

无损残余应力测量及其新技术

罗健豪¹⁾

(澳门大学科技学院机电工程系, 中国澳门)



罗健豪, 1975 年生于香港, 澳门大学讲师, 1993 年获澳门总督学术奖, 1993~1997 年获澳门政府奖学金于澳门大学修读机电工程学士, 1997 年第一名毕业获 CEM 学术奖及留校任助教, 2000 年获澳门大学机电工程硕士, 同年获英国政府 Chevening 全奖学金于曼彻斯特科技大学 (UMIST) 修读金属与陶瓷材料硕士, 2001 年以曼彻斯特材料科学中心三个硕士课程的最高成绩完成学业获得 Armourers-and-Brasiers 学术奖. 兴趣为激光加工, 金属的无损测量, 工程力学.

摘要 简述及比较了主要的残余应力无损测量技术, 重点为磁力法. 并介绍一台新的磁力仪 MAPS, 且对 MAPS 及传统磁力仪作了比较. 同时以 X 射线及中子衍射得到的结果验证了 MAPS 的可靠性. 也介绍了文献上较少见的火车钢轨残余应力分布图.

关键词 磁力应力测量, 有效方向磁导率, 应力致磁各向异性中子衍射, X 射线, 超声波, Barkhausen 发射法, MAPS

1 引 言

材料内部缺陷如裂纹、气孔等直接影响构件的安全性和寿命, 如何无损地测量这些缺陷一直受到人们的重视, 其测量技术如超声波等已比较成熟. 对于某些构件, 其安全性与残余应力也有相当重要的关系. 如在石化工业中, 大量的事故就是由于构件表面存在很大的残余拉应力, 加速了表面腐蚀引起的. 此外, 残余应力对构件的疲劳强度也有重要的影响. 适当地在材料表面产生残余压应力, 可以显著提高构件的疲劳强度. 因此, 材料残余应力准确、快速的无损测量技术对残余应力的利用或防治具有非常重要的意义. 残余应力的测量及研究日渐获得人们的重视. 在欧洲已定期召开关于残余应力的国际会议, 在我国, 最近也出版了一些关于残余应力的书籍.

下面对各种主要的无损应力测量技术作出简要说明, 并重点介绍一台刚研制成功的新磁性应力测量仪 MAPS 及其在工业上的应用实例.

2 无损残余应力测量技术

材料的某些物理量 (如晶格常数), 在应力场的作用下会发生变化. 大多数的无损应力测量技术是通过测量这些物理量的变化, 间接地计算出物体内的

应力状态. 工业上较常用的无损残余应力测量技术有中子衍射、X 射线、超声波及磁力方法. 磁力法中较常用的技术有 Barkhausen 发射法、应力致磁各向异性法 SMA (Stress-induced Magnetic Anisotropy) 和磁致伸缩效应法 (Magnetostriction).

2.1 非磁力测量技术简介

中子衍射法主要是利用材料晶格常数的变化来推算出物体的应力状态. 当以一束波长为 λ 的中子流按某一角度辐照向材料表面时, 若辐照区中 Miller 指数为 hkl 的晶面族间距 D_{hkl} 刚好为 λ 的整数倍, 则反射的中子流便会发生相长干涉. 这时在与入射中子流成角度 ψ_{hkl} 的接收器处会收到一个峰值信号. 根据这些产生相长干涉的角度及波峰宽度, 由 Bragg 定律 ($2D_{hkl} \sin \theta_{hkl} = n\lambda$), 可以求出辐照区中某些晶面族的平均间距 D_{hkl} . 由于残余应力改变了材料的晶格常数, 因而同一晶面族 (hkl) 的间距在无应力状态时, 用中子衍射测出的间距会变成 D_{0hkl} . 所以辐照区中晶格的微应变可表示为^[1]

$$\left. \begin{aligned} e_{hkl} &= \frac{D_{hkl} - D_{0hkl}}{D_{0hkl}} = -\cot \theta_{0hkl} \frac{(\phi_{hkl} - \phi_{0hkl})}{2} \\ \phi_{0hkl} &= 2\theta_{0hkl} \end{aligned} \right\} (1)$$

2002-05-22 收到第 1 稿, 2002-09-17 收到修改稿.

