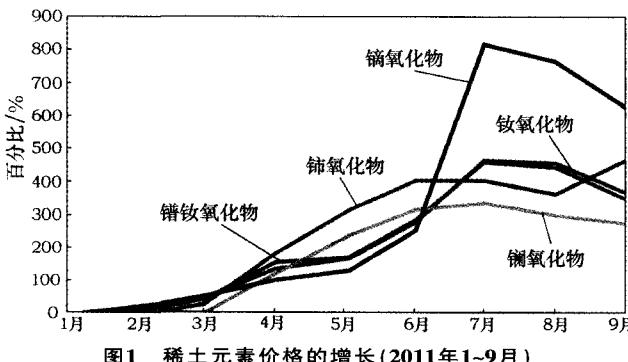


图1 稀土元素价格的增长(2011年1~9月)

这些稀土价格的飙升直接导致了钕铁硼磁体价格翻了3倍甚至更多。烧结钕铁硼磁体的价格不仅受镨和钕价格的共同影响，也受价格飞涨的镝元素影响。在2011年7月，镝元素的价格飙升至16 000元/公斤，相当于自2011年1月以来价格翻了8倍之多。在如此高的价格水平之下，尽管通常的钕铁硼磁体中钕和镨的含量是镝元素的8倍，但是在磁体中镝元素的美元价值却比钕和镨多一半。

是什么引起了镝的价格增长？是由于根本上的供需不平衡造成的。

镝主要应用于烧结钕铁硼磁体中，一些激光技术中也是用镝。大多数烧结钕铁硼磁体中镝元素平均含量为3%~4%。2011年这种磁体的需求量估算超过100 000公吨，这就意味着这一年该行业将要消耗3 000~4 000公吨镝。在空调压缩机用电机、风力发电用电机、电动自行车和其他应用领域的需求增长的带动下，烧结磁体的市场需求量每年大概增长15%~20%。此外，大家也都认为镝的需求量会随着富镝烧结钕铁硼相关应用的不断扩展而持续增加，例如在混合动力汽车的主电动机中。举个例子来说明镝元素消耗量的比率增长：混合动力汽车主电动机中用到的钕铁硼磁体使用了高至8%的镝，此含量超过当今市售的普通烧结钕铁硼磁铁中的2倍。

镝的需求量增长迅速，而镝的供应量却并非如此。镝主要存在于重稀土混合物，含量在3%~8%之间（见图2）。

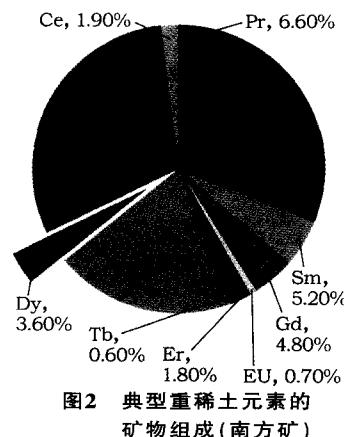


图2 典型重稀土元素的矿物组成(南方矿)

就目前中国的现状而言，包含重稀土的稀土氧化物每年产量仅为13 400公吨，并且从这些重混合物中提炼出的镝估计每年仅有500公吨。当然，许多公司也正在中国以外的地区着手新矿的开采项目。尽管这会使全球稀土元素供应量增加，但这些开采项目的大优势是包含轻稀土，而在这些轻稀土中即便有镝存在，数量也是非常有限的。

考虑到镝未来的潜在供给与需求，镝的价格显然会随着时间增长。而镝价格的增长未来会传递到烧结钕铁硼磁体及其他应用到镝的领域当中。在烧结钕铁硼磁体成本很有可能会增加的情况下，许多烧结钕铁硼磁体消费者正在考虑使用不依赖镝元素的其他原材料。

2 降低成本的解决方案

简单的电机案例研究表明，不含镝的烧结钕铁硼磁体并不可行。图3中由A点和B点可以看出，没有镝的烧结钕铁硼磁体在温度提高时第二象限退磁曲线更容易出现拐点。这个弯度很大程度上是由于烧结钕铁硼磁体的高剩磁值导致在电机启动时不可逆的磁通损失。这种不可逆的磁通损失在磁体负载线与退磁曲线交叉点低于拐点时就会发生。

