



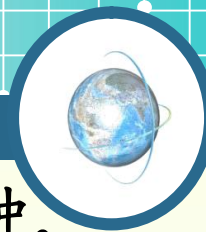
**武汉理工大学**  
wuhan university of technology

# 金属工艺学

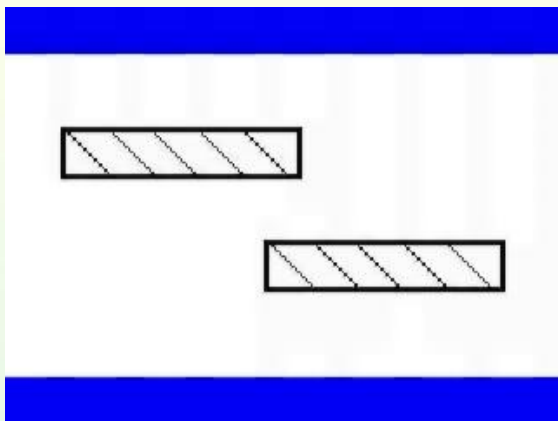
多媒体课件



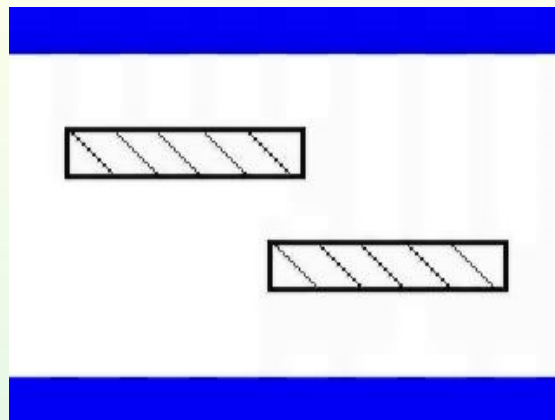
# 第四篇 焊接



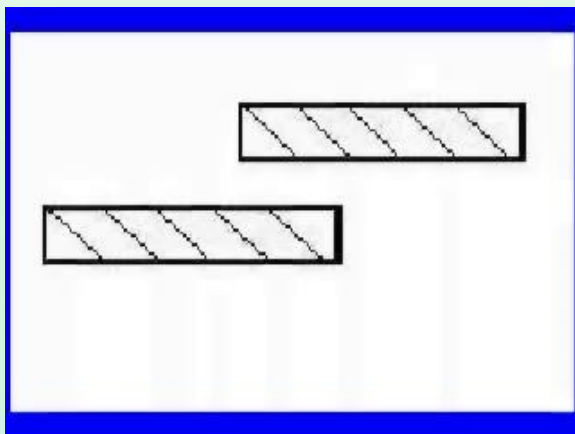
材料连接方法有**螺纹连接**、**销钉连接**、**铆接**及**焊接**等多种。



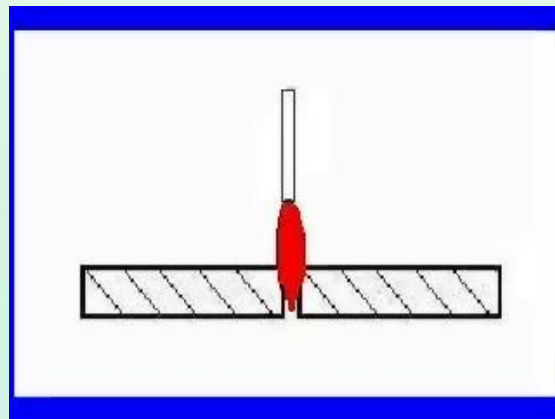
螺纹连接（机械）



铆接（机械）



粘接（物化连接）



焊接（冶金连接）

# 第13章 焊接工艺基础

## 本章主要内容

1

13.1 概述

2

13.2 焊接工艺基础

3

13.3 焊接接头组织与性能

4

13.4 焊接应力与变形

## 本章重点

- 1、较深刻地理解焊接工艺的基本理论;
- 2、对焊接接头的组织与性能、焊接应力与变形的形成过程有清楚的认识;
- 3、掌握防止和消除焊接变形的常用方法。

## 13.1 概述

**焊接：**是通过加热或加压，或者两者并用，并且用(或不用)填充材料，使焊接件达到原子结合的一种方法。

### 焊接的主要特点：

- (1) 节省材料，减轻质量；
- (2) 简化复杂零件和大型零件的制造；
- (3) 适应性好；可实现特殊结构的生產；
- (4) 满足特殊连接要求；可实现不同材料间的连接成型；
- (5) 降低劳动强度，改善劳动条件。

### 焊接方法的应用：

- (1) 制造金属结构件；
- (2) 制造机器零件和工具；
- (3) 修复。

# 焊接方法

**焊接方法：**熔焊、压焊、钎焊等。

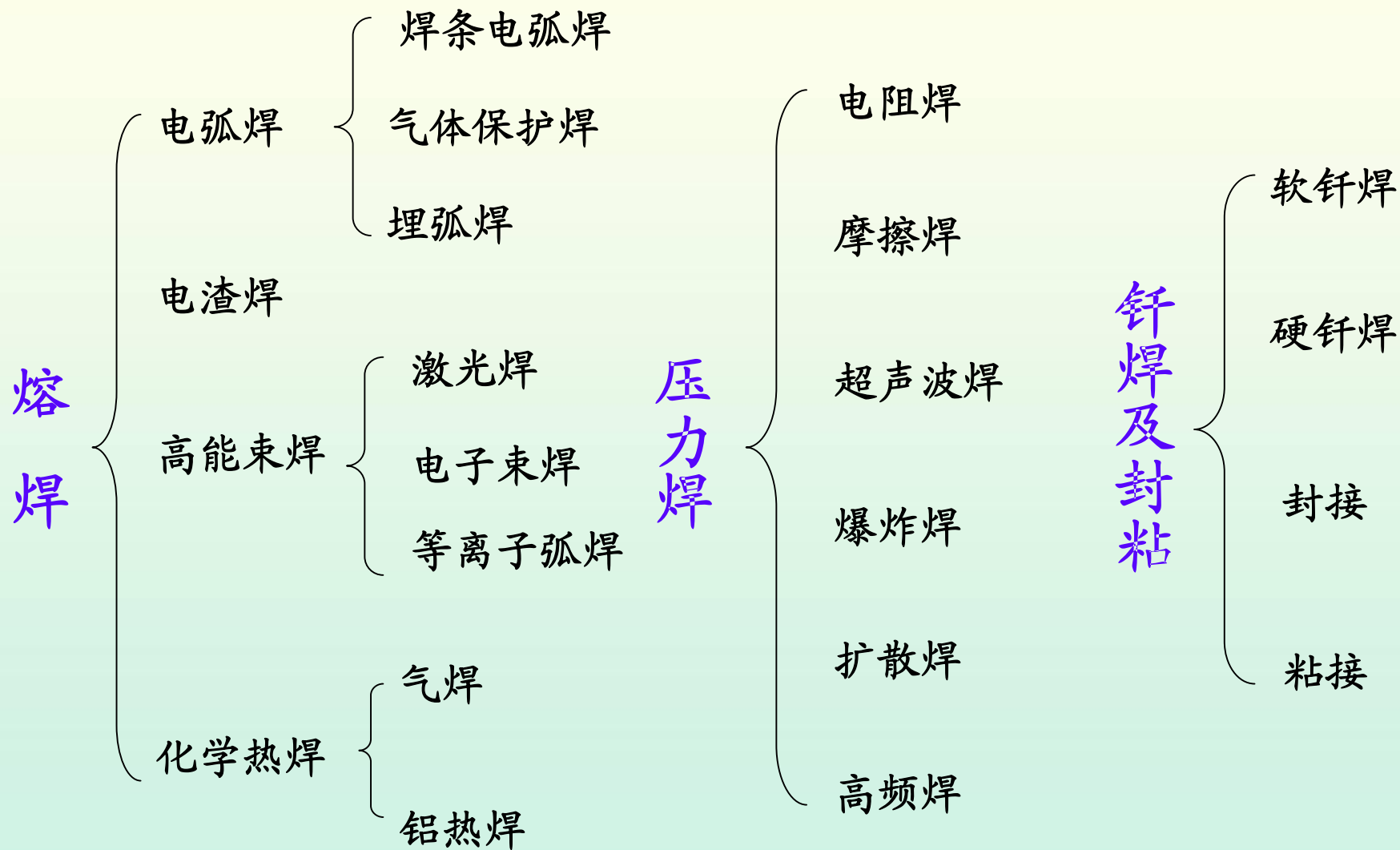
**1、熔焊**——是一种将焊件接头部位加热至融化状态，不加压力完成的焊接方法。

