

# 第一章 总论

**本章概要** 从现在开始我们就要学习放射治疗技术了，本章主要介绍放射治疗的起源与发展过程以及放射治疗在肿瘤治疗学中具有的地位。让我们对放射治疗及技术有个总体认识，便于更好地学习放射治疗技术。

**知识要点** 放射治疗 放射线 外照射



图 1-0 大多数肿瘤经放射治疗可以得到比较好的效果，在整个治疗过程中还需要人文关怀

## 第一节 放射治疗的发展历程

### 一、放射治疗与放射治疗技术

放射治疗(放疗)是指采用 X 线、放射性核素的射线、电子束、质子、快中子、负  $\pi$  介子以及其他重粒子束来照射肿瘤组织，将其杀死或控制的一门肿瘤治疗学科——放射肿瘤学。

广义的放射治疗既包括放射治疗科的放射治疗，也包括核医学科的内用放射性核素的放射治疗如碘-131 ( $^{131}\text{I}$ ) 治疗甲状腺癌、锶-89 ( $^{89}\text{Sr}$ ) 治疗骨转移瘤等。目前，依靠组织器官选择性吸收的内用(肌内或静脉注入)放射性核素治疗在放射治疗中所占的比例不高，所以为了叙述方便，本教材中若不做特别说明，所有描述都是指放射肿瘤科的放射治疗。在我国的北方地区通俗地将放射治疗称为“烤电”，而在南方则称为“照光”。放射治疗有两种照射方式：一种是远距离放射治疗(或称外照射)，即将放射源与患者身体保持一定距离(15~150 cm)进行照射，射线从患者体表穿透进入体内的一定深度，达到治疗肿瘤的目的，外照射用途最广泛，也是放射治疗最主要的方式；另一种是近距离放射治疗(或称内照射)，即利用人体的自身腔体和管道，通过内



表 1-1 放疗常用放射性核素的物理特性表

放射性核素	符号	射线种类	射线平均能量	半衰期	TVL <sub>铅</sub> ( HVL <sub>铅</sub> )铅
镭 - 226	<sup>226</sup> Ra	光子	0.83 MeV	1 590 年	HVL <sub>铅</sub> = 1.3 cm
钴 - 60	<sup>60</sup> Co	光子	1.25 MeV	5.27 年	HVL <sub>铅</sub> = 1.27 cm
铯 - 137	<sup>137</sup> Cs	光子	0.662 MeV	33.0 年	TVL <sub>铅</sub> = 18.5 mm
金 - 198	<sup>198</sup> Au	光子	0.412 MeV	2.7 天	HVL <sub>铅</sub> = 0.3 cm
铱 - 192	<sup>192</sup> Ir	光子	0.36 MeV	74.2 天	TVL <sub>铅</sub> = 7.1 mm
碘 - 125	<sup>125</sup> I	光子	28 keV	59 天	TVL <sub>铅</sub> = 0.025 mm
钯 - 103	<sup>103</sup> Pd	光子	22 keV	17.0 天	TVL <sub>铅</sub> = 0.013 mm
镅 - 241	<sup>241</sup> Am	光子	60 keV	432.2 年	TVL <sub>铅</sub> = 0.41 mm
钐 - 145	<sup>145</sup> Sm	光子	43 keV	340.0 天	TVL <sub>铅</sub> = 0.20 mm
镱 - 169	<sup>169</sup> Yb	光子	93 keV	32.0 天	TVL <sub>铅</sub> = 1.6 mm
锶 - 90	<sup>90</sup> Sr	电子	2.28 MeV	28.1 年	R <sub>最大</sub> = 1100 mg · cm
镅 - 252	<sup>252</sup> Cf	中子	2.35 MeV	2.65 年	HVL <sub>水</sub> = 5 cm

TVL : 十分之一价层 ;HVL 半价层

### (二) X 线治疗机和各类加速器产生的不同能量的 X 线

普通 X 线治疗机产生的低能 X 线 ( 16 ~ 400 kV ) 主要用于治疗较表浅的肿瘤。各种加速器产生的高能 X 线 ( 2 MV 以上 ) 几乎可以治疗任何部位的肿瘤, 尤其对较深部的肿瘤治疗效果好, 而其产生的电子束常用于治疗表浅或偏心性肿瘤。

### (三) 各种加速器产生的重粒子束

加速器是利用电磁场把带电粒子加速到较高能量的装置, 利用被加速后的高能粒子轰击不同的靶材料, 可以产生次级粒子, 如 X 线、中子和介子束等。加速器开始主要应用于实验室的核物理实验研究。加速器按粒子加速的轨道形状可分为直线加速器和回旋加速器, 按加速粒子的种类可分为电子加速器、质子加速器、离子加速器和中子加速器等, 按被加速后粒子能量的高低可分为低能加速器 ( 能量小于  $10^2$  MeV )、中能加速器 (  $10^2 \sim 10^3$  MeV )、高能加速器  $10^3 \sim 10^6$  MeV 和超高能加速器 ( 能量在  $10^6$  MeV 以上 ), 按加速电场所所在的频段可分为静电加速器、高频加速器和微波加速器。加速器产生的快中子、质子、负  $\pi$  介子以及 18 号元素以前 ( 如氦、碳、氮、氧、氟等 ) 的重粒子束能用来治疗肿瘤, 因此, 也可能成为放射治疗的常用设备。但对于大多数肿瘤而言, 重粒子的治疗机制、治疗效果的研究还不十分透彻, 再者庞大的加速器价格太昂贵, 因此就是在发达国家, 重粒子加速器医学应用也不多。我国已逐步开展这方面的工作, 2004 年 12 月 20 日引进的质子治疗系统已投入临床使用, 成为世界第四台、国内第一台, 继美国、日本后第三个国家用于商业运作的质子治疗系统。另外, 用快中子治疗腮腺癌、前列腺癌和一般放射治疗效果较差的肿瘤 ( 如软组织肉瘤或其他复发性肿瘤等 ) 也取得了比较好的效果。

### 三、放射治疗的发展历程

在 100 多年以前的 1895 年 11 月，德国科学家伦琴首先发现了 X 线。次年，法国科学家贝可勒尔又发现了含铀盐的矿物质也能产生放射线。这些射线看不见，摸不着，嗅不到。在 1898 年 12 月，居里夫妇从近百吨的废矿渣中成功地分离出了镭，并首次提出“放射性”概念。1899 年，临床医生用 X 线试验治疗皮肤癌，获得一定的疗效。1920 年，200 kV 级 X 线治疗机商品化，应用于治疗喉癌获得了成功。但由于那个时代对射线的性质、特点、生物效应了解很少，在治疗患者的同时医生也受放射损伤，且 X 线的深度剂量低，皮肤反应大，只能治疗浅表部位的肿瘤。因此，放射治疗出现了一个发展缓慢的时期。