1) E-mail: fstkhl@hotmail.com

式中下标 0 表示无应力状态量. 设微应变 ϵ_{hkl} 与坐标轴的方向余弦为 lmn , 则主应力张量可表为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{lmn} &= l^2\epsilon_{xx} + m^2\epsilon_{yy} + n^2\epsilon_{zz} + 2lm\epsilon_{xy} + \\ &\quad 2mn\epsilon_{yz} + 2nl\epsilon_{zx} \\ \sigma_{ii} &= \frac{E}{1+\nu}\epsilon_{ii} + \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot \\ &\quad (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \quad (i = x, y, z) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

至少对 6 个不同的角度进行测量, 便可由式 (2) 的第 1 式求出应变并进而求出主应力张量, 从而了解材料内残余应力的情况.

X 射线的原理与中子衍射相似, 由于 X 射线的波长较大, 其探测深度 ($10\mu\text{m}$ 级) 和精度不及中子衍射. 但 X 射线源较中子源易于获得. 因此工业上 X 射线的应用远较中子衍射为广.

材料的应力状态会直接影响弹性波在其内部的传播速度. 这也是超声波法的基本原理. 例如在单向应力时, 平行应力方向的纵波传播时间与应力的关系为

$$d\sigma = \frac{E}{L_{xx}t_0} dt \quad (3)$$

L_{xx} 为 x 方向的声弹性常数, t_0 为无应力时的波传播时间. 因此, 通过比较超声波在材料有应力及无应力情况下的波速, 就可估计到材料的应力状态. 与 X 射线及磁力法相比, 超声波有较大的探测深度, 适用的材料也较多. 但超声波波速的变化十分微小, 其测量并不容易, 而且材料的结构对其影响也很大. 因此超声波的流行程度远远不及 X 射线. 这些非磁性无损测量技术, 尤其 X 射线, 都已广泛应用在各种工业上.

2.2 磁力测量技术简介及磁力仪的现状

磁力法与上述方法相比, 具有测量速度快, 探测深度大 (可达数毫米), 无辐射危险等优点, 此外一般磁力仪携带方便. 因而可对使用中的构件进行实时实地且安全的测量. 但磁力法只能用于铁磁性材料. 且对材料结构等因素也敏感. 这些因素均多多少少限制了磁力法在工业上的应用.

铁磁性材料内部存在大小不同的磁畴, 每个磁畴的磁化矢量是不相同的. 应力和外加磁场可改变磁畴的大小, 从而使物体的尺寸与磁力性能发生变化, 这即为磁致伸缩效应. 磁畴大小的变化伴随畴界移动, 而材料中的晶界及杂质等则对畴界起钉扎作用. 当施加一磁场或应力于材料时, 磁畴有变化的趋势, 但由于钉扎源的存在, 作用区中磁畴的大小仅在外因达到某一数值时才会变化, 畴界不连续

的移动会产生电磁脉冲, 叫 Barkhausen 信号. 这便是 Barkhausen 发射法的基本原理. 对于正磁致伸缩材料, 当外磁场平行应力时, Barkhausen 信号正比于拉应力而反比于压应力. Barkhausen 信号也与应力及磁场的方向有关. 故由 Barkhausen 信号可计算出材料的残余应力状态. 当磁探头在材料表面转动一圈, 最大与最小的 Barkhausen 信号在材料的磁各向异性不强时, 对应于两个主应力. 比较材料在无应力及有应力状态时的 Barkhausen 信号值, 便可以求出一对主应力 [2].

当对磁各向同性材料施加一磁场 H 时, 物体内的磁感应强度 B 在无应力时会平行于 H . 但应力可使材料变成磁各向异性. 此时 H 与 B 间将存在一个角度. 这便是应力致磁各向异性 (SMA). 基于 SMA 法的磁力仪一般在其探头内放置有一 U 型磁铁, 且在平行及垂直于磁铁磁极的方向各布置一个线圈. 若 H 与 B 平行, 则仅在平行磁极的线圈产生感应电压. 反之则两个线圈都有感应电压. 这两个电压之比经处理后的信号与该处的主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) 有一一对应的关系. 且当 σ_1 与外加磁场 H 成 45° (逆时针) 时出现最大值. 从而由 SMA 读数的变化也可以定出主应力的方位. 实用上线圈布置较繁复且数目较多, 但其原理不变. 材料结构等对 SMA 信号的影响很小. 这是其优点. 但此法最大缺点是仅能测出 ($\sigma_1 - \sigma_2$) [3~5]. 因此像光弹性法一样, 需要借助附加实验如剪应力差法, 才可测出两个主应力的大小.