它采用局部加热方法，使工件的焊接接头部分出现局部熔化，通常还需填充金属，共同构成熔池。熔池经冷却结晶后，形成牢固的原子间结合，使分离的工件成为一体。

**2、压焊**——是在焊接过程中必须对工件施加压力，（加热或不加热）以完成焊接的方法。

**3、钎焊**——是采用比母材熔点低的金属材料作钎料，将焊件和钎料加热到高于钎料熔点、低于母材熔点的温度，利用液态钎料润湿母材，填充接头间隙并与母材相互扩散实现连接焊件的方法。

# 焊接方法



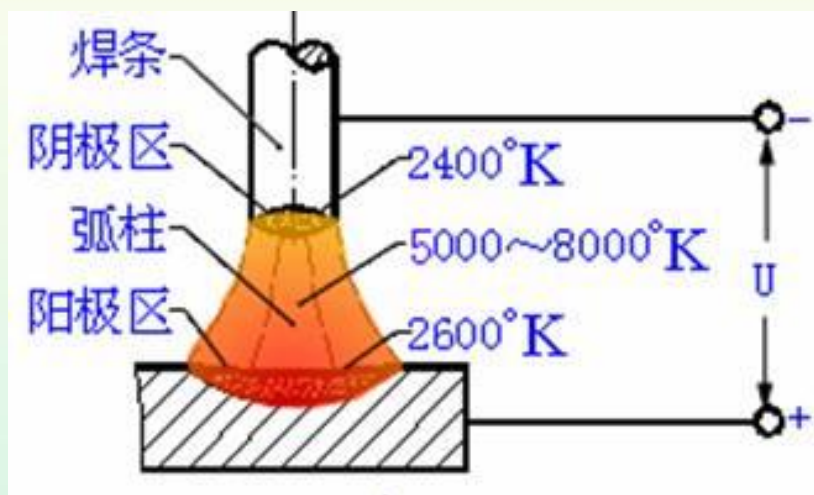




## 13.2 电弧焊工艺基础

### 13.2.1 焊接电弧

焊接电弧是在具有一定电压的电极与工件之间的气体介质中长时间的放电现象，即在局部气体介质中有大量的电子流过的导电现象。



#### 焊接电弧的温度和热量分布

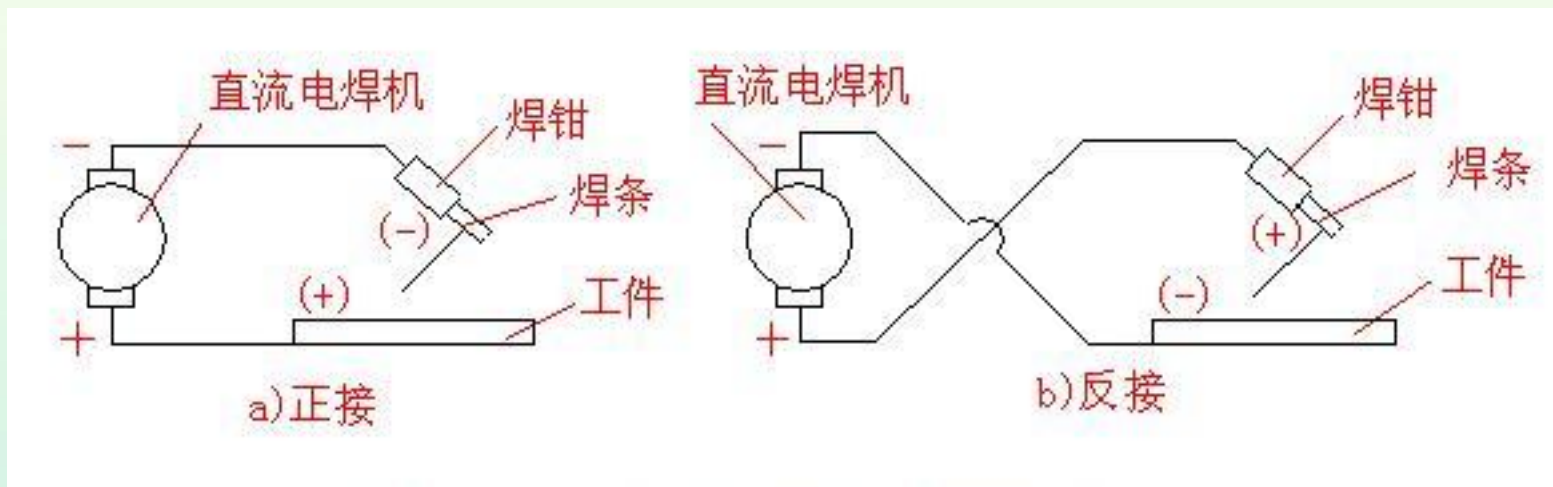
	温度 K	热量分布
阳极区:	2600	43 %
弧柱区:	6000 ~ 8000	21 %
阴极区 :	2400	36 %



由于电弧产生的热量在阳极和阴极上有一定的差异，在使用直流电焊机焊接时，有两种接线方法：

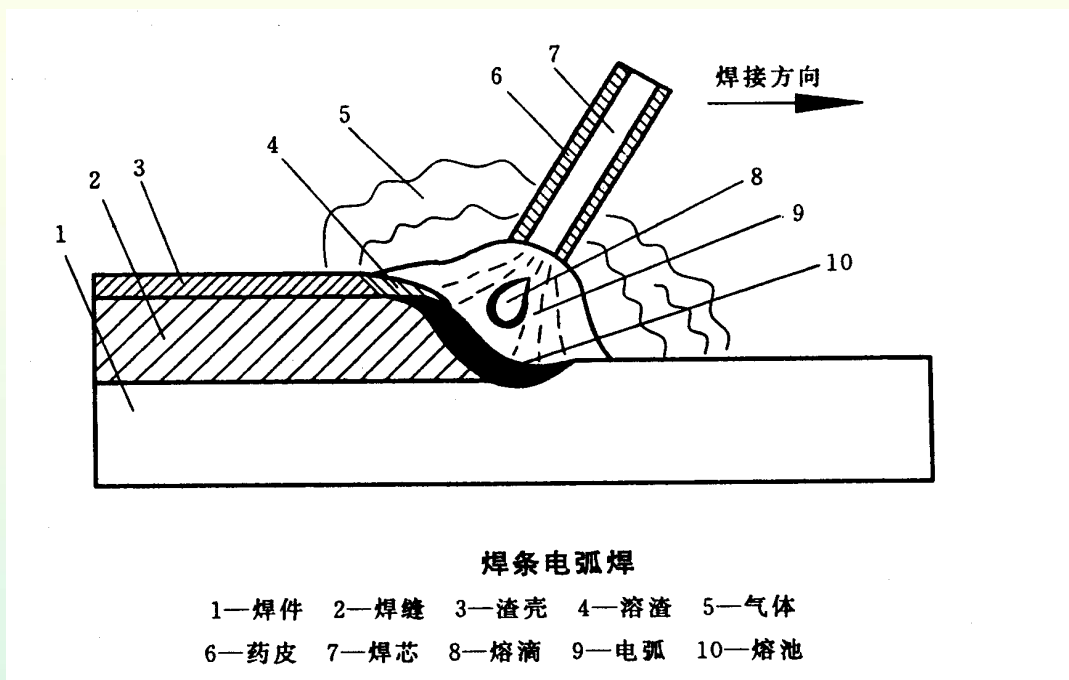
**直流正接：**焊件接正极，焊条接负极（厚板、酸性焊条）

**直流负接：**焊件接负极，焊条接正极（薄板、碱性低氢焊条、低合金钢和铝合金）



如果焊接时使用的是交流弧焊机，因为电极每秒钟正负变化达一百次之多，所以两极加热温度一样，都在2500K左右，因而不存在正接和反接问题。

## 熔焊的本质及特点:



- 熔化焊的本质是小熔池熔炼与铸造，是金属熔化与结晶的过程。
- 熔池存在时间短，温度高；冶金过程进行不充分，氧化严重；热影响区大。
- 冷却速度快，结晶后易生成粗大的柱状晶。

# 熔化焊的三要素

## ✓ 热源

能量要集中，温度要高。以保证金属快速熔化，减小热影响区。满足要求的热源有电弧、等离子弧、电渣热、电子束和激光。

## ✓ 熔池的保护

可用渣保护、气保护和渣-气联合保护。以防止氧化，并进行脱氧、脱硫和脱磷，给熔池过渡合金元素。

## ✓ 填充金属

保证焊缝填满及给焊缝带入有益的合金元素，并达到力学性能和其它性能的要求，主要有焊芯和焊丝。

## 电弧焊的焊接过程:

手工电弧焊是利用焊条与工件间产生的电弧热，将工件熔化而进行焊接的。

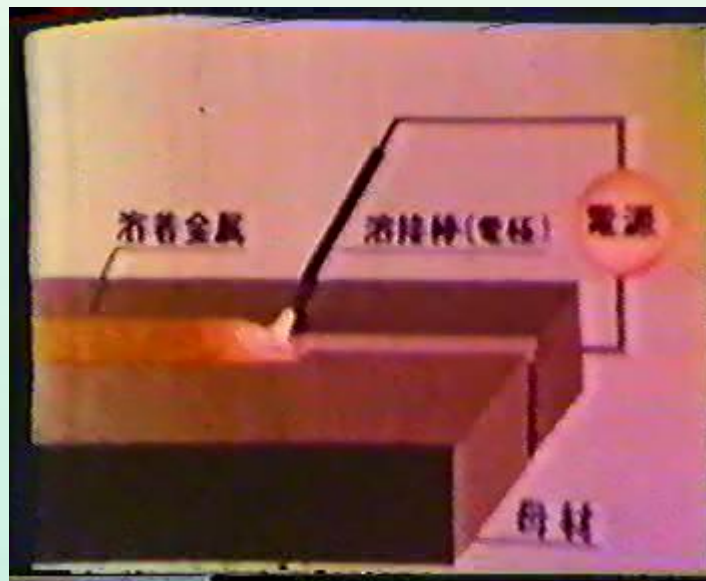


- 电弧在焊条与被焊工件之间燃烧，电弧热使工件（基本金属）和焊条同时熔化成为熔池，焊条金属熔滴借重力和电弧气体吹力的作用逐渐过渡到熔池当中。
- 电弧热还使焊条的药皮熔化或燃烧。药皮燃烧后与液体金属起物理化学作用，所形成的熔渣和气体可防止空气中氧、氮的侵入，其保护熔化金属的作用。



## 电弧焊的冶金过程特点:

- 电弧和熔池金属温度高于一般的冶炼温度，使金属元素强烈蒸发，导致**金属烧损**或形成**有害杂质**。
- 金属熔池体积小，熔池处于液态的时间很短，一般在10秒左右，导致化学**成分不够均匀**，气体和杂质来不及浮出，易产生**气孔和夹杂**等缺陷。
- 熔池不断更新，有害气体容易进入熔池，形成**氧化物、气孔、杂质**等缺陷。

