



武汉理工大学
wuhan university of technology

金属工艺学

多媒体课件



上次课内容的回顾

焊接应力和焊接变形

原因？危害？

防止？焊接顺序、不要有密集交叉、焊前预热、焊后缓冷、退火

消除？采用反变形方法、对称焊、多层多道焊、刚性固定、机械矫正、火焰矫正

埋弧焊：埋弧焊的原理及特点

气体保护焊：氩弧焊：不熔化极氩弧焊、熔化极氩弧焊

二氧化碳焊

第15章 常用金属材料的焊接

主要内容:

1 15.1 金属材料的焊接性

2 15.2 碳钢的焊接

3 15.3 合金结构钢的焊接

4 15.4 铸铁的补焊

5 15.5 有色金属的焊接

6 15.6 焊接缺陷与检验

重点内容:

能够根据材料的特性正确选择焊接方法。对可焊性差的材料在焊接时应采取哪些措施。

15.1 金属材料的焊接性

15.1.1 金属焊接性的概念

金属材料的焊接性是指限定的施工条件下，焊接成规定设计要求的构件，并满足预定服役要求的能力。即金属材料在一定的焊接工艺条件下，表现出“好焊”和“不好焊”的差别。

金属材料的焊接性不是一成不变的，同一种金属材料，采用不同的焊接方法、焊接材料及焊接工艺，其焊接性可能有很大的差别。

焊接性包括两个内容：

一是工艺焊接性，主要是指焊接接头产生工艺缺陷的倾向，尤其是出现裂纹的可能性；

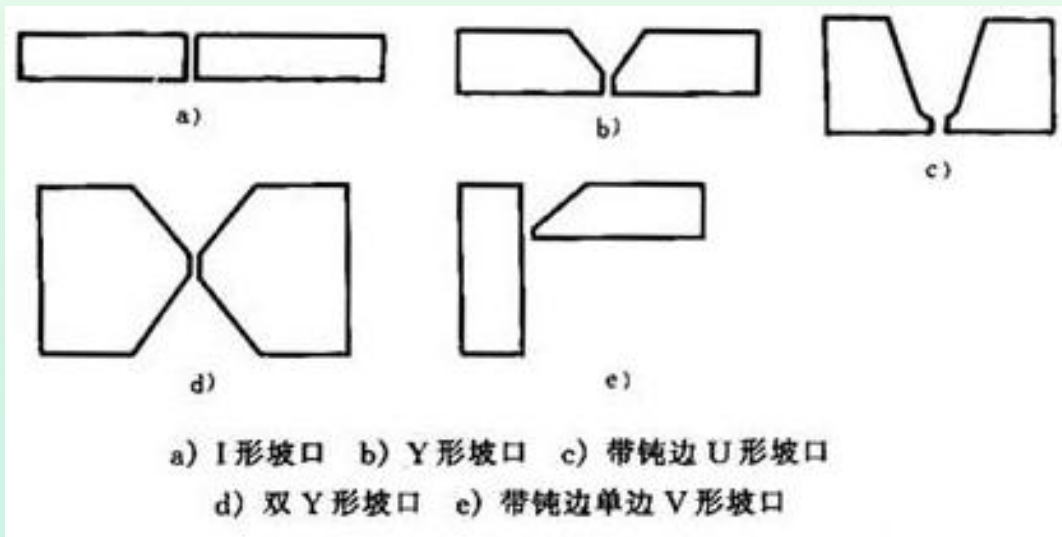
二是使用焊接性，主要是指焊接接头在使用中的可靠性，包括焊接接头的力学性能及其他特殊性能（如耐热、耐蚀性能等）。

15.1.2 金属焊接性的评定

钢的焊接性可通过焊接性实验来评定，也可以通过钢的化学成分来间接评定。

15.1.2.1 实验法

试验法是将被焊金属材料做成一定形状和尺寸的试样，在规定工艺条件下施焊，然后鉴定产生缺陷（如裂纹）倾向的程度，或者鉴定接头是否满足使用性能（如力学性能）的要求。



15.1.2.2 碳当量法

碳当量法是依据钢材中化学成分对焊接热影响区淬硬性的影响程度，来评估钢材焊接时可能产生裂纹和硬化倾向的计算方法。

在钢材的化学成分中，影响最大的是碳，其次是锰、铬、钼、钒等。把钢中合金元素（包括碳）的含量按其对焊接性的影响程度换算成碳的相当含量，其总和称为碳当量。

$$w(C)_{\text{当量}} = w(C) + \frac{w(Mn)}{6} + \frac{w(Cr) + w(Mo) + w(V)}{5} + \frac{w(Ni) + w(Cu)}{15}$$

