

# NdFeB 塑料粘结磁体的研究进展

赵树高<sup>1</sup>, 王大鹏<sup>1</sup>, 姜彩云<sup>1</sup>, 杨青<sup>2</sup>, 李培军<sup>1</sup>, 叶洁琼<sup>3</sup>

(1. 青岛科技大学橡塑材料与工程教育部重点实验室, 山东 青岛 266042; 2. 中国橡胶工业协会, 北京 100107; 3. Université du Havre France Faculté des Affaires Internationales, France 76063)

**摘要:** 主要从粘结磁体的反应共混、耐腐蚀性、加工流变性能和动态性能 4 个方面论述 NdFeB 粘结磁体的最新研究进展。NdFeB 粘结磁体既拥有 NdFeB 磁体较好的磁性能, 又能表现出粘结剂(主要是塑料)固有的流变性能, 是未来 NdFeB 磁体发展的方向。

**关键词:** NdFeB; 粘结磁体; 研究进展

**中图分类号:** TG132.27

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2009)01-0031-04

## Research progress in NdFeB bonded magnets with different polymer matrix

ZHAO Shu-gao<sup>1</sup>, WANG Da-peng<sup>1</sup>, JIANG Cai-yun<sup>1</sup>, YANG Qing<sup>2</sup>, LI Pei-jun<sup>1</sup>, YE Jie-qiong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Rubber-Plastics(QUST) Ministry of Education, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China; 2. China Rubber Industry Association, Beijing 100107, China; 3. Université du Havre France Faculté des Affaires Internationales, France 76063)

**Abstract:** The latest research progress in bonded magnets, including their reactive blending, corrosion resistance, processing rheological and dynamic properties is reviewed in this paper. NdFeB bonded magnets not only possess outstanding magnetic properties of NdFeB magnets, but also own inherent rheological performance of binder (e. g. plastic), so is the development trend of NdFeB magnets in the future.

**Key words:** NdFeB; bonded magnets; research progress

塑料粘结磁体是由聚合物基体与硬磁性填料复合而成的功能化永磁材料, 广泛用于当代数字化信息技术中的信息存储及其数字化转变; 由于其机械强度高、弹性好、制件造型和磁场设计灵活、尺寸精度高、成型加工简便等一系列优点, 近年来日趋成为现代数字化信息技术领域电子产品的新兴主打材料之一。

NdFeB 粘结磁体在塑料粘结磁体中占有重要地位<sup>[1]</sup>。NdFeB 粘结磁体, 就是利用粘结剂将钕铁硼磁粉粘结在一起。这种粘结磁体既拥有 NdFeB 磁体较好的磁性能, 又能够表现出粘结剂固有的流变性能, 便于加工成形状复杂的磁性部件, 而且粘结剂的存在, 使得 NdFeB 磁体固有的耐腐蚀性差的缺点得到改善。粘结 NdFeB 磁体是未来 NdFeB 磁体发展的方向。通常情况下, 将 NdFeB 磁粉与树脂直接共混得到的粘结磁体内部高分子基体无法完全有效地包覆磁粉表面, 导致机械性能和流变性能不佳。且 NdFeB 磁粉中的 Nd 元素非常活泼, 如果基体对磁粉包覆不完全, 会使其非常容易受到外界热、光、

氧、酸、碱的侵蚀。另外, 粘结磁体经常工作在动态环境中, 所以其动态性能也对粘结磁体制品有至关重要的影响。本文从粘结磁体的反应共混、耐腐蚀性、加工流变性能和动态性能 4 个方面来论述 NdFeB 粘结磁体的最新研究进展。

## 1 反应共混制备

Yudin 等<sup>[2]</sup>报道了一种聚酰亚胺(PI)复合 NdFeB 磁粉体系。与一般常见的使用成品 PI 直接与磁粉共混不同, 他是利用了一个两步反应: 先用二酐与二胺在一定条件<sup>[3]</sup>下反应生成聚酰亚胺预聚体, 与磁粉共混得到磁体混合物后在 220℃ 下处理 1 h, 然后在 3 MPa 压力、300 ± 5℃ 温度下模压成型。用该方法制备的粘结磁体在加工过程中具有非常低的黏度, 并且相对相同磁粉填充量的市售粘结磁体相比, 磁性能提升 10% 以上。