磁致伸缩效应法与 SMA 法类似, 都是以内置线圈的探头对物体施加一交变磁场. 线圈的感应电压与磁通量跟材料的磁导率 μ 有关. 材料在应力作用下, 其磁导率 μ 要发生变化且与应力成正比. 其关系为 [6]

$$\frac{\Delta\mu}{\mu\sigma} = \lambda_0 \cdot \mu_0 \cdot \sigma \quad (4)$$

$\Delta\mu = \mu_0 - \mu_\sigma$ 为无应力与有应力时的磁导率之差, λ_0 为初始磁致伸缩系数, σ 为应力值. 因此通过测量线圈的感应电压便可间接计算出物体的应力状态. 当探头转动一圈时, 线圈最大及最小的信号值与一双主应力对应. 所以由信号读数大致可知道主应力方位. 与 SMA 法一样, 此法也仅能测出 ($\sigma_1 - \sigma_2$). 但它对材料结构等因素的敏感度比 SMA 法更高. 另外, 由于式 (4) 仅在应力小于 300MPa 时成立. 此法不宜用于测量含高残余应力的构件 [6].

上面提到的各种磁力法, 以 Barkhausen 发射法较常用, 其原理应用已差不多有 30 年的历史. 现今大多数磁力仪均基于此法. 但材料的结构, 晶粒大小, 杂质等对 Barkhausen 信号有强烈的影响.

找出 Barkhausen 信号与这些因素的关系一直是人们努力的方向。Barkhausen 法一般用于浅表测量 ($\sim 0.1 \text{ mm}$)。而其有效测量范围约为材料屈服应力的 50%，高于此范围时，Barkhausen 信号将出现饱和效应^[7]。至于利用 SMA 的磁力仪，最早进行研究的人是澳洲 Tasmania 大学的 R. Langman^[3~5]，他早在上世纪 80 年代初已利用 SMA 原理测量火车轮的残余应力状态。但由于此法仅能测出 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ，一直不及 Barkhausen 法流行。可是，由于 SMA 信号对材料组织等因素的敏感性较低，故在下面介绍到的新磁力仪 MAPS 也利用 SMA 来决定主应力的方位。至于磁致伸缩效应法，它只能测出 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 。国产的 CCY-84 型磁力仪就是基于此法的^[6]。

3 新一代的磁力仪及基本原理

最近在英国研制了一台能同时找出测量点上主应力大小及方位的新磁力仪——MAPS (Magnetic Anisotropy and Permeability System)。MAPS 的研制曾得到英国能源部及欧洲一些产油公司资助，其目的是制造出一台可靠的工业用测量仪。以对离岸油气生产设备作检测^[8]。MAPS 于 1 小时内差不多可获得 40 至 50 个不同点上的主应力值及方向，并且不需任何附加实验。故测量的效率大为提高。MAPS 不对被测体有任何损伤，其测量深度也较大 (可达数毫米)。

在 MAPS 中磁致伸缩效应称为有效方向磁导率 DEP (Directional Effective Permeability)。MAPS 同时应用 SMA 及 DEP 两种方法进行测量。MAPS 主要利用对结构等因素较不敏感的 SMA 信号来确定主应力的方位。而用与应力大小有一定关系的 DEP 信号来确定主应力的数值。DEP 信号与材料的磁导率有关。利用材料热力学及大量的实验数据，MAPS 的发明者建立了一些关联磁导率 (DEP 信号) 及应力大小的模型。通过比较材料在有应力及无应力状态下的 DEP 信号，便可由这些模型换算出主应力的大小。一般磁力仪由于欠缺了这些应力转换模型。故而只能利用 DEP 信号求出 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ，而非 σ_1 及 σ_2 。磁导率张量与应力的关系为^[9]

