

薄层活化法在国外工业中的研究发展

齐宏伟¹, 盛惠渝¹, 马家驹¹, 罗 斌²

(1. 哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036; 2. 浙江工业大学 之江学院, 浙江 杭州 310000)

摘 要: 对薄层活化法在国外工业中的研究发展状况进行了综述, 范围涉及薄层活化法的原理、测量方法、应用概况以及需要注意的问题, 并总结出该方法的优点。

关键词: 薄层活化; 工业设备; 磨损; 腐蚀; 监测

中图分类号: TH117.1

文献标识码: A

1 前言

人们已经知道, 磨损、腐蚀和冲蚀等情况严重影响工业设备、交通系统、核电站、常规电站、管线系统的可靠性。因此, 开发有效的探测、监测上述过程的方法十分重要。用于研究腐蚀与结构设计、材料选择、润滑条件、载荷变化、振动状态等问题的内在联系; 必要的监测能够防止工业设备和交通车辆在运行期间的危险事故并避免由于机器设备故障而引起的损失。

当难以接触到被测表面或被测表面被重叠结构遮盖时, 带电粒子活化或中子活化等核反应方法就成为监测磨损腐蚀的强有力的工具。

利用核反应堆进行中子活化可在整个样品内产生均匀的放射性活度分布(即整体活化), 该方法的优点是可以测量被辐照样品各部分的平均磨损量, 但由于磨

损量相对很小, 因而只能在冷却液里或润滑油里进行测量才能达到一定的灵敏度, 同时, 该方法在样品内产生了大量剩余的放射性, 因此, 只能在具备相应保护措施的试验室里才能使用。

为使核反应方法得到实际应用, 人们利用带电粒子活化原理开发出了薄层活化法(简称 TLA 法), 该方法对样品的薄层活化深度只有 $\mu\text{m} \sim \text{mm}$ 级, 其优点是灵敏度高、放射性弱, 可免于对样品进行特殊的安全处理。从 20 世纪 70 年代初期开始, 美国、英国、德国、日本等发达国家对 TLA 技术进行了更深入的开发并成功地在商业领域中进行了推广应用, 与此同时, 发展中国家也在试验室里引进了该技术对磨损腐蚀现象进行研究。1990 年, 国际原子能协会(IAEA)举办了研讨会^[1], 讨论当时 TLA 技术的发展状况以及把该技术引入发展中国家的可能性和条件, 按照这次会议的提议, 1992 年 IAEA 启动了一个工业领域应用核反应方法测量磨损和腐蚀的合作研究计划(简称 CRP), 在随后的三年中, 匈牙利、印度、意大利、罗马尼亚和俄罗斯联邦等国的研究人员为 TLA 方法和技术在各方面的发展做出了巨大的贡献, 1996 年 6 月 4~8 日, IAEA 在布达佩斯德布勒森举

行了最终研讨会(简称 RCM)^[2], 评估在 CRP 框架下所做的工作, 认为已经达到了预定的目标。CRP 使人们更多地理解 TLA 方法及新开发的测量应用技术。在 CRP 中, 科研人员获得的主要成果有: TLA 法所用的不同元素可靠的核数据表格^[3]; 用电池供电的 NaI(Tl)探测系统进行了现场磨损测量系统的试验^[4]; 同位素扩散技术做为薄层活化技术系列的一个补充方法, 简单易行并已得到了实际应用^[5~6]; 实地测量了油管线和煤气管线的腐蚀^[7]。

2 薄层活化法的原理

带电粒子一般是指质子(p)、氦核(d)及 α 粒子等。当加速器产生的带电粒子轰击材料表面时, 就在被轰击的范围引起核反应, 带电粒子由于与靶原子相互作用而损失能量, 只有在有效射程范围内靶核被活化, 结果在材料的局部表面形成很薄的放射层, 厚度与能量有关, 可根据测量需要进行控制。材料表层下的放射性活化原子的浓度非常低, 产生的放射性强度也很弱, 通常情况下约为几个微居里。辐照后的材料, 其表面由于放射性示踪物的自然衰变和磨损损失, 使放射性强度随着辐射出的 γ 射线逐渐