第二次世界大战以后，军事工业技术（特别是核研究）的进步，使放射物理学和放射医学理论有了较大的发展。科学家们人工制造出了放射性核素，核反应堆的副产品开始在医学上得到应用。

1951 年，加拿大制造出第一台  $^{60}\text{Co}$  远距离治疗机，放射治疗适应证有了进一步的扩大，治疗效果也有了明显的提高。

1952 年在英国哈默·史密斯(Hammer Smith)医院安装了第一台 8 MV 固定型射频微波直线加速器。至今，电子直线加速器是临床应用最广的外照射治疗机。20 世纪 70 年代，回旋加速器则开始应用于医学。

1968 年瑞典的 Elekta 公司研制成功世界上第一台  $\gamma$  刀，装备在瑞典斯德哥尔摩的 Sophiabermmet 医院，主要应用于功能性疾病的治疗。到 1988 年  $\gamma$  刀已经发展到了第三代。美国在 1968 年成功地制造了加速管，可直立安装于机头内的驻波型电子直线加速器，不久利用直线加速器实现了非共面多弧度等中心旋转治疗，也就是用多个小照射野从三维方向照射病变，即现在称之为 X 刀的前身。20 世纪 80 年代中期至 90 年代初，由于计算机技术以及计算机 X 线断层摄影(CT)、磁共振成像(MRI)和脑血管数字造影等影像学技术的迅速发展，目前已研究出比较完善的三维图像重建与放射剂量三维分布重建相结合的软件系统，同时对准直器、立体定向仪进行进一步改进，成功研制出无创、可重复定位框架和无框架定位系统，使放射治疗技术逐步走向成熟。

1976 年，X 线 CT(X-CT)开始用于临床的放射治疗应用，它与治疗计划系统相连接，加上 X 线模拟定位机共同构成了一个迅速、精确、严谨的放射治疗计划与最优化的选择系统，使放射治疗进入一个崭新的历史时期，放射治疗的临床医生开始拥有了性能优良、安全可靠、更加得心应手的治疗工具。

放射治疗的发展和放射治疗设备紧密相关。随着高能物理学与核技术的进步、电子学与机械制造业的发展，新的放射治疗设备研发和生产促进了放射治疗技术的不断发展，放射治疗进入了多种技术方法和超高压射线治疗的新阶段。当前，发达国家都用电子直线加速器进行治疗。现代电子直线加速器能产生 2~3 种不同能量的光子线(X 线)和几种不同能量的电子线，以适应临床使用时的多种选择要求。放射治疗已由常规二维放射治疗(2DRT)进入了三维放射治疗(3DRT)年代，包括三维立体定向放射治疗(X 线、 $\gamma$  射线)、调强放射治疗(IMRT)具备了进行精确定位、精确计划、精确摆位、精确照射的系列技术。这不但使照射的高剂量适合肿瘤靶区形状，而且可以更好地达到放射治疗总目标，即在最大程度地对肿瘤杀灭的同时，使正常组织损伤降到最低。

放射剂量学 20 世纪 30 年代有物理剂量伦琴 ( R ), 1 伦琴 =  $2.58 \times 10^{-4}$  库 / 千克 ( C/kg )。50 年代后有吸收剂量拉德 ( rad ), 之后又有戈瑞 ( Gy ), Gy 为法定计量单位 , 1 Gy 相当于 100 rad。相应地在放射防护上也有希沃特 ( Sv ) 计量单位。

放射生物学 由于在放射治疗早期阶段不了解放射线的生物效应 , 尤其在缺乏相关物理年代 , 只用发生皮肤红斑反应作为剂量参考。随着临床实践经验的累积 , 1934 年 , Coutard 发明的分割放射治疗方案成为沿用至今的基本模式 , 也就是进行分割放射可以达到比单次放射好的疗效 , 同时放射反应也较轻。1956 年 , 细胞集落形成率的实验成功以及对放射线引起细胞增殖死亡的概念一直沿用至今。

我国在 1932 年使用深部 X 线治疗机和镭源开展肿瘤的放射治疗 , 直到解放初期也只有几家医院有放射治疗设备 , 专业人员总共仅十余人。 1958 年 , 中国科学院肿瘤医院建立并筹建了新中国的放射治疗科。 20 世纪 60 年代开始制造  $^{60}\text{Co}$  治疗机 , 医院装备国产机占有量约为 80%。国内首台 10 MV 医用直线加速器于 1978 年诞生。1994 年开始引进 X 刀 , X 刀由直线加速器、脑立体定向仪、附加准直器及计算机治疗计划系统组成。目前我国相继开展 X 刀治疗的医院已有数十家。20 世纪 90 年代中期我国引进了  $\gamma$  刀技术和设备 , 并在此基础上 , 在 1997 年开发出完全国产化的头部旋转式  $\gamma$  刀由 30 个  $^{60}\text{Co}$  源组成 可提供等中心旋转照射 设备已经通过美国 FDA 认证。不久 , 全身  $\gamma$  刀装置也相继问世。国内一些大医疗中心纷纷成立由放射治疗、神经外科、医学影像科等专家组成的专家组 , 共同商讨患者的病变范围和确定治疗原则。

1987 年成立了中华放射肿瘤学会 , 从 1992 年起发行《中华放射肿瘤学杂志》。根据中华放射肿瘤学会调查结果显示 , 到 2001 年 , 全国开展放射治疗的医院有 715 家 , 从事放射治疗相关专业人员 14 131 人 其中医生有 5 113 人 技术员有 3 465 人。

#### 四、放射治疗技术的展望

##### (一) 放射治疗技术

放射治疗经历了 100 多年的历程 , 从初始阶段到 X 线片、透视、常规模拟定位机的二维放射治疗 再到 CT 及 MRI 的三维模拟定位、三维放射治疗计划系统、三维适形放射治疗及调强放射治疗 , 这种精确的放射治疗可以在不增加正常组织反应的前提下 , 增加肿瘤的放射剂量 , 提高肿瘤的局部控制率 , 进而提高生存率 , 这些必将是放射治疗的主流方向。

