

现代医用 X 线机原理

东南大学医学院医学影像系

放射教研室

编者：承益清 陈梅 李国昭

目 录

第一篇 现代医用 X 线机基础

第一章 总论	1
第一节 X 线的发现	1
第二节 X 线的产生原理	2
第二章 X 线基础知识	5
第一节 X 线的发生系统及特性	5
第二节 X 线发生器及控制	18
第三节 X 线发生器的效率与功率	26
第四节 X 线的质与量	27
第五节 X 线强度的空间分布	30
第六节 影响 X 线产生的因素	31
第三章 现代医用 X 线机基本知识	32
第一节 X 线机发展简史	32
第二节 X 线机分类和功能	34
第三节 医用 X 线机的分类	38
第四节 诊断 X 线机的功能和应用	39

第二篇 现代医用 X 线机基本原理

第四章 现代进口 X 线机原理	41
第一节 概述	41
第二节 技术特点	42
第三节 电路原理	45
第四节 系统安装	49
第五节 使用与维修	54
第五章 现代国产 X 线机原理	62
第一节 概述	62
第二节 电路原理	64
第三节 技术特点	70
第四节 使用与维修	72

第三篇 计算机及数字 X 线成像

第六章 计算机 X 线成像原理	74
第一节 概述	74
第二节 CR 基本原理和方法	75
第三节 CR 结构和功能	81
第四节 CR 的临床应用	84
第七章 数字 X 线成像原理	87
第一节 概述	87
第二节 直接放射成像 (DR) 原理	87
第三节 间接数字成像	89
第四节 DR 与 CR 的比较	90
第八章 现代医用 X 线机的选型和应用管理	94
第一节 X 线机的配置原则	94
第二节 X 线机机房的设计与防护	94
第三节 X 线机操作规程及注意事项	96
第四节 现代医用 X 线机的应用管理	98

第一篇 现代医用 X 线机基础理论

第一章 总论

第一节 X 线的发现

X 线是德国的物理学家威·康·伦琴(Wilhelm Conrad Roentgen)教授于 1895 年 11 月 8 日发现的。1895 年 10 月间,伦琴在实验室内研究阴极射线管放电现象时,发现用黑纸包得很严密的照相底片感光了,他以为是阴极射线所致。为了避免再次感光,他在 11 月 8 日晚把阴极射线管用厚黑纸包好,接通阴极射线管的高压电源,结果发现从阴极射线管壁发出荧光。他还发现了更加奇特的现象,在漆黑的实验室里,距阴极射线管两米以外的一块涂有铂氧化钡的纸板上发出的绿色荧光。关闭加在阴极射线管上的高压电源,涂有铂氧化钡的纸板上发出的绿色荧光消失。再接通高压电源,纸板上的荧光又出现了。伦琴根据这一发现推测:一定是从阴极射线管发出了一种新的射线,透过黑纸,照射在铂氧化钡的纸板上,使纸板发出荧光,并且肯定这种射线能使照相底片感光。为了证实这一推测,伦琴把手伸在阴极射线管和铂氧化钡纸板之间,伦琴吃惊地在纸板上看到自己的手象,而在很淡的手阴之中,还显出了黑色的非常清楚的骨骼影子。接着他将他夫人的手放到照相底板上用这种射线照射,得到了第一张手的照片,显示出了软组织、骨骼结构和结婚戒指的不透 X 线的致密影。

面对这一新的发现,伦琴很激动,他将各种各样的物体放在这种看不见的射线中间试验,一直搞到天亮。他发现纸片和木板都挡不住这种射线,只有较厚的铅片才能把它挡住。

伦琴继续研究这看不见的射线性质,发现在磁场中射线没有偏转,这说明它不带电,不同于阴极射线。射线通过三棱镜并不发生折射,这和普通光线有所不同。他把这种不知性质的奇妙的射线采用数学上的未知数“X”代表之,并起名为“X 线”。后来人们为了纪念他,也称为伦琴射线。

伦琴把他的发现写成了论文,于 1895 年 12 月 28 日在德国的科学杂志上发表。1896 年 1 月 23 日又在德国的物理学会上正式宣布了这一伟大的发现。同时,初步揭示了关于这种射线的某些性质,并当众展示用 X 线拍摄的第一张 X 线照片。

当发现 X 线的消息传到美国的第 4 天,就有一位医生用 X 线检查了受枪伤的病人身体里留下的子弹。X 线的伟大发现,无论是在近代科学理论上或在应用技术上,还是自然科学史上,都是一个重大里程碑,在相当程度上改变了医学科学,尤其是临床医学

的进程，为人类疾病的诊治作出了巨大的贡献。

1901 年，由于这一伟大的发现伦琴获得了科学界的最高荣誉--诺贝尔奖。他是第一个获得诺贝尔物理奖的科学家。

第二节 X 线的产生原理

X 线是通过从电子上获得能量并把它转换成具有适当能量的光子的办法产生的。而这种能量的转换是在 X 线管内进行的，所产生的 X 辐射的量和质可以通过调节加在管子上的电量(kv, mA)和照射时间(s)来控制。

一、X 线产生的条件

(一)高速电子与阳极靶面的相互作用

X 线是在能量转换中产生，它是根据靶原子的三个性质(核电场，轨道电子的结合能，原子处于最低能态)的需要产生的。在轰击电子并与靶原子的轨道电子或核相互作用下，其结果把动能转换为热能和 X 线形式的电磁能。更确切地说，是高速电子与阳极靶面相互作用的结果。所以，分析这种作用对认识 X 线产生的原理是十分重要的。

高速电子与靶面物质相互作用是很复杂的。一般来说，高速电子在失去其全部动能而变成自由电子之前要穿过很多原子间隙，经过很多次碰撞，发生多种作用的物理过程。例如，一个 1MeV 的高速电子在被阻止之前，会遭受一万次碰撞，每一次碰撞后，电子损失部分能量，而且往往还要改变运动方向。所以，电子在物质中的径迹是十分曲折的。