减弱,经过半衰期校正后,测量放射性示踪物活度的变化就可换算出零件表面的磨损量。

示踪物的参数必须与所考虑的问题密切相关,放射性核素的成份必须简单,在工业条件下应有可靠的结果,放射性活化层的深度必须与预期的磨损深度相匹配,必须精确知道放射性活度与深度的分布关系,因为要根据该关系把放射性活度的减小量转变为相应的磨损量。

材料活化时要产生正确的示踪物需考虑下面的一些条件:材料中的渗透深度与能量的数据;核反应阈能;厚靶量和能量的关系等。另外还要熟悉不同元素带电粒子的能量值和其它能够收集到的资料,以便能针对具体问题选择合适的粒子能量^[3]。材料表面的活化深度取决于带电粒子的能量和入射角度,通过选择不同的粒子能量和入射角度就可调整活化层的深度,从而可以提高测量的灵敏度^[8]。

文献[9~11]深入研究了大多数情况下化学元素和主要的建筑材料的放射性活化,并列出了一些核反应的数据,这些数据在遇到实际问题时可提供一些对照和参考,因为具体问题多种多样,材料和辐照方法也不相同,就可能选择另一种放射性核素和溶液。比如由于缺乏高能量α粒子,可用一些掺合剂来研究铝合金的性能,同样,可用⁵⁸Co来研究含有大量铁元素的青铜的磨损现象。

材料活化的一个重要指标是厚靶产额^[12],定义为每一个辐照单位(μA·h)所产生的放射性活度:

$$Y = \frac{A}{I} \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (1)$$

其中

- Y—厚靶产额, Bq/μA·h
- A—厚靶放射性活度, Bq
- I—辐照电流, μA
- t—辐照时间, h
- λ—靶核衰变常数, h⁻¹

由式(1)即可得出厚靶的放射性活度:

$$A = YI \left[\frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda} \right] \quad (2)$$

材料的被辐照区包含了核反应中产生的不同的放射性核素,一般情况下,监测总的放射性活度是不合适的,因为在材料中的活化深度分布上,不同放射性核素的衰减率不同,深度分布也不相同,因而总的放射性活度是发散不稳定的。理想情况下只监测一种放射性核素的γ射线强度,而这种放射性核素必须具备如下特征:(1)半衰期长(几天或更多);(2)γ射线能量高;(3)机械壁吸收弱;(4)材料辐照时的厚靶产额大。

只选择一种放射性核素进行监测的方法有下面几种:通过变化带电粒子的能量来选用不同的核反应阈能;利用不同的半衰期,将材料闲置一段时间,使短寿命的放射性核素衰减掉;选择适当的能量间隔,使γ射线的能量不同。

有几种科技文献定期公布厚靶产额数据,通常这些数据的精度不低于10%^[13~19]。

示踪物的一个非常重要的指标是放射性核素的深度分布,它代表着标定曲线,利用该曲线可把活度转变成被磨去的深度^[20]。标定曲线可用两种方法表示:第一种方法与磨去的层深x及剩余的活度A有关:

$$A = F(x) = \frac{N_t - N_b}{N_0 - N_b} e^{-\lambda x} \quad (3)$$

其中

- N₀—被辐照样品的读数
- N_b—背景的读数
- N_t—材料被磨去x深度后样品的读数
- t—测量N₀与N_t之间的时间间隔
- λ—衰变常数

第二种表示方法直接与磨去深度x和磨去的活度a有关,在这种情况下x=f(a),并且:

$$a = \frac{(N_0 - N_b) - (N_t - N_b) e^{-\lambda t}}{N_0 - N_b} \quad (4)$$

显然:a=1-A。一般情况下,第二种方法用作计量学特性指标时比较方便。

函数f(a)可用非负系数的m次幂的多项式表示:

$$x = \sum_{k=1}^m b_k \cdot a^k \quad (5)$$

当轰击能量不超过激励函数的最大值时,用上式表示是可能的,对许多实际应用的重要材料而言,相当部分的系数均为零,因而上式可简化为:x=b₁a+b_ka^k^[8]。

理想的标定曲线是线性的,在这种情况下,放射性活度的减少量正比于被磨去的深度,用能量接近于激励函数最大值的加速离子对材料进行辐照可使标定曲线很好地接近线性。

标定曲线可以通过下述方法获得:把与零件材料相同的箔片覆盖在机器零件表面上,轰击零件表面,然后分别测量有箔片时的放射性活度和撤去箔片时的放射性活度,但这种方法的误差较大,在活化深度不大于50μm时,该方法一般都不正确;一些研究人员从已知的激励函数中推算出了标定曲线^[21~22];对于带电粒子的渗透深度R和截止能量

