

- [1] 上田良二, 固体物理, 1(1984), 1.
- [2] R. Birringer et al., *Phys. Lett.*, 102A (1984), 365.
- [3] R. W. Siegel and H. Hahn, in M. Yussuff (ed), *Current Trends in the physics of Materials*. World Scientific, Singapore, (1987).
- [4] J. A. Cowen et al., *J. Appl. Phys.*, 61(1987), 3317.
- [5] M. Vehara, *Phys. Lett.*, 114A(1986), 23.
- [6] 上田良二, 应用物理, 50-2(1981), 174.
- [7] R. Kubo, *J. Phys. Soc. of Jap.*, 17(1962), 975
- [8] M. A. Reed, *Appl. Phys. Lett.*, 54(1989), 1034.
- [9] H. Gleiter, *Encyclopedia Mater. Sci. Engin., Pergamon press, Suppl.*, 1(1988), 139.
- [10] 阶部惊, 小川久仁, *Mater. Tech. Rep.*, 26(1980), 457.
- [11] 官山胜, 化学总论, 48(1985), 203.
- [12] C. Hayashi, *Physics Today*, No 12 (1987), 44.

## 计算机断层扫描技术的工业应用

盛康龙 强玉俊 杨福家

(中国科学院上海原子核研究所, 上海 200233)

**编者按:** 这是一篇好文章, 尤其在宣传科学技术是第一生产力的活跃时期, 它具有很强的现实意义, 说明基础研究可为国民经济创造巨大财富。我们借此栏目向科研工作者及在诸如钢铁工业、电力工业、石化工业、兵器工业、海空军军械工业、机械制造业等生产制造领域的广大工程技术人员推荐这一篇有启发、有借鉴、有开拓和有吸引力的文章。

工业用计算机断层扫描仪(工业 CT) 及其应用是一项发展飞快的高技术。它不但在工业设备或产品的无损检测中得到日益广泛的应用, 而且正在迈入工业生产过程控制领域, 创造更为巨大的财富。本文简述了工业 CT 的基本原理和典型结构, 并着重介绍了几种十分成功的工业 CT 系统。同时, 我们也向读者介绍一位为工业 CT 发展作出重要贡献的物理学家摩根教授。

### Abstract

Industrial computer tomography (CT) and its application is a rapidly developing field of high technology. CT systems have been playing important roles in nondestructive testing (NDT) of products and equipment for a number of industries. Recently, the technique has advanced into the area of industrial process control, bringing even greater benefit to mankind. We present the basic principles and typical structure of an industrial CT system. Descriptions are given of some successful CT systems for either NDT application or process control purposes. We also introduce I. L. Morgan, professor of nuclear physics and a pioneer in the development of industrial applications of computer tomography.

不多几年前, 美国肯尼迪航天中心的工程师们曾遇到了一次不小的麻烦<sup>[1]</sup>。在航天飞机发动机上, 他们找到了一个不很起眼的凹痕, 凹痕仅如一枚硬币大小, 但它却位于一根燃料管的减震器上。减震器为壁厚 2.3 mm 的不锈钢波纹管, 用以吸收燃料注入发动机时的剧烈震动。然而, 这根高 1.8 m、重 900 kg 的燃料管

为呈“L”形的整体结构, 无法卸下减震器又不损坏燃料管。鉴此, 他们必须检查形变处壁厚与损伤程度。问题在于, 燃料管构造复杂, 凹痕部位又是一个拐角处, 一般的无损检测方法, 如超声波探伤或射线照相等, 很难奏效。眼看这根价值十万余美元的燃料管将由于这个小小的凹痕而被打入冷宫。

幸好,这个中心刚刚添置了一台新式的无损检测设备,这是一台叫做工业用计算机断层扫描分析仪 (computerized industrial tomographic analyzer) 的 CITA 201 型工业 CT<sup>[2]</sup>。他们用这台机器对凹痕部位作了 621 次测量,仅花四小时就得到了形变部位层析厚度一毫米的剖面图像。图像中不锈钢材料的密度均匀,这排除了内部缺陷的可能性;同时,对图像的处理表明,凹痕处的管壁厚度仍在加工公差允许范围之内。此举使该燃料管起死回生,也使 STS-26 航天计划如期执行。飞行中发动机工作正常。出师告捷,这台工业 CT 从此在肯尼迪航天中心 24 小时运行。它能发现燃料阀内密封油脂中的气泡、能明察热传感器中线径不足 0.02 mm 铂丝绕阻分布情况,这样的密度分辨本领和空间分辨本领,确非常规无损检测技术可比<sup>[3]</sup>。

