

超磁致伸缩材料及其应用研究*

李松涛 孟凡斌 刘何燕 陈贵峰 沈俊 李养贤†

(河北工业大学材料科学与工程学院 天津 300130)

摘要 稀土超磁致伸缩材料是一种新型稀土功能材料. 文章概述了超磁致伸缩材料(GMM)的研究历史,对比了一种实用的超磁致伸缩材料(Terfenol-D)和压电陶瓷材料(PZT)的性能,阐述了超磁致伸缩材料当前在以下两个方面取得的研究进展:(1)关于工艺方法的研究,包括直拉法、区熔法、布里奇曼法和粉末烧结、粘结等方法;(2)关于材料组分的研究,包括对Fe原子的替代研究以及开发轻稀土超磁致伸缩材料的研究. 文章最后叙述了超磁致伸缩材料的应用领域,以及发展我国稀土超磁致伸缩材料的意义.

关键词 超磁致伸缩 稀土金属间化合物

Giant magnetostrictive materials and their application

LI Song-Tao MENG Fan-Bin LIU He-Yan CHEN Gui-Feng SHEN Jun LI Yang-Xian†

(School of Material Science & Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract Rare-earth giant magnetostrictive materials (GMM) are a type of new functional materials. A brief description is given of the history of giant magnetostrictive materials; and their characteristics are compared with those of piezoelectric materials. Current research developments are described, in particular: (1) fabrication technology, including the Czochraski, FSZ, Bridgman, powder-sintering and powder-bonding methods; (2) composition studies of GMM, including the substitution for Fe in RFe_2 and exploitation of light rare-earth GMM. Applications and the importance of GMM research in China are reviewed.

Key words giant magnetostriction, rare-earth-transition intermetallics

1 磁致伸缩效应简介

1842年,焦耳(Joule)发现沿轴向磁化的铁棒,长度会发生变化,这种现象称为磁致伸缩效应,又称为焦耳效应^[1],从广义讲包括顺磁体、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.但是顺磁体、抗磁体材料的磁致伸缩值很小,实际应用价值不大,而对于部分铁磁性及亚铁磁性材料,磁致伸缩值较大,数量级可以达到 10^3 ppm,具有很高的实用价值,引起研究人员的重视.

磁致伸缩材料的应用主要涉及到以下几种效应:

(1)磁致伸缩效应(焦耳效应):材料在磁化状态改变时,自身尺寸发生相应变化的一种现象.磁致

伸缩有线磁致伸缩(长度变化)和体磁致伸缩(体积变化)之分,其中线磁致伸缩效应明显,用途广,故一般提到的磁致伸缩都是指线磁致伸缩.

(2)磁致伸缩的逆效应(Villari效应):对铁磁体材料施加压力或张力(拉力),材料在长度发生变化的同时,内部的磁化状态也随之改变的现象.

(3)威德曼效应(Wiedemann)效应:在被磁化了的铁磁体棒材中通电流时,棒材沿轴向发生扭曲的现象.