dE/dx , 人们用数字积分法或一些经验公式来表示^[23]。通过计算得到的标定曲线误差较大, 有时能达到 20%^[22], 其原因并不仅仅是计算方面造成的, 如当按照典型误差为 10% 来测量激励函数时, 研究人员就忽略了一些因素: 如反冲核子离开其结构位置点以及由于发散在低于反应阈值时放射性活度上升等, 但实际情况下, 这些现象都存在。因此, 计算出的标定曲线只能看作是一定程度上的近似曲线。

相对而言, 用实验获得的标定曲线比较精确些。试验方法分为箔片堆栈法和标准件研磨法, 用这两种方法获得的标定曲线 $A(x)$, 其最小相对误差有时可低于 1%, 厚靶产额曲线通常也用同样方法获得。箔片堆栈法简单实用, 箔片材料可以与机器零件材料相同, 也可以是能产生放射性核素的纯净的元素。如铁就能代替所有的钢、紫铜和青铜等, 其误差不会超过 1%~2%。标准件研磨法适用于活化层非常薄的情况, 标准件的材料必须与机器零件相同, 辐照条件也必须与零件的辐照条件相同。标准件被磨去时, 测量其放射性活度就可获得标定曲线。研磨可以借助于专用工具和研磨剂, 也可采用化学腐蚀和电解抛光等方法, 该方法相当费时费工, 除非有一个备品, 否则该过程没有重复性。该方法的误差不超过 2%~3%^[13-19, 24-25]。

获取标定曲线的过程要求辐照条件必须具有很好的可重复性, 带电粒子能量和粒子束入射角度的变化均可引起误差。当入射角度小于 15° 时, 要特别注意, 粒子能量的变化不仅影响横坐标的值(即材料活化的深度), 而且影响纵坐标的值(即放射性活

度)。在激励函数的陡峭部分尤为明显。另外, 轰击能量的平均值大小和能量分布的宽度都很重要, 对具有同样平均能量的粒子束而言, 用串联加速器和回旋加速器获得的标定曲线总是存在一些差异, 因此, 标定过程应当在十分相似的辐照条件下进行, 如果辐照条件稳定并且检查仔细, 那么从一组在基本材料和辐照条件下获得的标定曲线中提取出的标定曲线其误差约为 1%~5%。

由于薄层活化法是一种测量方法, 因此有必要对该方法的误差、灵敏度、测量极限等指标进行评估, 文献 [8] 做了这方面的工作。

3 薄层活化法的变通方法

在一些特殊情况下, 不能用常规的薄层活化法在样品的表面产生活化层, 原因如下: (1) 没有合适的粒子加速器; (2) 机械零件太大或结构太复杂, 不能被辐照; (3) 实际情况要求超薄的活化层; (4) 现有的粒子和能量不能对样品的基体或示踪元素进行活化。为解决上述问题, 研究人员开发出了其它一些方法, 如同位素扩散法和碰撞活化法^[5-9], 同位素扩散法就是在人工控制下把放射性同位素从化学溶液中扩散到样品的表面, 从而产生放射性。碰撞活化法适用于材料的基体或微量元素不能用现有的粒子加速器和带电粒子进行活化的情况, 此时, 可以从核反应中引入第二级放射性粒子。当试验要求的活化量很小, 尤其是要求超薄的放射性活化层时, 碰撞活化法就非常适用。碰撞活化法的原理是, 用一束带电粒子 a 轰击含有 A 元素的一个几十微米厚的薄靶, 通过反应 $A(a, b)B$ 活化 A 元素, 其中

一部分放射性核素 B 有足够的动能脱离靶并进入所研究的目标靶中。用轻型粒子轰击薄靶时, 其能量不会超过 40 MeV, 碰撞产生的放射性离子 B 的能量在数百 keV 和几个 MeV 之间, 中等质量的放射性核子如 ^7Be 、 ^{22}Na 其最大注入深度为几个微米, 较重些的核子如 ^{48}V 、 ^{56}Co 、 ^{65}Zn 为几十到几百纳米。碰撞活化法的标定程序随注入深度的不同而不同, 微米级的可用箔片堆栈技术^[13, 24-25], 低于微米级的采用薄膜技术, 薄膜的组合成份必须与样品相似。