根据经验：

当 $w(C)_{\text{当量}} < 0.4\%$ 时，钢材塑性良好，淬硬倾向不明显，焊接性良好。在一般的焊接工艺条件下，焊件不会产生裂缝，但对**厚大工件**或**低温下焊接**时，应考虑**预热**。

当 $w(C)_{\text{当量}} = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时，钢材塑性下降，淬硬倾向明显，可焊性较差。焊前工件需要适当预热，焊后应注意缓冷，要采取一定的焊接工艺措施才能防止裂缝。

当 $w(C)_{\text{当量}} > 0.6\%$ 时，钢材塑性较低，淬硬倾向很强，可焊性不好。焊前工件必须预热到较高温度，焊接时要采取减少焊接应力和防止开裂的工艺措施，焊后要进行适当的热处理，才能保证焊接接头质量。

利用碳当量法估算钢材焊接性是粗略的，因为钢材的焊接性还受结构刚度、焊后应力条件、环境温度等因素的影响。

从应用一般焊接工艺焊后有无裂缝或裂缝多少，可初步评定试板材料的可焊性好坏；而后调整工艺（如预热、缓冷等）再焊接试板，使达到不裂，从而可参考抗裂试验制订出合理的焊接工艺规程与规范。

各种金属材料的焊接性

金属材料	焊 接 方 法												钎 焊
	熔 焊							压 焊					
	焊条电弧焊	埋弧焊	二氧化碳焊	氩弧焊	电渣焊	气焊	电子束焊	点焊蜂焊	对焊	摩擦焊	超声波焊	爆炸焊	
铸铁	A	C	C	B	B	A	B	D	D	D	D	D	C
铸钢	A	A	A	A	A	A	A	D	B	B	C	D	B
低碳钢	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A
低合金钢	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	B	A	A
高碳钢	A	B	B	B	B	A	A	B	A	A	C	B	C
不锈钢	A	B	B	A	B	A	A	A	A	A	B	A	A
耐热合金	A	B	C	A	D	B	A	B	C	D	C	D	A
高镍合金	A	B	C	A	D	A	A	A	C	C	C	A	A
铜合金	A	C	C	A	D	B	B	C	A	A	A	A	A
铝	C	C	D	A	D	B	A	A	A	B	A	A	B
硬铝	D	D	D	B	D	C	A	A	A	B	A	A	C
镁及镁合金	D	D	D	A	D	D	B	A	B	D	A	A	C
钛及钛合金	D	D	D	A	D	D	A	B	C	D	A	A	B
锆	D	D	D	A	D	D	A	C	C	D	A	A	C
钼	D	D	D	B	D	D	A	D	C	D	A	A	D

注：A-焊接性良好；B-焊接性较好；C-焊接性较差；D-焊接性不好。

15.2 碳钢的焊接

15.2.1 低碳钢的焊接

低碳钢含碳量 $\leq 0.25\%$ ，塑性好，一般没有淬硬倾向，对焊接过程不敏感，焊接性好。

焊这类钢时，不需要采取特殊的工艺措施，通常在焊后也不需要热处理。

厚度大于50mm的低碳钢结构，常采用大电流多层焊，焊后应进行消除内应力退火。

低温环境下焊接刚度较大的结构时，由于各部分温差较大，变形又受到限制，焊接过程易产生较大的应力，甚至开裂，因此应进行焊前预热。

低碳钢的焊接方法较广，可采用焊条电弧焊、埋弧焊、电渣焊、气体保护焊和电阻焊等。

15.2.2 中、高碳钢的焊接

中碳钢含碳量在0.25%~0.6%之间，随含碳量的增加，淬硬倾向愈发明显，可焊性逐渐变差。在实际生产当中，主要是焊接各种中碳钢的铸钢件与锻件。

中碳钢的焊接特点：

✓ 热影响区易产生淬硬组织和冷裂纹

中碳钢属于易淬火钢，热影响区被加热超过淬火温度的区段时，受工件低温部分的迅速冷却作用，将出现马氏体等淬硬组织。

当工件刚性较大或工艺不恰当时，就会在淬火区产生冷裂纹，即焊接接头焊后冷却到相变温度以下或冷却到常温后产生裂纹。

✓ 焊缝金属热裂纹倾向较大

焊接中碳钢时，因工件基体含碳量与硫、磷杂质含量远远高于焊芯，基体材料熔化后进入熔池，使焊缝金属含碳量增加，塑性下降，加上硫、磷低熔点杂质存在，焊缝及熔合区在相变前可能因内应力而产生裂纹。