(4)威德曼效应的逆效应(Matteucci效应):将铁磁体棒材绕轴扭转,并沿棒材的轴向施加交变磁

* 国家自然科学基金(批准号 50271023)和教育部科学重点(批准号 02017)资助项目

2004-03-23 收到初稿 2004-06-07 修回

† 通讯联系人. E-mail: admat@jssmail.hebut.edu.cn

场时,沿棒材的圆周方向会产生交变磁场的现象。

(5) ΔE 效应 磁致伸缩材料由于磁化状态的变化而引起自身杨氏模量发生变化的现象。

正是由于上述效应的存在,磁致伸缩材料才能广泛应用于超声波、机器人、计算机、汽车、致动器、控制器、换能器、传感器、微位移器、精密阀和防震装置等领域^[2]。

2 超磁致伸缩材料的研究历史

在焦耳发现磁致伸缩现象后的一个世纪里,人们一直在努力探索实用的磁致伸缩材料,但是大部分材料的磁致伸缩值只有 10^{-6} — 10^{-5} 数量级,仅相当于热膨胀系数。直到 1940 年, Ni 和 Co 的多晶 (Ni, Co - Ni, Ni - Fe, Fe - Co) 材料出现后,磁致伸缩材料才得到实用化,磁致伸缩约为 40ppm,主要应用于超声波换能器。1950 年,发现了 Alfer Fe - 13% Al 合金,它的磁致伸缩值达到 100ppm,磁致伸缩材料的研究取得了一定进展。但是早期的磁致伸缩研究大部分是关于噪声的,如 1954 年 Hunt 发现放置在通有交变电流的线圈附近的永磁体会发出声音;日常生活中的老式日光灯镇流器会发出的低鸣声,都是磁致伸缩效应在交变磁场下的表现。

20 世纪 60 年代, Legvold^[3], Clark^[4] 和 Rhyn^[5] 等致力于稀土类磁致伸缩材料的研究,并取得较大进展。该类材料的磁致伸缩值比一般材料要大上百倍,因此称为超磁致伸缩材料。一般来讲,超磁致伸缩材料包括稀土金属、稀土 - 过渡金属间化合物及其非晶薄膜合金、稀土氧化物和钢系金属化合物,其中只有 MgCu₂ 型 Laves 相金属间化合物 RFe₂ (R 代表稀土元素)及其非晶薄膜以其居里温度高、室温磁致伸缩值大而倍受研究人员的关注。

室温超磁致伸缩材料的研究始于 20 世纪 70 年代, Clark 等人^[6] 系统研究了稀土 - 过渡族金属 (Ni, Co, Fe, Al, Mn) 化合物,发现具有 MgCu₂ 型 Laves 相结构的 RFe₂ 合金具有较大的室温磁致伸缩值。但是该材料的磁晶各向异性性能很高,各向异性常数达到 10^6 J/m^3 数量级,仅被当作永磁材料的候选者。后来,研究人员发现 RFe₂ 的各向异性常数具有正负号,于是利用符号相反的 RFe₂ 相互补偿来获取较低磁晶各向异性性能的磁致伸缩材料。1974 年, Clark 等人^[7] 成功地发现了赝二元金属间化合物 Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe₂ 合金,它具有磁致伸缩值高、居里温度高、磁晶各向异性性能小等优点,目前 Terfenol-D 牌

号的超磁致伸缩材料 (Tb_xDy_{1-x}Fe₂) 已经商品化应用。

如今,稀土超磁致伸缩材料像稀土磁光材料、稀土永磁材料和稀土高温超导材料一样,成为人们广泛关注的又一新型稀土功能材料。

3 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,然而 Terfenol-D 材料较压电陶瓷材料具有更优越的性能:

(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。当环境温度高过居里温度时,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,机电耦合系数可达到 0.8。

(5) 超磁致伸缩材料可承受高达 200MPa 的压力,能适用于高压力的执行器、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 (°C)	380°C ± 40	180°C ± 100
机电耦合系数	0.8	0.7
响应速度	μs 级	ms 级

4 超磁致伸缩材料当前的研究热点和进展

4.1 关于制备工艺的研究

111 方向是 Terfenol-D 材料的易磁化方向,也是磁致伸缩系数最大的方向.因此生长 111 方向的单晶是获得大磁致伸缩材料的途径之一.磁致伸缩材料单晶或取向晶体的生长方法主要有直拉法、悬浮区熔法和布里奇曼法等等.

直拉(Czochraski)法是将籽晶与熔融金属接触,以一定速度拉出,依靠固液界面张力将熔化金属提出后凝固生成单晶的晶体生长方法.该方法要求高的真空度和高纯度的原料,拉出的晶体成分偏差较大,目前只用于实验室研究.