计算机断层扫描 (CT) 技术是物理学和计算机科学的发展产物。它诞生于 70 年代初,随即使放射医学产生了革命性的变化。用于临床诊断的 X 射线 CT 扫描仪,现已是家喻户晓的医疗设备。80 年代以来,CT 技术工业应用的发展引人注目。工业 CT 不但成为工业设备或部件的无损检测新军,而且它们正在迈入工业生产过程的在线实时质量监控和工业设备的在役安全检查等领域,为人类创造更为巨大的经济财富。本文将在简述工业 CT 的基本原理和结构后,着重介绍几种十分成功的工业 CT 系统,以及与它们的发展直接有关的一位科学家,即摩根教授。

CT 技术的物理原理基于射线与物质的相互作用。射线穿越物体时,由于光电子产生以及光子散射等物理过程,相当部分的人射光子为物质吸收,一束初始强度为  $I_0$  的 X 射线或  $\gamma$  射线穿越密度为  $\rho$  的均匀物质后,其强度减弱为

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho D}, \quad (1)$$

其中  $\mu_m$  谓质量吸收系数,与物质种类和射线能量有关; $D$  为射线在物质中的行程长度,亦即被测部位的横向线度。被测物体一般由若干种

物质构成,则

$$I = I_0 e^{-\sum \mu_m \rho_i D_i}.$$

亦即射线衰减为不同物质吸收作用的指数和。

工业 CT 的典型结构如图 1 所示,它主要包括放射源、探测器组、样品台、电子学系统与接口、计算机系统等。放射源可为 X 射线或  $\gamma$  射线源,射线一般准直为扇形束。射线穿越被测物体后,也须经准直。探测器把光信号转换成电信号,经电子学系统放大并处理为数字信号。数据由计算机处理并把被测截面的图象显示或记录在终端设备上。根据前述射线吸收原理,探测器测量到的是被测物体被人射束“切割”处的不透明度信息。它们被处理成为投影 (projection),即如图中右侧所示(为简便直观,已将扇形束转化为平行束,从而给出图中的投影),图中曲线上每一点数据反映射线路径上样品密度的积分。把被测样品转动一个小角度,测得另一个投影。如此继续,得到全部投影数据。通过计算机计算,可以得到被测截面图象,此谓图像重建。一个典型的 CT 图象将涉及上万乃至更多的计数数据和数以亿次计的计算量<sup>[4]</sup>。

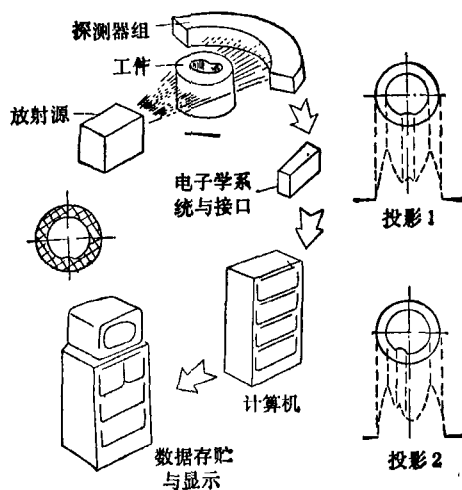


图 1 工业 CT 的结构与原理

图中“ $\Rightarrow$ ”所示为信号与数据输送方向,“ $\rightarrow$ ”所示为样品台转动方向;右侧投影系将扇形束化作平行束而得到

工业 CT 检测对象的构成物质密度范围

广,检测要求(精度、速度、分辨率,等)又往往较高,因此工业 CT 的结构和技术措施有许多不同于医用 X 射线 CT 的特点。

工业 CT 有采用 X 射线发生器作放射源者,但其端电压高,可达四百多 kV。有的还采用电子直线加速器,以检测特大型工件。采用放射性同位素  $\gamma$  源如  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  等,放射性活度一般为数十至 200 Ci。用作静态检测的工业 CT,如 CITA 201,往往备有若干套射线源,以适应不同尺寸、不同密度的检测要求。