4 测量方法

4.1 加速器、辐照

薄层活化法中带电粒子加速器(回旋加速器、Van de Graff ...) 基本上是在中级能量范围内(5~30 MeV)内使用, 如果需要对材料体积进行辐照, 则需要核反应堆或中子发生器, 但由于放射性强度高, 按照辐射保护法, 不允许进行现场测量。

一个完备的辐照站可以辐照不同尺寸的机器零件, 如可能再给辐照站配置一个大容积的真空室, 对于大的部件, 还需具备一束外部的粒子束。使用外部粒子束时, 粒子束需经过几厘米的大气空间后才能轰击样品的表面, 因而就会损失几百到 1~2 兆电子伏特的能量, 在计划辐照时应考虑该因素。

为使薄层活化法的费用降至最低, 辐照电流应保证在最多 1~2 h 内, 使材料产生可供测量的放射性活度值, 典型的辐照电流为 0.1~10 μA , 产生的放射性活度在经过适当的冷却后就能够进行现场测量。

4.2 测量放射性活度和磨损量

材料被辐照后应搁置一段时间,使得辐照产生的短寿命的同位素自然衰减掉,以保证这些干扰因素既不能影响磨损测量,也不会损伤人身健康。依据同位素的半衰期,监测时间和搁置时间可以从几天到几个月,甚至几年。

被辐照的机器零件的放射性活度由 γ 光谱仪测量。依据 TLA 的特殊用途, γ 光谱仪可分为单通道和多通道。第一次测量(如测量标定曲线)可以用较贵的半导体探头在试验室里进行。当已经开发并试验了特种方法后,可以在现场采用较便宜的闪烁器探头进行测量。最简单的光谱仪是一种单通道的分析仪,配有闪烁探头 NaI(Tl),该光谱仪约 4 000 美元,已经在现场广泛使用;多通道分析仪配上 HpGe 探头,价值约 15 000 美元,主要在试验室使用。 γ 光谱分析程序由于应用场合和显示方式不同而有很多不同的版本,在大多数情况下,进行简单的光峰搜索和背景补偿就足够了。

磨损量的测量就是把不同时刻测到的放射性活度值与标定曲线进行比较,从而把活度的损失量转化为质量的损失量。

5 在工业中的应用

薄层活化法在实际中的应用分为薄层示差法和浓度测量法。薄层示差法就是用 γ 光谱系统测量被辐照零件的放射性活度,用标定曲线把活度的损失量转化为磨损量,该方法一般适用于无载体(如无油润滑)的情况,其灵敏度取决于应用的场合,典型的磨损率值约为 0.01 $\mu\text{m}/\text{h}$ 。浓度测量法是用一个或多个 γ 光谱

系统测量磨去材料(磨粒)的放射性活度,可以在专用油滤或在油流里测量,该技术允许对两个以上的磨损区域进行同时测量,其灵敏度在典型情况下约为 1 nm/h。

美国很早就开始用放射性核素示踪法研究摩擦副的磨损^[4]。最初用反应堆中子活化法,

由于放射性高,不适用于较大的部件。后来采用放射针嵌入技术,放射性强度大为减少,但由于放射针的材料与摩擦副材料之间不完全相同,嵌入后与实际情况也有差别,因而不能准确反映磨损量;从 20 世纪 70 年代初开始,英国哈威尔原子核科学研究中心与工业部门进行合作,首先采用带电粒子表面薄层活化技术,精确地测量各种机械零件和材料的磨损^[26~28];西德卡尔斯鲁埃核研究中心应用磨损研究所(IAVF)应用薄层活化技术测量磨损,通过发动机的台架试验,根据发动机运行的工况来优化发动机中主要摩擦副的摩擦系统。世界著名的汽车集团如 Mercedes、GM、Toyota、Benz 等与科研部门密切合作,在实际生产中应用薄层活化技术监测汽车中的活塞环、气缸衬套、阀门、轴承、齿轮、凸轮轴和其它一些零件的磨损情况^[29~30], Mercedes-Benz 企业的研究人员把测量磨损的常规重量法和薄层活化法进行了比较,结果见表 1。