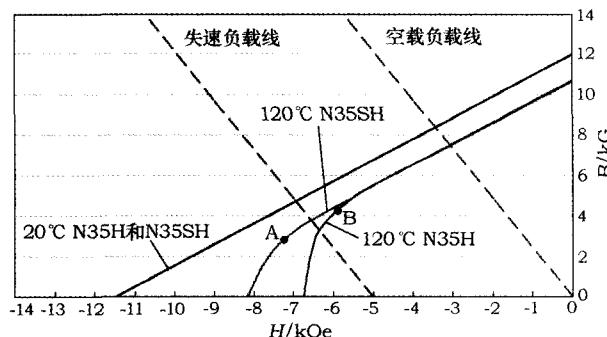


图3 室温或120℃温度下磁体退磁曲线或称BH曲线(实线)

原料N35SH和N35H在120℃条件下分别存在拐点A和B。不可逆的磁通损失发生于“失速负载线”与曲线相交处拐点B下方。因此，对于要求这一特定负载线和失速电流的一个设计说，需要含有高镝和拐点A的N35SH材料（关于“为何烧结钕铁硼磁体需要镝元素”更多详情可参见 www.mqitechnology.com）。

与此不同的是，那些由MQP™磁粉制成的各向同性钕铁硼粘结磁体，在温度高达180℃的第二象限退磁曲线中却有非常好的直线性。因此，没有镝，粘结钕铁硼磁体在不明显增加电机尺寸的情况下，可提供在使用温度达到180℃时与烧结钕铁硼磁体同等的性能，该电机设计研究如图4所示。因为所有MQP™系列的磁粉都是不含镝的，所以基于MQP™系列磁粉的解决方案在许多应用领域都是成本较低的解决方案。

3 电机设计案例研究

以下的研究设计可用来验证退磁曲线中的拐点是如何影响电机设计的。在功率100 W，峰值功率为250 W的电机上分别装配一个N35SH烧结磁体和一个高性能MQP磁粉制成

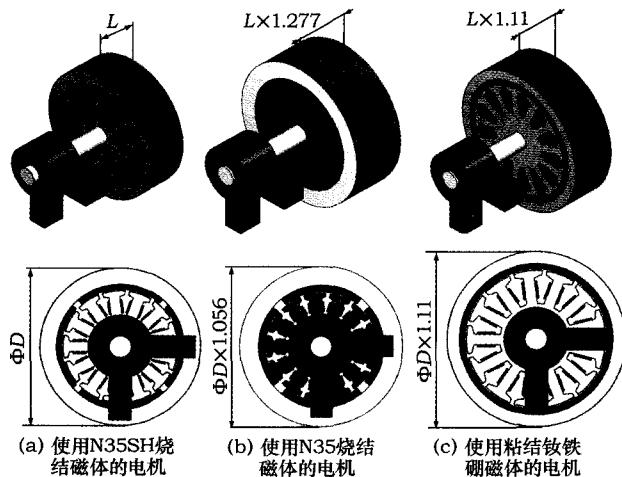


图4 使用粘结钕铁硼和烧结钕铁硼(N35SH和N35)磁体的电机尺寸对比

的粘结磁体。镝含量近于0的钕铁硼烧结(N35)方案也包括在此研究中以便对比。图5表明，在给定的负荷扭矩下，电机的性能可通过转速和电流来进行对比，并且表1详细列出了用于电机的磁体主要尺寸和所使用材料的含量。

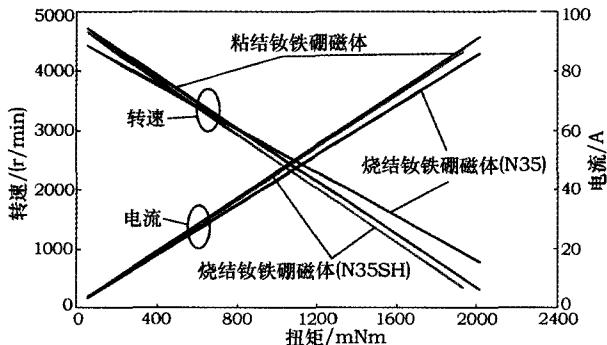


图5 使用烧结和粘结钕铁硼磁体的电机的各自运行特性

表1 同等性能的烧结和粘结磁体电机中磁体主要规格尺寸和原料含量

磁体	烧结钕铁硼(N35SH)	烧结钕铁硼(N35)	粘结钕铁硼
镝含量	3%	0~0.5%	0%
直径/mm	57.5	60.72	63.9
长度/mm	18	23	20
磁体质量/g	29.1	56.5	37.3
铜线质量/g	29.8	21.3	57.1
铁芯质量/g	256	373.6	318
电机总重/g	314.9	451.4	412.5