悬浮区熔(Free-standing-zone)法是将母合金棒放入悬浮区熔装置中,由感应线圈提供一定宽度的熔区,棒相对于感应线圈上下移动,母合金经过熔化-凝固过程后得到单晶或定向多晶的方法.悬浮区熔法避免了坩埚对原材料的污染,元素烧损少,轴向成分和性能比较均匀.此方法适用于生产小尺寸的棒材.

布里奇曼(Bridgman)法是将熔体置于底部尖端的坩埚内,熔体通过水冷结晶器作用,缓慢生成单晶的方法.该方法生成的棒材磁致伸缩性能略差,但是可以一次浇注多根不同尺寸、不同形状的棒材,适合大规模生产,目前已经商业化应用.

目前,研究者在单晶和取向晶体的制备工艺上取得了很大的进展,如北京科技大学周寿增教授、北京航空航天大学蒋成保教授等成功制备出 $[110]$ ^[8]、 113 ^[9]和 $[112]$ ^[10]取向的 TbDyFe 磁致伸缩材料.由于 Terfenol-D 合金凝固时晶粒的择优生长方向为 112 和 110,且在晶体生长过程中容易出现包晶反应、组分过冷,生长 111 方向的单晶很难.1995 年,中国科学院物理研究所吴光恒研究员采用直拉法首次生长出 111 方向的 Terfenol-D 单晶^[11],其自由样品磁致伸缩值达 1800ppm;在 6MPa 压力和 2kOe(10e = 79.5775A/m)磁场作用下,该单晶最大磁致伸缩值为 2375ppm^[12].

由于制备单晶和取向晶体的成本高,且需要根据实际应用对单晶进行切割处理^[13],造成很大浪费,更不能制备大尺寸和形状复杂的磁致伸缩应用元件.于是研究者借鉴了永磁材料制备中的烧结和粘结技术.如利用磁场取向成型法^[14],将 Terfenol-D 粉末制成晶粒沿磁场方向取向的压结体,然后在一定的温度(950—1050℃)下烧结 12h,使晶粒长大.在 14kOe 下,该烧结体材料的磁致伸缩值达到

1067ppm. Clark 等用粉末粘结法^[15]制备了 ErFe₂ 和 TbFe₂ 的粉末粘晶体,其中在磁场下固化的 TbFe₂ 粘晶体,饱和应变达到 1185ppm.另外研究者还研究了不同胶含量和粉体粒径对磁致伸缩性能的影响^[16,17].烧结和粘结方法虽然降低了磁致伸缩系数,却能够制备大尺寸异形元件,具有很高的实用价值.

4.2 关于超磁致伸缩材料组分的研究

目前稀土超磁致伸缩材料组分的研究主要集中在以下两个方面:

4.2.1 对 RFe₂ 结构中 Fe 原子的替换

研究人员用 Ni,Co,Mn,Al 取代 RFe₂ 中的 Fe 后发现,Mn 的替代^[18]显著降低了磁晶各向异性能,磁致伸缩值增大,而 Ni,Co 的替代未见明显的效果,Al 的替代虽然降低了磁致伸缩,但同时略微降低了饱和场^[19].另外少量的非金属 B 的掺杂可促进成相和提高磁致伸缩^[20,21].

4.2.2 开发含轻稀土的超磁致伸缩材料

对于 Terfenol-D 而言,限制其推广的一个原因是重稀土价格昂贵.因此,价格低廉的轻稀土超磁致伸缩材料成为又一研究热点.这方面的工作开始主要集中在含 Sm 和 Pr 的化合物上^[22,23].由于具有与 TbFe₂ 相比拟的室温磁致伸缩,SmFe₂ 首先引起研究者的重视.但 SmFe₂ 的磁致伸缩值是负的,应用范围较小.因此可能使用的材料是含 Pr 的化合物,但是由于 Pr 的原子半径较大,常压下不能合成含有较高浓度 Pr 的 Laves 相材料.研究发现,Ce 原子具有较高的结合能,Ce 的掺入能够提高 Laves 相金属间化合物中 Pr 的浓度^[24].因此研究含有 Pr,Ce 轻稀土的超磁致伸缩材料具有重要的研究价值.对于含轻稀土 Pr 的 Laves 相金属间化合物的研究^[25,26],发现 Pr_{0.15}Tb_{0.75}Dy_{0.25}Fe₂ 取向材料 $\lambda = 2200\text{ppm}$ ($H = 10\text{kOe}$),磁致伸缩性能比无 Pr 替代的 Tb_xDy_{1-x}Fe₂ 高出约 400ppm.

