

大电流脉冲磁场技术及某些应用

白希尧 白敏冬

(鞍山静电技术研究设计院)

应用大电流脉冲放电技术,可在具有很强机械强度的螺旋管中产生强磁场(3—100 T,甚至 100T 以上)。文中论述了获得强磁场的方法,磁场和电路理论,电磁线圈,供电系统效率,接地技术与安全以及强磁场的应用。此外,还介绍了具有很大经济效益和实用价值的电磁成形、电磁复合、电磁力杀菌等应用实例。

长期以来,强磁场(3T 以上)已成为固体物理领域的有效研究手段,用以研究物质的极限状态,它也是核聚变和高能物理研究的重要条件。在强磁场下,材料的许多物性,如磁性、电阻等常常会发生很大变化。强磁场能使核聚变缓慢地反应,从而实现可控的目的。在超强磁场下,物质的磁结构和电子结构会出现明显的变化。强磁场对生物也会产生很大的影响。大电流脉冲磁场技术在工业、农业以及科学技术进步过程中,发挥着巨大作用。

早在 1924 年,苏联的卡比查采用大电流脉冲放电技术就曾获得 30T 的强磁场,持续时间为千分之几秒。为了得到更强的磁场,人们在金属圆筒的四周放置炸药,爆炸瞬间将圆筒迅速压缩,在圆筒被压缩的过程中,使预先注入的磁通得到浓缩,因而可以获得高度浓缩的强磁场。另一种方法是将脉冲大电流通入一次线圈,由于磁场的变化,在线圈内部的金属圆筒中感应出反向电流,在电磁力作用下,金属圆筒被瞬间压缩,同样可以获得高度浓缩的强磁场。以上两种方法虽可得到 100—200T 的超强磁场,但线圈和试样只能一次性使用,不能产生连续的超强脉冲磁场,难以应用到国民经济中去。

应用超导技术也可获得强磁场,但由于超导线材的临界磁场的限制,目前采用超导线圈产生的磁场还没有超过 20T。应用大电流脉冲放电技术可产生 50—100T 的非破坏性强磁

场。它是产生强磁场可取的和有效的方法。

一、获得强磁场的方法

获得强磁场的原理线路图如图 1 所示。高压脉冲大电流的控制器 1 由微型计算机进行控制,并由可控硅进行调压。它具有理想的恒流输出及可靠的保护特性,保证高压发生器 2 以恒定的电流对高压脉冲电容器进行充电,省去耗能的限流电阻,减少了电流对高压脉冲电容器的冲击。高压发生器是由高压变压器和桥式高压整流器组成。高压变压器是把交流低电压升到所需的交流高电压,再由硅堆组成桥式整流器整流成直流高电压。通常输出的直流高压为 20—120kV,输出电流为 0.2—2A。高压脉冲电容器起着储存、释放能量的作用。

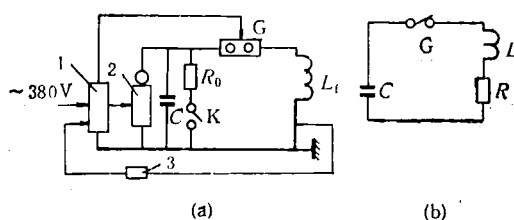


图 1 产生脉冲强磁场的原理示意图

(a) 产生强磁场原理线路图; (b) 等效电路图;

1. 控制器; 2. 高压发生器; 3. 信号变换器;

C. 高压脉冲电容器; R_0 . 水保护电阻; K. 泄电开关;

G. 高压真空开关; L_t . 电感线圈

当高压直流电源对高压脉冲电容器充电, 电压 U_c 达到真空隔离开关 G 的临界击穿电压 U_{GK} 时, 隔离真空间隙被击穿, 成为高压电路通路。高压脉冲电容器 C 将所储存的全部能量加在负载线圈 L_f 上, 真空隔离间隙控制了供给负载线圈脉冲大电流幅值、磁场强度以及电磁力的大小。