PI 粘结磁体在成型加工过程中存在一个重要的问题是随着温度的增高, 粘结磁体的黏度呈指数级增加, 一般认为这是加热过程中 PI 高温亚胺化

收稿日期: 2008-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50673047)和山东省重大科技专项资助项目(2006GG1103085)

作者简介: 赵树高(1949-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高分子材料成型加工理论与工程, zhaosgq@hotmail.com; 王大鹏(1984-), 男, 硕士生, 通讯联系人, wangdapen1000@hotmail.com。

造成的。Yudin 用含有苯环的联乙醚和含有苯环的二酐混合生成预聚物后与磁粉混合,然后在 220℃ 下模压成型成粘结磁体。此 PI 分子链上含有大量的苯环,所以分子链非常僵硬,提高了 PI 亚胺化温度,所以在一定温度范围内粘结磁体的黏度增加不明显,有效提高了粘结磁体的加工性能,并且能够在不降低磁性能的前提下提高其热稳定性。

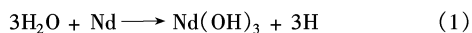
笔者所在课题组利用反应挤出工艺,制备了尼龙基 NdFeB 粘结磁体<sup>[4]</sup>。通过对比尼龙树脂直接熔融包覆磁粉的工艺,发现该工艺制备的粘结磁体力学性能与磁性能基本保持不变,但是在加工过程中黏度降低 1 个数量级,非常适合用以成型各种结构精细的磁性制件。同时研究了该体系的结晶动力学,发现无论以何种工艺制备 NdFeB 粘结磁体,磁粉的存在会极大地阻碍尼龙的结晶程度,但是不会影响尼龙的结晶温度。一定量的氨基硅烷偶联剂的存在可以提高尼龙在粘结磁体中的结晶程度,认为这是存在氨基硅烷偶联剂可以提高粘结磁体机械性能的主要原因。

## 2 耐腐蚀性

由于 NdFeB 磁体中的 Nd 元素是非常活泼的元素之一,所以其非常容易受到外界热、光、氧、酸、碱的侵蚀。相对来说,烧结磁体的耐腐蚀性一般不如相应的塑料粘结磁体,因为塑料在磁体的腐蚀过程中起到屏蔽作用,所以从这个意义上来说,粘结磁体具有更广阔的应用环境<sup>[5-6]</sup>。

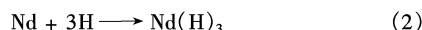
### 2.1 湿热腐蚀

磁体较多工作在湿热的环境中,因此磁体的最高工作温度与其热氧稳定性至关重要。而一些电气操纵的大中型驾驶设备(例如电车)要求马达中磁体的转矩损失要降到最低,以避免过高的生热和能量损失<sup>[7]</sup>。在高温或者潮湿的环境中,Otaigbe 等<sup>[8]</sup>认为 NdFeB 与水蒸气在磁体晶相的表面发生了式(1)中的反应。



如果氢原子能够渗入晶体内部,也能跟富钕相

发生式(2)中的反应。



腐蚀将导致晶体界面的膨胀,最后使界面趋于被破坏。研究发现,氢原子渗入晶体内部后发生的反应是在湿热环境下磁体被腐蚀的主要反应。所以随着磁粉颗粒的减小,表面积增大,暴露在外界的晶界富 Nd 相越多,被腐蚀的速率就越快,磁性能损失的就越严重<sup>[9]</sup>。当然,如果表面包覆一层处理剂后,可以在一定范围内保护晶体不受腐蚀物质的侵袭,上述反应发生的趋势将大大减缓。

磁场的存在对于 NdFeB 磁体的热腐蚀行为有较大的影响。未经磁化的 NdFeB 磁体的腐蚀速率明显比已经磁化的 NdFeB 磁体要慢,这是由于磁场的存在,使得磁体中存在一种氧转移效应<sup>[10]</sup>,这种效应能够将分散的氧转移到磁体粉末的表面,从而加速磁体的腐蚀。Rodewald 等<sup>[11]</sup>研究了各向同性和各向异性磁粉粘结磁体的热稳定性,认为在高温下短期的(小于 1 h)磁损失是由于矫顽力对温度有依赖性,而长期的热稳定性取决于热效应的后期影响。当温度升高到一定程度时,磁体粒子与粘结剂的界面会发生明显的解离现象<sup>[12]</sup>。