工业 CT 的射线探测器可用 BGO (锗酸铋)或塑料闪烁体等配以光电倍增管组成,或则采用钨酸镭配以晶体光电管组成的电流积分探测器,也可采用其它高位置分辨率的 X 或  $\gamma$  射线探测器。探测器组可由数十个乃至数百个探测器组成。用于在线检测和过程控制的工业 CT 往往得在短短数十 ms 的时间里完成一次投影测量,探测器的信号脉冲宽度应为 ns 级,方可保证足够好的计数统计性(即因计数引起的测量误差极小)。这就要求在电子学系统和数据传输接口等的设计中采用 ns 快电子学(现有大部分电子学线路是  $\mu\text{s}$  级的)。典型的计数率和数据传输速率分别为 5 百万次/s 和 5 百万字节/s。有的还采用光缆系统传输数据,以排除环境中的电磁干扰。

工业 CT 的计算机系统,其硬件包括主机、阵列处理器和数据存贮、显示与输出等外围设备;软件有图像重建、图像后处理和 CT 系统的操作管理程序。主机一般为高速度、大容量的小型计算机,如美国 DEC 公司生产的 micro VAXII 或 VAX 3300。数据存贮与图像显示等终端要求大容量、高清晰度。图像后处理,除常规的二维图像处理外,还有任意截面、曲面图像合成等。

被测工件一般置于样品台上,样品台可将工件转动、平移与升降。一些空间分辨率要求高的系统,样品台的调节精度往往高达 1—10  $\mu\text{m}$  (线度)和 0.5—1% 度。其调节由计算机控制。除上述特点外,工业 CT 还往往有若干辅助系统。尤其是应用于工业过程控制的 CT 系

统,需要冷却、空压防尘、工件速度与温度测量、检测结果标记和应急保护措施等一系列的辅助系统。而且,这些保护措施和伺服功能的设置还应大大超过实际情况的需要,以确保生产的连续性和安全性。

与超声、射线照相等常规方法相比较,工业 CT 具有检测速度快、分辨率高等优点,在不少应用中,它们的独特贡献无法为其他无损检测技术替代。工业 CT 可给出被测工件的三维密度分布图象,这对于确定工件内部缺陷的性质、位置、大小、走向等,提供了极大方便。工业 CT 的密度分辨率之高,足以使操作者对密封式工件的内部组成、各种零件的尺寸或不同材料间的复合程度等等,有十分清楚精确的了解(如尺寸测量,其精度甚至好于千分卡)。把 CT 技术与计算机辅助设计制造 (CAD/CAM) 技术结合起来,可十分方便地研究机器的设计制造情况和功能,以便仿制、改型(此谓倒向工程学)。工业 CT 对工件的测量实际上不接触被测部位,因此其工作不受被测物温度、内部压力或表面平整度与附着物等因素的影响,这是 CT 技术胜过一些常规无损检测手段的重要方面。

说起 CT 技术工业应用的发展,笔者愿意略费笔墨介绍一下美国德克萨斯州首府奥斯汀市的两家工业 CT 公司和它们的创始人摩根教授,那就是制造 CITA™ 系列工业 CT 的科学测量系统公司 (SMS) 和制造 IRIS™ 系列工业 CT 的国际数字模式公司 (IDM)。

SMS 公司成立于 1979 年,由奥斯汀德克萨斯大学以摩根教授为首的一批物理学家创办,摩根教授任公司总裁兼研究部主任达八年之久。摩根教授是一位著名学者,他于 1954 年在奥斯汀德州大学获博士学位。1968 年和 1976 年,他相继担任该校原子核研究中心主任和基本粒子物理中心实验部主任。至今,他还兼职于两所德州大学,而且是一项大型国际会议的两主席之一。这就是每两年举行一次的“加速器在科学研究和工业生产中的应用”会议,1990 年第 11 届会议的与会者达上千人。摩根教授向来注重科研与生产的结合,他本人又是一位

业绩赫赫的企业家。早在 1956 年,他就创办了德克萨斯核子仪器公司(TN 公司,现以其性能出众的工业用核子仪表著称于世)。70 年代,他和他的同事们开始探索 CT 技术的工业应用,他们带头把高能物理和原子核物理研究中采用的实验技术,应用于 CT 系统,并创立了 SMS 公司。这是第一批工业 CT 专业公司之一,数年后,他们推出 CITA™ 系列产品。