根据单离子模型,CeFe₂ 和 PrFe₂ 在 0K 下的磁致伸缩值分别达到 6000 和 5600ppm,分别远大于 TbFe₂、DyFe₂ 的 4400 和 4200ppm.然而低温条件下 CeFe₂ 磁致伸缩系数仅为 60ppm.原因在于 CeFe₂ 中稀土 Ce 离子表现为 +3.29 价,而不是 +3 价,因此,获得表现为 +3 价的 Ce 基化合物有可能获得大磁致伸缩材料.唐成春博士研究了含 Ce 的 Laves 相金属间化合物,通过对材料的晶体学、磁学性质的分析,系统地研究了 Ce 的变价行为,证明 Ce 向 +3 价的波动确实对磁致伸缩有贡献^[27-31],在 Ce 基轻稀

土超磁致伸缩材料研究方面取得较大的进展。

5 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,超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。近年来,随着超磁致伸缩材料的不断开发和应用,已形成了替代压电陶瓷的趋势。超磁致伸缩材料的用途可分为以下几个方面。

5.1 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和磁致伸缩材料。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。超磁致伸缩材料 Terfenol-D 与压电陶瓷材料 PZT 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,从而在声纳系统中得到广泛的应用。用 Terfenol-D 制成的超声波发生器在捕鱼、海底测绘、建筑和材料的无损探伤方面也有很好的应用前景^[32]。图 1 是超磁致伸缩材料的应用原理图。由驱动线圈提供磁场, Terfenol-D 棒材的长度会发生变化,从而将电能转换成声波或机械能输出。另外超声振动能够使液体瞬间产生大量气泡并破裂,产生局部的高温、高压和机械振动,于是人们用超磁致伸缩材料制成了大功率超声换能器,用于超声清洗、加工和分散等领域。

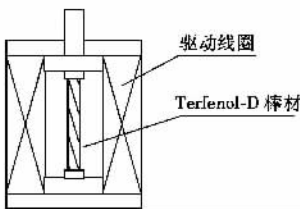


图 1 超磁致伸缩材料应用原理

5.2 传感器和电子器件

利用超磁致伸缩材料的磁致伸缩大、响应速度快的特点,超磁致伸缩材料可以制成位移、力、加速度的传感器,还可以用于与磁场有关的物理量测量。Chung 等利用 Terfenol-D 设计了一个磁致伸缩型二极管激光磁强计^[33],对 90Hz 的交变磁场,具有 0.2mOe 的分辨率,而一般商用磁强计只有 1mOe 的分辨率。

5.3 微控制领域

利用超磁致伸缩材料应变随磁场变化以及响应速度快的特点,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,用于精确定位、微动马达和精密阀门等方面,如分辨率达 nm 级的微位移执行器和微小步进达微弧度的旋转马达^[34]。超磁致伸缩材料可应用于燃料注入系统,实现对燃料的精确、瞬时控制,以达到燃料充分燃烧,减少污染的目的,目前已经应用于汽车等内燃机。

5.4 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,ABB 等几家公司设计了阻尼减震系统,并预见磁致伸缩材料用于未来的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。

超磁致伸缩材料制成的元件在功率、响应频率、低压效果、可靠性等方面的优势引起了世界各国的重视。美国海军早在 20 世纪 70 年代就开始了水下超磁致伸缩材料的研制工作;日本海洋科技中心与 NKK 电子工业公司开发了用于音响层 X 射线照相术的超磁致伸缩低频声纳换能器;东芝公司试制了超磁致伸缩低频小型扬声器,超磁致伸缩材料已经进入民用阶段。人们仍在努力探索室温超磁致伸缩材料应用的新领域。