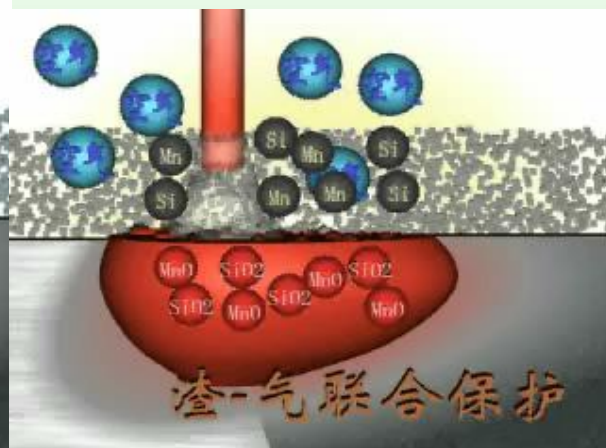
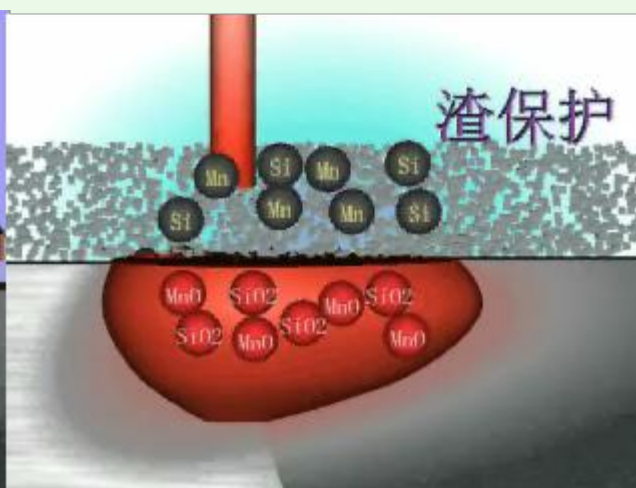
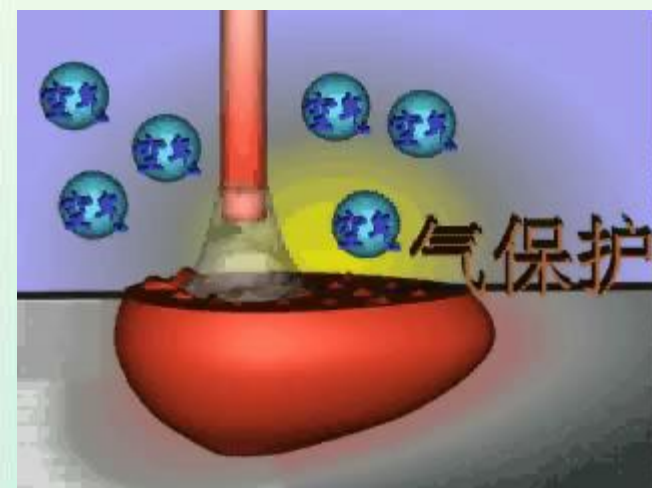


# 熔池的保护

焊剂是由 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{MgO}$ 及 $\text{CaF}$ 等组成的硅酸盐。

## 焊剂保护的效果

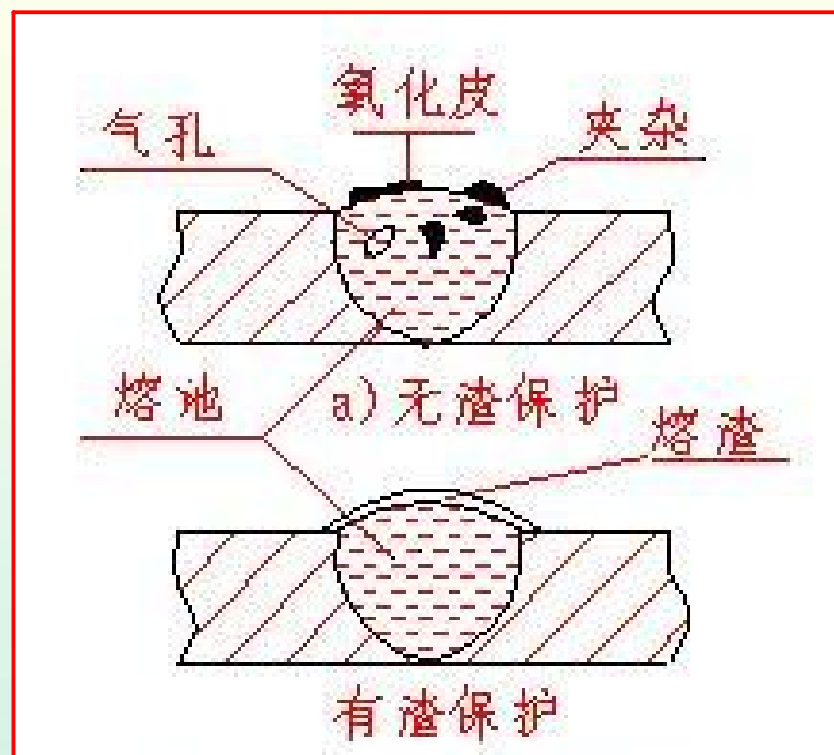
- 形成熔融的液态焊剂薄膜，使熔池与空气隔绝，大大减少焊缝中的含气量，提高焊缝韧性。
- 延长熔池存在时间，加强了冶金反应，有利于气孔、夹渣的析出。



## ✓ 渣保护

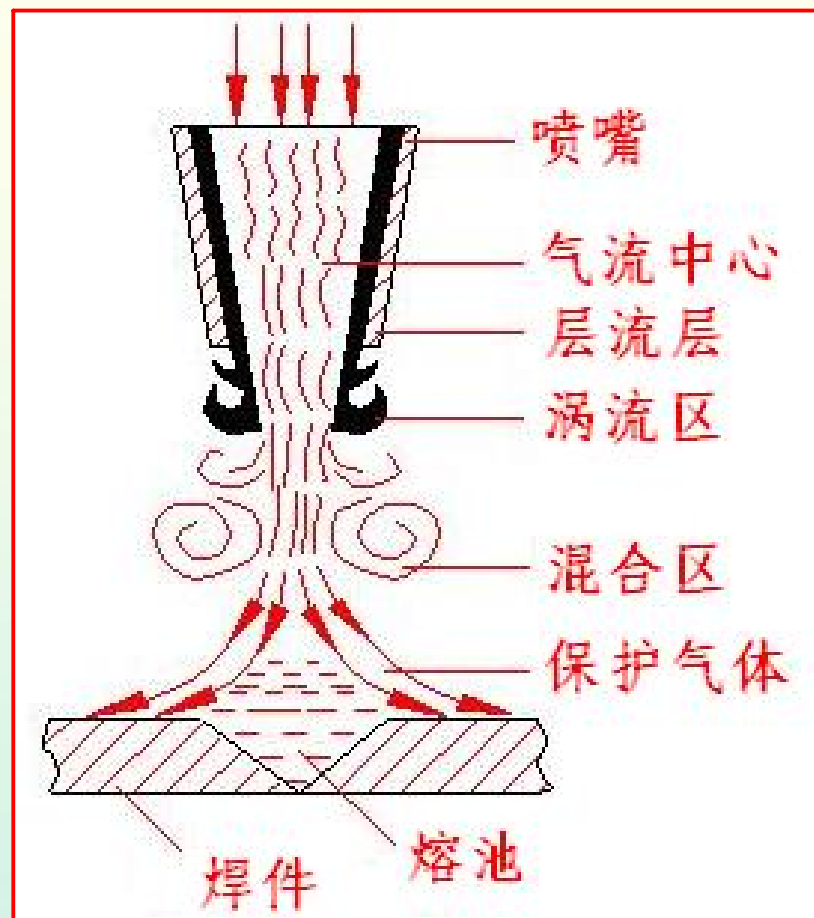
为了使熔池与空气隔离，  
可在熔池上覆盖一层熔渣

- 一方面防止金属氧化和吸气
- 另一方面向熔池过渡合金元素，提高焊缝性能
- 同时，还可以减少散热，提高生产率，防止强光辐射



## ✓ 气保护

- 用于保护熔池和溶滴的气体应是惰性气体，并在高温下不分解，或是低氧化性的不溶于金属液体的双原子气体(如Ar或CO<sub>2</sub>)。
- 喷嘴结构应尽可能使气体以层流流出。





## 氩气

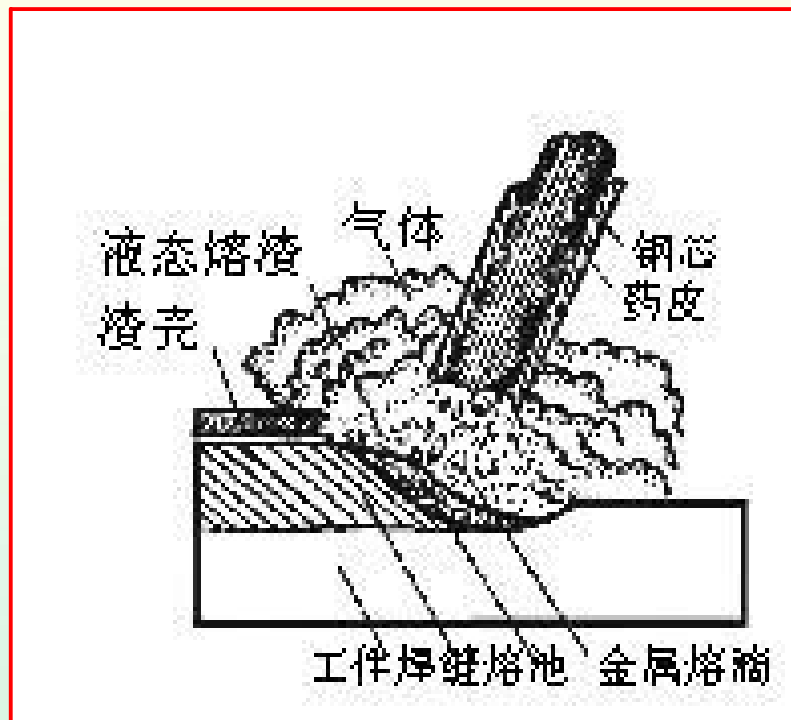
- 氩气为惰性气体，高温下不溶入液态金属，也不与金属发生化学反应，因此，氩气是一种理想的保护气体。
- 由于氩弧温度高，因此一旦引燃，电弧就很稳定。
- 氩弧焊一般要求氩气纯度达99.9%，我国生产的工业纯氩，其纯度可达99.9%，完全合乎氩弧焊的要求。
- 氩弧焊对焊前的除油、去锈、去水等准备工作要求严格，否则就会影响焊缝质量。

## CO<sub>2</sub>气体

- CO<sub>2</sub>为无色无味气体，密度是空气的1.5倍，在常温下很稳定，但在高温下易分解。
- CO<sub>2</sub>气体密度大，受热后体积膨胀大，所以在隔离空气保护焊接熔池和电弧方面，效果良好。
- 但CO<sub>2</sub>气体为氧化性气体，在高温下将分解为CO和O<sub>2</sub>:  
$$2\text{CO}_2 = 2\text{CO} + \text{O}_2$$
- 所以二氧化碳在高温时有强烈的氧化性。