此外,匈牙利、印度、意大利、罗马尼亚、比利时和俄罗斯等国的研究人员分别与各自国家的工

表 1 重量分析法和薄层活化法测量汽车零件磨损的费用比较表

测量方法	重量分析法	薄层活化法
测量精度	100 mg	< 10 mg
对一点的测量时间	> 100 h	< 10 h
每次测量的点数	10	10
测量总时间	1 000 h	100 h
测量过程中的调停	拆卸/重新装配	无
测量设备的安装	无	测量前安装
同位素示踪的费用	无	6 000 美元
试验台的费用(125 美元/h)	125 000 美元	12 500 美元
活化技术的费用(125 美元/h)	无	12 500 美元
试验一个零件的费用	125 000 美元	31 000 美元
试验五个零件的费用	625 000 美元	155 000 美元
节省的费用		470 000 美元

业企业合作,将薄层活化法推广应用到机械、石油、化学、铁路、航空、电力、纺织、印刷等各个行业的实际生产中,监测活塞环、气缸、车刀、轴承、输油管线、反应容器、阀门、铁轨、车轮、涡轮叶片、电站设备、纺织针和印刷机导杆等零件的磨损、腐蚀和冲蚀现象,并比较不同牌号润滑油的性能^[1~2,7,31~36]。对于齿式联轴节、花键轴等处的微振磨损,研究人员用薄层活化法 TLA、球帽建模法 SCM、法向位移测量法 ND、三维表面测绘法 3DST 以及扫描电子显微法 SEM 分别对轴承滚珠在冷拔钢平板上的微振磨损进行测量,对各种方法的测量结果进行比较后得出结论:TLA 法测量结果最准确;SCM 法过高估计了微振磨损;3DST 法过低估计了微振磨损;ND 测量结果受到了接触区逸出的粒子的影响,最后建议推广薄层活化法,以弥补常规测量方法不灵敏、不准确的缺陷^[33~34]。

6 需要澄清的几个问题

薄层活化法是一种先进的磨损测量技术,在现代工业中的应用越来越广,然而,由于实际问题多种多样,薄层活化法在其应用中也会遇到一些限制,下面对这些限制做一些分析,以便对薄层活化法有进一步的认识。

(1) N、O、F…S、Cl 等非金属元素被带电粒子辐照后产生的放射性核素中缺乏长寿命的核素, C 和 Si 的活化不耐用,再加上大量发热,使得 TLA 技术很难应用在聚合物、橡胶、塑料、树脂、氟塑料等材料上。研究这些材料宜采用放射性粒子束植入法以产生放射性示踪物⁵⁾。

(2) 用 TLA 法监测磨损的最大持续时间取决于被测量的放射性核素的半衰期。对 Ti、V 及其合金约为 2~3 个月;对基于 Al、Cr、Cu、Zn、Pb 的材料可达几年;Fe、Ni、Zr、Nb、Mo、W 组成的混合物和其它一些材料约为一年。

(3) 由于发热和辐照损害,活化过程对材料整体性能和材料表面性能的影响对于 TLA 方法的推广影响很大,经研究得知,典型的辐照条件对材料性能没有影响,不会改变材料的磨损率³⁷⁾。

(4) TLA 法监测的是不同于原材料的示踪元素(如钢和铁测的是⁵⁶Co,铜合金为⁵⁸Zn),因此示踪元素的特性必须可靠。

(5) 在整个磨损测量其间,放射性活度的深度分布必须保持恒定,几百度的高温和局部应力的影响有可能引起放射性核素扩散出原先的范围,从而引起标定无效,为避免该情况的发生,在实际应用 TLA 法时应做一个可行性的模拟试验。