图6给出在空载和失速条件下烧结钕铁硼磁体的工作点。使用较高镝(Dy)含量的N35SH的电机，在120 °C条件下工作点高于拐点(图6中A点所示)。可以从图6中看出，在烧结磁体中减少镝的含量导致拐点向右偏移，沿着矫顽力轴，即H轴向原点偏移。如果电机使用了含有少量镝或不含镝的烧结钕铁硼磁体，在120 °C条件下，磁体的工作点会低于拐点(图6中B点和C点)。

图6电机中磁体工作点(图6中空载负载线与BH曲线相交区域)必须位于BH曲线拐点之前的直线部分，以避免产生不可逆的磁通损失。表明120 °C条件下需要有高镝含量的

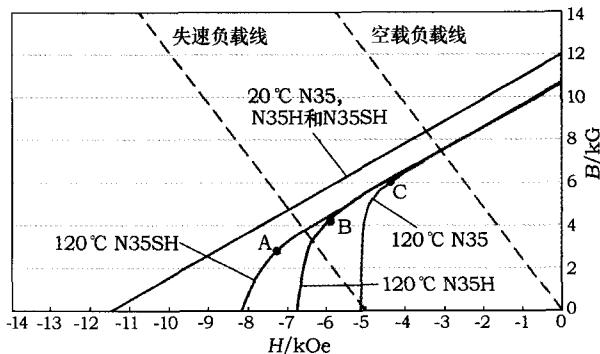


图6 空载和失速条件下烧结钕铁硼磁体的工作点

SH等级的材料来避免在运行过程中的不可逆磁通损失。

用不含镝的N35原料设计电机时，磁体的负载线需要提高以避免在极端的运行条件下不可恢复的磁通损失，以保证电机在高的温度条件下仍能正常工作。在给定了磁体与电枢齿间的气隙条件下，提高磁体的负载线需要更厚的磁体。这种影响可以明显从表1中看出，材料由N35SH转变为N35时，磁体质量增加了。此外，增厚后的磁体会导致高磁通量。为了避免软磁铁心被这种高磁通量饱和，电机中软铁部分的厚度，如回路铁环和电枢齿部分需要加厚。在这种特殊的设计中，使用N35不含镝的烧结磁体电机需要厚度为7 mm的定子轭铁以避免饱和。而通常的轭铁厚度大概是2 mm，7 mm是相当少见的。

相应地，磁体设计人员在无镝电机中可以使用粘结钕铁硼磁体。图7展示了使用粘结钕铁硼磁体的电机在空载和失速条件下的工作点。可以清楚地看到，即便是在最大工作温度的失速状态下，电机的工作点还是停留在曲线的直线区域，并且拐点稳定地停留在第三象限。粘结钕铁硼磁体为磁体设计者提供了不含镝的选择，并且与那些含有少量镝或是不含镝的钕铁硼烧结磁体相比，使用粘结钕铁硼磁体的方案需要的磁体原料、软磁性材料也更少。

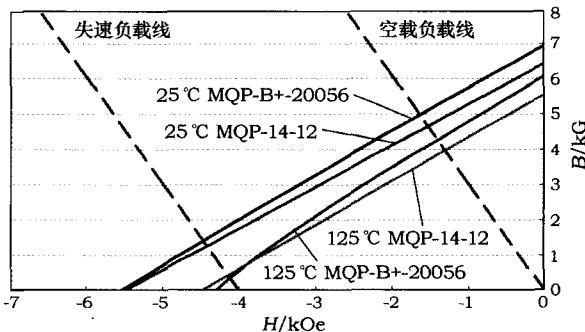


图7 使用粘结钕铁硼磁体的电机在空载和失速条件下的工作点

由于粘结钕铁硼磁体的BH线性特性，在更高的工作温度下，粘结钕铁硼磁体不存在不可逆的退磁损失。

现今处在研发下一代磁体的公司和设计者们必需要考虑的是，烧结钕铁硼磁体的价格增长将可能贯穿于整个产品的生命周期。然而，粘结磁体将不会受紧张的供需矛盾的限制，而且由于并不使用镝元素，所以也不会导致价格升高，这将会使粘结磁体在许多应用领域成为理想的替代品。

(麦格昆磁 供稿) (编辑 李 翩)