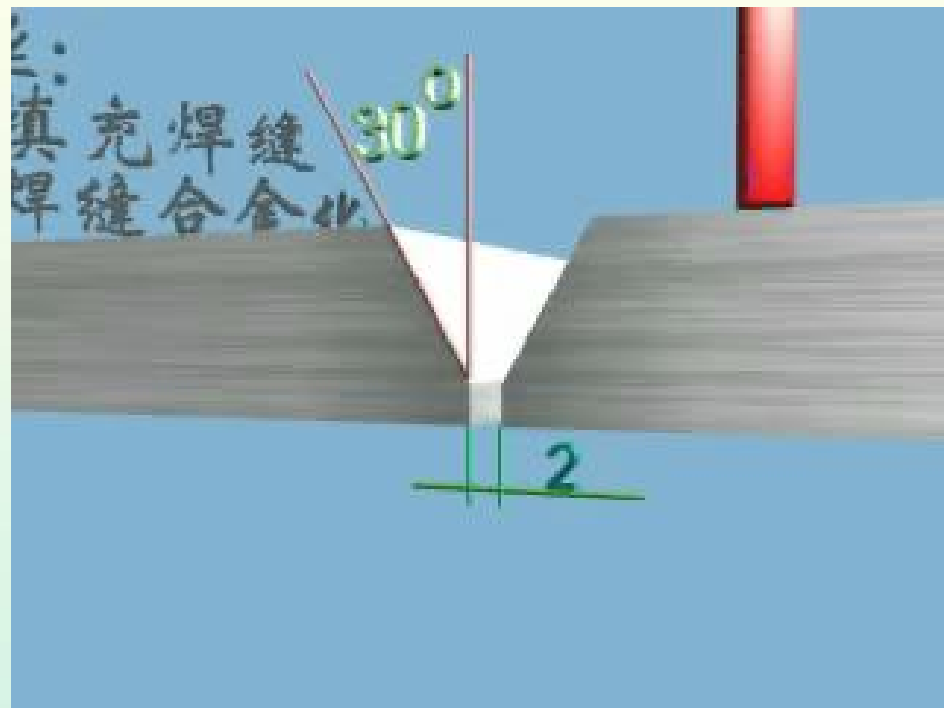
## ✓ 渣-气联合保护

- 利用渣的良好的冶金反应和焊缝成型特点以及气体的优良电弧热效率和稳弧作用，可获得良好的熔池保护效果。如焊条的药皮及二氧化碳加药芯。



## ✓ 填充金属

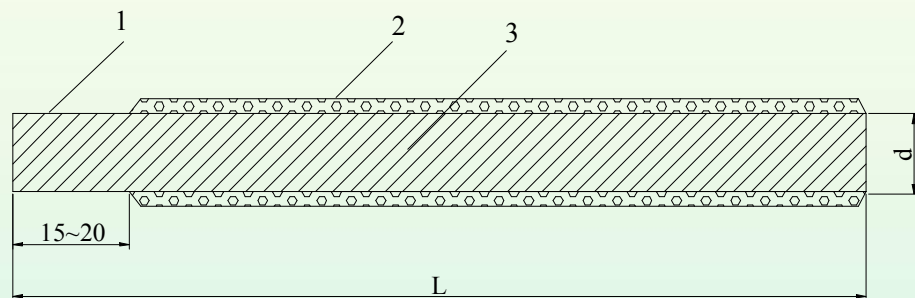
- 填满焊缝，提高焊缝性能，使**焊缝与母材等强度**，用焊丝和焊芯（填充金属）过渡合金元素。
- 常用的焊条钢芯为碳素钢丝、合金钢丝和不锈钢丝。
- H代表焊接用钢丝，其后的两位数字代表含碳量的万分之几；A为高级优质钢；E代表特级优质钢。



## 13.2.2 电焊条

### 一、电焊条的组成及作用

涂有药皮供手工电弧焊用的融化电极称为焊条，它由焊芯和药皮（涂料）两部分组成。



焊条纵截面

1-焊条夹持端 2-药皮 3-焊芯

焊芯是由专门冶炼的焊条钢经轧制和拉拔而成的，主要起导电和填充焊缝金属的作用。

药皮的作用：提高电弧燃烧的稳定性；对焊接过程和焊缝起保护作用；控制焊缝金属的化学成分。



## 二、焊条的种类、型号和牌号

焊接的应用范围越来越广泛，为适应各个行业，各种材料和达到不同性能要求的焊条品种非常多。

焊条类别	代 号	
	拼音	汉字
结构钢焊条	J	结
钼及铬钼耐热钢焊条	R	热
不锈钢焊条	G	铬
	A	奥
堆焊焊条	D	堆
低温钢焊条	W	温
铸铁焊条	Z	铸
镍及镍合金焊条	Ni	镍
铜及铜合金焊条	T	铜
铝及铝合金焊条	L	铝
特殊用途焊条	TS	特殊

每种类型的焊条又因药皮类型不同，可具有不同的焊接工艺性能和不同的焊缝力学性能。

牌 号	药皮类型	适用电源	备 注
×× 0	不规定	不规定	酸性 焊条
×× 1	氧化钛型	交直两用	
×× 2	氧化钛钙型	交直两用	
×× 3	钛钙型	交直两用	
×× 4	氧化铁型	交直两用	
×× 5	高纤维素型	交直两用	
×× 6	低氢钾型	交直两用	碱性 焊条
×× 7	低氢钠型	直流专用	
×× 8	石墨型	交直两用	
×× 9	盐基型	直流专用	

# 焊条的型号

焊条型号是国家标准中的焊条代号。碳钢焊条型号见GB 5117—1995，如E4303、E5015、E5016等。

1. “E”表示焊条；
2. 前两位数字表示熔敷金属抗拉强度的最小值，单位为Mpa；
3. 第三位数字表示焊条的焊接位置，“0”及“1”表示焊条适用于全位置焊接(平、立、仰、横)，“2”表示焊条适用于平焊及平角焊，“4”表示焊条适用于向下立焊；
4. 第三位和第四位数字组合时表示焊接电流种类及药皮类型，如“03”为钛钙型药皮，交流或直流正、反接，“15”为低氢钠型药皮，直流反接，“16”为低氢钾型药皮，交流或直流反接。

## E 43 03

E——表示焊条类别

43——表示熔敷金属抗拉强度的最小值为430Mpa

0——表示焊条适用于全位置焊接

03——表示焊条药皮为钛钙型，交直两用

焊条E4303也称J422碳钢焊条，药皮是钛钙型，药皮中含30%以上氧化钛和20%以下钙或镁的碳酸盐矿，熔渣流动性好，脱渣容易，电弧稳定，熔深适中，飞溅小，焊波整齐，适用于全位置焊，电流为交、直流，正、反接，主要用于焊接较重要的低碳钢结构。



# 焊条的牌号

焊条牌号是焊条行业统一的焊条代号。

焊条牌号一般用一个大写拼音字母和三个数字表示，如 J422、J507 等。

拼音字母表示焊条的大类，如“J”表示结构钢焊条（碳钢焊条和普通低合金钢焊条），“A”表示奥氏体不锈钢焊条，“Z”表示铸铁焊条等；

前两位数字表示各大类中若干小类；

最后一个数字表示药皮类型和电流种类。

以结构钢焊条为例: **J 42 2**

其中: J —— 结构钢焊条

4 2 —— 焊缝金属抗拉强度大于等于 4 2 0 MP

2 —— 药皮类型 ( 钛钙型 ) 和电源种类 ( 交直两用 )



## ✓ 酸性焊条与碱性焊条两者的性质

酸性焊条的工艺性好，适用于各种电源，操作性好，电弧稳定，成本低。但焊缝强度稍低，渗合金作用弱，故不宜焊接承受重载和要求高强度的重要结构件。

碱性焊条一般要求采用直流电源，焊缝强度高、抗冲击力大，但操作性差、电弧不够稳定、成本高，故只适合焊接重要结构件。

碱性药皮中因不含有机物，也称低氢型药皮，**可以提高焊缝金属的抗裂性。**

碱性药皮氧化性强，对锈、油、水的敏感性大，易产生飞溅和CO气孔。

碱性药皮在高温下，易生成较多的有毒物质（HF等），因而应注意通风。

## ✓ 电焊条的选用原则

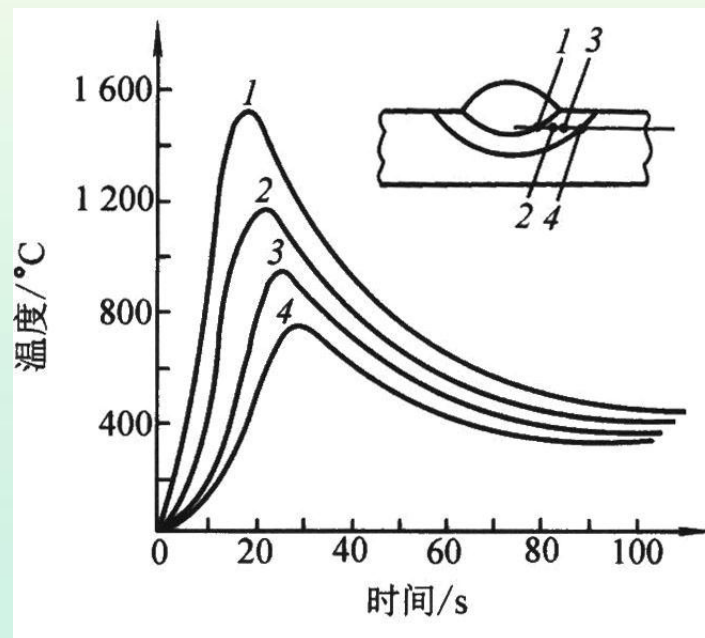
- **等强度原则**：低碳钢和普通低合金钢构件，一般都要求焊缝金属与母材等强度，因此可根据钢材强度等级来选用相应的焊条。
- 同一强度等级的酸性焊条和碱性焊条的选用。主要应考虑：**焊接件的结构形状、钢板厚度、载荷性质和抗裂性能而定。**
- **低碳钢与低合金结构钢**焊接，可按某一种钢接头中**强度较低**的钢材来选用相应的焊条。
- 焊接不锈钢或耐热钢等有特殊性能要求的钢材，应选用相应的专用焊条。
- 铸钢件的含碳量一般比较高，而且厚度较大，形状复杂，易产生焊接裂纹，一般采用碱性焊条。