$$\mu(\sigma) = \frac{dB}{dH} \quad (5)$$

其中 $B = \frac{\partial E(\sigma, H)}{\partial H}$ 为物体内磁感应强度， H 为外加磁场强度， E 为总自由能。

在外加磁场作用下，材料内磁畴的磁矢会向使系统总能量最小的几个方向偏转，因而各磁畴的磁取向都不相同，总自由能 E 包括外磁场磁化能 E_H ，

自磁化能 E_S ，磁各向异性能 E_K ，磁致伸缩能 E_σ 和交换自由能 E_e ^[9]。

$$\left. \begin{aligned} E &= E_H + E_S + E_K + E_\sigma + E_e = f(H, \sigma) \\ E_H &= - \int \mathbf{M} \mathbf{H} dV \\ E_S &= - \frac{1}{2} \int \mathbf{M} \mathbf{H}_S dV \\ E_K &= K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 \\ E_\sigma &= - \frac{3}{2} \lambda_{100} \left[\sigma_{11} \left(\alpha_1^2 - \frac{1}{3} \right) + \right. \\ &\quad \left. \sigma_{22} \left(\alpha_2^2 - \frac{1}{3} \right) + \sigma_{33} \left(\alpha_3^2 - \frac{1}{3} \right) \right] - \\ &\quad 3 \lambda_{111} (\sigma_{12} \alpha_1 \alpha_2 + \sigma_{23} \alpha_2 \alpha_3 + \sigma_{31} \alpha_3 \alpha_1) \\ E_e &= \frac{2J_e S^2}{A} \int [(\nabla \alpha_1)^2 + (\nabla \alpha_2)^2 + (\nabla \alpha_3)^2] dV \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中下标 1,2,3 表示晶胞的三个坐标轴， \mathbf{M} 为磁化向量， \mathbf{H} 为外加磁场， \mathbf{H}_S 为材料表面及体内磁极子磁场， K_1, K_2 为磁各向异性常数， $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为磁畴磁矢与坐标轴之方向余弦， $\lambda_{100}, \lambda_{111}$ 为 [100] 及 [111] 晶向的饱和磁致伸缩量， J_e 为交换积分， S 为原子自旋向量， A 为晶格常数。

考虑到系统自由能最小，且假设磁畴能量服从 Boltzmann 分布。对式 (6) 的各式在磁矢的各种位向上积分后可求出系统的总自由能。结合式 (5) 即可找到磁导率张量与应力的关系。上式计算十分复杂且忽略了磁滞等因素。过去由于缺乏这些模型，致使利用磁致伸缩效应的磁力仪不能快速求出主应力的大小，阻碍了其在工业上的应用。但是，找出这些关联应力和磁导率的模型及其计算殊不容易，因而直到本文写成时，MAPS 的模型也仅是适用于碳钢及不锈钢等黑色金属。

目前，MAPS 仍处于改进的阶段，并未在工业上大量应用。但在英国的 Salford, Manchester, 及 UMIST 大学已有利用 X 射线、中子衍射和 MAPS 做测量及进行比较的研究在进行。而 MAPS 亦已应用于实际工程上，例如用于测量输液、输气管道，火车轨及火车轮的应力分布。下面给出 MAPS 与其它方法测量结果的比较，并以 MAPS 在火车钢轨上得到的结果说明 MAPS 用于工程上的优势及其可靠性。

由图 1, 图 2^[10~12]，可见 MAPS 能清楚显示残余主应力的分布情况，这类主应力分布图，在焊接、激光处理、强度分析等领域中有重要的指导意义。从文献 [13,14] 可知，与工作应力相比，钢轨的残余应力是不能忽略的。因此在进行钢轨的疲劳寿命分

析时,应考虑残余应力. 否则误差可能很大. 此外,过去由于缺乏必要的先进测量手段,且由于轨冠的曲率使得测量十分困难,人们一般假设钢轨的三个残余主应力分别沿图中的 X, Y 及 Z 方向. 图 1, 图 2 表明这个假设在大部分区域是不成立的. 最后,由图 2 可知,新轨的残余应力分布并不对称于中线. 在一侧上由于轧制及矫直工序产生了很大的残余拉应力. 这有利于形成裂纹.