二、磁场和电路理论

通常用螺线形线圈获得强磁场。如果认为线圈外面的磁场强度近似为零, 线圈内部的磁场强度大致沿着轴线方向, 根据安培环路定律, 可得

$$\int Hdl = Hl = nI, \quad (1)$$

磁场强度最大值

$$H_m = \frac{nI_m}{l}. \quad (2)$$

从(2)式可知, 磁场强度最大值 H_m 与线圈匝数 n 和通过线圈的脉冲电流幅值 I_m 成正比, 与线圈长度 l 成反比。穿过线圈的磁通量

$$\phi = \frac{\mu n^2 IS}{l}, \quad (3)$$

式中 μ 为磁导率, S 为线圈的横截面积。单位面积上最大电磁力

$$P_m = \frac{1}{2} \mu_0 H_m^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{nI_m}{l} \right)^2, \quad (4)$$

式中 μ_0 为真空的磁导率。由(4)式可知, 最大电磁力 P_m 与脉冲电流幅值 I_m 和线圈匝数 n 的平方成正比, 与其长度的平方成反比。为了得到强磁场以及巨大的电磁力, 必须尽力提高脉冲电流幅值和前沿的上升速率。

从图 1(b) 可知, 放电脉冲电流的最大幅值

$$I_m = U_{GK} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (5)$$

放电脉冲电流的最大上升速率

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_m = \frac{U_{GK}}{L}. \quad (6)$$

从(5), (6)式可知, 放电脉冲电流最大幅值 I_m

与电容器的电容值 C 的平方根及其隔离间隙的临界击穿电压值 U_{GK} 成正比, 与放电回路中的电感量 L 的平方根成反比。脉冲电流最大上升速率 $\left. \frac{di}{dt} \right|_m$ 和放电回路中的电容值 C 、负载值 R 无关, 只与 U_{GK} 成正比, 与 L 成反比。 L 企图阻止脉冲电流的变化, 当脉冲电容器和隔离间隙击穿电压选定后, U_{GK} 和 C 就确定了。提高放电电流幅值与上升速率的关键在于减小放电回路各部分的电感。回路的结构形式及线圈形状决定回路电感大小, 在设计放电回路时, 要从结构上认真考虑, 减少回路电感。

放电回路的电感 L 是由线圈负载电感 L_f 、传输线电感 L_s 、电容器内部电感 L_c 和隔离间隙电感 L_g 组成。 N 个电感并联时, 总电感值下降为 L/N 值, 减少 N 倍。为此在设计放电回路时, 应将电容器、隙离间隙、传输线等并联使用, 电感量降为 $L_{co}/N, L_{go}/N$ 。为减少传输线电感, 可在每台电容器与隔离间隙之间用 m 根电感量为 L_{so} 的传输线叠加起来(并联)后进行连接, 其电感量为 L_{so}/mN 。放电回路的总电感量降为

$$L = L_f + \frac{L_{co}}{N} + \frac{L_{go}}{N} + \frac{L_{so}}{mN}. \quad (7)$$

从(7)式可知, 并联运行能有效地大幅度降低放电回路的电感量。隔离间隙的电感量同其结构有关, 采用真空引燃管为好, 电感量小, 通载能力强, 无噪声, 损失能量少。

电容器上的充电电压 U_c (或 U_{GK}) 对电磁效应影响最大。当隔离间隙被击穿成为高压电路通路时, 电容器 C 将所储存的全部能量释放到线圈上, 这一过程发生在 $10^{-5} - 10^{-3}$ s 瞬间, 电容器释放出电能

$$W_c = \frac{1}{2} CU_{GK}^2, \quad (8)$$

瞬时放电功率

$$P = \frac{W_c}{t} = \frac{CU_{GK}^2}{2t}. \quad (9)$$

从(8), (9)式可知, 电容器储存的能量 W_c , 瞬时放电功率 P 均与隔离间隙击穿电压 U_{GK} 的平

方值成正比。由(5),(6)式可知,放电脉冲电流最大幅值 I_m 和放电脉冲电流最大上升速率 $\left. \frac{di}{dt} \right|_m$ 均与 U_{OK} 成正比。所以增强电磁效应最有效、最经济的方法是提高 U_c (或 U_{OK})。当前高电压技术发展很快,60—120kV 高压电源的获得和绝缘处理较以前容易很多,成本大大下降,比增加充电电容值便宜。