从能量转换角度来看，高速电子的能量损失分为碰撞损失和辐射损失两种情况。碰撞损失是高速电子与原子外层电子相"碰撞"，使原子吸收能量处于激发态，这种能量损失将全部变为热，使阴极温度迅速上升，高速电子动能的 99%左右都在碰撞损失中转换为热能。辐射损失是高速电子与靶原子内层电子或原子核相互作用的结果，以辐射 X 线光子的形式而损失能量，大约占高速电子总动能的百分之零点几，可见在 X 线管中，X 线能的转换效率是很低的。

从作用的物理过程来说，高速电子与靶原子相互作用存在以下四个物理过程，电离、激发、弹性散射和韧致辐射。具体分析如下。

1. 电离 原子的外层价电子或内层电子在高速电子作用下完全脱离了原子轨道，使原子变成离子的过程称为电离。

高速电子的动能转为以下三部分：一部分能量消耗在内、外层电子的脱出功，这部分能量暂时"储存"在原子内，将伴随着发射光学光谱(由外层电子轨道跃迁产生)和标识 X 射线(由内层电子轨道跃迁产生，以光能的形式释放出来；另一部分转化二次电子(被击出的轨道电子)的动能；第三部分转化为射出电子的动能，射出电子以较低能量，并改变方向射出，然后与其它原子或原子核发生作用。

电离过程中向外发射的光谱有两种：一种是由价电子脱离原子轨道，离子结合自由电子变为处于激发态的原子，在回到基态过程中发射出光学光谱。由于最外层电子轨道

的能级差较小，这些光谱一般在紫外线、可见光和红外线的波长范围，不属于 X 线；而且这部分光能几乎全部被周围原子所吸收，转化为热运动加快(固体中分子热运动主要是在平衡位置附近作无规则的振动)，使阳极温度上升。另一种发射光谱是由于内层电子脱离轨道，使原子处于激发态，通过内层电子的能级跃迁而辐射出 X 线，这是构成医用 X 线的成分之一。

2. 激发 高速电子(或二次电子)撞击原子外层电子，由于作用较弱，不足以使其电离，反将其推入高能级的空壳层，使原子处于激发态，这种作用叫做激发。

入射电子的动能，一部分转化为方向改变，速度变小的出射电子的动能；另一部分是被原子吸收的激发能。处在激发态的原子将发射光学光谱。这部分光能最终导致固体分子热运动加快，温度上升，全部转化为热能。

3. 弹性散射 高速电子受原子核电场的作用而改变运动方向，但是能量不变，称为弹性散射。

这种作用没有光谱辐射，也没有能量损失。由于阳极靶内物质的密度很高，散射的距离很短，高速电子将很快在已改变的方向与其它原子核或核外电子相遇，发生新的作用。

4. 韧致辐射 韧致辐射是由轰击电子与靶原子的原子核相互作用的结果。高速电子在原子核的电场作用下，速度突然变小时，它的一部分能量转变成电磁波发射出来，这种情况叫韧致辐射。

在韧致辐射中，入射电子的能量一部分转化为辐射电磁波的能量，其波长在 X 线范围内，在医用 X 线中占有特别重要的地位；另一部分转化为出射电子的动能，出射电子的方向将发生改变。

韧致辐射具有以下两个特点：(1)韧致辐射是在核电场作用下的一种能量转换形式，不能用经典理论作简单的解释。(2)韧致辐射所产生的 X 线是一束波长不等的连续光谱。这是由于下面几个原因造成的：一是加在 X 线管两端的高压通常是脉动直流电压，使得到达阳极的各个高速电子的动能并不相等；二是高速电子在核电场作用前，通过电离或激发所失去的动能各不相等；三是各个高速电子在原子核电场中被阻止的情形不一样，离核越近，受核电场阻止作用越强，由动能转换为光能的部分能量越多，辐射 X 线的波长越短，反之，波长就长。此外，核电场强度还随原子序数不同而异。所以韧致辐射所形成的 X 线是一束随靶元素不同而异的连续谱线。

从以上四种作用的物理过程看出：高速电子与阳极靶原子“撞击”的结果，产生两种类型的光辐射。一种是波长在可见光、红外线、紫外线附近的光学光谱；另一种是 X 线。X 线依其产生的机制不同，又有两种成分，一种是高速电子与原子内层电子作用所产生的标明元素特性的标识 X 线；另一种是高速电子与核电场作用所形成的韧致辐射，这是一束连续 X 线。X 线由于波长短、能量大，穿透作用强，将穿过 X 线管壁、油层、窗口、滤过板而射向人体，用作治疗和诊断。光学光谱则波长长，光子能量小，则全部被周围原子和管壁、油层所吸收，使原子的热运动加快，温度上升。从能量转换角度上看，高速电子总能量的 99% 将转换为热能，而仅有大约百分之零点的能量转换为有用的 X 线。

由于 X 线束由复杂波谱组成，不能用量子能量说明，不得不借助等效能量的概念，

令 X 线穿过不同厚度的物质，对于一种给定的材料(如铝)，总有一个厚度使射束强度减低到原始强度的一半，即为该材料半价层。然后用单一能量 X 线重新测定，与射线束有相同的半价层的单一能量 X 线束的量子能量，叫它的等效能量。例如用 100keV 加在 X 线管上产生的等效能量大约为 60keV。

(二)X 线产生的必备条件

自从物理学家伦琴发现 X 线以来，经过科学家的研究，现已从理论上搞清了伦琴发现的 X 线是由于在真空条件下，高速飞驰的电子撞击到金属原子内部，使原子核外轨道电子发生跃迁而放射出的一种能。可见要产生 X 线必须具备三个条件：(1)电子源，根据需要随时提供足够数量的电子。(2)高速电子流，在强电场作用下，电子作高速、定向运动。因为原子核外电子与原子核之间有结合能，击入原子内部的电子必须有一定能量传递给轨道电子，才能使内层轨道电子发生跃迁产生 X 线。若击入原子内部的电子所具备的动能不够大，则只能使原子核外较外层电子产生激发状态，放出可见光或紫外线。(3)必须有适当的障碍物(靶面)来接受高速电子所带的能量，使高速电子所带的动能部分转变为 X 线能。根据计算可知，低原子序数的元素内层电子的结合能小，高速电子撞击原子内层电子所产生的 X 线的波长长，即能量小。原子序数较高的元素如钨，其原子内层电子的结合能大，当高速电子撞击了钨的内层电子，便产生波长短能量大的 X 线。所以，用于 X 线诊断和治疗的 X 线管的靶面是由钨制成的。只有特殊用途的 X 线管的靶面是用钼制成的，钼(Mo)原子序数比钨低，能产生波长较长的 X 线，谓之软 X 线，用于“软组织”摄影。