另外 , 我们在进行放射治疗的过程中 , 还存在因器官移动 ( 特别是呼吸运动 ) 而导致肿瘤也随之移动的问题。虽然当前在放射治疗中使用了呼吸门控系统 , 但效果并不理想。如果把时间因素也考虑进去 , 就可以达到跟踪肿瘤进行照射的目的 , 有人称之为四维放射治疗。随着计算机技术的进步 , 随着具备更为先进的由智能机器人控制的自动纠错定位系统等多项科技的应用 , 目前已能自动追踪患者治疗过程中因身体摆动造成的病灶靶点移动 , 及时准确自动纠正定位系统 , 使误差在 0.1 mm 以内 , 使得肿瘤的治疗过程迈入智能自动化的进程 , 也使治疗的定位过程变得简单而又快捷。

除了  $\gamma$  刀、X 刀技术日趋成熟外 , 质子刀、快中子刀治疗的研究正在继续进行 , 对质子、快中子治癌的适应证也随着临床工作研究的深入而逐步应用于临床。对负  $\pi$  介子和重粒子进行的实验探索也逐步应用到临床实践中。关于“刀”的称谓见表 1-2。

表 1-2 各种名称的“刀”的一般内容

通俗名称	使用技术	应用
γ 刀	小圆野 + 固定立体束	头部病灶
体部 γ 刀	小圆野 + 固定立体束	体部肿瘤
赛勃刀	图像引导 + 程控机械手的立体定向	任何部位
X 刀	小圆野 + 立体弧	头部病灶
体部 X 刀	立体定向 + 几何适形 + 楔形板	体部肿瘤
诺力刀	立体、定向 + 几何适形 + 调强	等中心射野小于 10 cm × 10 cm
超级诺力刀	立体、定向 + 几何适形 + 调强 + 调能 + 实时影像	等中心射野达 10 cm × 10 cm, 即 IMRT 照射

在这里，我们将几种不完全属于放射治疗范畴而被称为“刀”的治疗技术罗列在此以相互比较。

1. 超声聚焦刀和聚能刀 都是将声波聚集，将声能转换为热能治疗肿瘤的一种技术（图 1-2）。理论上，在均匀介质内聚焦点温度可达到 70 ~ 100 ℃，但在人体内由于传导介质不均匀，同时受血流散热的影响，实际治疗温度很难达到理论值。



图 1-2 聚焦超声治疗乳腺肿瘤

2. 激光刀 是利用激光对腔道黏膜病灶和皮肤病灶进行切割式治疗，主要治疗良性病灶和早期腔道内肿瘤。

3. 细胞刀 是将微电极插入病变细胞内直接毁损细胞的治疗方法，目前主要用于帕金森病等功能性疾病的治疗。

4. 氩 氦刀 是通过经皮穿刺管道到病灶处，同时用氩、氦两种惰性气体产生的高温和低温治疗肿瘤。目前主要用于肝癌的治疗，是一种有创治疗。

## (二) 放射物理方面

中子射线、重离子、轻离子以及质子 [ 具有高线性能量传递 (LET) 射线物理特性，而不具有高 LET 射线放射生物学特性 ] 可以改善乏氧肿瘤细胞周期依赖性等，对一些放射敏感性差的肿瘤可望提高疗效。

### （三）放射生物方面

1. 非常规分割放射 虽然至今常规放射治疗仍是主要的，但是对不同肿瘤改变疗程、分割剂量和总放射剂量仍是研究的重要方面，甚至应用调强放射治疗、三维立体定向放射等新技术仍脱离不了分割方案。因而，结合肿瘤放射生物特性深入研究，建立不同肿瘤的放射治疗分割方案会有很重要的临床意义。

2. 放射增敏 / 保护剂 增加放射线对肿瘤的生物效应，不增加正常组织损伤是放射增敏的前提；与之相反，保护正常组织（即减少放射线对正常组织损伤）而不减少肿瘤组织生物效应为放射保护的原则。继续通过实验研究找到临床上有使用价值的化学制剂或生物制剂是一个重要方面。

### （四）协同治疗

放射肿瘤学的发展离不开其他学科的发展。对肿瘤本身生物学特性的掌握，继而给予相应的治疗，以达到最满意的疗效才是我们的目标。

1. 化学疗法 由于放射治疗是一种局部治疗手段，不少患者的肿瘤经局部治疗获得控制但因远处播散而导致死亡。这种情况就需要行全身性用药的化学疗法（化疗）。化疗只能杀死一定比例的癌细胞，而不是一定数量的癌细胞。也就是说，很难完全消灭癌细胞，肿块越大越难治愈。有的癌细胞在化疗中可以逐渐产生耐药性，同时化疗的全身毒性较大，有的生长快的肿瘤在化疗间歇期会迅速生长。因此，放疗和化疗两者并用是局部与整体治疗的综合，取其所长，补其所短，将有助于肿瘤治疗的疗效。

2. 基因、免疫、靶向治疗调强放射治疗技术可给予靶区内不同部位不同放射剂量，但肿瘤内对放射敏感性差的乏氧细胞、增殖快的细胞群、生长比率大的细胞群仍难以通过当前影像学手段精确确定，如果从广义的基础研究，用针对上述细胞群的靶向治疗可能是有价值的。

3. 综合治疗方法综合治疗方法很多，比如与介入治疗、中草药等合理结合，应根据病种、病期和机体整体情况合理地选择不同的综合治疗方法。有些患者可采用手术与化学疗法的综合，手术、化学疗法与免疫疗法的综合，放射治疗、化学疗法与免疫疗法的综合，化学疗法与免疫疗法的综合等。同时，在所有治疗方法中都可以配合中医中药扶正治疗，提高机体抗病能力，使综合治疗能顺利完成。总之，能够正确地采用综合治疗，恶性肿瘤的治疗效果就会明显地提高。

## 第二节 放射治疗的重要性

### 一、放射治疗肿瘤的机制

人们利用放射线对各种组织器官的正常细胞群和肿瘤细胞群的不同影响和损伤，以及它们恢复能力的差别，使放射治疗成为治疗肿瘤的主要手段之一。

肿瘤细胞群受射线打击后有它自己的、与正常组织不同的反应体系，不同肿瘤之间的反应也极为不同。首先，肿瘤组织在受照射后，受致死损伤的细胞并不是全部立即死亡，而是有些还会分裂几次，对放射的损伤修复变慢，细胞增殖周期延长；其次，肿瘤细胞群内的生长比率高，细胞

处于增殖周期的多，受致死损伤的就比正常组织为多。因此，肿瘤受射线照射后，可见到的是肿瘤消退，但经常接着还有再生长，只不过在有些患者的正常寿命期间未能成功地再生长（于是就被称为治愈或局部控制）。