因此，**焊接中碳钢构件，焊前必须进行预热**，使焊接时工件各部分的温差减小，以减小焊接应力，同时减慢热影响区的冷却速度，避免产生淬硬组织。

由于中碳钢主要用于制造各类机器零件，焊缝一般有一定的厚度，但长度不大。因此，焊接中碳钢多采用焊条电弧焊，焊后进行相应的热处理。

高碳钢的焊接特点与中碳钢基本相似，进行焊接时，应采用更高的预热温度、更严格的工艺措施。实际上，高碳钢的焊接一般只限于利用焊条电弧焊进行修补工作。

15.3 合金结构钢的焊接

合金结构钢分为机械制造用合金结构钢和低合金结构钢两类。

用于机械制造的合金结构钢零件，一般都采用轧制或锻制的毛坯，焊接结构较少。

如需焊接，因其焊接性与中碳钢相似，所以用于保证焊接质量的工艺措施与焊接中碳钢基本相同。

焊接结构中，用得最多的是低合金结构钢。主要用于制造压力容器、锅炉、桥梁、船舶、车辆、起重机等。



桥梁钢筋焊接



汽车焊接

低合金钢的焊接特点

✓ 热影响区的淬硬倾向

低合金钢焊接时，热影响区可能产生淬硬组织，淬硬程度与钢材的化学成分和强度级别有关。

钢中含碳及合金元素越多，钢材强度级别越高，焊后热影响区的淬硬倾向也越大。

✓ 焊接接头的裂纹倾向

随着钢材强度级别的提高，产生冷裂纹的倾向也加剧。冷裂纹的倾向有三个方面：

- (1) 焊缝及热影响区的含氢量；
- (2) 热影响区的淬硬程度；
- (3) 焊接接头的应力大小；

不同环境温度的预热要求:

工件厚度/mm: 16以下, 不低于 -10°C 不预热, -10°C 以下预热 $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$

工件厚度/mm: 16-24, 不低于 -5°C 不预热, -5°C 以下预热 $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$

工件厚度/mm: 24-40, 不低于 0°C 不预热, 0°C 以下预热 $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$

工件厚度/mm: 40以上, 均应预热 $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$

15.4 铸铁的补焊

铸铁含碳量高，组织不均匀，塑性很低，属于焊接性很差的材料。因此设计和制造焊接构件时，不应该采用铸铁。

为了修复铸件中的缺陷，常需要对铸件进行补焊。

一、铸铁的焊接特点

(1) 熔合区易产生白口组织；

(2) 易产生裂纹；

(3) 易产生气孔；

(4) 铸铁的流动性好，立焊时熔池金属容易流失，所以一般只应进行平焊；

(5) 根据铸铁的焊接特点，易采用气焊、焊条电弧焊进行补焊；

二、焊接方法

按焊前是否预热，铸铁的补焊可分为热焊法和冷焊法。

1、热焊法——是焊前将工件整体或局部预热到600 ~ 700℃，焊补后缓慢冷却。

热焊法能防止工件产生白口组织和裂纹，焊补质量较好，焊后可进行机械加工。但热焊法成本较高，生产率低，焊工劳动条件差。

一般用于焊补形状复杂焊后需要加工的重要铸件，如床头箱、汽缸体等。

2、冷焊法——补焊前工件不预热或只进行400℃以下的低温预热。

主要依靠焊条来调整焊缝化学成分，以防止或减少白口组织和避免裂缝。

冷焊法方便灵活生产率高、成本低、劳动条件好。但焊接处切削加工性能较差。生产中多用于焊补要求不高的铸件以及怕高温预热引起变形的工件。

三、铸铁补焊时产生白口的原因及预防措施

防止白口的措施有以下几种：

1) 减缓冷却速度

延长熔合区处于红热状态时间，使石墨化充分进行。具体措施是焊前对焊件进行预热和焊后保温缓冷。

2) 增加有利于石墨化元素的含量

铸铁中常存的C、Si、Mn、S、P元素中，C和Si是强烈的石墨化元素，只有当 $(C+Si)\%$ 含量达到一定值时，在适当冷却速度配合下，才能使焊缝获得灰铸铁组织。因此，选择含硅、**碳较高**的材料是防止产生白口的常见方法之一。