二、X 线产生的过程

X 线的发生过程中接通电源，经过降压变压器供 X 线管灯丝加热，所产生的自由电子云集在阴极附近。当高压变压器向 X 线管两极提供高压电时，阴极与阳极间的电势差陡增，处于活跃状态的自由电子，受强有力的吸引，成束以高速由阴极向阳极行进，撞击阳极钨靶原子结构。此时发生能量转换，其中约 1%以下的能量形成了 X 线，其余 99%以上则转换为热能。前者主要由 X 线管窗口发射，后者由散热设施散发。

X 线的质决定于电子运行的速度及其撞击钨靶后动能所耗损的程度。改变高压变压器的电压，即可调节电子运行的速度。电压越高，电子的运行速度越快，动能消耗越多，则由 X 线管发射的 X 线波长越短，穿透力也越强。通过 X 线管的电压很高，以千伏(kV)计。图 2-1 为不同千伏时，电子轰击阳极靶面时产生 X 线的线谱分布。

X 线的量则取决于通过 X 线管的电流大小，亦即撞击在钨靶上的电子数量。改变灯丝的热度，即调节电子发生的数量，电流越大，则灯丝越热，电子越多，撞击在钨靶上的电子数量也越多。通过 X 线管的电流很小，以毫安计。

第二章 X 线基础知识

第一节 X 线的发生系统及特性

一、X 线管

现代在 X 线管是热阴极真空管，一般包括阳极和阴极两部分。它的功能是把接受的电能转换为 X 线能和热能。

(一) 固定阳极 X 线管

1. 构造和作用 固定阳极 X 线管由美国 W.O.Coolidge 于 1913 年发明，其特点是真空度高、电子由热阴极发射，X 线的量和质可以任意调节，它由阳极、阴极和玻璃壳三部分组成(图 2-2)。

阳极由阳极头、阳极罩、阳极柱三部分组成。阳极的作用是吸引电子和加速电子、阻止高速电子运动而产生 X 线，同时产生的热量传导或辐射出去，也吸收二次电子和散射线。

阳极头由靶面和铜体组成，它受电子轰击，其动能的 99% 转换为热能，只有 1% 左右转换为 X 线能，故靶面材料应选用高熔点、蒸发率低，且 X 线发射率较高的钨制成(钨的熔点为 337°C)。因为辐射的 X 线强度与靶面材料的原子系数成正比。但钨的导热率小，可通过真空熔焊的方法把钨焊接在无氧铜体上，以便具有良好的散热能力。

阳极罩在靶的外面，也由无氧铜制成，其作用是吸收二次电子和散射线。高速电子轰击靶面时，会有少量电子从靶面反射出来，称为二次电子，其能量为原来能量的 90% 左右。二次电子若轰击在玻璃壳上，会使玻璃壳温度升高而放出气体，降低管内真空度，甚至使玻璃击穿漏气；二次电子没有经过聚焦，当它撞击到玻璃壳或阴极时也可能再次轰击靶面，辐射出大量的散射线，严重地影响成像质量。阳极罩套在阳极面四周，与阳极同电位，能吸收二次电子，使从靶面反射出来的二次电子减少 50%~60%，该罩也能吸收部分散射线。

阳极柱由紫铜制成，是阳极引出管外的部分，并与阳极头的铜体相连，浸在变压器油中把热量传导出，提高阳极的散热效率。

阴极由灯丝和集射罩组成，其作用是发射热电子和聚焦，使打在靶面上的电子束具有一定的形状和大小，形成 X 线的焦点。

灯丝由钨制成，绕成螺旋状，作用是发射电子。灯丝通电后，温度逐渐上升，至一定值后开始发射电子。当灯丝温度低于 2400K 时，随着温度的升高，发射电流增加较慢，而温度高于 2400K 时，灯丝温度稍提高一点，发射电流却增加很多。一般来说，灯丝点燃时间越长，工作温度越高，它的蒸发越快，灯丝寿命越短。如果灯丝电流比额定值升高 5%，灯丝寿命可缩短一倍。因此，使用时灯丝加热电流应严格控制在额定值以下。

为了适应同一个 X 线管不同使用功率的要求，一般装配有长短两根灯丝，形成双

焦点 X 线管。阴极具有三根引线，其中一根为公用线，其余为大小灯丝的另一根引线。当然，也有单根或三根灯丝的 X 线管，形成单焦点或三焦点。

集射罩的作用是对灯丝发射电子进行聚焦。当灯丝发射大量电子后，接通高压时，在正电场的作用下，电子将以高速飞向阳极。由于电子之间相互排斥作用，致使电子呈散射状，特别是在阳极电压较低的情况下，散射更为显著。为了能使电子集中成束飞向阳极，将灯丝装入一个用镍或铁镍合金等制成的长方形罩中，即集聚罩。集聚罩与灯丝的一端相接，从而获得与灯丝相同的负电位，并借其几何形状，迫使电子成束状飞向阳极，达到聚焦的目的。

X 线管玻璃壳是用来支撑阴阳两极和保持管内真空度(10⁻² mmHg 以上)。多采用耐高温、绝缘强度高膨胀系数小的钼玻璃制成。因钼玻璃与铜的膨胀系数不同，不宜直接焊接，其间镶接一个与钼玻璃膨胀系数相近的铁、镍合金圈，以避免因温度变化使玻璃破裂和漏气。固定阳极 X 线管，电子束恒定地轰击阳极固定位置，使阳极靶面上所承受的最大功率小。固定阳极 X 线管的缺点是焦点尺寸大，瞬时负载功率小，多被旋转阳极所取代。