## 13.3 焊接接头的组织与性能

### 一、焊接工件上温度的变化与分布

焊接时，电弧沿着工件逐渐移动并对工件进行局部加热。因此在焊接过程中，焊缝及其附近的金属都是由常温状态开始被加热到较高的温度，然后再逐渐冷却到常温。

随着各点金属所在位置的不同，其最高加热温度是不同的。



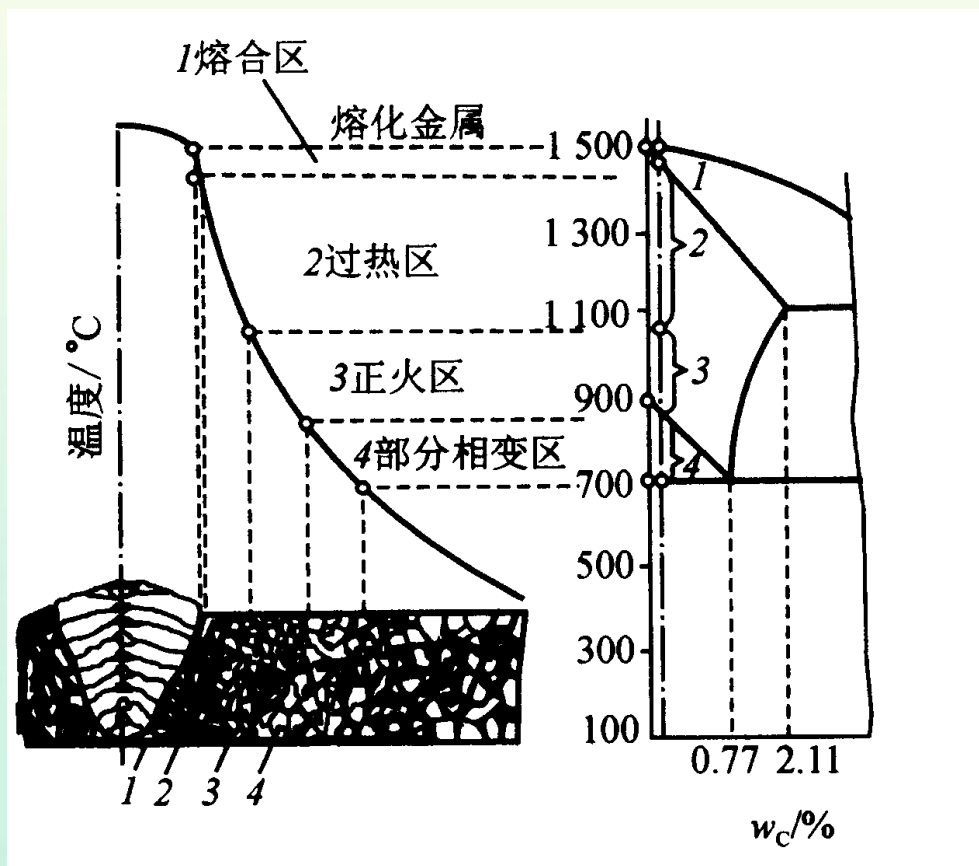
焊缝区各点温度变化情况



## 二、焊接接头的组织与性能

电弧焊热源的高温集中融化焊缝区金属，并向工件金属传导热量，必然引起焊缝及附近区域金属的组织 and 性能发生变化。

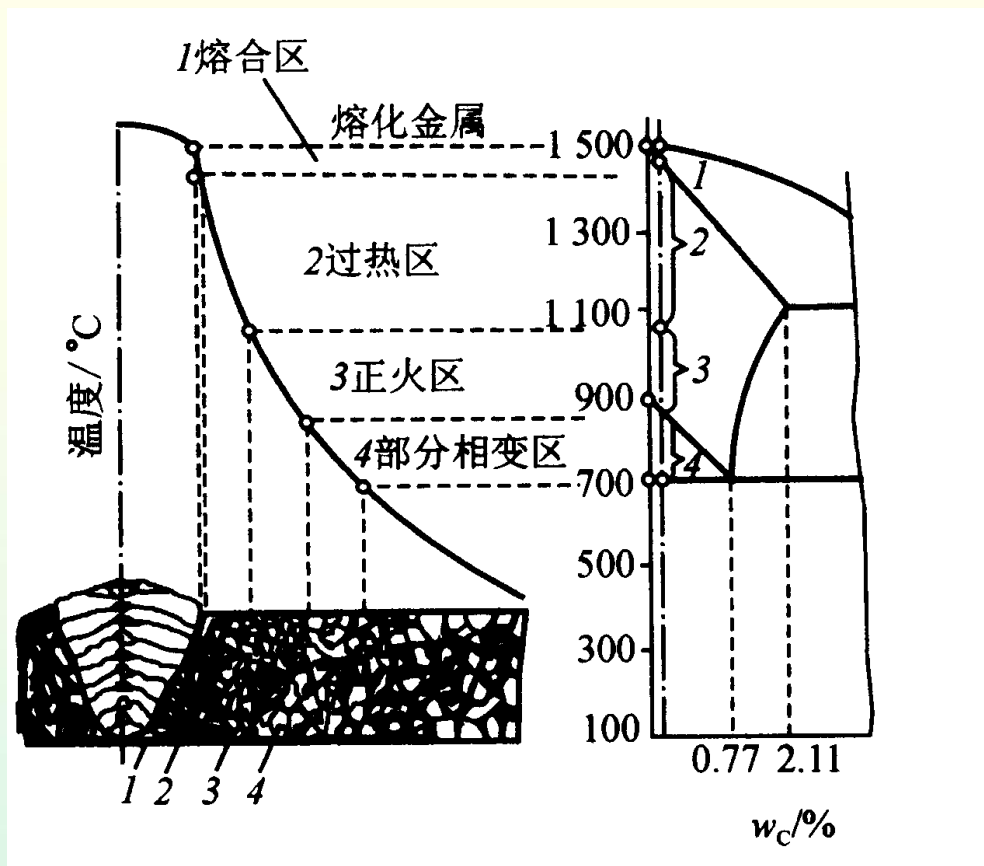
整个焊接接头由**焊缝区**、**热影响区**构成。



# 1、焊缝区

焊缝的结晶是从熔池底部开始向中心成长的。

因结晶时各个方向的冷却速度不同，从而形成柱状的铸态组织，由铁素体和少量珠光体所组成。



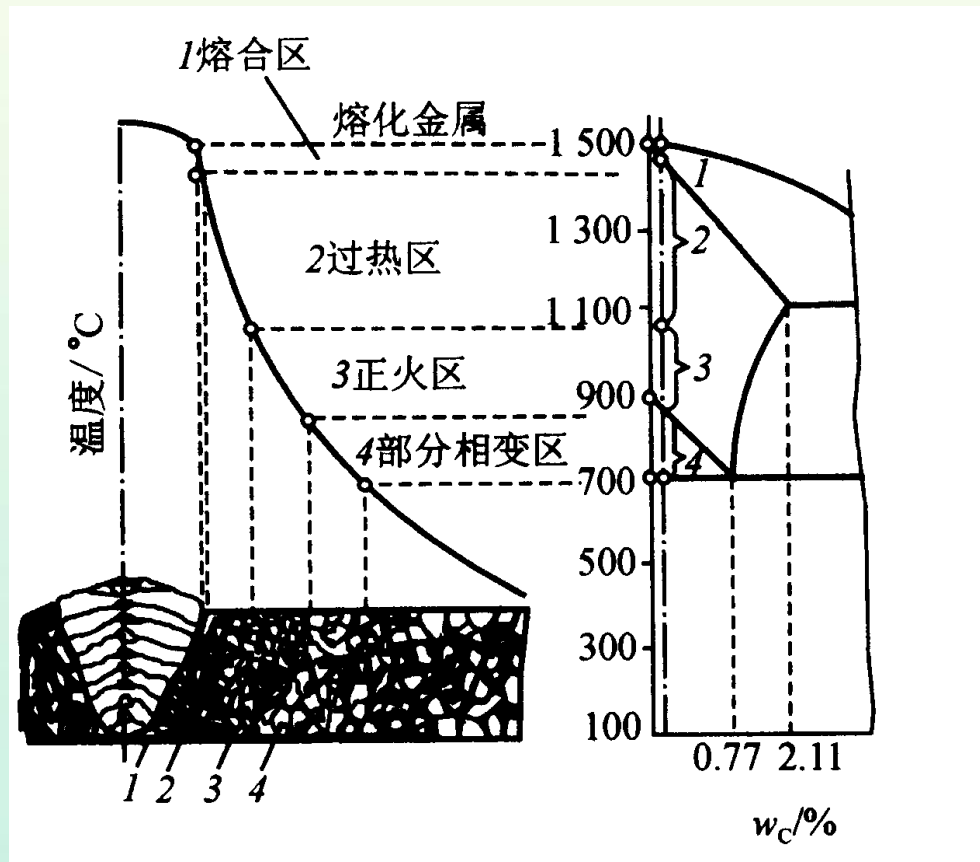
因结晶是从熔池底部的半熔化区开始逐次进行的，低熔点的硫磷杂质和氧化铁等易偏析物集中在焊缝中心区，将影响焊缝的力学性能。

因此，应慎重选用焊条或其它焊接材料。

## 2、焊接热影响区

焊接热影响区是指焊缝两侧金属因焊接热作用（但未熔化）而发生组织和性能变化的区域。

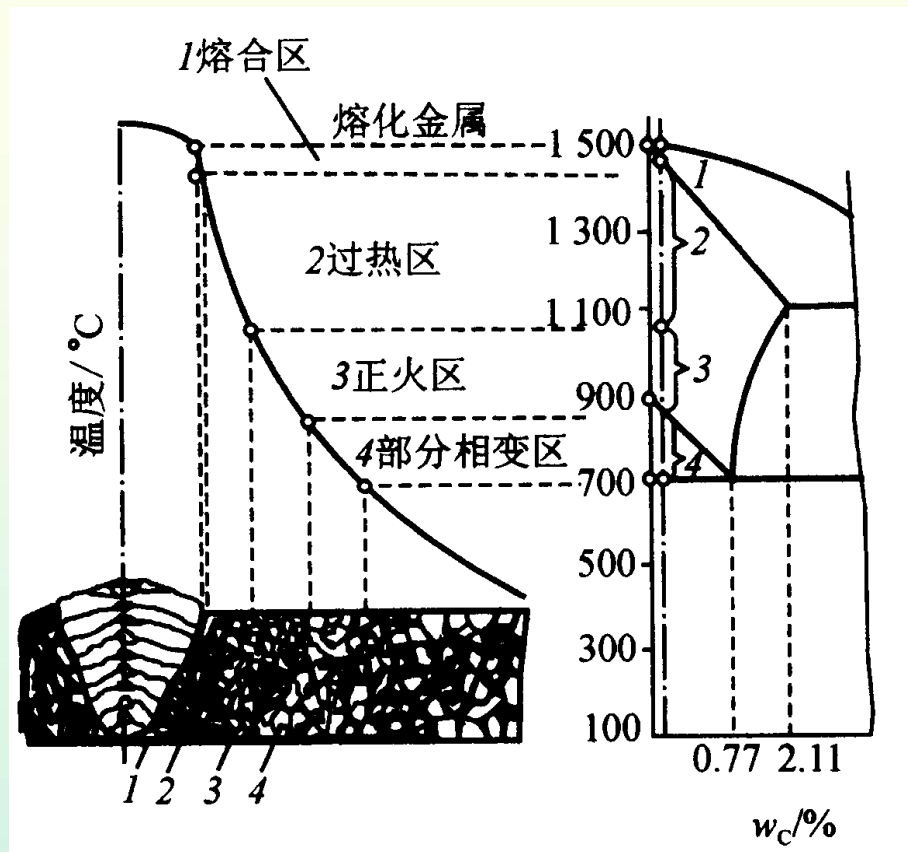
由于焊缝附近各点受热情况不同，热影响区可分为熔合区、过热区、正火区和部分相变区等。