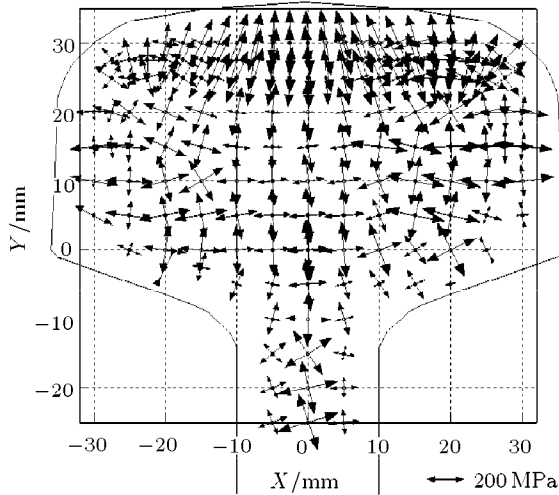


图 1 MAPS 在一新火车轨上求得的残余应力分布 (比例尺为 200 MPa)

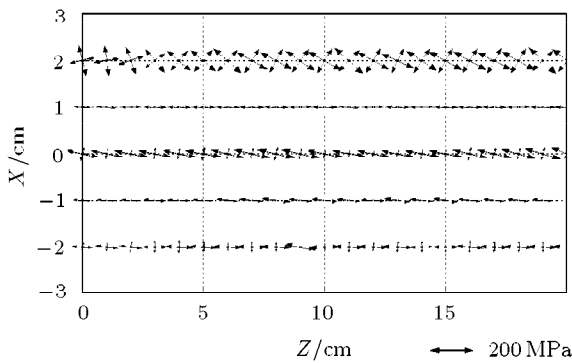
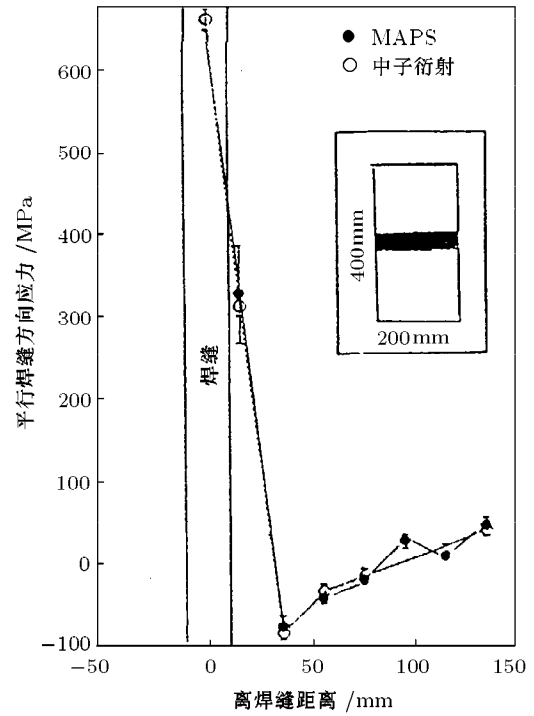


图 2 MAPS 在一新火车轨轨冠表面上求得的残余应力分布 (比例尺为 200 MPa, Z 为火车运动方向)

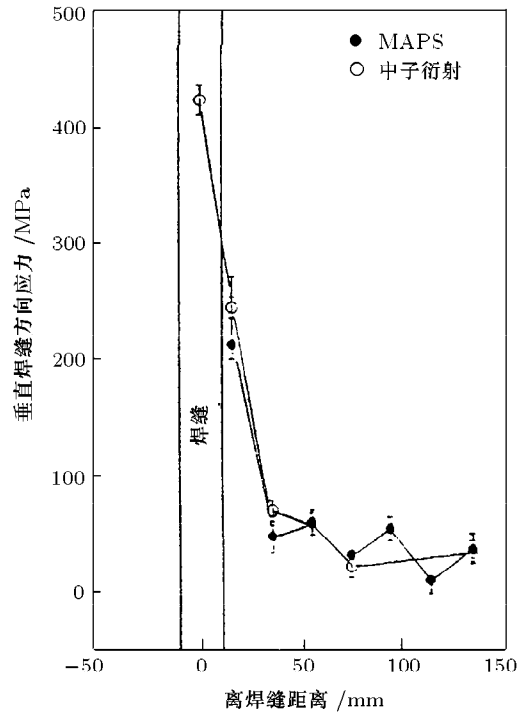
图 3 及图 4 是利用中子衍射及 X 射线与 MAPS 进行比较的结果. 由图可见 MAPS 的测量结果是可靠的. MAPS 也可以测出同一点上不同深度处之残余应力值 (图 5), 全过程只需 1~2 min, 因此利用 MAPS 也可方便地估算到构件的塑性硬化层的大小.