肿瘤的消退和再生长是肿瘤放射生物学所要弄清的问题。一个可导致平均每个细胞有一次致死事件的照射剂量将杀死 63% 的细胞，而剩下的 37% 还是有活性的。这个剂量被称为平均致死剂量 ( $D_0$ )，一般哺乳动物细胞的  $D_0$  值约为 1~2 Gy。肿瘤患者整个疾病的进程在很大程度上依赖于原发和转移肿瘤的生长速度。肿瘤生长速度是由细胞周期时间、生长比率和细胞丢失速度三个主要因素所决定的。一般来说，细胞周期时间短，生长比率高，细胞丢失少，则肿瘤生长得较快。所以，胚胎性肿瘤对放射线最敏感，淋巴类肿瘤次之，上皮性肿瘤再次之，而间质性肿瘤最不敏感，需要较高剂量才可能起作用。另外，肿瘤的部位、浸润程度和范围以及肿瘤的生物化学性质也起一定的影响作用。

高速的电子通过 DNA 分子只需用  $10^{-18}$  s 每个细胞照射 1 Gy 有大约  $10^5$  的电离，正常组织受射线损伤后，自动稳定控制系统开始起作用，大量的 DNA 内的损伤都可以成功地修复，仅有较少的一些损伤不能修复，这些未修复的损伤最后导致细胞死亡。细胞死亡需要一定的时间，正常组织和肿瘤内都存在细胞杀灭的继发效应，可观察到的电离辐射效应甚至可以延长到受照射后许多年。

## 二、放射治疗在肿瘤治疗中的地位

目前，恶性肿瘤已成为世界各国的常见病和多发病，发病率逐年增高，其死亡率占各种死因的第一或第二位。放射治疗已成为恶性肿瘤治疗中的主要手段之一。放射治疗综合了临床放射物理学、临床放射生物学和临床放射治疗学，已形成一个专门学科——放射肿瘤学。

原发肿瘤的局部控制是肿瘤治愈的先决条件，根据肿瘤的生物行为 大约有 60% ~ 70% 的恶性肿瘤患者需要接受放射治疗。放射治疗既有优点，也有缺点。

### 1. 优点

(1) 根治 有些恶性肿瘤单独放射治疗就能取得很好的根治效果，患者可获得长期生存。也有些患者需在术后进行放射治疗，既消灭残存病灶，又提高局部控制率和存活率。

(2) 功能保护 有些患者的放射治疗疗效甚至同手术疗效一样好，如早期舌癌、声带癌、皮肤癌、食管癌、宫颈癌和前列腺癌等 而患者的说话、发音、咀嚼、进食和排便等功能完好，且外观也保存完好。

(3) 局部控制 一般来医院就诊的肿瘤患者中，70% ~ 80% 病程已属中晚期，多数患者不能手术，或切除困难，或有手术禁忌，亦有不愿手术者，大多数可行放射治疗，以达到肿瘤的局部控制。多数患者肿瘤缩小，而且不少患者疗效较好。

(4) 减轻症状 对于那些病期较晚 或肿瘤引起的骨痛、呼吸困难、颅内压增高、上腔静脉压迫和癌性出血等患者，放射治疗往往能很好地减轻症状，并达到延长生命的目的。

### 2. 缺点

(1) 治疗费用高放射治疗设备昂贵，治疗费用较高。

(2) 操作要求高 放射治疗工作人员要全面和熟练地掌握有关理论和技能，包括放射物理学、放射生物学和熟练的放射治疗技术。

(3) 不良反应大 放射治疗周期长, 并发症较多, 甚至可引起部分功能丧失。对晚期肿瘤患者, 放射治疗效果不佳。

尽管如此, 放射治疗在肿瘤综合治疗中仍占有极其重要的地位, 目前发达国家的癌症治愈率达 45% 其中 22% 为手术治愈, 18% 为放射治愈, 5% 为药物治愈。可以看出, 放疗在癌症治疗过程中占有很重要的位置, 如与外科配合的术前、术中和术后放射治疗, 与化疗科配合的化疗前、化疗中及化疗后放射治疗, 还有放射治疗、手术和化疗三者配合的综合治疗, 是大多数恶性肿瘤患者不可缺少的重要治疗手段。

### 三、肿瘤的综合治疗方法

放射治疗和外科手术一样都是一种局部的治疗手段, 不同的是外科手术是用手术刀切除肿瘤, 而放射治疗是用射线照射肿瘤, 杀伤肿瘤细胞, 以达到消灭和控制肿瘤的目的。虽然放射治疗的适应证比较广泛, 但也有其局限性。因此, 必须开展集肿瘤手术、放射治疗、化疗、介入治疗、生物调节和中医药调理于一体的肿瘤综合治疗方法, 才能得到比较好的治疗效果。在外科手术治疗、放射治疗、化学治疗以及生物治疗四大模式中, 手术、放射治疗和化学药物治疗是有肯定疗效的三大治疗手段。这三种治疗方法各有千秋, 对于内脏的肿瘤应以手术切除为主, 对于鼻咽癌、早期喉癌和早期恶性淋巴瘤等以放射治疗为主, 而对于白血病、中晚期恶性淋巴瘤、绒毛膜上皮癌则以化学疗法为主。但如果将这三种疗法合理、有机地结合, 会取得任何一种单独疗法所达不到的治疗效果。综合治疗不是指一种治疗方法与第二种治疗方法的简单相加, 也不是三四种治疗手段的凑合。它所指的是肿瘤内科、外科、放射治疗科等多科共同讨论, 根据患者的机体状况、肿瘤的病理类型、侵犯范围(病期)和发展趋向, 有目的、有计划、合理地应用现有的治疗手段, 以期较大幅度地提高治愈率, 改善患者的生活质量。

生物调节剂治疗是通过加强、调节或保存机体的有效抗癌功能, 从而加强了患者的抗肿瘤能力。机体细胞免疫和体液免疫系统具有抑制肿瘤细胞生长的能力, 而有些物质可以刺激机体的免疫系统, 通过改变机体对肿瘤的生物反应来改变机体与肿瘤的关系, 从而起到一定的治疗作用。另外, 由于免疫化学、分子生物学及基因工程等技术的发展, 目前生物调节剂的治疗以免疫调节剂、细胞因子、过继性免疫治疗、单克隆抗体和特异性主动免疫为治疗的主要方法。但目前生物调节剂的治疗对进展期的肿瘤很难达到临床治愈的疗效, 而只作为手术、放射治疗和化学疗法的一个补充。