2.X 线管的焦点 电子轰击在靶面上的面积称为实际焦点，实际焦点的大小主要取决于聚焦罩的形状、宽度和深度。实际焦点在 X 线投射方向上的投影称为有效焦点或目视焦点。设靶面与 X 线投射方向的夹角为 α 、实际焦点的长度为 b 、宽度为 a ，那么在 α 方向上投影后，其宽度 a 不变，长度变为 $b \cdot \sin \alpha$ 。因此，有效焦点=实际焦点 $\times \sin \alpha$ 。显然，有效焦点与 X 线投射方向有关，愈近阳极端 α 角愈小，有效焦点愈小。这就是有效焦点的方位特性。

当投射方向与 X 线管轴相垂直时，这时的 α 角称为靶角或阳极倾角。阳极倾角一般 7~20°，它是与管容量和照射野密切相关的重要参数。在要求有效焦点一定条件下，倾角越小，实际焦点越大，管容量也越大。但倾角不能太小，它受到有用照射的限制。

有效焦点常以正方形标注，如 0.3mm×0.3mm，1.8mm×1.8mm 等等。但实际测得的有效焦点并不是正方形，这种标注方法并不科学。国际电工委员会(IEC)规定了有效焦点的标注方法和容许值。表 2-1 列出了四个有效焦点及其容许值的变化范围。

有效焦点与成像质量有密切关系，有效焦点尺寸越小，影像清晰度越高。由图 2-3 看出，当有效焦点为点光源时，图像界限分明，清晰度最高；当有效焦点具有一定尺寸时，图像边界产生了半影，边缘模糊，清晰度降低。焦点尺寸越大，清晰度越差。另外，焦点面上的 X 线辐射强度分布对成像质量也产生影响。由于集射罩的形状，灯丝表面在罩内深度不同，从灯丝表面发射出的电子的聚集情况也不同，以至到达靶面的电子束强度形成单峰、双峰甚至多峰分布，同时靶面结构和老化，也会造成 X 线辐射强度的不均匀性。图 2-4 为三种不同焦点 X 线辐射强度分布，焦点中央辐射强度越强(高斯分布)，其影像分辨率最高，其次为矩形分布，最差为双峰分布。焦点越小，X 线管的容量就越小。可见，焦点尺寸对 X 线管容量和影像清晰度的改善是有矛盾的，最终办法是采用旋转阳极 X 线管。

有效焦点的大小与 X 线管的管电流和管电压有关。在管电流一定条件下，管电压越高电子间的外力相对电场力的作用越小。所以，有效焦点尺寸略有减小，且在管电压一定条件下，尤其在低压情形下，管电流增大时，电子间的斥力增大，有效焦点尺寸将

明显增加,这种现象称为焦点增涨。所以,测量有效焦点时,即规定了与管轴垂直的投射方向,还应规定相应的管电流和管电压值。

(二)旋转阳极 X 线管

1. 旋转阳极的组成及特性 旋转阳极和固定阳极 X 线管相比,两者主要区别在于阳极构造不同。旋转阳极部分主要由靶面、转子、转轴、轴承和定子等组成。

固定阳极 X 线管,因阳极焦点面受温度的影响,限制了其功率,要提高功率就必须增大焦点面,这又使影像清晰度大大降低,两者不能兼顾。1927 年以后出现了旋转阳极 X 线管,其结构如图 2-5。

从偏离管子中心轴线的阴极发射电子,轰击转动的阳极靶面上。由于热量被均匀地分布在一个转动着的圆环面积上,使单位面积上的热量大为减小,因而大大提高了 X 线管的功率。或者说在一定的负载功率下,阳极倾角可以大大减小,从而使有效焦点变小,这样提高了影像清晰度。旋转阳极 X 线管的优点是功率大、焦点小。较好地解决了固定阳极 X 线管难以解决的问题。目前旋转阳极 X 线管的功率多为 20~50kW,高者可达 150kW,而有效焦点多为 1~2mm²,微焦点可达 0.05~0.3mm²,影像清晰度极高。

靶面具有 6~18° 之间的倾斜角度,镶在一个直径为 70~100mm 之间的圆盘上,其中心铆接在钼制细杆上,外杆的另一端与转子相连。转子为一表面黑化的铜管,以提高热辐射能力。转子内装的滚珠轴承,以便转动灵活,转子和轴承封闭在高度真空的玻璃壁内。定子线圈装在管壁外面,其结构和小型单相异步电动机类同。

60 年代以后的旋转阳极 X 线管,其靶面多为铌钨合金镶在钼或石墨基体上。这种结构与纯钨靶相比有以下优点: (1) 铌钨合金靶面的晶粒较细,抗热胀性提高,再结晶温度上升,使靶面在高温下不易龟裂。(2) X 线辐射率下降较慢,使用两万次以后,纯钨靶的 X 线输出下降到原来的 55%。而铌钨合金靶的 X 线输出只下降到原来的 87%。(3) 大大提高了热容量,由于钼或石墨的比重都比钨小,而比热都比钨大,这种复合靶的重量增加不多,但热容量却大大增加了。例如,外径为 100mm 纯钨靶,重为 540g,热容量为 15~10 J,同样尺寸的钼基铌钨合金复合靶,重为 640g,热容量为?

转子由无氧铜构成,转速由下式决定:

$$n=120f/P(r/min)$$

式中 n 为转速, f 为定子中电源频率, P 为定子的极数,一般 $P=2$ 。

由于存在转差率,转子转速约落后于磁场转速的 10% 左右。所以,对中速管 ($f=50\text{Hz}$), $n=2700\text{r/min}$; 对高速管 ($f=150\text{Hz}$), 实际转速 $n=8500\text{r/min}$ 左右。若电源频率提高到 300Hz, 实际转速可达 17000r/min。旋转阳极转速达到额定值时(需要 0.8~1.6s)才接通负载,产生 X 线。

转速越高, X 线管的功率越大。它们之间的关系如下:

$$P = K\sqrt{nd}$$

式中 P 为功率, K 为常数, n 为转速, d 为焦点轨道直径。可见功率与转速和靶面直径的平方根成正比。当速度增加到 2 倍时,允许功率增加到 1.4 倍左右。靶盘直径越大,热容量越大,散热速度也越快, X 线管的功率也增大。