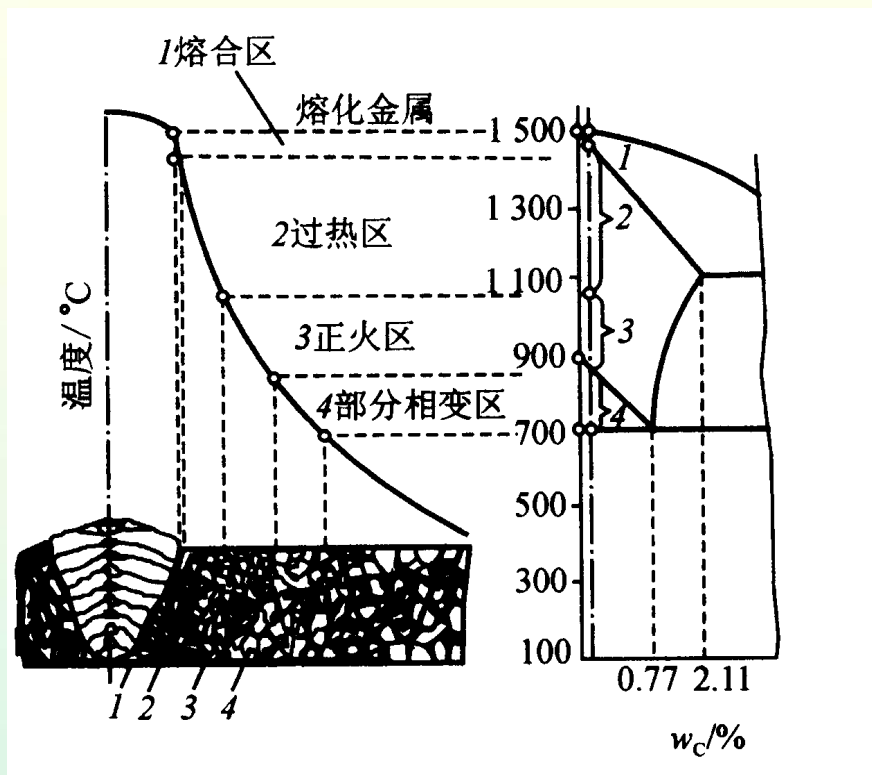
**熔合区** 是焊缝和基体金属的交界区。

此区温度处于固相线和液相线之间，由于焊接过程中母材部分熔化，所以也称为**半熔化区**。

熔化的金属凝固成铸态组织；未熔化金属因加热温度过高而成为过热粗晶。



在低碳钢焊接接头中，熔合区虽然很窄 (0.1 ~ 1 mm)，但因其强度、塑性和韧性都下降，而且此处接头断面变化，易引起应力集中，所以熔合区在很大程度上**决定着焊接接头的性能**。



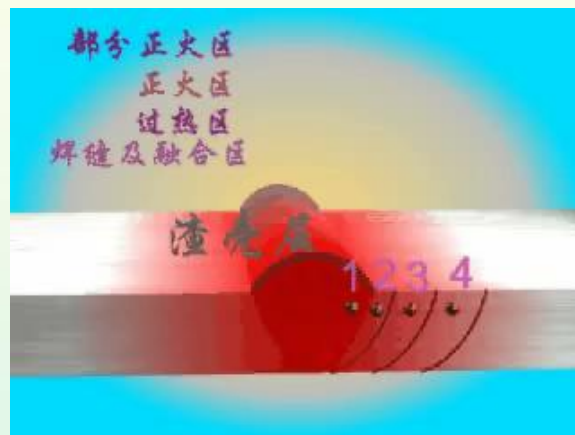
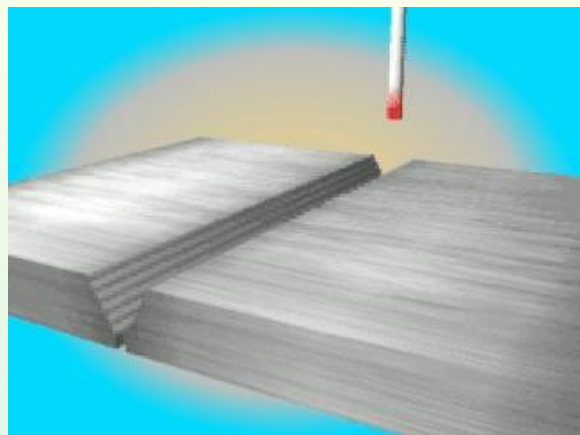
**过热区**——加热温度在  $Ac_3$  以上  $100\sim 200^\circ\text{C}$  至固相线温度区间。由于该区域内奥氏体晶粒急剧长大，形成过热组织，故塑性及韧性降低。

**正火区**——加热温度在  $Ac_1$  至  $Ac_3$  以上  $100\sim 200^\circ\text{C}$  区间。加热时发生金属重结晶，转变为细小的奥氏体晶粒。

**部分相变区**——在  $Ac_1\sim Ac_3$  温度区间。珠光体和部分铁素体发生重结晶，转变为细小的奥氏体晶粒。部分铁素体不发生相变，但其晶粒有长大趋势。



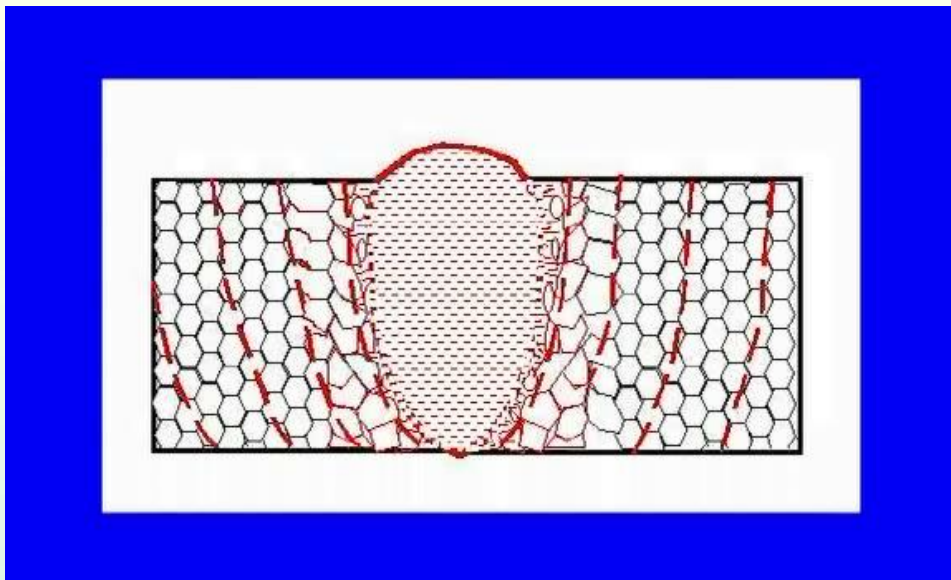
## 焊缝热影响区



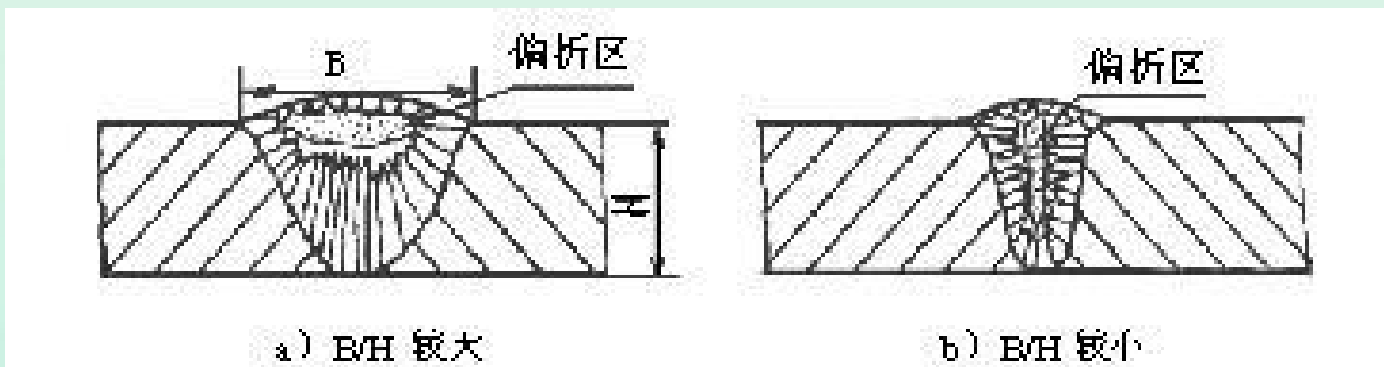
在低碳钢焊接接头中，熔合区很窄，但因强度、塑性和韧性都下降，而且此处接头断面变化，引起应力集中，在很大程度上决定焊接接头的性能。