中医中药治疗目前还不能起根治肿瘤的作用, 主要起到改善患者状态、提高机体抗病能力的作用, 是放射治疗和化学疗法的辅助治疗方法。

### 四、肿瘤放射治疗的一个疗程时间

放射治疗一个疗程所需的时间取决于肿瘤的性质、病期的早晚、治疗的目的、患者的身体状况等多方面的因素, 一般需时 4~6 周。病期相对较早、以放射治疗为主要治疗的根治性放射治疗, 疗程一般为 5~7 周。病期较晚的姑息性放射治疗, 疗程一般为 3~5 周。敏感肿瘤的放射治疗, 一般需时 3.5~5.5 周。对放射治疗敏感性较差的肿瘤, 则需时 6~8 周。术前放射治疗一般需时 4~5 周, 术后放射治疗一般需时 5~6 周。年迈体弱, 同时有其他慢性疾病者, 放射治疗约需 5 周左右。年幼者放射治疗一般需时 3~4 周。

### 第三节 放射治疗的一般流程及放射治疗技师在放疗中的地位

放射肿瘤科是一个临床学科，其成员构成不同于一般的临床科室，是由多种专业的技术人员所组成的一个有机团队，包括医师、技术员、放射物理师、护士、维修人员等。放射治疗是一个涉及多个环节的、相互紧密连接的过程，不同的技术人员各司其职承担不同的任务，协同工作。

#### 放射治疗的一般流程

放射肿瘤医师首先对患者进行全面检查，做出诊断和临床分期后，确定治疗目的（如根治或姑息治疗，单一放射治疗或与手术、化疗综合治疗等）。经模拟机和（或）CT模拟机定位，确定照射肿瘤靶区与剂量以及相关正常组织和器官与剂量。由放射物理师应用治疗计划系统（TPS）进行优化，包括放射源选择、射线种类和能量、放射野布置和剂量分配、放射野整修等。所选最佳放射治疗方案最终由放射肿瘤医师确认。然后，在模拟机和治疗机上摆位、摄验证片，在获得一个满意的结果后才可以开始进行放射治疗。

#### 二、放射治疗技师在放疗中的地位

在整个放射治疗中，放射治疗技师不但是参与者，更是实施放射治疗的具体执行者。在开始放射治疗前的一系列流程中，放射治疗技师参与患者固定装置的制作、模拟定位全过程、制作射野铅挡块、组织补偿器以及在模拟机和放射治疗机上摆位和拍验证片等。当放射治疗开始后，每一次放射治疗都由放射治疗技师按医嘱执行，无论外放射还是近距离放射，都必须安全、准确、无误地完成。“精确定位、精确计划、精确摆位、精确照射”中每一项都和技术人员有关。很显然，每一次治疗都影响到放射治疗质量的好坏，直接影响到患者的疗效。因此，我们说放射治疗技师在整个放射治疗过程中起着至关重要的作用，而不是简单的摆位、按按钮。不然放射治疗设备再先进，治疗计划再完善，放射治疗实施不好，质量不保证，放射治疗整体水平也不可能得到保证。



#### 练习与思考题

1. 放射治疗起于何时？其发展的大概过程是怎样的？
2. 用于放射治疗的射线有哪些？常用的是哪些？
3. 放射治疗在肿瘤治疗中具有何地位？
4. 阐述放射治疗技师在肿瘤放射治疗中的重要性。
5. 名词解释 放射治疗 外照射 内照射
6. 下列哪项不是放射肿瘤科的组成人员？（ ）  
A. 医生            B. 物理师            C. 计算师            D. 技术员
7. 哪一种射线为不带电的微粒？（ ）  
A. 质子            B. 负  $\pi$  介子            C. 快中子            D. 碳粒子
8. 医用电子直线加速器是哪一年用于肿瘤放射治疗的？（ ）  
A. 1950年            B. 1951年            C. 1952年            D. 1953年

## 第二章 常用的放射治疗设备

**本章概要** 本章将叙述常见的放射治疗设备，主要介绍 X 线治疗机、 $^{60}\text{Co}$  治疗机、医用直线加速器等的基本结构、主要功能及临床应用。如果掌握这些知识和技能，那么在实际工作中的操作就能做得十分正确，也能知道设备维护的基本原理。

**知识要点**  $^{60}\text{Co}$  加速器  $\gamma$  刀 治疗模拟 治疗计划系统



图 2-0 放射治疗设备能产生治疗用的各种放射线束，每种设备产生的放射线束各有自己的治疗特点，有的应用已经比较成熟，有的还在不断探索之中

### 第一节 概述

用于放射治疗所需的各种硬件和软件称为放射治疗设备，主要包括放射治疗束产生装置（治疗机）、模拟定位机、治疗计划系统以及其他各种附件等。常用的放射治疗设备类型见图 2-1。

#### 一、治疗束产生装置

治疗束产生装置是放射治疗关键的设备之一，它们可以产生各种类型和能量的治疗束，如 X 线、电子线、 $\gamma$  射线以及其他重粒子束，以满足不同部位、不同肿瘤的治疗需要。治疗束产生的主要装置有 X 线治疗机、 $^{60}\text{Co}$  治疗机、医用加速器和近距离治疗机等。其他的医用粒子束装置还有医用质子加速器、医用重离子加速器、医用中子发生器、医用介子发生器。

##### (一) X 线治疗机

伦琴发现了 X 线后不久，就有人将 X 线用于肿瘤治疗，20 世纪 40 ~ 50 年代是 X 线治疗机运用的高峰期。与诊断用 X 线机相比，X 线治疗机的特点是管电压较高，管电流很小，X 线质硬、穿