由于 MAPS 是一项新技术, 它仍有一些需要改进的地方, 大致可概括如下. MAPS 的探头呈圆柱型, 测量时以柱端平面紧置于待测体表面. 因此若

待测体表面为曲面时, 探头端面与待测体表面便有间隙存在, 测量结果将会失真. 对圆管这类等曲率物体, MAPS 有修正软件可用. 而对于像火车轨轨



(a)



(b)

图 3 利用 MAPS 及中子衍射在一块 V 型焊缝对接 50D 钢板中线上测得的应力比较

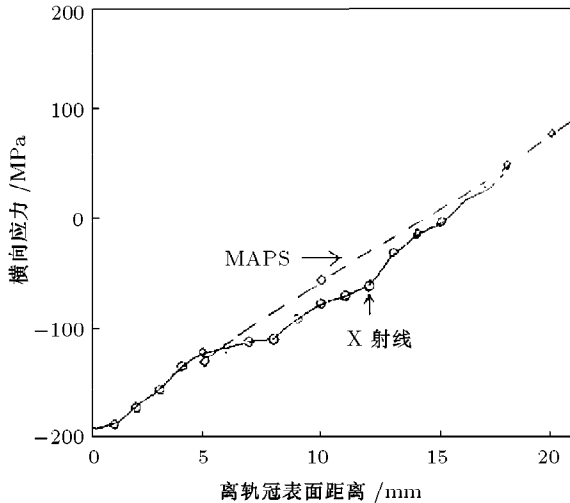


图 4 在一受载 13 年的火车轨横截面中轴上以 MAPS 及 X 射线测出的水平应力分量的比较

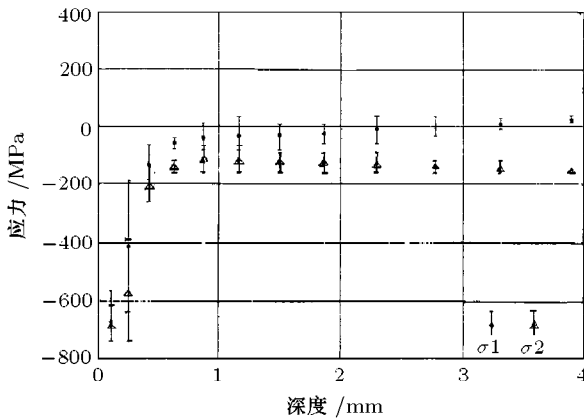


图 5 以 MAPS 在一喷丸强化不锈钢板某点上获得的不同深度处之残余应力值^[9]

冠表面这类变曲率物体，MAPS 的修正软件则仍处于调试阶段。另外，目前 MAPS 最小的探头直径为 10 mm。因此需要在距离物体边界至少 10 mm 的地方才能做测量（图 1 中的测量点均距钢轨边界约 10 mm）。为了能获得更接近物体边界处的应力分布，需要把探头进一步小型化。可是探头愈小，其内置的线圈也愈小，此时探头对待测物表面凹凸度等因素便愈敏感。MAPS 的稳定性及可靠性会降低。最后，与其它磁力法一样，MAPS 也受材料组织等因素影响。其应力转换数学模型目前仅适用于珠光体型碳素钢及某几类不锈钢。对于其它组织如马氏体型钢及其它材料因素的影响，仍需作进一步研究。

据 MAPS 的主要研制者 David J. Buttle 介绍，对变曲率物体问题，在对大量不同曲率的物体以 MAPS 做测量与用其它方法得到的结果作比较后，不难设计出修正软件。实际上这类软件已初步完成，图 2 就是经过该软件修正后得到的。至于做出更小巧但稳