Tattam 等<sup>[13]</sup>研究了由于基体的不同而导致粘结磁体在湿热环境下耐腐蚀性的不同。他们分别研究了环氧树脂、锌和聚四氟乙烯作为基体的粘结 NdFeB 磁体的腐蚀性,发现在相同的腐蚀环境中,聚四氟乙烯基粘结磁体经过热处理(180℃)后拥有最好的耐腐蚀性,而环氧树脂基粘结磁体表现出最好的初始抗腐蚀性。Tattam 特别指出,所有的原材料都没有经过特别处理。之所以基体不同导致的粘结磁体的耐腐蚀性不同,是由于各种树脂不同程度地与磁粉表面反应,这些反应有些会保护磁粉抵抗外界腐蚀,而有些反而会恶化磁粉的耐腐蚀性<sup>[14]</sup>。

### 2.2 酸碱腐蚀

Nd 的标准电势( $E^0$ )为 -2.431 V,由于磁体多相结构特别是铁的存在,使得形成一种电池效应,从而加速 Nd 在酸碱离子溶液中的腐蚀行为。目前主要是通过控制 NdFeB 磁体中富 Nd 相的形态结构或者

(上接第 30 页)

- [29] He Xiangming, Pu Weihua, Ren Jianguo, *et al.* Charge/discharge characteristics of sulfur composite cathode materials in rechargeable lithium batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 52: 7372 - 7376.
- [30] He Xiangming, Pu Weihua, Li J J, *et al.* Nano sulfur composite for Li/S polymer secondary batteries[J]. *Key Eng Mat*, 2006 (326/327/328):

541 - 544.

- [31] Zheng W, Liu Y W, Hua X G, *et al.* Novel nanosized adsorbing sulfur composite cathode materials for the advanced secondary lithium batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2006(51): 1330 - 1335.
- [32] Wang J, Chew S Y, Zhao Z W, *et al.* Sulfur-mesoporous carbon composites in conjunction with a novel ionic liquid electrolyte for lithium rechargeable batteries[J]. *Carbon*, 2008(46): 229 - 235. ■

化学活性等方法来提高 NdFeB 磁体的耐腐蚀性。

模压成型 NdFeB 粘结磁体<sup>[15]</sup>, 在加入铁粒子后可以有效地提高粘结磁体的机械性能, 并且能够很大程度上避免经过酸碱腐蚀后的机械性能下降。这应该是由铁经过腐蚀后形成的表面氧化层可以改善 NdFeB 磁体的耐酸碱腐蚀性, 而掺杂少量铝也有同样的效果。无论加入铝或者是铁实质上都是包覆在 Nd 表面, 以阻隔外界环境与富 Nd 的直接接触; 添加的金属由于与 Nd 结合能力不同, 所以在宏观表现为耐酸碱性的不同。值得注意的是, 掺入铝后会或多或少地降低磁体的磁性能。

Rada 等<sup>[16-17]</sup>研究了 NdFeB 纳米晶粘结磁体的酸碱腐蚀行为。研究发现, 粘结磁体在强酸 (pH = 1 的硫酸) 作用下磁体的微相存在降解行为, 在强碱性溶液 (pH = 13 的氢氧化钠) 中表现出钝化现象。NdFeB 的组分不同对于其在酸中腐蚀行为明显不同, 增加 NdFeB 磁体中铁的含量, 或者加入一定量的钴 (Co) 或铌 (Nb), 可以改善 NdFeB 的酸腐蚀行为。

将放电等离子烧结技术应用在 NdFeB 粘结磁体中, 可以有效改善粘结磁体的耐酸碱腐蚀性。放电等离子烧结技术是一种升温速度快、烧结保温时间短 (3 ~ 5 min)、烧结机理特殊的材料制备新技术。利用这一技术制备的 NdFeB 磁体<sup>[18-19]</sup>, 均比传统烧结 NdFeB 制备的粘结磁体的腐蚀电位要高。这从热力学角度证实了放电等离子烧结技术可以带来更好的耐腐蚀性<sup>[20]</sup>。