(6) 辐射源与探头之间的距离以及厚壁会降低测量的计算值,如果活度值在安全标准范围

内,为提高测量精度,会对测量设备的几何布置提出一些要求。

(7) 薄层活化法是一种核方法,在其推广应用时,人们考虑最多的是核辐射的安全性。表 2 给出了“免于处理”的典型的放射性活度的极限值。

表 2 德国、俄罗斯一些同位素免于处理的辐射标准

“免于处理”的极限值 kBq		
放射性核素	德国	俄罗斯
⁵¹ Cr	370	3 700
⁵⁶ Co	37	370
⁶⁵ Zn	370	370

上述问题并不会影响薄层活化法在实际应用时所显现出来的优点,在许多情况下,经过适当的变动或与其它方法综合使用便会解决实际中产生的各种问题。

7 结论

同常规的磨损测量方法相比,薄层活化法的优点是:

(1) 无损远程监测磨损、腐蚀和冲蚀等材料表面的剥蚀现象。

(2) 不需拆卸零件,在线进行磨损测量。

(3) 可以同时测量一个机器中几个零部件表面的磨损量。

(4) 灵敏度高,用浓度测量法可达 10^{-6} 克,薄层示差法可达 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

(5) 活化面积小,活化深度一般不超过 200 μm ,放射性活度很低,在使用时低于国家规定的安全值,非常安全。

(6) 比常规方法所耗的费用更低,试验时间明显缩短,费效比更合理。

薄层活化法已经在发达国家和发展中国家得到了研究和发

展,该方法有助于增加各种机器、设备、技术工艺的寿命和可靠性。以汽车行业为例,利用该方法得到的结果已经设计生产出低油耗的交通汽车。今后工作的一个重要方面就是要让工业界能进一步的了解到薄层活化法是一种安全、精确、实时、快速、费效比合理的测量方法,通过该方法能够解决他们长期悬而未决的磨损腐蚀等问题,使其生产出结构合理、安全、寿命长的工业产品。

参考文献:

- [1] Report of the IAEA consultants' meeting on "real-time nondestructive monitoring of wear and corrosion using the thin layer activation technique" [R]. Vienna: IAEA, 1990.
- [2] The thin layer activation method and its applications in industry [R]. Vienna: IAEA, 1997.
- [3] WILLIAMSON C F, BOUJOT J P, PICARD J. Table of range and stopping power of chemical elements for charged particles [R]. France: CEA, 1966.
- [4] 黄湘泰, 黄林根. 薄层活化快速测量和监控磨损研究 [R]. 上海: 上海材料研究所, 1989.
- [5] DITROI F, MAHUNKA I. Thin layer activation of non-metallic materials by using nuclear implantation [J]. *Nucl Instr Meth In Phys Res*. 1996, **B113**: 415-419.
- [6] KRASNOV N N. Determination of the wear of machine parts by charged particle surface activation [J]. *J Radioanal Nucl Chem* 1971, **8**: 357-371.
- [7] MICHAEL W JOOSTEN, KARL P FISCHER, ROE STROMMEN, et al. Internal corrosion monitoring of subsea oil and gas production equipment [J]. *Environmental Effects* 1995(4): 44-48.
- [8] LEONOV A I, KONSTANTINOV I O, TARASKO M Z. The metrological parameters of thin layer activation techniques [R]. Obninsk, USSR: Institute of Physics and Power Engineering 1984.
- [9] MALUHIN V V, KONSTANTINOV I O, Activation of construction materials on the