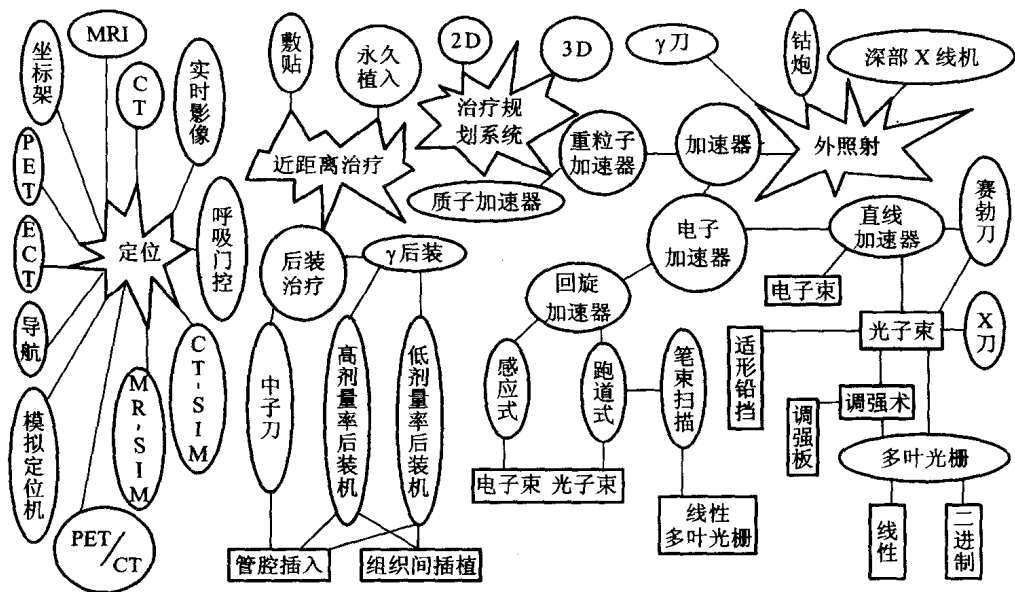


图 2-1 放疗设备统观

透能力强。但与  $^{60}\text{Co}$  治疗机和加速器相比，具有光子能量低、百分深度剂量低、剂量分布差等缺点，现在仅用来治疗一些浅层肿瘤和作为淋巴结的补充治疗。

#### (二) $^{60}\text{Co}$ 治疗机

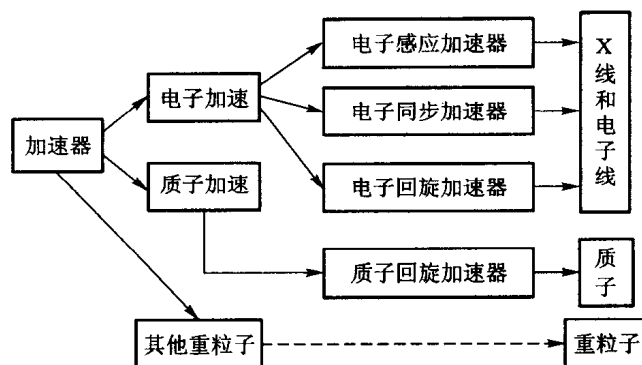
$^{60}\text{Co}$  治疗机是用  $^{60}\text{Co}$  产生的高能  $\gamma$  射线作为射线源。与 X 线治疗机相比，光子能量高 (3 ~ 4 MeV)，皮肤剂量低，射线穿透能力强，深部剂量高，适合深部肿瘤治疗，特别是骨肿瘤及骨旁病变的治疗。其缺点是装源量小，一般低于  $2.59 \times 10^{14}$  Bq (7 000 Ci)，源皮距较短 (60 ~ 80 cm) 半影严重，半衰期较短，需要定期更换  $^{60}\text{Co}$  源。 $^{60}\text{Co}$  治疗机可分为固定式、旋转式和  $\gamma$  刀三种类型。

#### (三) 医用加速器

医用加速器是放射治疗最常用的治疗束产生装置，种类较多 (图 2-2)。医疗上使用最多的电子加速器是电子感应加速器 (1951 年)、电子直线加速器 (1953 年) 和电子回旋加速器 (1973 年)，它们可以产生电子束 X 线束。电子直线加速器是利用微波电磁场把电子沿直线轨道加速到较高能量的装置，其优点是电子束和 X 线均有足够的输出量，射野较大，主要缺点是机器复杂，成本较高，维护要求较高。电子回旋加速器是电子在交变的超高频电场中做圆周运动不断得到加速，它具有输出量高、束流强度可调的优点，将会逐步替代  $^{60}\text{Co}$  治疗机，但价格和运行费用一直是回旋加速器发展的阻力。

#### (四) 近距离治疗设备

近距离治疗是放射治疗的手段之一，是指将封装好的放射源经人体腔道放在肿瘤体附近或放置于肿瘤体表面，或将细针管插植于肿瘤体内导入射线源实施照射的放射治疗技术的总称。近距离治疗是相对于  $^{60}\text{Co}$  治疗机和加速器等远距离照射而言的，又称内照射。现代近距离治疗后装机常用的放射源有  $^{60}\text{Co}$ 、 $^{192}\text{Ir}$ 、 $^{125}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  等。



### (五) 立体定向治疗装置

立体定向治疗装置包括  $\gamma$  刀、X 刀、质子刀、中子刀等装置，其原理是基本类同的，只是线束的物理、生物效应以及结构的复杂性不同。比如第三代  $\gamma$  刀，把 201 个  $^{60}\text{Co}$  源在空间上按一定的要求分布，然后根据病灶的情况，利用先进的治疗计划系统制定治疗计划，通过计算机控制各个  $^{60}\text{Co}$  源的开关状态，完成对病灶的立体定向放射治疗。

## 二、模拟定位机

模拟定位机是放射治疗中靶区定位不可缺少的配套设备，诞生在 20 世纪 60 年代末。它的结构类似于等中心治疗机，主要任务是模仿各类治疗机，按不同机型的条件定位，制定治疗计划，然后用模拟定位机修正和验证，使物理几何参数上与治疗计划一致，经确认正确无误后方能进行照射治疗。现在模拟定位机有 X 线模拟定位机和 CT 模拟定位机 (CT-SIM) 两种。

### (一) 普通 X 线模拟定位机

普通 X 线模拟定位机实际上是一种特殊结构类型的 X 线机，要求能准确模仿各种治疗机的条件，包括机架和机头的旋转角度、源皮距、准直器角度、射野大小、诊查床的位置、角度等机械参数。

### (二) CT 模拟定位

CT 模拟定位实际应用于临床已有 20 余年时间。1979 年,Goitein 率先将这一划时代的影像技术应用于临床放射治疗中。但是，放射治疗中早期的 CT 应用主要局限在以下两个方面：①为治疗计划设计提供精确的肿瘤靶区定义。为吸收剂量计算提供组织不均匀性校正。

现代的 CT 模拟机不仅可以像诊断性 CT 机一样为治疗计划系统提供高质量的横断面 CT 影像资料，还可以在相应的激光定位系统的辅助下，实现对治疗条件的虚拟模拟 (virtual simulation)。从这个意义上讲，现代 CT 模拟技术使肿瘤的放射治疗进入了高精度的三维适形放射治疗的新时代。