三、电磁线圈

线圈是形成强电磁场的元件,线圈的选取、设计和加工是至关重要的。它不仅要承受连续不间断的强大冲击力作用,而且要在高电压大电流脉冲条件下连续运行,一般要求线圈要能承受 $4 \times 10^9 \text{N/m}^2$ 冲击压力而不损坏。线圈要有足够高的机械强度,要能承受 120kV 高工作电压,在脉冲大电流 (10^8A) 连续工作条件下,温度不超过线圈绝缘强度的容许范围,漏感要小。为此,一般采用铍青铜等高强度、小电阻率的材料,尽量避免线圈发生电晕放电和火花放电,要在高于运行电压两倍的条件下进行定时间绝缘耐压检验。当前线圈耐压达到 200kV 以上是不困难的。由于强脉冲电流在极短时间(几个一几十个 μs) 内通过线圈,它的热惯性不能使线圈汽化,机械惯性不能使线圈爆开,这就在一定程度上解决了线圈的发热,以及线圈受电磁力破损等问题。

线圈有三种基本类型。第一种是外螺旋管线圈,为常用的基本形式,其它两种是内螺旋管线圈和平板式线圈。

为了获得强磁场,线圈所受的电磁力常常超过线圈导线的屈服极限或疲劳强度,损坏了线圈,破坏了绝缘材料。为分担一部分线圈所承受的

机械负荷,采用了磁通集中器。

磁通集中器如图 2 所示,它一般用高导电率、高强度材料,如铍青铜或黄铜制成。表面车有螺纹凹槽,绝缘导线就嵌在槽内。磁通集中器具有把磁通移向集中器内部的作用。如图 2 所示,当线圈中通过脉冲大电流时,磁通集中器外表面感应电流产生的磁场大部分抵消了线圈电流的磁场,内表面电流产生了强磁场,使绝大部分冲击力作用在集中器的内壁上,承受了线圈所受的巨大的电磁力。另外,采用螺纹凹槽,延长了漏磁通路径,减小了线圈和磁通集中器间的漏磁通,相对减少了线圈所受的电磁力。由此可见,磁通集中器有效地避免了线圈直接承受电磁力作用,大大地降低了线圈损坏和疲劳损坏的程度。

磁通集中器的另一个作用是浓缩磁通密度,获得强磁场。它是通过改变集中器内壁形状,改变磁通分布来实现的。如图 2 所示,磁通集中器的内外壁高度不同,电流分布的密度不同,内外壁高度与电流密度成反比,产生的磁场强度与电流密度成正比。因而采用这种装置,可得到 50T 以上的强磁场。另外,由于线圈是用截面粗的导线顺着凹槽绕制而成的,裸露面积大,散热性能要比平板式线圈好得多。若采取在线圈铜管中通以自来水,或在集中器轴向开水孔通水冷却等措施,线圈温度可控制在 60°C 以下趋于稳定,不超过线圈绝缘材料温度允许范围,避免了绝缘击穿和线圈损坏等问题。由此可见,磁通集中器是一种很有价值的浓缩磁通密度装置,用以获得强磁场。

另一种可产生强磁场并具有实用价值的线圈是平板式线圈,它是用绝缘后的扁铜线同轴依次绕制而成的。作为线圈的非破坏性条件,线圈外径和生成的磁场之间近似地存在如下对数关系:

$$H = H_0 \sqrt{2 \lg(R_0/r_0)}, \quad (10)$$

式中 r_0 为平板线圈内径, R_0 为平板线圈外径, H 为线圈中心磁场, H_0 为导线材料决定的上限磁场。用 Be-Cu 材料制成的平板式线圈,可产生 50T 的强磁场。理论上线圈外径 R_0 无限增

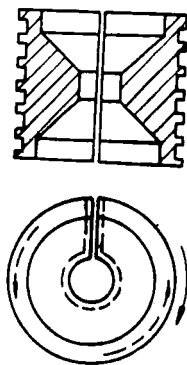


图 2 磁通集中器
实箭头为线圈电流;
虚箭头为磁通集中器
的感应电流

大,线圈中心磁场 H 也应无限增大,但实际上线圈数的增多是有限度的,因为如此多的导线绕制在一起,线圈的发热和绝缘问题很难解决,加之承受连续的冲击力作用,线圈会因弹性疲劳而突然损坏。采用 Be-Cu 材料制成的平板线圈,可产生持续时间为 1ms 的 100T 超强磁场。