3) 采用异质材料焊接

采用镍基、铜基、钢基焊缝的焊接材料，使焊缝不是铸铁组织，因而从根本上避免了白口组织的产生。

15.5 有色金属的焊接

15.5.1 铝及铝合金的焊接

要进行焊接的铝和铝合金主要有工业纯铝、不能热处理强化的铝合金（铝锰合金、铝镁合金）和能热处理强化的铝合金（铝铜镁合金、铝锌镁合金等）。

铝及其合金的焊接比较困难，其原因有：

(1) 氧化和夹渣

因为铝和氧的亲合力很大，极易氧化生成 Al_2O_3 膜（厚度为0.1~0.2mm），其熔点为2050℃，组织致密，在700℃左右仍覆盖于金属表面，严重阻碍母材的融化与熔合，而且 Al_2O_3 密度大，不易浮出熔池，从而形成焊缝夹渣。

(2) 变形和裂纹

铝的热导系数较大，焊接中要使用大功率或能量集中的热源。工件厚度较大时应考虑预热。铝的膨胀系数也较大，易产生焊接应力与变形，并可能导致裂缝的产生。

(3) 气孔

液态铝能吸收大量的氢，铝在固态时又几乎不溶解氢，因此在此凝固时易生成气孔。

(4) 塌陷和烧穿

铝在高温时强度及塑性很低，焊接时常由于不能支持熔池金属而引起焊缝塌陷，因此常需采用垫板。

目前焊接铝及铝合金的常用方法有氩弧焊、气焊、点焊、缝焊和钎焊。

不论采用哪种焊接方法焊接铝及铝合金，焊前必须彻底清理焊件的焊接部位和焊丝表面的氧化膜与油污，清理质量的好坏将直接影响焊缝性能。

15.5.2 铜及铜合金的焊接

铜及铜合金的焊接比低碳钢困难得多，其原因是：

(1) 铜的导热性很高（紫铜约为低碳钢的8倍），焊接时热量极易散失。因此，焊前工件要预热，焊接时要选用较大电流或火焰，否则容易造成焊不透缺陷。

(2) 铜在液态易氧化，生成的 Cu_2O 与铜组成低熔点共晶，分布在晶界形成薄弱环节；又因铜的膨胀系数大，凝固时收缩率也大，容易产生较大的焊接应力。因此，焊接过程中极易引起开裂。

(3) 铜在液态时吸气性强，特别容易吸氢。凝固时气体从熔液中析出，来不及逸出就会生成气孔。

(4) 铜的电阻极小，不适于电阻焊接。

(5) 铜合金中的合金元素有的比铜更易氧化, 使焊接的困难增大。

例如黄铜(铜锌合金)中的锌沸点很低, 极易烧蚀蒸发并生成氧化锌(ZnO)。锌的燃烧不但改变接头化学成分、降低接头性能, 而且形成氧化锌烟雾易引起焊工中毒。

铝青铜中的铝, 焊接时易生成难熔的氧化铝, 增大熔渣粘度, 生成气孔和夹渣。

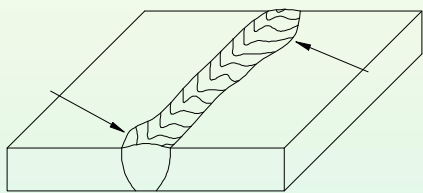
铜及铜合金可用氩弧焊、气焊、碳弧焊、钎焊等方法进行焊接。

采用氩弧焊是保证紫铜和青铜焊接质量的有效方法。

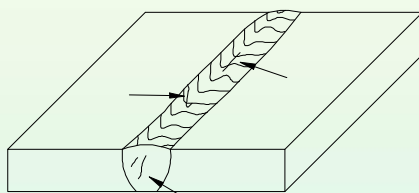
15.6 焊接缺陷与检验

15.6.1 焊缝常见缺陷

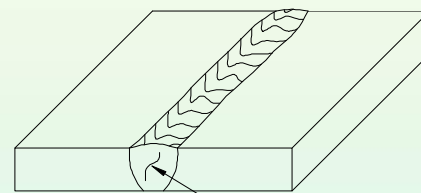
焊接接头的不完整性称焊接缺陷。主要有焊瘤、夹渣、裂纹、气孔、咬边和未焊透等。



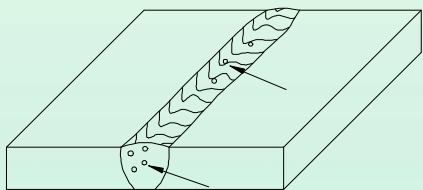
a)