## 三、治疗计划系统

肿瘤结构和人体脏器组织往往互相包容，为了使肿瘤得到致死剂量，同时保护重要器官，必

须对每一个患者制定精细的治疗计划，这全靠人工计算是不可能的。20世纪70年代，随着电子计算机的广泛应用和数学物理模型的建立，出现了治疗计划系统（treatment planning system, TPS）。TPS是一套专用的计算机应用系统，它根据病灶的情况进行治疗计划的设计，包括剂量分布的计算和治疗方案的优化选择，使靶区获得最大的肿瘤致死剂量，周围的正常组织，特别是重要器官的放射损伤最小。TPS的出现使放射治疗由定性走向定量，从而可能控制放射治疗的质量。治疗计划系统的发展经历了从一维到三维的发展，逐步成为精确放射治疗的精髓。

放射治疗设备除了上述的基本配置外，还需要一些辅助设备，如激光定位灯、摆位辅助装置、限光筒、楔形板和组织补偿器等射束修整装置、辐射剂量仪、剂量分布测量仪以及治疗摆位验证系统等。立体定向适形放射治疗时还需要采用多叶准直器（MIC）、地面定位系统或床上定位系统等辅助装置。

我们国内目前约有480台<sup>60</sup>Co远距离治疗机，约有400台左右的直线加速器，50%为国产。我国生产的第二代中直线加速器也已进入市场，能做调强放射治疗的第四代直线加速器国内为空白。有的单位正在研制辐射野分析仪，但尚未形成稳定产品。国产放射治疗剂量仪的性能已不低于国外产品。

此外，我国已能生产 $\gamma$ 刀、X线刀、后装 $\gamma$ 源近距离放射治疗机、放射治疗计划系统（逆向型的正在积极研发中）。

## 第二节 X线治疗机

X线治疗机在20世纪20~40年代在放射治疗中被广泛使用，是放射治疗的主要设备，但在20世纪60年代以后逐渐被其他高能治疗机所替代。但是，由于X线治疗机的治疗设计和操作比较简单，价格比较低，对于表浅部位的肿瘤和一些淋巴结区域治疗，还是有一定的使用价值。

### 一、X线治疗机的结构特点

X线治疗机是以X线管为辐射源的治疗装置。其电路原理和诊断用X线机差别不大，X线治疗机是由X线管组件、高压发生器、三维移动机架、治疗床及计算机控制系统等组成。其主要工作特点是高电压、连续工作。因此，X线治疗机的X线管结构、散热方式与X线诊断机不同，特别是X线管的阳极设置冷却系统，X线管除油浸冷却外，再用风冷或水冷对油进行二次冷却。

X线治疗机的核心部件是治疗用的X线管。它的基本结构和诊断机一样，也是由阳极、阴极和管壳三部分组成，只是它的灯丝形状和阳极结构不同（图2-3）。X线中的有用成分通过很薄的铍窗引出，经X线管组件附加的铅（或钨）制准直器给予准直，其他方向的X线被铅（或钨）屏蔽罩所吸收。

高压发生器由高压变压器、灯丝变压器和高压整流器等组成。高压变压器将几百伏的电源电压升到几十千伏或几百千伏，然后被由半导体整流器件组成的高压整流电路整流成直流高电压，作为X线管的加速电压。现代中高频X线治疗机是采用逆变技术，将工作频率为50Hz的电源变为4~100kHz，再经高压变压器及高压整流电路和滤波电路后变成直流高压，其优点是减小电压脉动，缩小电源体积。

三维移动机架可调节X线管头的位置，使X线准确照射肿瘤组织。多数X线治疗机采用地

面立柱结构，辐射头可沿立柱升降并可移动。深部治疗机改进为悬吊式结构，其机械结构及控制都较复杂，辐射头相对于治疗床可以做前后、左右及升降运动，并可相对于垂直轴线做旋转运动。

当代 X 线治疗机由计算机控制，主要控制及显示各种治疗参数（kV、mA、剂量率、累计剂量、过滤器、限束筒等），并有存储及打印功能。

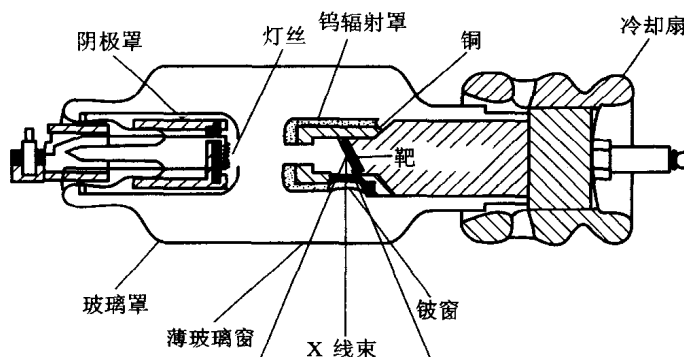


图 2-3 治疗用 X 线管的结构图

## 二、X 线束的硬化

X 线管产生的 X 线，其光子的能量从零到最大值不均匀分布，呈现连续能谱，如将其直接应用于临床，其低能量部分的 X 线只会造成皮肤损伤，不能深达肿瘤组织，对治疗毫无价值。为此，根据不同的治疗目的，通常在 X 线治疗机的输出口施加滤过板，以吸收 X 线能谱中“软光子”（即低能射线）的成分，使 X 线束“硬化”。加设滤过板后，滤除了软 X 线成分，线束的总强度虽会减弱，但能谱中的高能光子的比例增加。

在放射治疗的临床应用实践中，对 X 线质的描述和诊断用 X 线不一样，X 线束的质大多用半价层（HVL）表示。所谓 HVL 就是能使 X 线强度衰减到初始值的 50% 时所需吸收体的厚度。吸收体一般用纯铝、纯铜或纯铅材料。HVL 越高，说明该射线穿透性越强，质也越高。图 2-4 与图 2-5 分别给出了 220 kV X 线经不同厚度滤过板后能谱的改变以及 HVL 随滤过板厚度增加而增加的情况。

## 三、X 线治疗机的分类与应用

虽然有的 X 线治疗机可以根据治疗目的需要，通过调节管电压变换能量来实现，但 X 线治疗机依据 X 线管的管电压和治疗射线束的特点大致可分为四种。

### （一）接触治疗机

接触治疗机管电压在 10~50 kV，由于管电压低，因此产生出来的 X 线能量低，穿透能力很弱，照射面积比较小。治疗距离（即靶到皮肤距离）为 1 cm 或更小，治疗深度仅为 1~2 mm。因此，临床上一般多用于治疗皮肤表面或体腔浅层疾病，如表皮的血管瘤、经久不愈的湿疹、神经性皮炎以及手或足部位的指、趾疣等良性病变，也可用于眼睑、口腔、浅表部位的病变或身体其他部位皮肤的基底细胞癌等病变。