化点: 功率大, 散热快, 焦点小

从切断定子线圈电源开始,到转子停止转动所需的时间叫静转时间。这时间反映了转子摩擦和轴承的润滑状况。为避免油脂类润滑剂在高温时蒸发汽化,轴承润滑剂都采用固体润滑材料,如二硫化钼、银、铅等。不同润滑材料,静转时间不同,对银、铅来说,新管的静转时间一般为数分钟,对二硫化钼来说,可达 20min 左右。对 2700R/min 的中速管,静转时间低于 20S,则说明管子报废。

为了减少空转磨损,可采用制动装置。即造成转动力矩的定子工作电源断开以后,立即给转子一个反作用力矩,使转子很快停止下来。对高速管来说,制动装置是必不可少的。它可使转子很快越过引起共振的临界转速,以避免管子破损。临界转速为 5000~7000r/min 之间。

固定阳极管的散热方式主要是热传导,旋转阳极管的散热方式主要是热辐射。轴承的工作温度不能越过 460°C 。为了避免过多的热量传导到轴承,靶面与转子之间的连接采用外径较细的管状钼杆。为了增大转子的热辐射,一般把转子表面黑化。尽管如此,轴承的工作温度仍达到 400°C 左右,所以轴承材料要采用耐热合金钢,如高速工具钢。由于热辐射的散热速度较慢,在使用旋转阳极 X 线管时,在两次曝光之间必须要有充分的间歇时间,以防热容量过载而损坏管子。

2. 基本原理和特点 现代的中大型 X 线机均采用旋转阳极 X 线管,该管具有焦点小、功率大、散热快等优点。但是,旋转阳极管在摄影前很短时间内必须达到很高转速才能曝光,否则,电子将集中撞击小块面积,致使焦点面过热熔化而造成管子损坏。因此,对旋转阳极及其控制有以下基本要求:

(1)有快速启动装置:要求在曝光前很短的时间内(中速管为 0.8~1.2 S,高速管约 2.4 S),将转动惯量由静止状态达到额定转速(中速管 2800 R/min,高速管 8500 R/min)。这要求它的机械强度好,能耐受很大的角加速度;对电路来说,要求提供很大的启动电流,使启动电容足够大和启动电压足够高,以便输出很大的启动转矩。

(2)有延时装置:延时就是为了保证一定的启动时间,以便在阳极达到额定转速后才送出曝光开始信号。

(3)有降压装置:阳极一旦达到额定转速后,在曝光期间应该将启动状态的高压切换为工作状态的低压,以适应阳极的启动转矩大、运转转矩小的特点。

(4)有保护装置:保护装置是为了避免阳极未转动或转速不够而加高压曝光,造成 X 线管立即损坏。最常见的办法是在定子回路中设置电流、电压继电器或电流互感器来进行检测和保护。

(5)有制动装置:为了减少阳极轴承磨损,延长使用寿命,曝光结束后,阳极应在很短时间内停止转动,故应设置制动器。其原理是在曝光结束,定子的工作电压断开后,立即有一个脉动直流流经工作绕组,以产生一个制动力矩,使已旋转的阳极迅速停止转动,几秒钟后,又将此脉动直流电流自动切断。

对于 8500 R/min 的高速管,制动装置必不可少。转子系统的机械共振频率一般为 5000~7000 R/min,制动装置将使转子尽可能快速地通过这一临界转速,以避免产生共振而损坏管子。

(三)X 线管的规格和基本特性

各种型号的 X 线管都有它一定的规格和特性,只有充分了解和正确运用它,才不

至因使用不当而损坏 X 线管。

1.X 线管的规格参数 X 线管的规格参数包括结构参数和电参数两种。前者指 X 线管的结构所决定的各种参数，如靶面的倾斜角度，有效焦点，外形尺寸，重量，管壁的滤过当量，阳极转速，工作温度，冷却和绝缘形式等。电参数是指 X 线管电性能的规格数据，如灯丝加热电压和电流，最大管电压，管电流，最长曝光时间，最大允许功率，代表容量等。在调整和使用 X 线机时，特别要注意以下几项参数。

(1)最大管电压：指加于 X 线管两极间的最高电压峰值，单位为千伏(kVp)。若越过最大管电压值，可使管壁放电或击穿。

(2)最大管电流：指在一某管电压和曝光时间内所允许的最大电流平均值，单位为毫安(mA)。在调整管电流时不得超过额定值，否则将导致焦点面过热而损坏或缩短灯丝寿命。

(3)最长曝光时间：指在某一管电压和管电流条件下所允许的最长曝光时间，单位为秒。若超过此值，热量的积累，将使焦点面过热而损坏。

下面是日本东芝 A129/92 系列 X 线管规格参数：

最大峰值电压：150kV

有效焦点尺寸：小焦点 0.6mm；大焦点 1.2mm

最大阳极负载(3 相，180Hz，0.1S)：小焦点 40kW；大焦点 96kW；

最大透视生热率：600Hu/S

阳极盘结构：钼基铼钨合金

阳极盘直径：102mm

阳极盘靶角：12°

阳极热容量：A129 为 300kHu；A292 为 400kHu

最大阳极冷却速率：100kHu/min

固有滤过(铅当量)：最小 0.7mm

封装：玻璃

2.X 线管的阳极特性 在灯丝加热电流 I_f 为某一恒定值时，管电流 mA 与管电压 KV_p 的关系曲线叫 X 线管的阳极特性。

X 线管灯丝发射的电子大致可分为三个区域：一是灯丝前端发射出来的电子，它们在静电场作用下飞往阳极，这部分电子运动不受阻力；二是灯丝两侧发射出来的电子，这部分电子的运动特点是在空间发生交叉后飞向阳极，它们的运动受到一定的阻力；三是灯丝后端发射出来的电子，由于电子间相互排斥和电场作用力很微弱，这部分电子滞留在灯丝后面，形成“电子云”(即空间电荷)，它们受到的阻力很大，只能随着管电压的升高而逐渐飞向阳极。

X 线管的阳极特性曲线如图 2-6 所示。

由图看出，曲线可分为两部分，起始部分是上升部分，称为比例区，即管电流随管电压的升高而增大，这是空间电荷在起作用。管电流 mA 与管电压 KV_p 之间满足 3/2 次方定律，即： $mA=A \cdot V_a^{3/2}/d$

