

超磁致伸缩材料及其应用

李松涛

1842年焦耳发现沿轴向磁化的铁棒，长度会发生变化，这种现象就称为磁致伸缩效应，又称为焦耳效应。相反，如果对铁磁性材料施加压力或张力（拉力），材料在长度方向发生变化的同时，内部的磁化状态也随之改变，这种现象称为磁致伸缩的逆效应，又称为维拉瑞（Villari）效应。

磁致伸缩效应起源于材料磁化时晶格的自发形变。图1中采用A、B两个小磁针（小磁针代表晶格的磁化方向）间的相互作用，形象地解释磁致伸缩效应。如图1(a)所示，在外磁场H中，小磁针A、B处于平衡状态， R_0 表示二者之间的平衡距离。如果外磁场H方向转动 90° ，则小磁针A、B随之转动 90° ，正如图1(b)所示，此时小磁针A和B间的相互作用能发生了变化，平衡距离变成 R_1 。 R_1-R_0 即为材料因磁化状态的改变而产生的磁致伸缩。

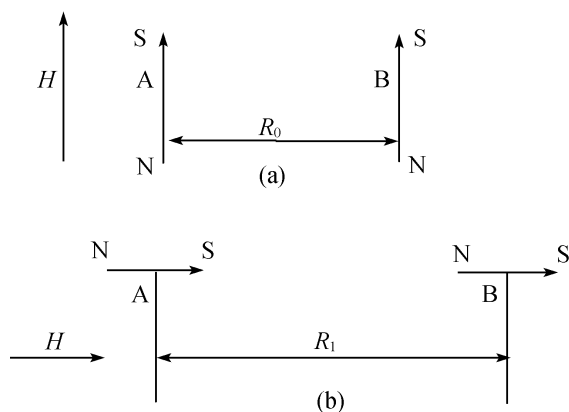


图1 磁致伸缩模型

广义讲，包括顺磁体、抗磁体、铁磁体以及亚铁磁体在内的所有磁性材料都具有磁致伸缩性质。但是前两类材料的磁致伸缩值很小，实际应用价值不大；而部分铁磁性及亚铁磁性材料，低温磁致伸缩值的数量级可达 10^3ppm ($1\text{ppm}=10^{-6}$)，具有较高的实用价值，从而引起了研究人员的重视。早期的超磁致伸缩材料普遍存在磁晶各向异性高、使用温度条件苛刻等缺点。因此，科学家们不断改进成分配比和合成工艺，着力开发更具实用价值的磁致

伸缩材料。

1974年，美国科学家克拉克发现了 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_2$ 合金，该合金具有室温磁致伸缩值大、居里温度高、磁晶各向异性小等优点。 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_2$ 合金的室温磁致伸缩比传统材料要高1000倍左右，因此又称为超磁致伸缩

材料。图2是该合金的磁致伸缩和磁场的关系曲线。由图2可知，低场范围内，材料的磁致伸缩值随磁场增加而快速增加，具有很高的应用价值。此后，研究人员不断对 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_2$ 合金进行替代和合成工艺研究，开发出了不同性能的超磁致伸缩材料。如今，牌号为Terfenol-D（成分为 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_2$ ）的超磁致伸缩材料已经商品化，应用于换能器、致动器等精密器件。

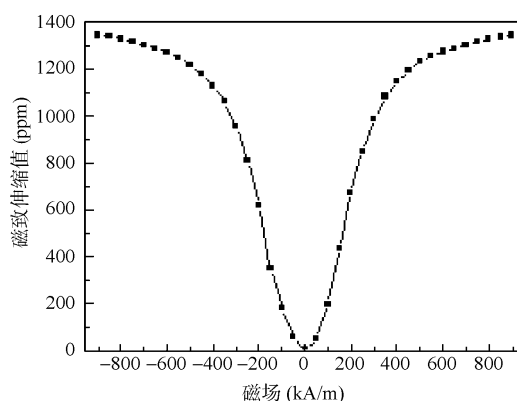


图2 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_2$ 合金的磁致伸缩和磁场的关系曲线

超磁致伸缩材料 Terfenol-D 的优点

目前，在各种致动器件中广泛应用的是压电陶瓷材料（PZT），然而超磁致伸缩材料 Terfenol-D 与压电陶瓷材料相比具有更优越的性能（参数对比见表1）。①室温磁致伸缩值更大，单晶材料应变值达1500ppm以上，比传统压电陶瓷材料高数倍。②居里温度高，适用于高温环境。当环境温度高于居里温度时，磁致伸缩性能只会暂时消失，待冷却到居里点后，磁致伸缩性能完全恢复；而压电陶瓷在工作温度以上会极化而永久失效。③输出应力大，在外加预应力条件下，磁致伸缩还存在跳跃效应。④能量转换效率高，机电耦合系数可达0.8。⑤超磁致