CITA™ 为通用目的工业 CT,用于产品和设备的离线检测(或曰静态检测)。本文一开始提到的 CITA201,是此系列中的大型工业 CT。其放射源为 X 射线(420 kV X 射线发生器与 2MV 电子直线加速器)和  $\gamma$  射线(100 Ci  $^{60}\text{Co}$  或 200 Ci  $^{192}\text{Ir}$ ) 互换。放射源准直器的扇形角度与扇形厚度均连续可调,由计算机控制。测量大截面或高密度工件,采用小角度扇形束,扫描方式为转动加平移,被测工件的最大尺寸可至 1.5 m 直径与 1.8 m 高度,重量可达 3600 kg。测量直径 0.6 m 以下的工件,采用大角度扇形束作旋转扫描,以缩短检测时间,一次扫描可在半分钟内完成。CITA™ 系列工业 CT 的图像后处理软件功能完备,即使无法测定的投影数据——若射线从此方向入射将被吸收殆尽——也可根据其它方向上的测定数据,合成出 CT 图像来。

CITA™ 系统受到航空航天、机械制造、材料研究等众多部门的欢迎。SMS 公司的用户很快就达数十家,分布遍及北美,远达日本、欧洲。然而,摩根和他的一些同事们并不以此满足。他们很早就意识到,工业 CT 不光能解决产品的离线检测问题,它们还应在工业生产的过程控制方面发挥作用。而这一方面的发展,必将在更为巨大的程度上推动工业生产的发展,同时也使工业 CT 技术面临更为宽广的市场。

1982 年,他们开始把 CT 技术应用于热轧无缝钢管质量监测的可行性试验。热轧无缝钢管的主要用途是石油采集,用户对钢管的管径、壁厚、同心度等要求严格。但是,因为高温下钢铁呈良好塑性,废品率颇高。用 CT 技术对产品作在线实时的质量监测,十分必要。摩根等

人仿照第四代医用 X 射线 CT 扫描仪原理,把数百个探测器环列一周,一个  $^{60}\text{Co}$  源在环内高速环行,每周 20 s。但是,这一设计的关键缺点,是重达半吨的源罐的高速运动使轴承等部件不堪负担,故障率高,不宜推广。尽管如此,美国钢铁联合会及其下属的几家大钢铁公司仍然确认检测方法的可行性,他们联合支持摩根教授研制新型的 CT 系统。

摩根等人于 1987 年创建 IDM 公司,其经营方向就是应用于工业生产过程控制的 CT 系统。他们发展了有限角 CT 技术<sup>[2]</sup>,证明用钢管的三组投影,足以测定其管径、壁厚、同心度、椭圆度等截面参数。他们摒弃了旋转源设计,改用三源三探测器组固定式结构。三个 50 Ci  $^{60}\text{Co}$  源,探测器为塑料闪烁体加光电倍增管,每组 157 个探测器。三套源—探测器组三足鼎立,彼此相隔 120°。CT 系统每 25 ms 对钢管(移动速度每秒数米)作一次测量。数据由光缆送往计算机,求得截面参数后,根据已知的钢材料元素配比和热膨胀曲线,把计算结果化为冷尺寸。计算机还将测量结果与产品质量指标作比较,凡不合格者即由伺服机构打印记号,同时计算热轧参数的调节量,馈送给热轧线主控计算机。这一系统在 1988 年底完成实验室试验<sup>[4]</sup>。

据当时估计,这样一个 CT 系统投入无缝钢管热轧线运行后,每年将产生数百万美元的经济效益。首先,当热轧线开工或变更产品规格时,往往要花一定时间确定、调整工艺过程,而该系统可十分简捷地找到所需工艺条件。经 CT 检测,钢管头尾的切割正确,且单位长度重量受到严格控制,工厂由此增加产量、节约成本。更何况每根产品经百分之百的全长度质量检查,将使产品的市场竞争能力大为提高。1989 年 5 月,美国钢铁联合会的一个专门委员会对上述 CT 系统作了鉴定,建议将其投入热轧现场试运行。可惜,这一建议没能如期实施,原因是原与 IDM 订有租借协议的钢铁公司在产权问题上违约。