四、供电系统效率

电磁效应供电系统总效率(放电的电能转换成电磁能或机械能的转换效率)为

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_b \cdot \eta_p \cdot \eta_c, \quad (11)$$

式中 η_m 为高压变压器的效率,其值为 0.93; η_b 为整流器效率,其值为 0.90; η_p 为电能转变为机械能效率,其值为 0.3—0.5; η_c 为充电回路的效率, $\eta_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_c}{U_0}$ (U_c 为电容器上的充电电压, U_0 为电源额定供电电压)。

供电电源是以指数减函数对电容器进行充电的,形成充电的冲击电流。为了减小充电电流峰值,在充电回路中加限流电阻。为了提高生产效率,增加放电次数,电容器上充电电压 U_c 将远小于电源额定供给电压 U_0 。所以 η_c 最大值只能达到 0.45 左右。要提高充电回路效率,用具有恒流外特性的直流恒流电源对脉冲电容器进行线性充电,可以省去充电回路中的限流电阻,整个回路中的内阻很小,能量损失较少。充电过程中电压、电流的变化规律由指数曲线变为线性,可将充电回路效率由 45% 提高到 90% 左右。电磁效应的总效率由原来的 11—18% 提高到 22.6—37.7%。

电磁效应效率与其它电能转换为机械能效率相比较是很低的,但它的瞬时功率是巨大的,此时电磁效应效率是很高的。从工程整体来看,电能利用率高,耗能少,总的工程效率是高的。

五、接地技术与安全

电容器储存电能通过开关放电时,产生百万安培以上的脉冲电流。由于突变,脉冲电流

的高次谐波(MHz)丰富,再加上接地寄生电感及电阻存在,会使接地线电位突增,产生局部火花放电,造成设备、仪器仪表、电器元件局部放电击穿,发生一系列事故。由于接地和屏蔽不善,放电时产生强大的电磁波,可能干扰和损坏无线电设备,造成仪器仪表测试误差。因此放电回路必须自成回路,只有一点接地,即在线圈的一端接地。

由于供电设备电压高到 100kV 左右,电流大到安培级,再加上电容器上储存了巨大电能,应十分注意人身安全。高压室、放置线圈等地方应设立门链锁装置,避免工作人员误入高压区发生事故。设计时应考虑电动力的破坏作用,防止设备损坏。

六、强磁场应用

近来,随着应用高电压大电流脉冲放电技术建立强磁场的新进展,以及对其中的一些关键性问题的解决,该项技术已应用于工业、农业及人们生活中,并产生了人们难以预料的效果。在这里主要阐述一下它在机械成形、金属复合、果蔬汁液饮料常温杀菌几方面的应用。

1. 电磁成形

如图 3 所示,当一管状导体工件 4 放在磁通集中器 2 内部时,强磁场在工件内产生一感应电流,方向与线圈电流方向相反。这一感应电流所产生的反向磁通阻止初始磁通穿过工件,迫使磁力线密集在线圈和工件的间隙内。密集的磁力线具有扩张的特性,因而工件表面各部分都受到沿半径向内的冲击压力。如果电磁压力达到材料的屈服应力并在工件内放置模具 3 时,则管壁就被压紧在模具上而成形。

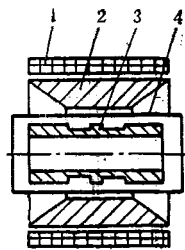


图 3 电磁成形示意图
1. 线圈; 2. 磁通集中器; 3. 模具; 4. 工件

工件所受的冲击压力仅在线圈磁场增强期间存在,在磁场增强期间,磁力线向工件内扩

散,扩散深度为

$$s \approx (\rho\tau)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

式中 ρ 为工件的电阻系数, τ 为脉冲磁场的半周期。如果工件内的模具是导体,当磁力线扩散与之相交时,则在模具中也产生涡流。它会对工件产生我们所不希望的向外压力。为了避免这种现象,成形过程必须在磁力线穿透工件以前就结束。为此,应尽可能减小磁力线的扩散深度,即设法使工件电阻和脉冲磁场的半周期减小。