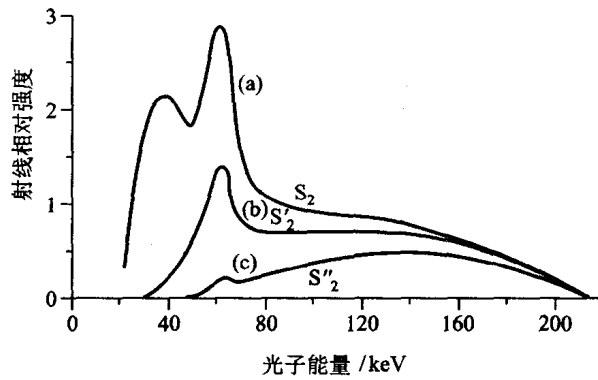


图 2-4 220 kV X 线滤过效应示意图  
( a ) 无滤过 ( b ) 1 mm 铜 ( c ) 2 mm 铜

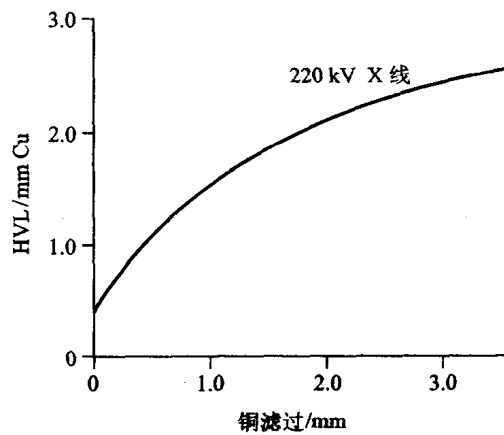


图 2-5 220 kV X 线滤过板与 HVL 的相对关系  
初始滤过为 1 mm 铝

### (二) 浅层治疗机

浅层治疗机管电压在 50 ~ 150 kV, HVL 约为 1 ~ 8 mm 铝。治疗距离为 10 ~ 30 cm 治疗深度一般到 5 mm。主要用于病灶表面和表浅病灶的放射治疗。

### (三) 深部治疗机

深部治疗机管电压约为 150 ~ 400 kV, HVL 约为 1 ~ 3 mm 铜 治疗距离 30 ~ 40 cm 治疗深度一般到 2 cm。现在大多用做  $^{60}\text{Co}$  治疗机和加速器高能 X 线治疗的辅助手段, 以补充浅层部位剂量的不足, 故多用于良性疾和位于较表浅的恶性肿瘤的治疗, 如皮肤瘢痕、腋臭、神经性皮炎、鸡眼、较深部位血管瘤和阴茎海绵体硬结症等良性疾病的治疗, 效果较理想。对于皮肤癌、皮肤附件癌、颈部淋巴结转移癌的补量放疗, 也取得明显疗效。根据治疗的需要, 该治疗机在设计上可分为固定照射型、摆动照射型和旋转照射型三种。

#### (四) 超高压治疗机

超高压治疗机管电压在 400 kV 以上甚至兆伏级，属于高能 X 线治疗机的范畴。所产生的 X 线强度及穿透能力更大，可以用做深层部位恶性肿瘤的放射治疗。

### 四、X 线治疗机的一般操作

#### (一) 治疗前

1. 滤过板 必须在 X 线管窗前安装相应的滤过板，一般机器都有此保护电路，即不插入滤过板时，高压不予接通，不能治疗。如无此电路，应严密注意，不可忽略，以防其波长较长的 X 线对患者皮肤的伤害。在用复合滤过板（铜铝合金）时，要注意铜面靠里，铝片向患者，不可倒置使用。

2. 遮线筒 选用适当的遮线筒，以能包括被照射的病灶部分，并且不超过 1 cm 为限，不可过大。

3. 铅防护板 不应被 X 线照射的正常组织需用铅板遮住保护。小面积照射时，可制成带有与病灶体积相仿的孔的铅板。保护铅板的厚度：一般管电压在 150 kV 以下的可用 1 mm 的铅板，200 kV 以上需用 2 mm 厚的铅板，100 kV 以下的浅部治疗用铅当量 0.5 mm 的铅橡皮即可。应设法将患者固定，以防止被照射中心移位。

#### (二) 治疗时

1. 关门 在治疗开始前，应将 X 线管附近其他无用物体，尤其是金属物体清除，以防产生过多的散射线。工作人员不能停留在治疗室，应关闭防护门，并保证防护门与设备连锁工作正常，同时治疗期间要随时观察患者情况。

2. 开机 一定要先将水冷开关开启，以满足冷却要求。接通主机电源后，首先要调节电源电压，使各部件的工作正常。再一次认真阅读治疗计划单，将管电压、管电流、滤过板、照射距离、限束筒、照射时间预选到相应条件，摆好位后再核实一下，然后开机。开机时随时注意管电压、管电流指示，如有变动可用微调调到相应位置。

#### (三) 治疗后

机器使用完毕后，切断总电源，关闭好水冷调节门，并将控制台上的各治疗参数值置于最低位。

## 第三节 $^{60}\text{Co}$ 治疗机

$^{60}\text{Co}$  治疗机俗称“钴炮”。1951 年由加拿大首先生产出  $^{60}\text{Co}$  治疗机，我国在 20 世纪 60 年代开始制造  $^{60}\text{Co}$  治疗机。 $^{60}\text{Co}$  产生的高能  $\gamma$  射线比深部 X 线治疗机所产生的 X 线能量要高，在世界范围内成为最常用的体外照射放射治疗设备。但  $^{60}\text{Co}$  治疗机存在着能量单一、投射半影较大和经常要更换  $^{60}\text{Co}$  源的缺陷。随着高能级医用直线加速器技术的发展，将逐步取代  $^{60}\text{Co}$  治疗机的应用领域。但目前在国内， $^{60}\text{Co}$  治疗机仍是主要的放射治疗设备。

### 一、 $^{60}\text{Co}$ 治疗机的基本结构

$^{60}\text{Co}$  治疗机由下列部分组成：一个密封的放射源，一个源容器及防护机头，具有开关的遮线