式中 d 为阴极与阳极间的距离，A 为常数。曲线的另一部分为近似水平部分，称为饱和区，即管电流基本上不随管电压上升而增加用为管电压已较大，几乎所有的空间电

荷都散飞往阳极，此时管电流的大小仅由灯丝加热电流决定。

当灯丝加热电流从 I_1 增加到 I_2 时，灯丝温度也从 T_1 提高到 T_2 ，由于热电子数目增加，空间电荷量增大，使管电流达到饱和所需管电压也增大，饱和区的管电流也增大。实向阳极特性受空间电荷和 X 线管结构影响饱和特性并不如此明显。

X 线管的灯丝发射特性是指在一定管中压下，管电流 I_a 与灯丝加热电流 I_f 之间的关系曲线。

3.X 线管灯丝加热和发射特性 X 线机的灯丝加热特性是指灯丝加热电压与加热电流的关系是正比关系。钨灯丝加热到一定温度后，其阻抗增大。灯丝电压高于额定值的 5% 时，电子发射数量增加 50%，而灯丝寿命却减少 50%，反之亦然。

(1)X 线管灯丝加热的基本要求和结构特点：X 线管的电流决定着 X 线的辐射量。管电流是由灯丝热电子发射形成的，灯丝温度高低将直接影响管电流的大小。对 X 线管灯丝加热的基本要求是稳定和可调性。具体要求：(1)有一个稳压电源。一般采用饱和谐振式稳压器，它的电源稳压度能达到 $\pm 1\%$ ，基本上能满足管电流稳定的要求。也有用电子稳压器，以防电源频率的变化。(2)在灯丝初级电路中串联可调电阻，以作为管电流选择。对透视来说，管电流很小，一般为几毫安，要求在高压下能连续调节阻值；对摄影来说，管电流变化范围从数十至数千毫安，且曝光时不能进行调节，故该可调电阻应分段调节。(3)在灯丝初级电路中要设置空间电荷补偿器，以补偿由于空间电荷效应而造成的管电流受管电压引起的变化。(4)摄影时能自动进行灯丝预热增温，以满足大的管电流发射的需要。

在现代 X 线机设备中，采用单钮制参量调制，自动曝光，降落负载等与管电压，曝光时间相协调的自动控制程序系统，灯丝加热的结构就有新的突破，以及满足各种特殊检查的要求。例如，日本岛津的 X 线机中，就是利用交流波形中峰值附近一定宽度的矩形波对灯丝加热，以及通过改变矩形波的幅度来改变管电流，省去了交流稳压器。

(2)空间电荷效应及其补偿：X 线管灯丝加热作用而产生电子发射，靠近灯丝有阴极聚焦罩，使灯丝周围电场极不均匀，构成电子初始动能具有较大差异，同时在工作过程中，管壳内壁集聚大量负电荷，不同程度上抵制电子流飞向阳极。所以，灯丝发射出来的电子不可能全部飞到阳极，这是由 X 线管固有结构和工作特点所决定的。在灯丝表面附近滞留的这部分电荷称为空间电荷。由它所造的各种作用，称为空间电荷效应。

空间电荷效应与灯丝加热电压，有极大的依从关系。灯丝加热电压越大，灯丝温度越高，热电子发射速率越大。在负载情况下，一方面使管电流增大，同时也使空间电荷数量骤增，空间电荷效应也大大增强。

空间电荷效应使 X 线管阳极特性曲线(管电流与阳极电压的关系曲线)不出现真正的饱和状态。在灯丝加热电压较低时，管电流随管电压增大将出现近似“饱和”状态，灯丝加热电压越大，“饱和”状态越不明显。

由于空间电荷的存在，管电流不仅与灯丝加热有关，而且与管电压的变化有关。这一点从 X 线管的发射特性曲线(管电流与灯丝加热电流的关系曲线)上就可以看出。如图 2-7 中加热电流为 5A 情况下，管电压在 50kV 时，管电流为 420mA；管电压 80kV 时，管电流达 600mA。这样，即使稳定了加热电流，由于空间电荷效应，一旦管电压改变，管电流亦随之而变。

管电流影响 X 线的量,管电压影响 X 线的质。为使 X 线的量和质独立地选择,必须克服管电流随管电压变化的影响,这就提出了如何对空间电荷效应进行补偿的问题。

通常采用改变灯丝加热电流的办法来补偿管电压对管电流造成的影响。

由两个大小焦点的实验证实,管电流与管电压关系并不是一条直线,而是一条曲线,在低 kV、高 mA 时曲线变化越大。所以,对空间电荷补偿存在着两种形式:线性补偿和非线性补偿。线性补偿的灯丝加热电压(或电流)随管电压变化呈线性关系,这种补偿适用管电流较小的情况,而非线性补偿的灯丝加热电压(或电流),随管电压变化呈非线性关系,这种补偿适用大电流情况。

(3)灯丝发射特性:是指在不同管电压下,管电流与灯丝加热电流之间的关系。管电流一定时,管电压高时所需的加热电流较低;加热电流一定时,管电压高时获得的管电流较大。

4.管电流自动补偿原理 一般 X 线机的管电流都在曝光前预置,近代 X 线机利用闭环控制技术,制成使 X 线机管电流在曝光中的补偿,既方便了操作,也提高了影像质量。

(1)直接曝光中管电流自动补偿:在连续 X 线摄影的 DSA 检查过程中,由于受人体不同厚度、不同器官组织密度和造影前后同器官的组织密度改变的影响,使 X 线穿过人体到达检测器的强度很不均匀,致使成像出现各种模糊的线性阴影,层次不佳,对比度不良,影响诊断。为了避免这种情况,有些机器有自动控制密度装置。

曝光开始时,X 线穿过人体、滤线栅、电离室,再使胶片感光。在曝光过程中,造影导管床的步进(如顺序观察解骨动脉-股动脉-腔排动脉)和血管内有无造影剂的变化,X 线强度出现了起伏变化,电离室产生的离子流也按同样规律变化,此信号经放大后,与预先给定的密度信号进行比较;由指令电子开关使可变变压器初级电压发生改变,从而改变灯丝加热电压,使 X 线强度发生相反方向的变化。当 X 线在穿过人体不同器官组织的厚度或密度增大时,X 线强度有减少的趋势,则通过此闭环回路,促使管电流自动升高,使 X 线强度回升;反之,迫使管电流下降。这样就获得了密度均匀的 X 线图像,提高了成像质量。用光电管替换电离室,也可得到同样效果。