电磁成形具有独特优点,其加工工件不直接与工具或加压介质接触,不污损工件表面或不破坏其光洁度、绝缘层和保护膜,同时能在高温下、惰性气体或真空中对工件进行加工。适合于把金属工件压合在陶瓷、玻璃、塑料等材料上。它可进行精细元件及具有特殊要求(如电子管、半导体零件、药瓶封口)的装配工作,可达到很高的精度,避免了复杂的工艺过程,减轻了工人的劳动强度。这些都是一般机械加工法难以达到的。电磁成形不需要阳模,免除了阴阳模配合的复杂工艺,减少了模具费用,降低了维修费用。在同一电磁成形装置上,只要更换线圈和磁通集中器便可进行多种不同的加工,灵活性大。它还可以用改变充电电压和电容值的方法来精确地控制能量和加工压力。电磁成形装置的操作简单,加工速度快,生产效率高,一般能达到每小时加工 1000 个或更多的零件。它易于实现装置机床化,生产过程自动化和遥控,因此具有广阔的发展前途,加工零件已被应用于航天、航空、电子、汽车、兵器等工业生产中。

2. 电磁复合

如图 4 所示,当半匝线圈 1 中通入强脉冲电流时,由于线圈与复板金属 2 是固联在一起

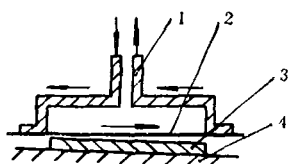


图 4 电磁复合示意图

1. 半匝线圈; 2. 复板金属; 3. 基板金属; 4. 基座

物理

的,在复板金属中流入了反方向脉冲电流,在金属间产生了同一方向的、突变的强脉冲磁场。磁力线密集在半匝线圈和复板金属的间隙内,密集的磁力线具有扩张的特性,使复板金属表面各部分受到垂直向下的巨大冲击压力。这一冲击压力,使复板金属以大约 1000m/s 的速度向下运动,在几微秒内,就可以与基板金属 3 进行撞合。撞合时产生很大压力,金属表面间产生射流,形成冶金粘结。由于半匝线圈和复板金属的固有电感小,电流上升速度快,因而磁场强度和相应的冲击压力都很大,可满足复板和基板金属之间冶金粘结的要求。

电磁复合的工艺流程如图 5 所示。

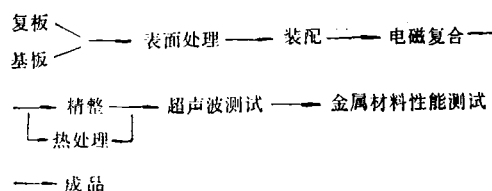


图 5

电磁复合要求复板和基板金属间有一定间隙,并存在一定角度。复合时,由小间隙一侧向另一侧复合。另外,金属板材要平整,瓢曲度要小,绝不允许呈现波浪形。基板和复板表面处理,一般可用喷砂、砂磨打磨或化学处理(酸洗),清除其表面氧化物。表面氧化物清除后,再用丙酮或汽油进行擦洗。复板和基板表面处理,立即进行电磁复合,否则金属表面又会产生氧化物。

电磁复合避免了常规复合方法(焊接、浇铸、冷轧、热轧)的缺陷,能有效地粘结性质差异很大的金属,更适合活性较大的铝、铌、钛、锆等稀有金属的复合。基板金属可处于退火、淬火、回火等不同的冶金状态,复合后不改变原金属的化学性能(抗腐蚀性)。另外它还避免了爆炸复合的不足,不需要一系列复杂的安全设备,复合时产生的噪声小,不会污损金属表面或破坏其光洁度,因而可以不加缓冲层,从而节约了大量能量(爆炸复合时,缓冲层消耗了大量能量)。复合板粘结均匀,基本上不存在小气穴,没有残留空气,复合质量好。电磁复合可以通过改变

充电压和电容器电容值的方法来精确地控制能量,它的工艺过程简单,成本低廉,可连续复合,易于实用化。它是一种很有前途的新型金属复合方法。

3. 电磁杀菌

杀菌工艺是决定果蔬汁液质量的主要因素。由于产量、成本等因素影响,通常采用高温杀菌。高温导致果蔬汁液饮料的品味、色泽改变,维生素也被破坏。为解决这一问题,人们在寻求一种常温液体杀菌新技术。