### 3 流变性能

黏度是评价高分子复合体系加工性能的一个非常重要的参数<sup>[21-22]</sup>。将哈克 (Haake) 流变仪用于高分子复合体系的密炼过程中时, 由于流变仪的转矩与流体的剪切应力息息相关, 所以流体的黏度也能够从转矩值以及其他的参数计算得到。Otaigbe 等<sup>[23]</sup>研究了 NdFeB 粘结磁体的流变性能以及各种影响流变性能的因素, 发现随着磁粉填充量的增加, 熔体的黏度有较大幅度的上升, 并且呈现明显的假塑性流体的流变行为。但是当填充量超过 20 份后, 熔体黏度增加的幅度不明显。特别需要指出的是, NdFeB 磁体粉末为片状的颗粒, 而制成粘结磁体后通过电镜观察发现, 磁粉变得平滑并且有一定程度的趋向。

对于相同填充量的粘结磁体来说, 磁粉的粒径大小对于黏度的变化有明显影响。粒径过大或过小

都会提高粘结磁体的熔体黏度。研究发现, 当 NdFeB 磁粉的粒径处于 106 ~ 150 μm 时的黏度最小, 而存在各种粒径的混合磁粉的黏度处于最大值和最小值之间。增加磁粉的粒径分布一般认为可以使各种粒子具有协同作用, 提高磁粉的填充量。当然, Farris<sup>[24]</sup>提出的增加分散刚性体系填充量而不增加黏度的方法目前在粘结磁体领域还未实现。

为了改善磁粉在粘结磁体中的耐腐蚀性和热稳定性, 常将偶联剂包覆在磁粉表面。Otaigbe 等<sup>[25]</sup>研究了不同质量、不同种类的硅烷偶联剂包覆的粘结磁体的流变行为。当硅烷偶联剂的用量为 1% (质量分数) 时, 熔体的黏度最低。这可能是因为偶联剂的存在增强了磁粉的浸湿性, 使粒子间相互作用降低, 在流体中变成一种惰性悬浮颗粒, 从而降低了黏度。粘结磁体的流动遵循式 (3):

$$\eta_r = (1 - V)^{-k} \quad (3)$$

其中  $\eta_r$  是相对浓度, 是用熔体的黏度除以在该旋转速率下纯 PPS 的黏度;  $V$  是指磁粉占粘结磁体中的体积分数。  $k$  为状态参数, 取值范围为 3 ~ 21。理论上, 当  $k$  为 3 时, 意味着粒径的分布为无限大, 而当  $k$  为 21 时是指粒径为单分散状态。由数据拟合可以得到, 纯 PPS 与粘结磁体的  $k$  值分别为 6.5 和 9.0。  $k$  值越小黏度越低, 由于包覆了偶联剂的粘结磁体具有更小的  $k$  值, 所以它的黏度相对较低。随着粘结磁体中磁体比重的增加, 这种趋势更加明显。同样磁体的平均粒径也对磁体的黏度有很大影响, 但是这种影响在低剪切速率下不明显, 在高剪切速率下, 磁体粒径过高或者过低都会导致熔体黏度的急剧上升<sup>[26]</sup>。

Joshua 等<sup>[27]</sup>将一定比例的液晶高分子 (LCP) 混入 PPS 基 NdFeB 粘结磁体材料, 得到的黏度与 LCP 体积分数呈现非常好的线性关系。随着 LCP 比重的增加, 粘结磁体的黏度呈现较大幅度的下降。例如增加 20% (质量分数) 的 LCP 就可以使黏度下降 20%。当 LCP 的质量分数增加到 30% 时, 黏度下降了 41%。Joshua 认为黏度下降的原因是由于粘结磁体基体存在两相结构, 并且 PPS 相中包含 LCP 球体, 其他区域的结构与纯 LCP 纤维结构的电镜照片非常相似。LCP 在粘结磁体中分散良好, 使得粘结磁体呈现更显著的假塑性流体行为, 因而黏度显著下降。当然低分子质量的 LCP 在流体中也可能起润滑作用。这 2 方面的因素共同作用, 既增加了粘结磁体的加工性能, 又保护了加工过程中所用的仪器。

## 4 动态性能

由于粘结磁体主要应用在电机等动态应用的环境中,所以研究磁体的动态性能很有必要。Xiao 等<sup>[28]</sup>研究了前文所述的填充 LCP 的 NdFeB 粘结磁体的动态性能,发现随着 LCP 用量的增加,损耗模量峰逐渐向高频方向移动,并且数值慢慢降低,而存储模量随着 LCP 用量的增加呈现增加趋势,这预示着高分子基体玻璃化转变温度发生改变,并且在实验可以观测的范围内动态性能变好。