(2)间接摄影中管电流自动补偿:间接摄影是用胶片来拍摄影像增强器输出屏的影像(图 2-8)。在摄影之参数(kV, mA, s)不变的情况下,随着人体厚度和被摄器官组织密度变化,必然反映在增强器输出屏上光通量的变化,使图像的密度背景发生较大的变化,影响成像质量。

为了使增强器输入屏的 X 线剂量与输出屏的光通量保持稳定,故在摄影过程中对管电流或管电压自动补偿(图 2-8)。

增强器输出屏上的光通量,由光电倍增管接收,放大后,将电信号送到比较器,另一方面摄影机所调制的胶片浓度信号,由基准信号源也送至比较器,输出误差信号推动一个伺服电动机正、反转,使之调节变压器升压或降压,再去控制灯丝加热电压或管电压。从而达到胶片浓度的预置参数。

(3)X 线监视器亮度自动调节:在 X 线电视透视时,由于人体厚度和密度的变化,会造成监视器图像忽明忽暗,影响诊断效果。

亮度自动调节的原理是:增强器输出屏图像的光信号,由光电倍增管接收,倍增后

输给放大器。当体厚或密度变化时,输出屏图像亮度就会改变,放大器输出变化的电信号,加至调节变压器的初级,导致 X 线管灯丝电压升高或降低,使管电流得到补偿,监视器的图像亮度保持稳定。

有的监视器亮度自动稳定装置,是将监视器的视频信号输至放大器,使 X 线管电流得到补偿。因监视器图像亮度是由视频信号决定,而视频信号又是由摄像管接收增强器输出屏图像亮度产生的,所以,用视频信号控制管电流的变化,也能达到监视器图像亮度的自动稳定。

监视器图像亮度不但与管电流有关,还与管电压有直接关系。如果管电压太低,使射线的穿透力不够,管电流再大也不起作用。所以,有的亮度稳定装置,是通过管电压补偿或对管电压和管电流同时进行补偿,以获得更好的效果。

2.管电压的自动补偿 X 线机在负载条件下,存在各种阻抗压降,为了达到预定管电压,就必须进行电压补偿。

电压补偿分平移补偿和斜率补偿,平移补偿主要是补偿由于管电流流经高压变压器和整流管所引起的电压降落,这种电压降落对某一固定的电流而言,是不随管电压变化的定值;而斜率补偿主要补偿管电流波形随管电压升高而发生畸变,和电源阻抗随管电压而变化所引起的电压降落,这种补偿不仅与电流有关,也随管电压增大而增大。

自动补偿一般通过控制伺服电动机的正、反转动来实现。把输入电压的一部分取样,与某个固定值的参考电压相比较,将误差电压(+、-或 0)放大后,驱动一个伺服电动机带动处在自耦变压器上的碳轮进行调节(或用电阻来改变电阻抗),直至比较器无信号输出为止。

当曝光开始以后,进行电压的动态调整过程。比较器的同相输入端送入管电压实际值的模拟信号,它由 X 线管阳-阴极实际电压经分压采样而形成的正电压信号,使曝光期间实际管电压与设定值保持一致。如果不是单帧摄影用,即 DSA 摄影可长达 20 s,曝光期间的电压值应随被摄体密度的变化而跟踪调整。例如,腹主动脉 DSA 检查,当注入碘造影剂时被摄体密度增加,在自动亮度控制作用下,高压就要有一定的增加,以保持图像亮度的稳定。

(四)X 线管的瞬时负载特性

1.负载的分类和表示方法 按 X 线管负载作用的时间长短分为瞬时负载和连续负载。瞬时负载作用时间在数毫秒至数秒之间,如单次摄影,单组连续摄影。这时,在 X 线产生过程中伴生的大量热能集中在靶面附近,靶面温度迅速升高,最大瞬时负载仅受靶面熔点所决定。连续负载的作用时间一般在 10 s 以上,如透视、DSA、X 线电影等,多次瞬时负载。这时,热量扩散在整个靶体或阳极体,并且通过传导或辐射的方式把热量传至周围介质中。在这过程中,阳极各部分的温度不断上升,阳极某部分的温升极限就限制了连续负载的继续作用。

瞬时负载是指在 X 线管安全使用下,一次曝光中,阳极靶面所能承受的最大负载。用容量或功率来表示,也常用瞬时负载曲线来表示。

2.容量的计算

$$P=IU/1000 \quad (\text{kW})$$

式中 P 为功率(kW), U 为管电压有效值(kV), I 为管电流有效值(mA)。在不同整流

方式中，管电压和管电流的波形不同，其管电压峰值与有效值，管电流平均值与有效值均不相同，有一定的换算关系。如单相全波整流电路中，管电压有效值为峰值的 0.707 倍，管电流有效值为平均值的 1.1 倍。故计算容量时必须考虑到整流方式，还要考虑负载时间，X 线管容量随曝光时间的增加而减少。例如在单相全波整流电路中，管电压峰值为 60kV，管电流平均值为 100mA，其容量为：

$$P = \frac{60 \times 0.707 \times 100 \times 1.1}{1000} = 4.66(kw)$$

3.代表容量 X 线管的容量不是一个固定值，它与焦点尺寸、整流方式、曝光时间、阳极转速、靶角、焦点面直径等有关。某 X 线管在一定整流方式和曝光时间条件下的最大容量称为代表容量。对固定阳极 X 线管的代表容量是指在单相全波整流电路中，曝光时间为 1S 时所能承受的最大功率。