- cyclotron[J] . **Isotopi v SSSR** 1975, **44**: 67—75.
- [10] DMITRIEV P P. The radionuclide yield in the reaction with protons, deuterons, alpha-particles and He-3 ions [D] . Moscow: Trudfiziko-Energeticheskogo Instituta M atomizdat, 1986.
- [11] ALBERT P. Thick target yields for the production of radioisotopes. Handbook on nuclear activation data[R] . Vienna: IAEA, 1987. 537.
- [12] KRASNOV N N. Thick target yield[J] . **Int Journal Appl Rad and Isotopes** 1974 **25**: 223.
- [13] TARKANYI F, SZELECSENYI F, KOP-ECKY P. Cross section data for proton, He and α -particle induced reactions on ^{nat}Ni , ^{nat}Cu and ^{nat}Ti for monitoring beam performance[A] . **Proc International Conf on Nuclear Data For Sci and Tech** [C] . Julich, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992. 529—532.
- [14] KOPECKY B, SZELECSENYI F, MOLNAR T, *et al.* Excitation functions of (p, xn) reactions on ^{nat}Ti ; Monitoring of bombarding proton beams[J] . **Appl Radiat Isot** 1993, **44**: 687.
- [15] SZELECSENYI F, BOOTHE T E, TAKACS S, *et al.* Nuclear data relevant to the production of ^{67}Ga ; A critical comparison of excitation functions/thick yield data for ^{67}Zn (p, n) and ^{68}Zn (p, 2n) nuclear reactions[A] . **Proc of the Fifth Int Workshop on Targetry and Target Chemistry BNL**[C] . BNL, 1994. 234.
- [16] SZELECSENYI F, BOOTHE T E, TAVANO E, *et al.* Compilation of cross section/Thick target yields for ^{66}Ga and ^{68}Ga production using Zn targets up to 30MeV proton energy[J] . **J Appl Radiat Isot** 1994, **45**: 473.
- [17] SZELECSENYI F, BOOTHE T E, TAVANO E, *et al.* New cross section data for $^{66, 67, 68}Zn + p$ reactions up to 26MeV [A] . **Proc International Conf On Nuclear Data for Sci and Tech**[C] . Gatlinburg, USA: American Nucl Soc Inc La Grande Park, 1994. 393.
- [18] TAKACS S, TARKANYI F, FESSLER A, *et al.* Excitation functions of 3He -particle induced nuclear reactions on natural nickel with special reference to the monitoring of beam energy and intensity [J] . **J Appl Radiat Isot**, 1995, **46**: 249.
- [19] TAKACS S, TARKANYI F, KOVACS Z. Excitation function of α -particle induced nuclear reactions on natural nickel [J] . **Nucl Instr Meth**, 1996, **B113**: 424.
- [20] KONSTANTINOV I O, LENOV A I, MIRONOV V N. The calibration of thin layer activation techniques[J] . **Isotopi v SSSR** 1983, **66**: 20.
- [21] SWITKOVSKI. A new technique for the measurement of sputtering yields[J] . **Radiation Effects** 1976, **29**: 65.
- [22] BEAGLEY T M. Laboratory assessment for a wear measurement technique using thin layer activation[J] . **Wear**, 1975, **32**: 117.
- [23] MAXIMOV M Z. Range-energy relation for different substances[J] . **Journal Exper and Theor Phys**, 1959, **37**: 127.
- [24] DITROI F, TAKACS S, FENYVESI A, *et al.* Investigation of the charged particle nuclear reactions on natural boron for the purposes of the thin layer activation (TLA) [J] . **Nucl Instr Meth In Phys Res**, 1995, **B102**: 389.
- [25] DITROI F, TAKACS S, TARKANYI F, *et al.* Study of the $^{nat}C(^3He, 2\alpha)^7Be$ and $^9Be(^3He, \alpha n)^7Be$ nuclear reactions and their applications for wear measurements [J] . **Nucl Instr Meth In Phys Res**, 1995, **B103**: 412.
- [26] ASHER J, CONLON T W, TOFIELD B C, *et al.* Thin layer activation: a new plant corrosion-monitoring technique [R] . Oxfordshire: Nuclear Physics and Materials Development Divisions 1983.
- [27] ASHER J, SUGDEN S, BENNETT M J, *et al.* An investigation of the high temperature oxidation of a 20% Cr/25% Ni/ Nb stainless steel in carbon dioxide using thin layer activation [R] . Oxfordshire: Nuclear Physics and Materials Development Divisions, 1986.
- [28] ASHER J, PEACOCK A T. A study of disc wear on a pin-on-disc tester by thin layer activation [J] . **Wear**, 1982, **81** (2): 275—284.
- [29] MASAGO YAMAMOTO, JUN-ICHI, KAWAMOTO. Engine wear measurement by thin layer activation method [J] . **Japanese journal of tribology** 1990, **35**(1): 47—57.
- [30] DELVIGNE T, LEYMAN D, OXORN K. Thin layer activation measuring wear and corrosion [J] . **Materials World**, 1995, **3**(4): 184—187.
- [31] RACOLTA P M, POPA-SIMIL L, ALEXANDREANU B. Resistance-to-wear testing of metallic machine components by charged particle surface activation [J] . **Appl Rad Isot** 1996 **47**(8): 745—750.
- [32] RACOLTA P M, POPA-SIMIL L, ALEXANDREANU B. Ion beam-based studies for tribological phenomena[J] . **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, 1996, **B113**: 420—423.
- [33] DE BAETS P, STRIJCKMANTS K. The quantification of microscopic wear amounts of steel surfaces with thin layer activation[J] . **European Journal Mech Eng M**, 1996, **41**(2): 67—74.
- [34] DE BAETS P, STRIJCKMANTS K, VAN PETEGHEM A P. Characterization of the fretting wear of unlubricated steel surfaces based on the comparison of wear results obtained by different methods[J] . **Wear**, 1997, **208**: 169—176.
- [35] DITROI F, MAHUNKA I. Thin layer activation of non-metallic materials by using nuclear implantation [J] . **Nucl Instr Meth In Phys Res**, 1996, **B113**: 415—419.
- [36] LACROIX O, SANVAGE T, BLONDIAUX G, *et al.* Ultra thin layer activation by recoil implantation of radioactive heavy ions [J] . **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, 1997, **B122**: 262—268.
- [37] RACOLTA P M, POPA-SIMIL L. Thin layer activation-based evaluation of tribological behavior of light ion-implanted metallic samples [J] . **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, 1997, **127**—**128**: 949—953.