Otaigbe 等<sup>[26]</sup>研究发现,偶联剂的存在可以在很大程度上改善 NdFeB 粘结磁体的动态性能,包覆偶联剂的粘结磁体的存储模量相对未包覆的要大 1 GPa 左右。而使用了偶联剂后,损耗模量峰向更高方向移动。损耗模量峰与基体(PPS)的玻璃化转变温度相关,这说明磁粉的存在会抑止 PPS 分子链的运动,使得 PPS 的玻璃化转变温度提高,当磁粉表面包覆偶联剂后,磁粉与 PPS 的相互作用进一步增强,使得玻璃化转变温度进一步提高。

Guschl 等<sup>[29]</sup>研究了 PPS 基 NdFeB 粘结磁体的动态性能和结晶性。他认为 NdFeB 磁粉颗粒在 PPS 粘结剂的结晶过程中起成核剂的作用。热分析结果显示,加入磁粉可以加快粘结剂(PPS)的结晶速度,并且在 PPS 玻璃化转变温度以上;随着磁粉粒子的粒径增加,结晶速度更快,动态性能更好,并且增加一定数量的硅烷偶联剂可以改善粘结磁体的动态性能。

## 5 结语

长期以来,发达国家围绕这一领域进行了大量的基础研究和应用研究,促进了数字化信息技术领域的电子产品更新换代,其中日本等国家的应用技术居于国际领先地位。国内这方面的工作也受到了高度重视,得到了国家重点支持,不少课题从粉末金属材料制备和成型加工的角度进行了卓有成效的工作,取得了一系列重要的理论和应用创新成果。

目前制约 NdFeB 粘结磁体发展的关键问题是:由于粘结磁体中聚合物基体的稀释作用,导致其磁性与传统的烧结磁体相比有所降低;而高填充不相容体系高黏度熔体的注塑加工成型与传统塑料相比更加苛刻,制件更难以达到理想的技术指标。粘结磁体属于高填充聚合物,磁体的磁性与填料含量成正比,因此为了获得最高的磁性,一般要尽可能提高磁体的填充量。但随着填充量的提高,填料粒

子之间的相互作用增强,磁粉在磁场中取向阻力增大,体系黏度会迅速升高,加工成型性能变差。另外,由于磁粉与塑料基体之间的相容性变差,其填充量的过度提高还会导致磁体性能的降低,目前,注塑磁体磁粉的体积装载量大,为 55% ~ 65%。实际上,塑料粘结磁体的磁性能、加工性能和机械性能三者之间存在着相互抵触的“魔三角”关系,通过系统深入的科学研究,有效地破解这种矛盾,就有可能突破这一领域的技术瓶颈。

## 参考文献

- [1] Brown D N, Chen Z, Guschl P, *et al.* Developments with melt spun RE-Fe-B powder for bonded magnets[J]. *J Magn Magn Mater*, 2006, 303: e371 - e374.
- [2] Yudin V E, Otaigbe J U, Bui T X, *et al.* Polyimide bonded magnets: Processing and properties[J]. *J Appl Polym Sci*, 2003, 88: 3151 - 3158.
- [3] Goykhan M Y, Svetlichnyi V M, Kudryavtsev V V, *et al.* Thermally stable polyimide binders from aromatic dianhydrides and acetyl derivatives of aromatic diamines: Formation mechanism[J]. *Polym Eng Sci*, 1997, 37: 1381 - 1386.
- [4] 青岛科技大学. 一种具有良好加工性能的铁氧体粘结磁体的制备方法: 中国, 200810016694. 2[P]. 2008 - 06 - 12.
- [5] Liu A Z, Rahman I Z, Rahman M A, *et al.* Fabrication and measurements on polymer bonded Nd-Fe-B magnets[J]. *J Mater Process Technol*, 1996, 56: 571.
- [6] Xiao J, Otaigbe U, Jiles D C. Modeling of magnetic properties of polymer bonded Nd-Fe-B magnets with surface modifications[J]. *J Magn Magn Mater*, 2000, 218: 60.
- [7] Liu A Z, Rahman I Z, Rahman M A, *et al.* Fabrication and measurements on polymer bonded NdFeB magnets[J]. *J Mater Process Technol*, 1996, 56: 571 - 580.
- [8] Otaigbe J U, Xiao J, Kim H. Influence of filler surface treatments on processability and properties of polymer-bonded Nd-Fe-B magnets[J]. *J Mater Sci Lett*, 1999, 18: 329 - 332.
- [9] Kim A S. Effect of oxygen on magnetic properties of Nd-Fe-B magnets [J]. *J Appl Phys*, 1988, 64(10): 3376 - 3379.
- [10] Costa I, Oliveira M C L, De Melo H G, *et al.* The effect of the magnetic field on the corrosion behavior of Nd-Fe-B permanent magnets[J]. *J Magnetism Magn Mater*, 2004, 278: 348 - 358.
- [11] Rodewald W, Wall B, Fernengel W, *et al.* Temperature stability of flexible RE magnet-foils[J]. *IEEE T Magn*, 1999, 35(5): 3307 - 3309.
- [12] Garrell M G, Ma B M, Shih A J, *et al.* Mechanical properties of polyphenylene-sulfide (PPS) bonded Nd-Fe-B permanent magnets[J]. *Mat Sci Eng A: Struct*, 2003, 359(1/2): 375 - 383.
- [13] Tattam C, Williams A J, Hay J N, *et al.* The corrosion behaviour of uncoated bonded Nd-Fe-B magnets in humid environments[J]. *J Magn Magn Mater*, 1996, 152(3): 275 - 278.
- [14] Mazany A M. Protection from the magnetic property of NdFeB magnets [J]. *J Appl Phys*, 1991, 69(8): 5534 - 5537.