电磁杀菌是把装有待杀菌果蔬汁液饮料的瓶子放入磁通集中器中,利用磁通集中器产生的强脉冲磁场在常温下杀死细菌的一种新工艺方法。由于果蔬汁液中含大量离子及果酸,其电阻率远远低于纯水,可把其整体视为导体,把其中细菌体视为带电粒子,在强大的脉冲磁场中,受到巨大、突变的电磁力作用,使其细胞膜破裂、压碎,加上细胞内部的强迫振动,使细胞核震碎,细菌致死,达到杀菌的目的。

利用强大的脉冲磁场产生巨大的电磁力杀

(上接第500页)

15—20min,使阳极表面达到理想清洁表面。

蒸发物质的装料量依据对膜厚的要求,参照下式^[2]进行称量: $m = 4\pi\rho r^2 t$,

其中 ρ 为密度, r 为蒸发源至凝聚面的距离, t 为膜的厚度。蒸镀膜厚用蒸发电流和蒸发时间控制,同时为测得镀层厚度,在阳极旁边放一玻璃陪片,蒸镀后,测得其陪片厚度即可知阳极镀层的厚度。蒸发温度控制在显著蒸发点处:蒸发 Mg 靶,加热电流为 7A,其温度约 712°C;蒸发 Al 靶,加热电流为 18A,温度约 1490°C。若蒸发时温度太高,蒸发速率快,则易使镀层疏松;若温度过低,蒸发速率太慢,则会导致蒸镀面污染。掌握蒸镀速率是一个关键。我们经多次摸索,控制 Al 蒸发速率为 20 Å/min, Mg 蒸发速率为 35 Å/min。

二、实验结果

良好的 X 射线源双阳极靶镀层呈银白色,光亮、均匀、质密、附着力强。它在电子束轰击

死果蔬汁液中的细菌,杀菌率可达 100%,耗能很低,杀菌效率高。在常温条件下就可以杀死细菌,使果蔬汁液饮料的味道、色泽、维生素、成分等均没有变化。人们可以饮到没有添加剂,维生素不被破坏,具有原味道、原色泽的野生果、水果及蔬菜的汁液饮料。

- [1] Hansjorg Jansen, The Influence of Frequency and Geometry on the Efficiency of the Electromagnetic Compression of a Metal Tube, System and Products Division MAXWELL LABORATORIES, INC. San Diego, California, (1970), 5.3.2.
- [2] Lloyd E. Gilbert and William N. Lawrence, Design of Electromagnetic Swaging Coils, Proc. 2nd International Conference on High Energy Forming, (1969-6), 5.2.1.
- [3] 鈴木秀雄, 根岸秀明, 日本機械学会論文集(第3部), 39卷317号(昭48-1), 432-440.
- [4] 村田眞, 根岸秀明, 塑性と加工, 24卷274号(1983-11), 1120-1125.
- [5] 根岸秀明, 村田眞, 塑性と加工, 23卷262号(1982-11), 1092-1102.
- [6] 大森・豊明, 電磁気と生体, 日刊工業新聞社, (1982), 104-110.
- [7] 白希尧, 毛纺科技, No. 4(1988), 1-4.

下没有脱落现象。我们用美国 Dektaklla 公司的膜厚测量仪测量膜的厚度,一般 Al 膜为 3000—4000 Å, Mg 膜为 5000—6000 Å。

将镀好的阳极靶装进光电子能谱仪中进行实地测量,使用 Ag 或 Ni 作为标样。XPS 测量使用的各种参数为:计数 10^5 ,通过的能量为 25eV, X 射线源电压为 12kV,管流为 10mA。测试结果: MgK $\alpha_{1,2}$ 测得的 Ag 3d $_{5/2}$ 半高宽为 0.9eV, AlK $\alpha_{1,2}$ 测得 Ag 3d $_{5/2}$ 半高宽为 1.1eV,而且没有出现异常的伴峰。说明靶没有被杂质所污染。各种指标均能达到原始靶的标准。我们用超高真空蒸发镀膜技术蒸镀阳极靶,除满足本研究组的需要外,先后为复旦大学、北京大学等单位共镀了十余支阳极靶,使用寿命均在一年以上。这样既节约了外汇,又解决了缺少备件的困难。

- [1] T. X. Carrell et al., J. Electron and Related Phenomena Spectroscopy, 46-3(1988), 249.
- [2] 华中一主编, 真空实验技术, 上海科学技术出版社, (1986), 264.