伸缩材料可承受高达 200MPa 的压力，适于高压力的执行器、大功率的声学换能器等；而压电陶瓷无法承受较大的压应力。⑥驱动电压低，只需几伏电压驱动，远低于压电陶瓷几千至几万伏高压驱动。⑦响应速度快，对磁场和应力几乎即时响应，可用于快速执行器。⑧频率特性好，频带宽。

表 1 超磁致伸缩材料 Terfenol-D 与压电陶瓷材料物理性能对比

材料特性	Terfenol-D 材料	压电陶瓷材料
应变值 (ppm)	1500	800
声速 (m/s)	1700~2600	—
产生应力 (kg/cm ²)	300	150
居里温度/极化温度 (°C)	380±40°C	180±100°C
机电耦合系数	0.8	0.7
响应速度	μm 级	ms 级

超磁致伸缩材料的应用领域

超磁致伸缩材料和压电陶瓷材料在军事、电子、机械等领域有着重要的应用。利用电磁能和机械能的有效转换，磁致伸缩材料和压电陶瓷材料可以制成众多先进器件，如声/水声学器件、力学器件、执行器件、换能器件等。

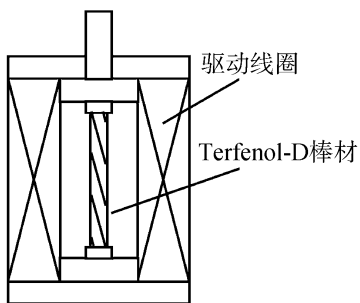


图 3 超磁致伸缩材料应用原理

近年来，随着超磁致伸缩材料的不断开发和应用，已形成了替代传统压电陶瓷的趋势。图 3 是超磁致伸缩材料应用原理图之一。若驱动线圈通入电流，即可沿 Terfenol-D 棒材方向产生磁场，从而产生磁致伸缩现象。若通入的电流是交变电流，则产生的磁场也是交变的，Terfenol-D 棒材在交变磁场的作用下产生伸缩变化，向外发射超声波。下面就简单介绍超磁致伸缩材料（以 Terfenol-D 材料为例）的用途。

声学方面 声信号是水下通信、探测、侦察和遥控的主要手段。声纳装置的核心元件是压电材料或磁致伸缩材料。声纳发射的声波频率越低，声信号在水中的衰减就越小，传播的距离就越远。同时，宽频带响应可以提高声信号的分辨率。图 3 中，驱动线圈中交变电流的频率决定了 Terfenol-D 棒材输出的声信号频率和波长。Terfenol-D 材料与压电陶瓷材料相比具有输出功率大、低频特性好、工作温

度范围大、低电压驱动等优点，从而受到声纳系统的青睐，广泛用于军事海洋探测、海底测绘、建筑和材料的无损探伤方面。

传感器 图 3 中，如果对 Terfenol-D 棒材施加压力，根据磁致伸缩效应的逆效应，该棒材的内部磁化状态就会发生改变，从而在周围线圈中产生电信号，根据电信号可以得知压力的大小。因此，利用磁致伸缩效应的逆效应，及其磁致伸缩大、响应速度快的特点，超磁致伸缩材料可以制成力、加速度的传感器，还可以用于与磁场有关的物理量测量。

微控制领域 根据图 2 中磁致伸缩和磁场的关系曲线，并利用其随磁场变化响应速度快、数值大的特点，超磁致伸缩材料可制成精密致动器、控制阀门和高速阀门的驱动元件，如分辨率达纳米级的微位移执行器、精密燃油注入系统、精密喷墨控制系统等。采用超磁致伸缩材料制造的燃料注入系统，目前已经应用于汽车等内燃机，以达到燃料充分燃烧、减少污染的目的。

阻尼减震系统 根据磁致伸缩材料机械响应快、能够将机械能转变成磁能的特点，人们还设计了阻尼减震系统，并预见了磁致伸缩材料用于未来交通工具的减震技术。该系统由 Terfenol-D 伺服阀控制液压柱，取代弹簧和减震器，根据微机信号进行反应，使用该减震系统的交通工具在行驶时十分平稳。

超磁致伸缩材料有着优异性能和广阔市场前景，它的广泛运用将导致一系列控制和执行元件的革命。高技术产业的发展，对超磁致伸缩材料的需求越来越大，据有关专家预测，用于超声波器件的超磁致伸缩材料在美国一年需要直径 0.5~1 英寸圆棒约 10000 英寸；用于油压机、机器人等的超磁致伸缩材料在美国市场每年约 6 亿美元；用超磁致伸缩致动器取代传统压电陶瓷致动器的市场更加可观。

超磁致伸缩材料 Terfenol-D 中稀土元素占据了很大比例，我国稀土资源丰富，所以开展超磁致伸缩材料的研究，进行多学科交叉研究，拓展超磁致伸缩材料的应用领域，对推动我国稀土事业的发展和提高科技水平将产生深远影响。

（河北省保定市华北电力大学数理学院 071003）

本文系华北电力大学科研基金资助项目 (No.200611030)。