薄层活化法在国外工业中的研究发展= **The Research and Development of Thin Film Activation Method in the Industries of Some Foreign Countries** [刊, 汉] / QI Hong-wei, SHENG Hui-yu, MA Jia-ju, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 1 ~ 6

A broad overview is given of the current state of research and development concerning thin-film activation method along with a description of its basic principles, measuring method, general applications and some issues worthy of close attention. Moreover, summed up are the merits of the proposed method. **Key words:** thin film activation, industrial equipment, wear, corrosion, monitoring

天然气再燃脱硝的原理和技术= **Basic Principles and Technology of Denitration through the Reburning of Natural Gas** [刊, 汉] / SHEN Bo-xiong, YAO Qiang (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 7 ~ 9, 13

With respect to the mechanism of denitration by way of natural gas reburning a comprehensive assessment is conducted of the influence of some key parameters of this denitration technology on the denitration efficiency. Several kinds of fuel for reburning were compared in terms of their effect on the denitration efficiency. It has been found, that to achieve a relatively high denitration effectiveness, proper values should be selected as regards the following: reburning zone temperature, excess air factor and residence time in the reburning zone, as well as an appropriate location of the spray of fuel reburned. It is beneficial to add a proper amount of HCN, HN_3 or pyrolysis gas to the natural gas. Due to the interaction of the above parameters an optimization effort is in order, depending on specific conditions. **Key words:** natural gas, reburning zone, denitration

蒸汽水合生石灰的脱硫实验研究= **Experimental Study of the Desulfurization Performance of Calcium Oxide Activated by Steam Humidification** [刊, 汉] / LIU Xian-zhuo, ZHAO Chang-sui, WU Shu-zhi, QIAN Xiao-dong (Education Ministry Key Lab on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1); — 10 ~ 13

On a test rig of flue gas humidification and desulfurization an experimental study was conducted of the desulfurization performance of calcium oxide activated by steam humidification. The study results indicate that a whole range of parameters, such as Ca/S molar ratio, approach-to-saturation temperature (temperature difference between flue gas and water steam dew point), flue gas flow speed (residence time), exercise a major influence on the desulfurization efficiency. A rational allocation of the above parameters can result in a significant enhancement of the desulfurization efficiency. **Key words:** desulfurization, lime, steam humidification

T 型三通管横向射流流动与传热实验研究= **Experimental Study of Transverse Jet Flow and Heat Transfer of a T-shaped Three-way Pipe** [刊, 汉] / WANG Hai-jun, CHEN Ting-kuan, LUO Yu-shan, WU Mei (National Key Lab of Multi-phase Flow in Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 14 ~ 16, 22

An experimental study was conducted of the transverse jet flow and heat transfer in a T-shaped three-way pipe with different speed ratios of jet flow and main flow. As a result, obtained are the basic characteristics of the flows and the temperature fluctuation features of local points at various flow speed ratios. In addition, measurements were taken of the local heat transfer factors at some key locations. **Key words:** T-shaped three-way pipe, transverse jet flow, flow, heat trans-