虽然遭此挫折,摩根教授等人的多年努力并未尽付东流。在潜心研究 CT 技术热轧生产

应用的同时,他们还在探索其它工业过程控制的 CT 应用。他们发现电力生产中的高温高压设备的在役安全检查(即不停产检查)是 CT 技术的用武之地。为此, IDM 公司已与德克萨斯电力公司签订了合作协议。

发电机的汽轮机在  $650^{\circ}\text{C}$ 、 $140\text{ kg/cm}^2$  的高温高压下运行,安全问题至关紧要。以前,安全检查都得停机进行,检查前还须拆除管道的绝热包装,作清理处理,检测后再行复原。工作周期长,检查费用高,而且停机还损失发电量。据估计,一台机组停产一天的损失约为 25 万美元。问题还不止于此,由于检查进度慢,不少机组因老化而处于降温降压运行状态,以保障安全。这样造成的发电量亏损,还得由新的机组来加以补足。由于对设备的确切寿命心中无数,要定期更换大批“到期”的设备。一家电力公司在这些方面的支出极为巨大。工业 CT 正是解决这些问题的理想手段。

IDM 公司在其原有工作基础上,为电力公司设计了两种 CT 系统,并定名为 IRIS<sup>TM</sup>(全长度实时检测系统, integrated real-time inspection system, iris 为英文“虹膜”之主,故 IRIS 含“观察事物的新方法”之意)<sup>[7]</sup>。第一种 IRIS<sup>TM</sup> 为固定式结构,该系统结构与原先准备用于钢管热轧线的 CT 系统相仿,但三个  $^{60}\text{Co}$  源各为 100 Cui,每个探测器组由 243 个探测器组成。被测工件置于测量台上,其转动精度为  $0.005^{\circ}$ 。整个测量头的横向尺寸近四米,可对直径近一米的工件作高精度检测。CT 图像的密度分辨率好于 0.5%,体灵敏度  $3.3\text{ mm}^3$ 。所谓固定式,系指该系统被固定安装于发电厂的维修车间内,对一切新的或行将更换上去的管道、阀门、泵、热交换器等部件作预检。此举可剔除废次进货,同时建立每一厘米长度上的质量档案,以备日后将在役检查结果与之比较,估算它们的使用寿命。

第二种 CT 系统谓活动式 IRIS<sup>TM</sup>。整个系统其实是一个车载实验室,由大型货车改装而成。该系统巡回于各使用现场之间。在发电厂里,它的检测头沿着被测管道等平移、转动,

所得信息由光缆馈送至车载实验室的计算机内处理。活动式 IRIS<sup>TM</sup> 系统采用单源单探测器组结构,放射源为  $^{60}\text{Co}$  与  $^{192}\text{Ir}$  互换,前者 10 Cui,后者 100 Cui。探测器组为 71 个塑料闪烁体探测器,探测器结构已作改进,以适应长途跋涉及其扫描方式的要求。活动式 IRIS<sup>TM</sup> 的扇形束张角近  $70^{\circ}$ ,可包含外径(包括外包装在内)为 550 mm 的管道。此系统的工作不受被测物内介质或外包装的影响(因为它们都是低密度物质),检测尽可在发电机组运行时进行。测量结果也如前述化为冷尺寸。测量得到每一厘米长度上的截面参数、密度分布和腐蚀情况等,一一记录于光盘上。将它们与初始值和前后检查结果作比较,可获得被测部件各处的蠕变率、塑性形变、腐蚀率、应力裂缝生长、焊接质量变化等一系列数据。IRIS<sup>TM</sup> 系统对上述变化量的测定精度为这些变化的临界影响值的十分之一左右,由测量结果推算而得的使用寿命的误差为一年。在电厂设备中,高温高压蒸汽管道接缝处的焊接质量变化,是安全生产的薄弱环节,IRIS<sup>TM</sup> 系统的问世,使这一类问题得以可靠控制。

1990 年, IDM 公司的业务发展很快,美国南部的几家电力公司纷纷订购或租借上述两种 IRIS<sup>TM</sup> 系统。美国的石油化工企业和海军部门,也欲用此系统以解决一些管道和水下设施的安全检查问题。IRIS<sup>TM</sup> 系统还在欧洲引起很大反响,对之感兴趣者包括当地的钢铁、建筑、石油化工和电力等工业界人士。北美的钢铁业界仍然是这一领域的首批 IRIS<sup>TM</sup> 用户,加拿大的一家钢厂将在 1992 年春天把一台 IRIS<sup>TM</sup> 安装于它的无缝钢管热轧线上。