定的探头，将涉及改良 MAPS 的电子线路设计。这方面的工作亦在进行。

据报我国也有人员在开发类似 MAPS 的新一代磁力仪，且已取得一定成果。

4 磁力测量及残余应力研究的展望

由于碳钢等铁磁性材料在工业上大量应用，磁性应力测量有十分广泛的应用前景。Barkhausen 发射法发展已相对成熟，今后仍将获得广泛应用。找出 Barkhausen 信号与材料结构等因素的相互关系将仍是人们的主要研究方向。至于单独利用 SMA 或磁致伸缩效应的磁力仪，由于它们仅可测得主应力差且需借助附加实验才能算出主应力的大小，其应用一直受到一定的限制。随着 MAPS 这种结合了两种方法优点的新磁力仪的出现，这些老式的磁力仪或许将被取代。

至于残余应力的研究方面，各工业国对残余应力都很重视。欧洲最重要的残余应力会议——The European Conference on Residual Stress (ECRS) 已举行了 6 届，欧洲各国的残余应力工作者每次均十分踊跃参加。跨国的研究也不少，例如在英国发生多起火车事故后，UMIST, Salford 及 Manchester 等大学在有关当局资助下已合作研究残余应力对钢轨疲劳强度的影响，其中部分实验更是与法国的一些科研机构共同进行的。在亚洲，日本也有不少关于残余应力的研究在进行。在我国，从已发表的文献数量及我国人员参与国际会议的情况来看，我国对残余应力的研究似乎仍然偏少，但重视程度已日益增加。随着我国工业高速发展，由残余应力引起的问题将更为突出，而表面工程等技术的研究在国内也是方兴未艾，准确的残余应力测量对它们来说是十分关键的。可以预计，无损应力测量及残余应力的研究在促进我国工业现代化上是大有作为的。

参 考 文 献

- 1 Bray DE, Stanley RK. Nondestructive Evaluation—A Tool in Design, Manufacturing and Service (International Ed). McGraw-Hill, 1993
- 2 Jiles D. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. 2nd edition. Chapman and Hall, 1998
- 3 Langman R. Measurement of the mechanical stress in mild steel by means of rotation of magnetic field strength. *NDT & E International*, 1981, 14(5): 255~262
- 4 Langman R. Measurement of the mechanical stress in mild steel by means of rotation of magnetic field strength—Part 2: Biaxial stress. *NDT & E International*, 1982, 15(2): 91~97
- 5 Langman R. Measurement of the mechanical stress in mild steel by means of rotation of magnetic field strength—Part

- 3: Practical applications. *NDT & E International*, 1983, 15(2): 59~65
- 6 张定铨, 何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射和分析. 西安: 西安交通大学出版社, 1999
- 7 Nondestructive Evaluation and Quality Control. Vol.17. ASM Handbook, 1989
- 8 Buttle DJ, Dalzell W, Gulliver JA, et al. The Development of MAPS: A Portable Instrument for Biaxial Stress Measurement. A report produced for the CEC within the THERMIE'93 programme, August-1996
- 9 Buttle DJ. Operations Manual of MAPS, 2000
- 10 Lo Kin Ho. Microstructural Influences on the Measurement of Stress by Magnetic Signals. MSc Thesis. UMIST, Manchester, September 2001
- 11 Lo Kin Ho, Buttle DJ, Mummery P. The effects of service life and duty on the residual stress in railway rails. In: Proceedings of the 6th European Conference on Residual Stress (ECRS6), Portugal, 2002
- 12 Hutchings MT, Buttle DJ, Scruby CB. Residual stress measurement for component life management. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Residual Stress (ECRS5), Sweden, 1997
- 13 张焱, 孔祥安, 金学松等. 轮轨三维弹塑性接触应力的算法研究. 力学与实践, 2000, 22(1): 23~27
- 14 张军, 吴昌华. 轮轨接触问题的弹塑性分析. 铁道学报, 2000, 22(3)

NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF RESIDUAL STRESS

LO Kin Ho

(Dept. of Electromechanical Engineering, Faculty of Science and Technology, The University of Macau, Macau, China)

Abstract This paper introduces and compares the most widely used techniques in the non-destructive evaluation of residual stress. The emphasis is on magnetic methods. This paper also introduces a new residual stress measuring kit, MAPS, which is compared with other conventional devices. Since researchers in the mainland are also making a similar device, this paper will be of value to them. This paper also compares the results obtained from MAPS, neutron diffraction, and X-ray.

Key words magnetic measurement of stress, directional effective permeability, stress-induced magnetic anisotropy, neutron diffraction, X-ray, ultrasound, Barkhausen emission, MAPS