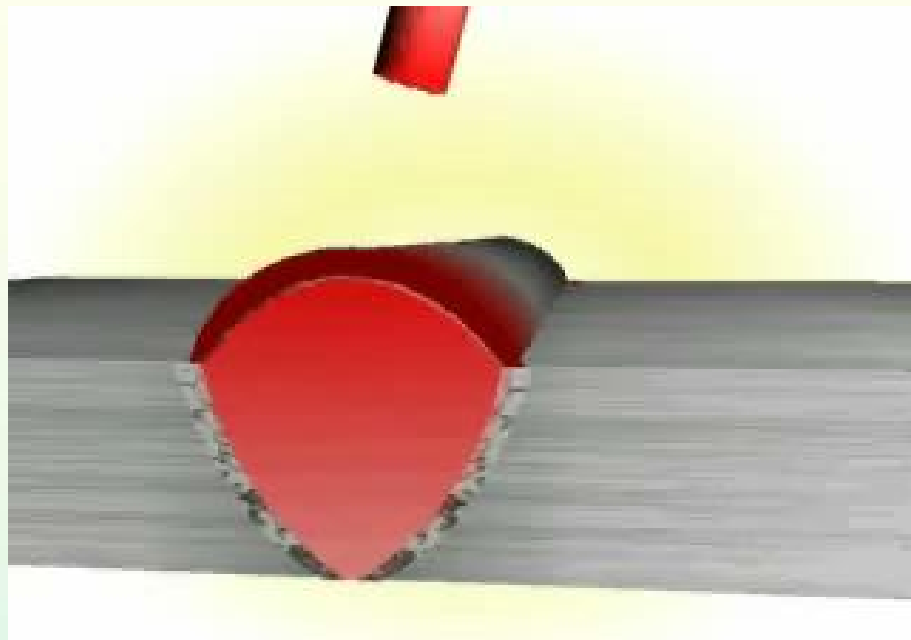
## 焊缝的组织 and 性能

热源移走后，熔池焊缝中的液体金属立刻开始冷却结晶，以垂直熔合线的方式向熔池中心生长为柱状树枝晶。



低熔点物质将会被推向焊缝最后结晶部位，形成成分偏析。





焊接热影响区的大小和组织性能变化的程度，决定于**焊接方法、焊接参数、接头形式和焊接后冷却速度**等因素。

同一焊接方法使用不同焊接参数时，热影响区的大小也不相同。在保证焊接质量的条件下，**增加焊接速度或减少焊接电流**都能减小焊接热影响区。

## 改善焊接热影响区组织和性能的方法

1、用焊条电弧焊或埋弧焊方法焊接一般低碳钢结构时，因热影响区较窄，危害性较小，焊后不进行处理即可使用。

2、对重要的碳钢构件、合金钢构件或用电渣焊焊接的构件，为消除热影响区的影响，一般采用**焊后正火处理**，使焊缝和焊接热影响区的组织转变成为均匀的细晶结构，以改善焊接接头的性能。

3、对焊后不能进行热处理的金属材料或构件，则只能在正确选择**焊接方法与焊接工艺**上来减少焊接热影响区的范围。

# 上次课内容的回顾

**熔焊的本质及特点：**小熔池熔炼与铸造、熔池存在时间短，温度高；冷却速度快

**熔化焊的三要素：**热源、熔池的保护、填充金属

**直流正接与直流反接**

**熔池的保护：**渣保护、气保护、渣-气联合保护

**电焊条：**组成与作用

**酸性药皮与碱性药皮两者的性质**

**电焊条的选用原则：**等强度原则

整个焊接接头由**焊缝区、熔合区、热影响区**构成。

由于焊缝附近各点受热情况不同，热影响区可分为**过热区、正火区和部分相变区**等。

焊接热影响区的大小和组织性能变化的程度，决定于**焊接方法、焊接参数、接头形式和焊接后冷却速度**等因素。

在保证焊接质量的条件下，**增加焊接速度或减少焊接电流**都能减小焊接热影响区。



## 13.4 焊接应力与变形

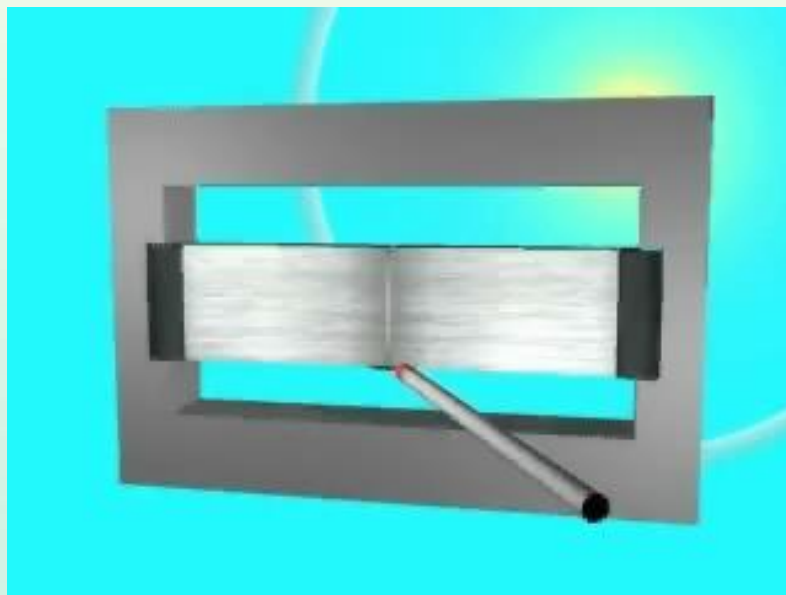
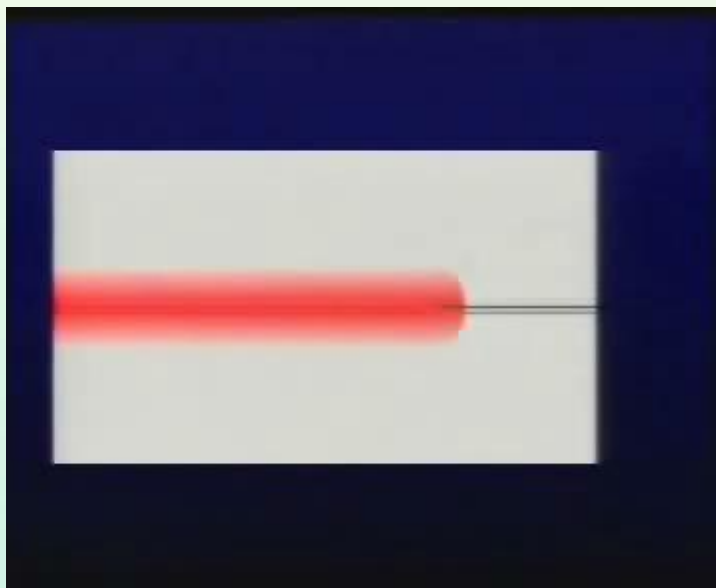
焊接过程是一个极不平衡的热循环过程，即焊缝及其相邻区金属都要由室温被加热到很高温度(焊缝金属已处于液态)，然后再快速冷却下来。

由于在这个热循环过程中，焊件各部分的温度不同，随后的冷却速度也各不相同，因而焊件各部位在热胀冷缩和塑性变形的影响下，必将产生内应力、变形或裂纹。



当焊缝及相邻区金属处于加热阶段时都会膨胀，但受到焊件冷金属的阻碍，不能自由伸长而受压，形成压应力，该压应力使处于塑性状态的金属产生压缩变形。

随后再冷却到室温时，其收缩又受到周边冷金属的阻碍，不能缩到自由收缩所达到的位置，因而产生残余拉应力（焊接应力）。



## 焊接变形与应力的危害

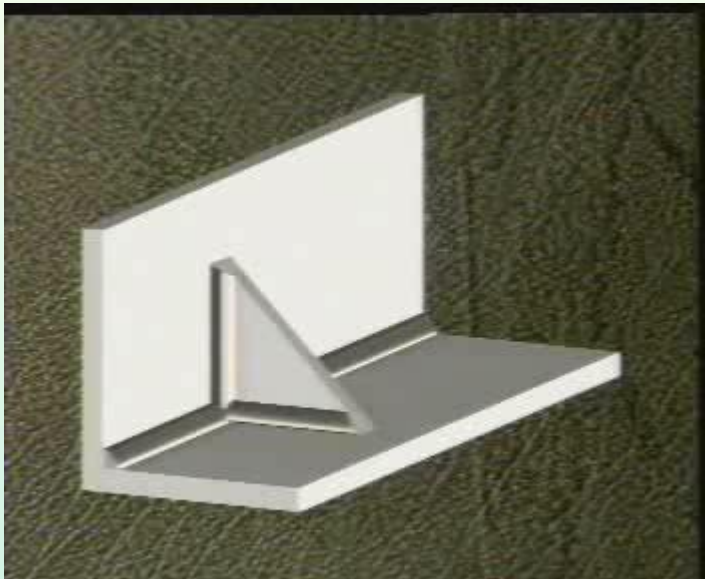
工件焊接后产生变形和应力对结构件的制造和使用会产生不利影响。

- 产生焊接变形，可能使焊接结构**尺寸不合要求**，**组装困难**，间隙大小不一致等，从而**影响焊件质量**。
- 焊接残余应力会增加工件工作时的内应力，**降低承载能力**；还会引起**裂纹**，甚至造成**脆断**，应力的存在会诱发**应力腐蚀裂纹**。
- 残余应力是一种不稳定状态，在一定条件下会衰减而产生一定的变形，使构件**尺寸不稳定**，所以减少和防止焊接变形和应力是十分必要的。

# 焊接应力的防止及消除

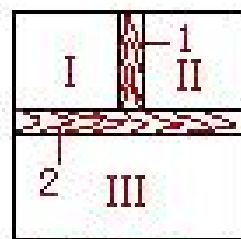
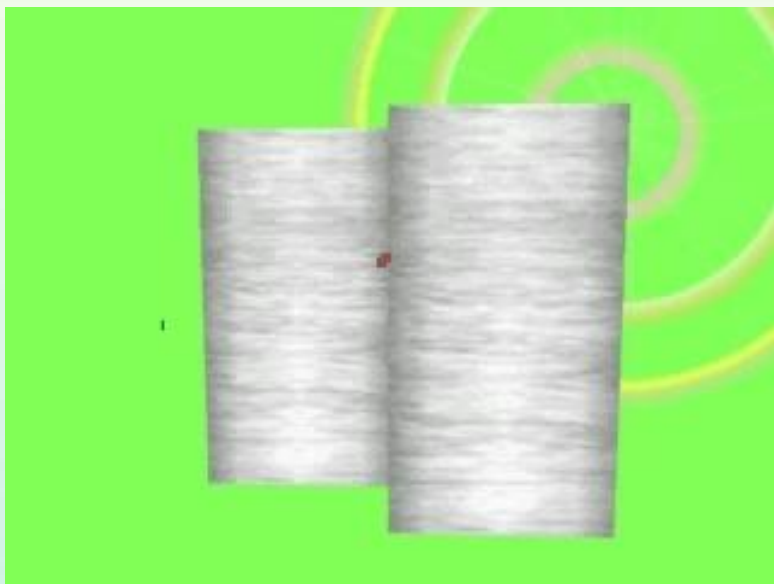
对于承受重载的重要结构件、压力容器等，焊接应力必须加以防止和消除。