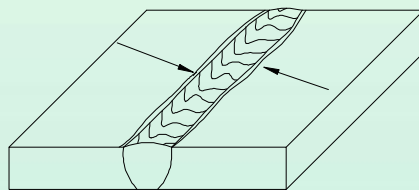
b)



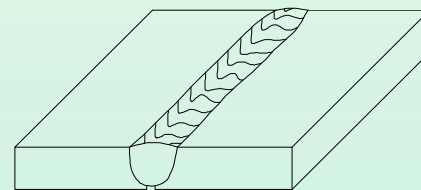
c)



d)



e)



f)

(a) 焊瘤 (b) 裂纹 (c) 夹渣 (d) 气孔 (e) 咬边 (f) 未焊透

15.6.2 焊接检验过程

一、焊前检验

焊前检验的主要内容包括原材料检验和焊接结构鉴定。原材料检验内容为工件金属质量检验，焊丝、焊条及其它焊接材料的质量检验。

二、生产过程检验

生产过程检验是针对制造过程各工序的完成质量进行跟踪检查，内容包括焊接工艺参数检验（如焊接电流、焊接速度等）、结构装配检验和焊缝尺寸检验。

三、焊后检验

焊后检验是对焊接质量的综合评定，尤其是对有特殊性能要求的产品，焊后检验成为决定其能否投入使用的关键。焊后检验的内容主要包括焊缝的外观检查、焊缝密封性检验和焊缝内部缺陷检验。