于白腐真菌、革兰氏阳性菌 (*Staphylococcus*、*Bacillus* 等种属) 和革兰氏阴性菌 (*Pseudomonas*、*Escherichia* 和 *Desulfovibrio* 等种属) 等中。何德文等<sup>[1]</sup>用白腐真菌降解纯 TNT 模拟废水, TNT 降解率达 90% 以上。尹萍等<sup>[2]</sup>从受 TNT 严重污染的土壤和废水中分离筛选到 17 株可降解 TNT 的酵母菌和白地霉, 对其中 6 株进行了降解 TNT 的实验, 在含 75 ~ 80 mg/L TNT 的培养基中, 40 h 内 TNT 去除率达到 71% ~ 93%。Ederer 等<sup>[3]</sup>从弹药富集反应器的土壤中分离出的 *Clostridium* 在 10 h 能完全降解 TNT, 细胞悬浮液能将 2,4-二氨基-6-硝基甲苯转化为 2,4,6-三氨基甲苯。French 等<sup>[4]</sup>发现 *Enterobacter cloacae* 能以 TNT 为唯一氮源, 好氧条件下缓慢地实现 TNT 的降解。Esteve-Nuñez 等<sup>[5]</sup>研究发现以 TNT 为唯一氮源, *Pseudomonas* 能够厌氧降解 TNT。

## 2 微生物降解 TNT 的机理

TNT 生物降解过程是一个相当复杂的过程。当条件改变时, 其降解途径也有很大差别。

### 2.1 TNT 的好氧生物降解

#### 2.1.1 真菌对 TNT 的降解

国内外对白腐真菌降解 TNT 的研究较多。白腐真菌对 TNT 取得如此高的降解率, 是由其独特的降解机制所决定的。白腐菌依赖于一个主要由细胞分泌产生的酶系统所组成的胞外降解体系; 在有氧条件下, 葡萄糖等在已二醛氧化酶的作用下形成  $H_2O_2$ ,  $H_2O_2$  刺激木质素过氧化物酶 (LiP) 或锰过氧

化物酶 (MnP) 触发一系列的自由基链反应降解 TNT, 实现对底物无特异性的氧化分解<sup>[17-18]</sup>。另外, 漆酶、还原酶、甲基化酶和蛋白酶等也参与组成了降解系统的主体。降解酶系通常在碳源、氮源受限的情况下才表达。藜芦醇等可促进该反应的进行。值得注意的是, 在 LiP 和 MnP 分泌之前, 依赖于质膜的氧化还原系统可将高度氧化的 TNT 还原为氨基对应物 (主要是 2-氨基二硝基甲苯和 4-氨基二硝基甲苯), 这是 TNT 生物降解的关键<sup>[19]</sup>。图 1 所示为 Jalal Havari 等<sup>[16]</sup>提出的白腐菌 *Phanerochaete chrysosporium* 降解 TNT 的可能途径。