6 结束语

高性能的超磁致伸缩材料是现代技术所必须的重要功能材料之一,它的广泛应用将导致一系列控制和执行元件的革命。高技术产业的迅速发展,对稀土超磁致伸缩材料的需求日益增大。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 $\phi 0.5-1\text{in}$ ($1\text{in} = 2.54\text{cm}$) 圆棒约 10000in。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致动器的市场更加可观。

稀土超磁致伸缩材料中稀土占有相当大的比例,以原子百分浓度计达 33% 以上。我国是一个稀土大国,超磁致伸缩材料又有广阔的市场和应用前景,所以开展稀土超磁致伸缩材料的研究,开展多学科交叉研究,拓展超磁致伸缩材料的应用,对推动我国稀土事业的发展和提高科技水平将产生深远的影响。

参 考 文 献

- [1] 钟文定. 铁磁学(中). 北京:科学出版社,1987. 21 [Zhong W D. Ferromagnetics(II). Beijing :Science Press ,1987. 21 (in Chinese)]
- [2] 都有为. 物理,2000 ,29 :323 [Du Y W. Wuli (Physics) , 2000 ,29 :323 (in Chinese)]
- [3] Legvold *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1963 ,10 :509
- [4] Clark A E *et al.* Phys. Rev. A ,1965 ,138 :216
- [5] Rhyne J *et al.* Phys. Rev. A ,1965 ,138 :507
- [6] Clark A E. Ferromagnetic Materials. Ed. Wollfarth E P. Amsterdam :North Hollond Publications ,1980 ,1 :532
- [7] Clark A E *et al.* AIP Conf. Proc. ,1974 ,18 :1015
- [8] 张茂才,高学绪,周寿增等. [110]轴取向的稀土-铁超磁致伸缩材料. 见:中国物理学会等编. 第10届全国磁学和磁性材料会议论文集. 北京,1999. 567 [Zhang M C , Gao X X , Zhou S Z *et al.* The R-Fe giant magnetostrictive material with [110] axial orientation. In :Chinese Physical Society *et al* ed. Digests of the 10th National Conference on Magnetism & Magnetic Materials. Beijing ,1999. 567 (in Chinese)]
- [9] 张茂才,高学绪,周寿增等. 具有 113 轴取向的稀土超磁致伸缩材料. 见:中国物理学会等编. 第11届全国磁学和磁性材料会议论文集. 长沙,2002. 449 [Zhang M C , Gao X X , Zhou S Z *et al.* The rare-earth giant magnetostrictive material with 113 axial orientation. In :Digests of the 11th National Conference on Magnetism & Magnetic Materials. Changsha ,1999. 567 (in Chinese)]
- [10] 蒋成保,周寿增,张茂才等. 材料研究学报,1998 ,12 :482 [Jiang C B , Zhou S Z , Zhang M C *et al.* Chinese Journal of Material Research ,1998 ,12 :482 (in Chinese)]
- [11] Wu G H , Zhao X G , Wang J H *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1995 ,67 :2005
- [12] Zhao X G , Wu G H *et al.* Appl. Phys. ,1996 ,79 :6226
- [13] 贺西平,李斌,周寿增. 兵器材料科学与工程,1998 ,21 :62 [He X P , Li B , Zhou S Z. Ordnance Material Science and Engineering ,1998 ,21 :61 (in Chinese)]
- [14] Malekzade M , Pickus M R. US Patent 4. 1979. 152 ,178
- [15] Clark A E , Belson H S. US Patent 4. 1983. 378 ,258
- [16] Liu H Y , Li Y X , Wu G H *et al.* Appl. Phys. ,2002 ,91 :8213
- [17] Lim S H , Kim S R , Kang S Y *et al.* Magn. Magn. Mater. , 1999 ,191 :113
- [18] Wu C H , Yang C P *et al.* Magn. Magn. Mater. ,1997 ,166 :249
- [19] Mohan Ch V. Alloys Comp. ,1996 ,236 :184
- [20] Wu L , Zhan W S *et al.* Magn. Magn. Mater. ,1995 ,139 :335
- [21] Ren W J , Zhang Z D *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2003 ,82 :2664
- [22] Li Y F , Shen B G , Zhan W S *et al.* Alloys Comp. ,1995 ,288 :37
- [23] Wang B W , Hao Y M , Busbridge S C *et al.* Magn. Magn. Mater. ,2002 ,246 :270
- [24] Tang C C , Zhan W S , Li Y X *et al.* Phys. :Condens. Matter. ,1997 ,9 :9651
- [25] Li Y X , Tang C C , Wu G H *et al.* Appl. Phys. ,1998 ,83 ,7753
- [26] Li Y X , Wu G H *et al.* IEEE transaction on Magnetics. , 2001 ,37 :2696
- [27] Tang C C , Zhan W S , Li Y X *et al.* Phys. D :Appl. Phys. , 1998 ,31 :2426
- [28] Tang C C , Chen D F , Li Y X *et al.* Appl. Phys. ,1997 ,82 :4424
- [29] Tang C C , Zhan W S , Chen D F *et al.* Phys. :Condens. Matter. ,1998 ,10 :2797
- [30] 唐成春,吴光恒,李养贤等. 物理学报,2001 ,50 :132 [Tang C C , Wu G H , Li Y X *et al.* Acta Phys. Sin. ,2001 ,50 :132 (in Chinese)]
- [31] Tang C C , Li Y X , Du J *et al.* Phys. :Condens. Matter. , 1999 ,11 :5855
- [32] Tenganhn , Wikstrom. European Patent Application. 1990. 0 ,400 497
- [33] Chung R , Weber R , Jiles D C. IEEE Trans. Magn. ,1991 ,27 :5358
- [34] Vranish J M , Naik D P , Restorff J B *et al.* IEEE Trans. Magn. ,1991 ,27 :5355