IDM 公司的成长过程,是美国工业 CT 研制、发展与应用的一个缩影,也是美国科学家们走出实验室,把高技术推向国民经济领域的一个典型事例。不少美国人把“教授当老板、小而精的高技术企业纷纷崛起”称为“美国现象”<sup>[8]</sup>。这种现象的确在美国各地都很普遍。值得指出的是,教授经商得利后,常不忘基础研究。摩根教授在他的长期奋斗过程中,积累了多方面的

学科知识(他在钢铁加工、发电设备、材料学等领域都堪称专家)。目前,他还在进行毫微米科学技术的研究,从微观机制上考察合金中缺陷形成的原因。IDM 公司联合德克萨斯州的好几家企业资助北德克萨斯大学的静电加速器实验室,每年 50 万美元,用加速器质谱、核微探针等一系列先进手段,研究各种特殊条件下金属结构的微观行为。摩根教授领导的一个研究组的毫微米材料科学研究的一项申请,被美国科学基金会评为“优”,获得每年 50 万美元共五年的基金,该大学物理系气象由此一新。

为了我国的科学技术的发展,为了我国经

济的腾飞,我们正需要有更多的“摩根教授”,愿今天和未来的物理学家们努力,再努力!

- [ 1 ] H. P. Engel, ASTM Standardization News, March (1989), 34.
- [ 2 ] Scientific Measurement Systems Inc. Product Literature (1988).
- [ 3 ] Scientific Measurement Systems Inc. Product Literature (1990).
- [ 4 ] H. Ellinger et al., ASNT Reports, (1988).
- [ 5 ] I. L. Morgan, U S. Patent 06732301, (1988).
- [ 6 ] International Digital Modeling Corp. Product Literature (1988).
- [ 7 ] International Digital Modeling Corp Product Literature 1990
- [ 8 ] 杨福家,论美国现象,科学报1988年12月16日.

## 磁场处理燃料油的电镜分析

陈国宪 尹志营

(天津大学物理系,天津 300072)

目前,电磁技术在工业、农业、国防、现代科学技术等各个领域已有了广泛的应用。在石油和石化工业部门对电磁技术的应用也很重视,并取得了可喜的成果。但是,各地区、各部门在电磁技术的应用方面发展并不平衡,有的应用效果好,有的应用效果不太好。这主要是不知道应用效果好坏的原因所在,也就是说,在应用中还存在一定的盲目性。为提高在应用中的自觉性,从理论上搞清其机理是必要的。不少人曾对磁场处理的燃料油进行了大量光谱分析研究,很多实验结果是吸收峰没有发生位移,这说明油分子结构未因磁场作用而产生变化。

作者对磁场处理前后的燃料油,用透射电子显微镜分别进行了形貌和结构分析。通过形貌分析发现,无论是柴油还是重油,在未经磁场处理的情况下,其沉积物的形貌结构显得致密,而经过磁场处理的油样(柴油和重油),其沉积物的形貌结构显得疏松。通过结构分析发现,无论柴油还是重油,在未经磁场处理的情况下,其沉积物的结构为点阵的单晶结构,而经过磁场处

理的油样(柴油和重油),其沉积物的结构照片为环状的多晶和月晕状的非晶结构。这说明油经磁场处理后产生了物理变化。

### 一、实验及结果

#### 1. 样品制备

用 TU-6 型燃油磁化器(磁场约为 120—140 mT)对柴油连续处理六次。然后,将柴油滴在样品网上,待其自然挥发凝固后,即可进行电镜分析。对于重油,因其粘度太大,改用电磁铁磁场(场强为 820 mT)处理。然后,将重油用汽油稀释,将重油溶液滴在样品网上,待溶液中的汽油自然挥发后,其凝固在样品网上的沉积物即为重油,方可进行电镜分析。

#### 2. 形貌分析

##### (1) 柴油的透射电镜形貌分析

未经磁场处理的柴油,用 100 kV 的透射电子显微镜获得放大 10 万倍的形貌相如图 1(a)所示。经磁场连续处理六次的柴油,同样用 100