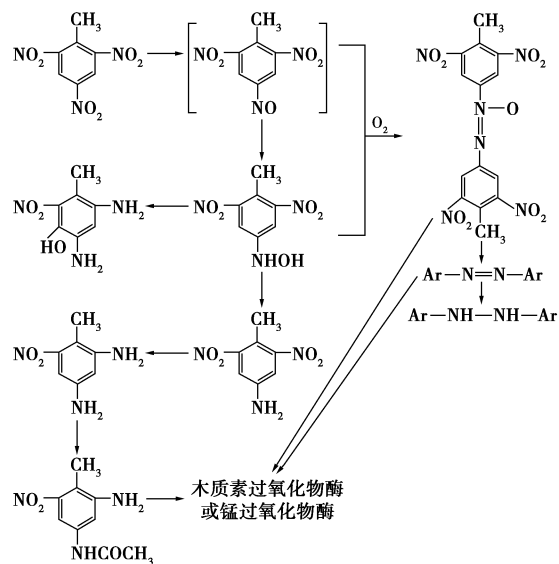


图 1 真菌降解 TNT 的途径

(上接第 34 页)

- [15] Dobrzanski L A, Drak M. Properties of composite materials with polymer matrix reinforced with Nd-Fe-B hard magnetic particles [J]. J Mater Process Tech, 2006, 175: 149 - 156.
- [16] Rada M, Kardelky S, Mazilu I, et al. Corrosion behavior of polymer-bonded NdFeB-based nanocrystalline magnets [J]. IEEE T Magn, 2004, 40(4): 2864 - 2866.
- [17] Rada M, Geberta A, Mazilu I, et al. Corrosion studies on highly textured Nd-Fe-B sintered magnets [J]. J Alloy Compd, 2006, 415(1/2): 111 - 120.
- [18] Yue M, Zhang J X, Liu W Q, et al. Chemical stability and microstructure of Nd-Fe-B magnet prepared by spark plasma sintering [J]. J Magn Mater, 2004, 271(23): 364 - 368.
- [19] Yue M, Zhang J X, Xiao Y F, et al. A new kind of NdFeB magnet prepared by spark plasma sintering [J]. IEEE T Magn, 2003, 39(6): 3551.
- [20] Mamedov V. Spark plasma sintering as advanced PM sintering method [J]. Powder Metal, 2002, 45(4): 322.
- [21] Otaigbe J U, Kim H S, Xiao J. Effect of coupling agent and filler particle size on melt rheology of polymer-bonded Nd-Fe-B magnets [J]. Polym Composite, 1999, 20: 697 - 701.
- [22] Xiao J, Otaigbe J U. Polymer-bonded magnets: Part I. Analytic thermogravimetry to determine the effect of surface modification on dispersion

of Nd-Fe-B fillers [J]. J Mater Res, 1999, 14(7): 2893 - 2897.

- [23] Otaigbe J U, Kim H S, Xiao J. Effect of coupling agent and filler particle size on melt rheology of polymer-bonded Nd-Fe-B magnets [J]. Polymer Composite, 1999, 20(5): 697 - 704.
- [24] Farris R. Prediction of the viscosity of multimodal suspensions from unimodal viscosity data [J]. J Rheol, 1968, 12: 281 - 301.
- [25] Otaigbe J U, Kim H S, Xiao J. Effect of coupling agent and filler particle size on melt rheology of polymer-bonded Nd-Fe-B magnets [J]. Polym Composite, 1999, 20(5): 697 - 704.
- [26] Otaigbe J U, Xiao J, Kim H. Influence of filler surface treatments on processability and properties of polymer-bonded Nd-Fe-B magnets [J]. J Mater Sci Lett, 1999, 18: 329 - 332.
- [27] Joshua U, Otaigbe J U, Kim H S, et al. Polymer Bonded Magnets: II. Effect of liquid crystal polymer and surface modification on magneto-mechanical properties [J]. Polym Composite, 2000, 21(2): 332 - 342.
- [28] Xiao J, Joshua U, Otaigbe J U. Polymer bonded magnets: II. Effect of liquid crystal polymer and surface modification on magneto-mechanical properties [J]. Polym Composite, 2000, 21(2): 332 - 342.
- [29] Guschl P C, Kim H S, Otaigbe J U. Effects of a Nd-Fe-B magnetic filler on the crystallization of poly(phenylene sulfide) [J]. J Appl Polym Sci, 2002, 83: 1091 - 1102. ■