· 物理新闻和动态 ·

利用客车来探测铁轨裂缝的仪器

最近英国 Warwick 大学的 Dixon S 教授领导的研究组发明了一种超声装置可放在客车上对火车铁轨的裂缝进行探测. 过去超声径迹探测设备必须要安装在特殊的火车上才能进行工作. 这种火车的速度要保持在每小时 20—30 英里. 而现在的新装置可以在一般快速疾驶的载人客车上使用, 车速可达到每小时 200 英里. 它还可以连续地、常规地检查刚出现的铁轨的裂纹.

新的超声技术可以探测到离铁轨表面 15mm 深处的裂纹缺陷, 另外它还可以测量出裂纹的“量规角(gauge-corner)”, 所谓的量规角经常发生在滚动的车轮与铁轨端点相接触处. 由量规角裂缝引起的径迹故障常常是许多意外事故发生的原因, 例如 2000 年 10 月发生在英国的火车脱轨事故也是由此产生的, 该事故造成四位乘客伤亡.

安装在火车上的探测器, 它能产生“低频、宽带的瑞利波”. 多种频率的声波将沿着铁轨表面快速地传播, 不同频率的波可以穿透到离铁轨表面的不同深度. 低频波一般能穿透 15mm 左右. 若声波在碰到铁轨内的裂缝时, 其中的部分将会被阻截, 这时稍稍有一部分声波会发生反射, 从而被探测器测定. 根据各种波的频率大小就可以测出裂缝的精确位置与深度.

初步的试验结果表明, 这项新技术还可以检测铁轨内部微结构的变化和应力的分布. 这对于识别裂纹的敏感变化有极大的好处. 当然为了能证实上述的各种能力, 还需要进行一系列的实验工作, 特别是要把探测器从实验室的条件转变到真正的实际客车上去做试验.

(云中客 摘自 Issue of Insight The Journal of the British Institute of Non-Destructive Testing , June 2004)