旋转阳极 X 线管的代表容量是在三相六管全波整流电路中，曝光时间为 0.1 S 时所能承受的最大功率。

4.瞬时负载保护 X 线物理学指出：输入 X 线管的绝大部分功率转变为热量，有极少量的能量转换为 X 线能，其结果是将使阳极温度很快上升。但实际焦点上每平方毫米在单位时间所产生的最大功率是有限制的，即为该管的比容量(kW/mm²)。比如纯钨靶面，在 0.1s 时的比容量为 300W/mm²，而 1s 时的比容量为 200W/mm²，可见比容量与负载时间有关。若超过该管的比容量，将会使阳极靶面熔化蒸发，会在玻璃壁上溅上一层此类金属，吸收 X 线，使 X 线强度减弱，甚至使管内真空度降低。即使焦点温度在熔点以下，由于过热，冷却时靶面收缩，内部受到很大的压缩应力而致靶面裂痕，变得粗糙，产生的 X 线中散射线增多，使有用的中心线束的强度大大减弱。所以，在管电流不变的情况下，从粗糙靶面发出的有效 X 线强度可能只达原来的 50%。

X 线和瞬时保护电路，就是从电路结构上防止操作者在选择摄影条件时偶尔超过 X 线管的额定负载的一种安全措施。当发生这种情况，曝光也无法进行。单次的 X 线摄影是一种瞬时负载，保护仅属于一次性预置保护。对于额定值内的连续重复曝光而出现的累积性过载，是不能起保护作用的。预防累积性过载问题应根据 X 线管和管套的热容量特性，视具体情况保证相邻两次曝光之间有足够的时间，以便 X 线管冷却。

瞬时负载保护电路要以 X 线管瞬时功率曲线为依据。图 2-9 为 DI7-20、40/125 型旋转阳极 X 线管瞬时负载特性曲线。对于每个焦点，每次摄影自动控制管电流、管电压和曝光时间所对应的坐标点都应落在相应的瞬时功率曲线之下才允许曝光，绝对不允许在曲线之上。若出现在曲线之上的情况，则保护电路要自动阻止曝光发生。实际上，考虑到 kv、mA、误差，最高使用定额应留有一定余地。

现代的 X 线机中，还设置有单参量保护，比如过电流保护、过电压保护、冷高压保护等。

2.降落负载式瞬时负载保护原理 前面介绍的瞬时负载保护仅适用于三钮制调制系统。它在一次曝光过程中，kv、mA、s 都是预先选定的固定参量，是一种固定负载条件下的曝光。在 X 线管瞬时功率曲线的坐标系中，所有可能曝光点的边界是在瞬时

功率曲线下面形成了一条阶梯形下降的负载曲线(图 2-10)。

图中,连续下降的指数曲线 $N(t)$ 是 X 线管瞬时功率曲线,阴影部分是某 X 线机所有可能选择的曝光点所构成的图形,图中只画了四个阶梯,表示该机组仅具有四种固定的 mA 选择。显然,所有可能曝光点的边界,在以瞬时功率曲线 $N(t)$ 为极限,形成一条阶梯下降的负载曲线。在阴影部分与 $N(t)$ 曲线之间的空白部分都是不可能曝光的"死区"。所以,三钮制曝光方式不可能充分发挥 X 线管的效能。

在对运动性器官进行动态摄影时,要求曝光时间尽可能缩短,至 10ms 的数量级,以减少动态模糊,同时管电流可高达 2000mA。这就要求 X 线管能最大限度地利用其负载能力,只有采用降落负载曝光才能较理想地解决这一问题。

所谓降落负载曝光,就是以 X 线管最大允许功率开始曝光,以后将按 X 线管瞬时功率曲线随时间而连续或分段地自动降低,这样一次摄影就是降落负载曝光。

采用降落负载曝光,X 线管一开始就工作在最高允许功率,靶面温度立即升到极限,以后在整个曝光过程中,X 线管始终工作在允许的功率极限,而靶面温度也保持在极限(这是靶面的生热和散热处在动态平衡状态),这样就能充分发挥 X 线管的效能,尽可能缩短曝光时间,减少影像运动模糊,获得高质量的 X 线图像。

降落负载曝光一般应用于单钮调制系统,即选定所需的千伏值后,以 X 线管最大瞬间功率下所对应的最大管电流开始曝光。由于管电压是恒定的,以后的管电流将按瞬时功率曲线的指数变化规律随时间而连续或分段地自动降低。为此,一般采用电机自动调节灯丝初级电路所串电阻或自动转换电阻器来实现。

在自动降落负载时,由于管电流随曝光时间的增长而减少,必然导致主电路电压降的减少,使管电压相对增高,故在控制系统内必须有相应的管电压补偿电路。此补偿装置可在高压初级电路内采用分级切换电阻,供电电压或使碳轮在自辅变压器上连续滑动,以取得不同的电压等方法,实现这一补偿。

降落负载曝光按负载降落的形式分为连续降落和分级降落两种。连续降落负载曝光是 X 线管瞬时负载功率沿着功率曲线 $w(t)$ 随时间而连续降低,靶面温度始终处在极限状态。而分级降落负载曝光则瞬时功率的降低是不连续的分级降低。图 2-11 为三级降落负载曲线,第一级对应最大的管电流和很短的曝光时间 T_1 ,若自动曝光系统测得图像的密度不足时,控制系统便自动过渡到第二级。第二级为较低的管电流和稍长的曝光时间 T_2 ,假若前两级的输出仍不能满足图像所要求的密度时,自动系统立即转入第三级,曝光过程中处在哪一级能使图像密度满足要求就立即停止曝光。

采用降落负载曝光,由于预先不能确定曝光时间,所以应配合采用自动曝光控时系统,以达到最佳摄影效果。现代大功率 X 线机中,普遍采用了这种技术。

(五)X 线管的连续负载特性

1. 热容量的计算 作用于 X 线管上数秒以上长时间的负载称为连续负载。在连续负载作用下,扩散到阳极各部分的温度将不断上升,称为生热过程。同时,通过热传导和热辐射方式使热量不断散失,称为冷却过程,这两个过程同时存在。若生热率大于冷却速率,阳极整体的温度就会越来越高,至某一薄弱环节的极限温度时,阳极整体所积储的全部热能就称为该管允许的最大热容量,其大小用热单位 Hu(heatunit)表示。一个热单位定义为在单相全波整流电路中,高压电缆每根长度在 6m 以下,管电压为 1kV(峰值),