15.6.3 焊接接头检验方法

1. 破坏检验

破坏检验是从焊件或试件上切取试样，或以产品（或模拟体）的整体破坏做试验，以检查其各种力学性能的试验法。

常用的破坏检验方法包括焊缝金属化学成分及金相组织检验、焊缝及接头力学性能试验等。

2. 非破坏检验

非破坏检验是利用不同的物理方法，在不破坏焊接结构和焊接接头状态的条件下，直接检查和评定焊接质量。

常用的非破坏检验方法包括外观检查、密封性检验和物理探伤。

15.6.4 常用非破坏检验方法

1. 外观检查

- ◆ 着色探伤
- ◆ 荧光探伤
- ◆ 磁粉探伤



2. 密封性检验

- ◆ 煤油试验
- ◆ 气密性检验
- ◆ 水压试验

五、水压试验

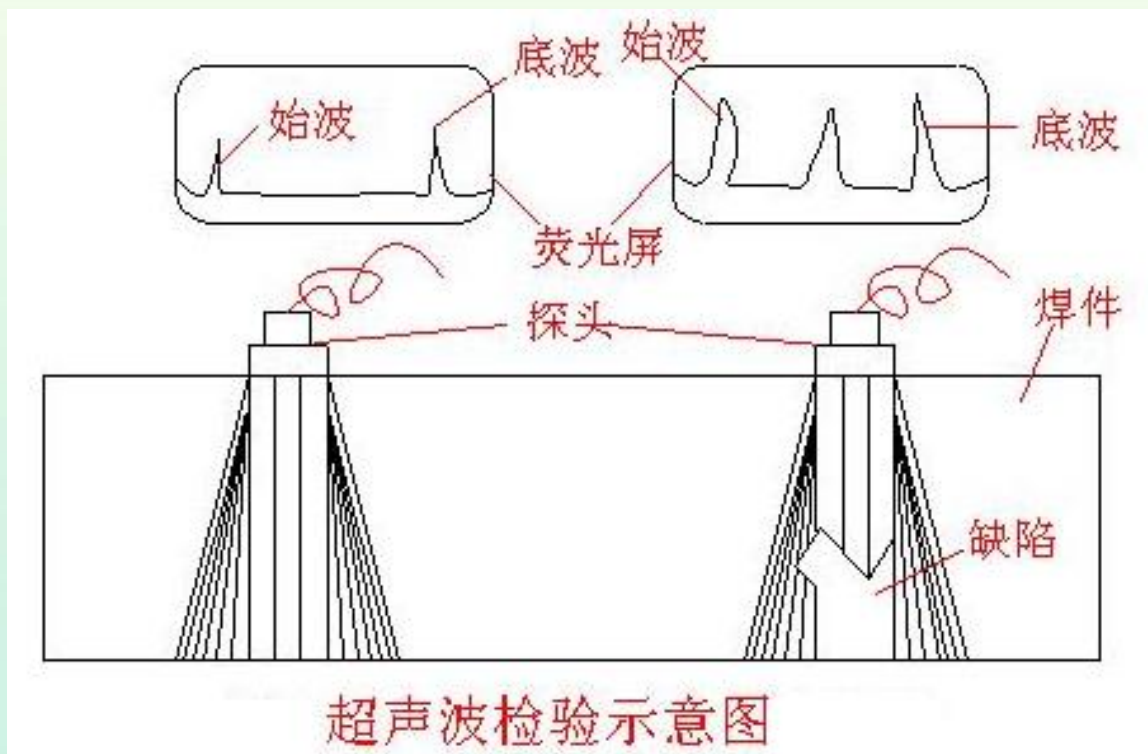
3. 无损探伤

- ◆ 声发射探伤
- ◆ 超声波探伤
- ◆ 激光全息探伤

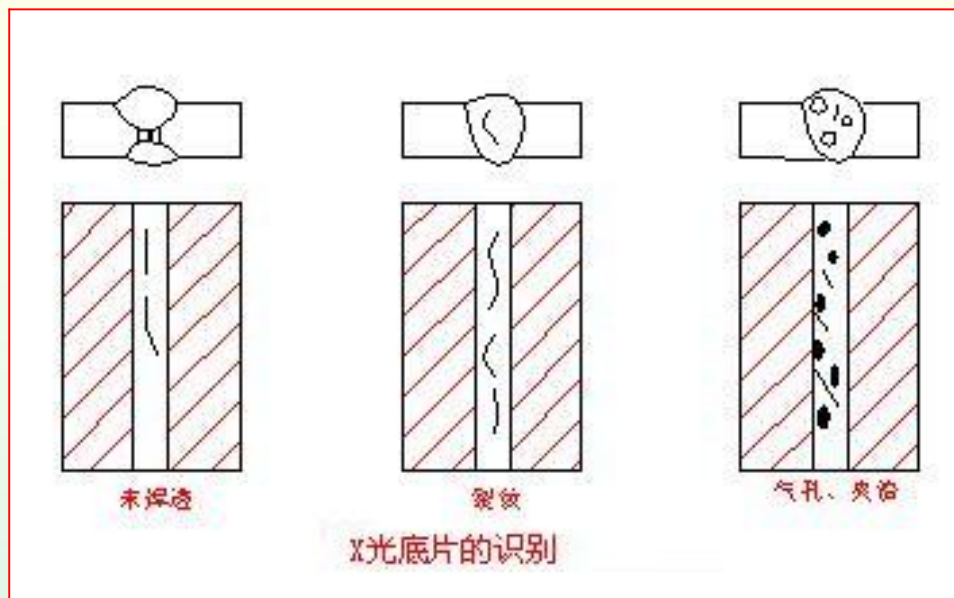
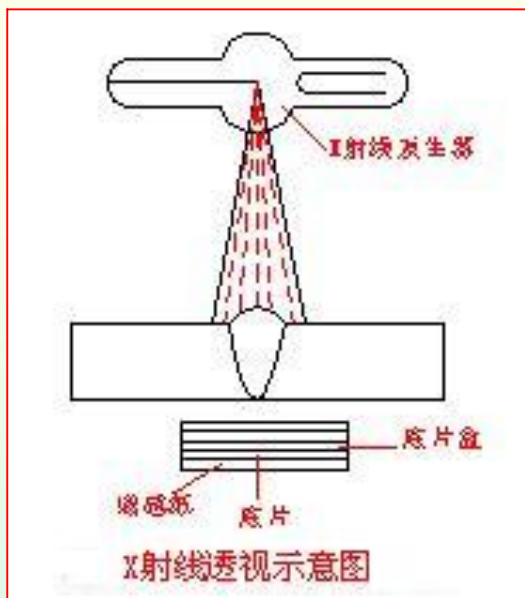
无损检测

超声波检验

超声波的频率在20000Hz以上，具有能透入金属材料深处的特性，而且由一种介质进入另一种介质截面时，在界面发生反射波，因此检测焊件时，在荧光屏上可看到始波和底波。



X射线和 γ 射线检验



X射线（如图）和 γ 射线都是电磁波，都能不同程度地透过金属。相应部位的底片感光较强，底片冲出后，就在缺陷部位上显示出明显可见的黑色条纹和斑点。