1、在结构设计时，应选用塑性好的材料，要避免使焊缝密集交叉，避免使焊缝截面过大和焊缝过长。

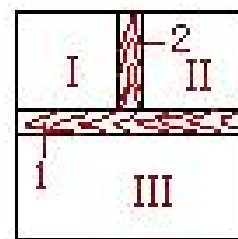


2、采用合理的焊接顺序，使焊缝能够自由地收缩，以减少应力。

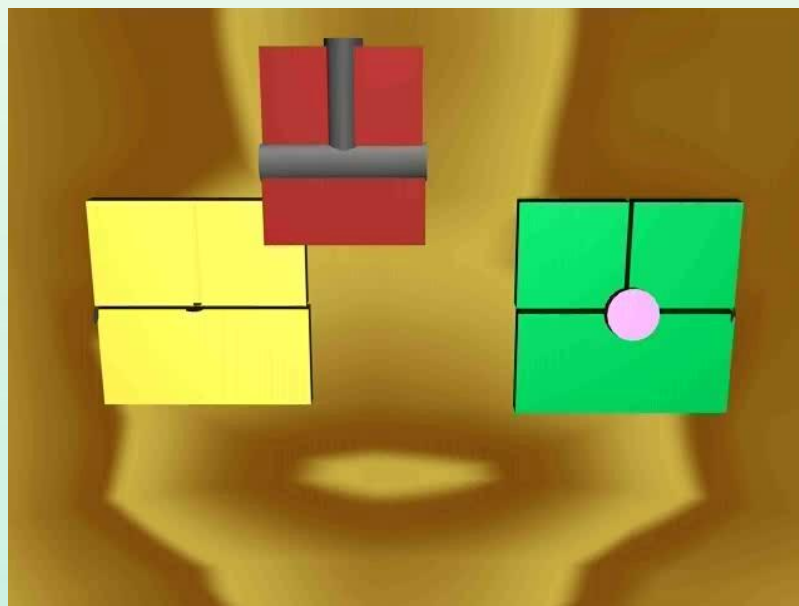
图b因先焊焊缝1导致对焊缝2的拘束度增加，而增大残余应力。



a) 焊接应力小



b) 焊接应力大





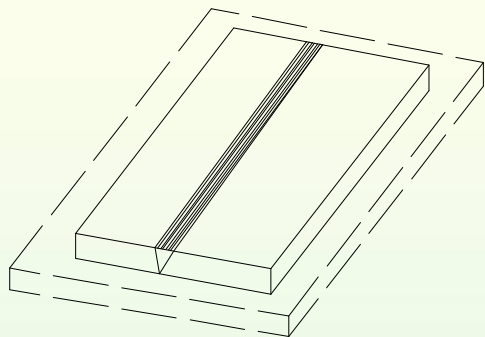
3、焊前对焊件预热，可以减弱焊件各部位间的温差，从而显著减小焊接应力。

4、当焊缝还处在较高温度时，锤击焊缝使金属伸长，也能减少焊接残余应力。

5、当需较彻底地清除焊接应力时，可采用焊后去应力退火方法。

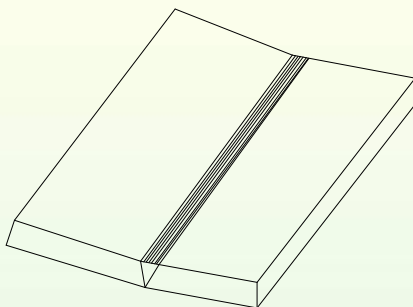


焊接应力的存在，会引起焊件的变形，其类型有：**收缩变形、角变形、弯曲变形、波浪变形、扭曲变形**等。



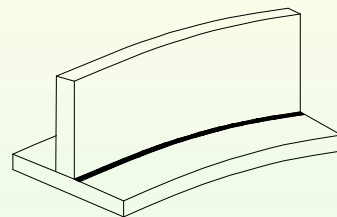
a) 收缩变形

**小型焊件**



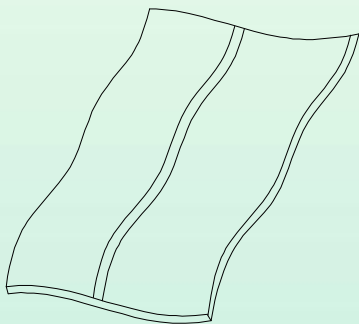
b) 角变形

**坡口横截面上下尺寸相差较大**



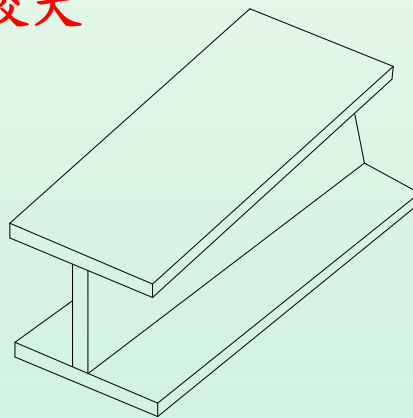
c) 弯曲变形

**焊缝分布不均匀**



d) 波浪变形

**薄板焊件**



e) 扭曲变形

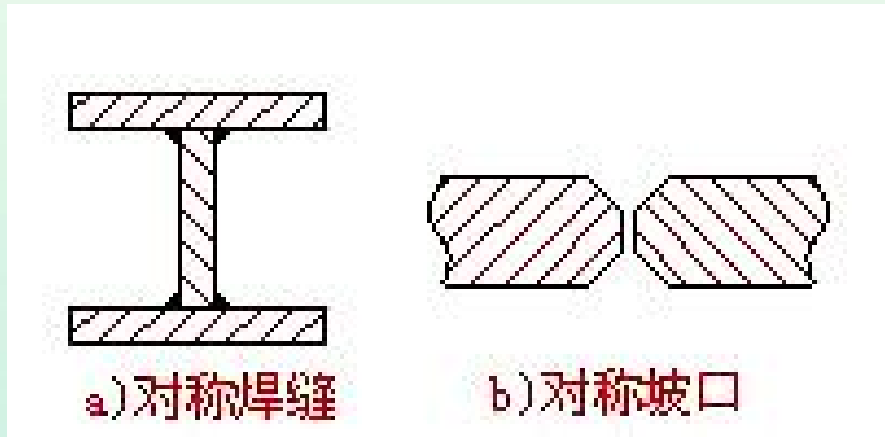
**多焊缝、长焊缝**

# 焊接变形的防止及消除

焊件产生变形主要是由焊接应力所引起，预防焊接应力的措施对防止焊接变形是有效的。

## 1、结构设计

设计焊件结构时，采用对称结构或大刚度结构、焊缝对称分布都可减小或不出现焊接变形。

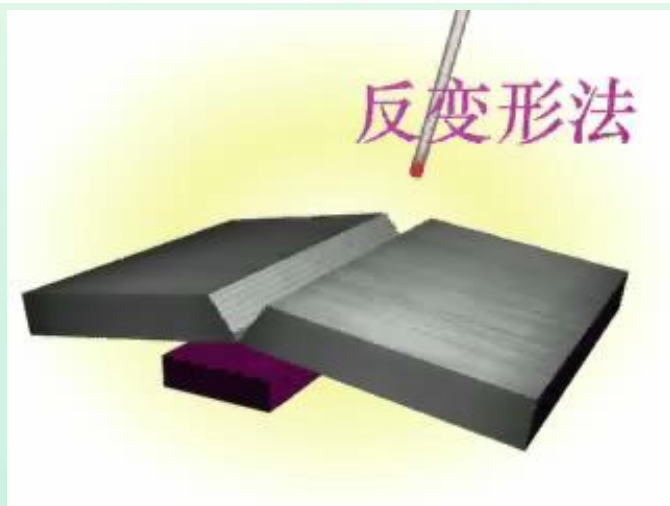
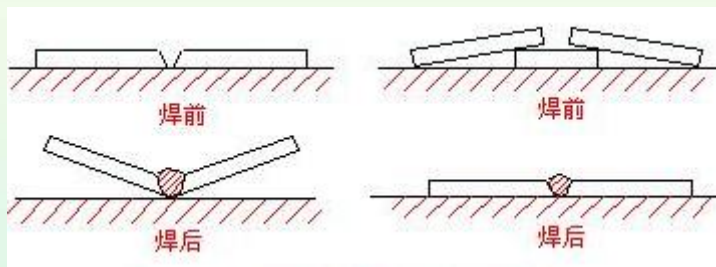


## 2、焊接工艺

在结构设计合理的前提下，可采取如下工艺措施来达到和减小变形的目的。

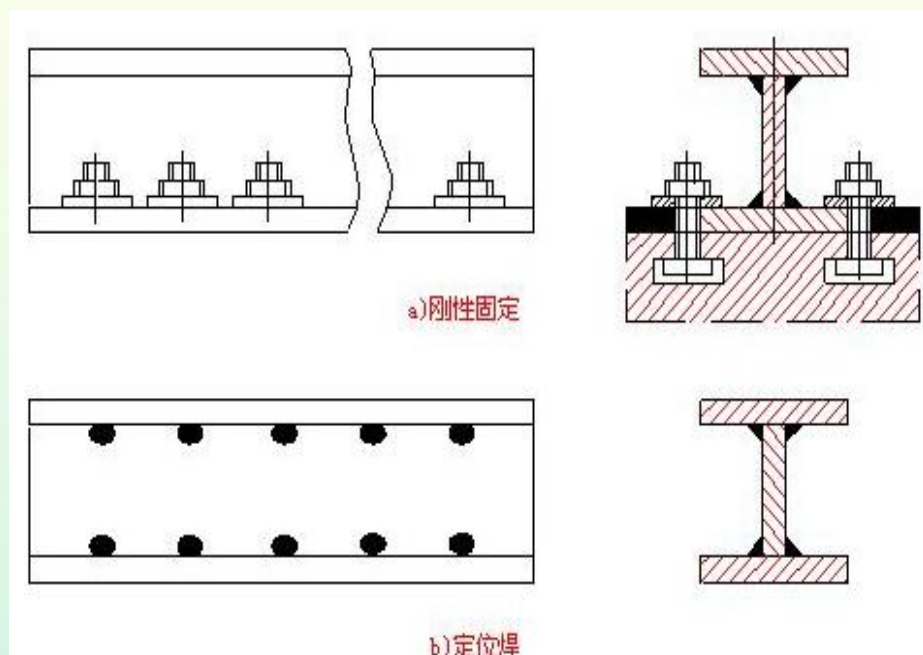
### (1) 反变形法

预测焊后可能出现的变形大小和方向，焊前将工件预先反方向变形，焊后可抵消发生的焊接变形。



## (2) 刚性固定法

利用焊前装配使工件的相对位置固定，用夹具强制性约束焊接变形，适用于塑性好的焊件。

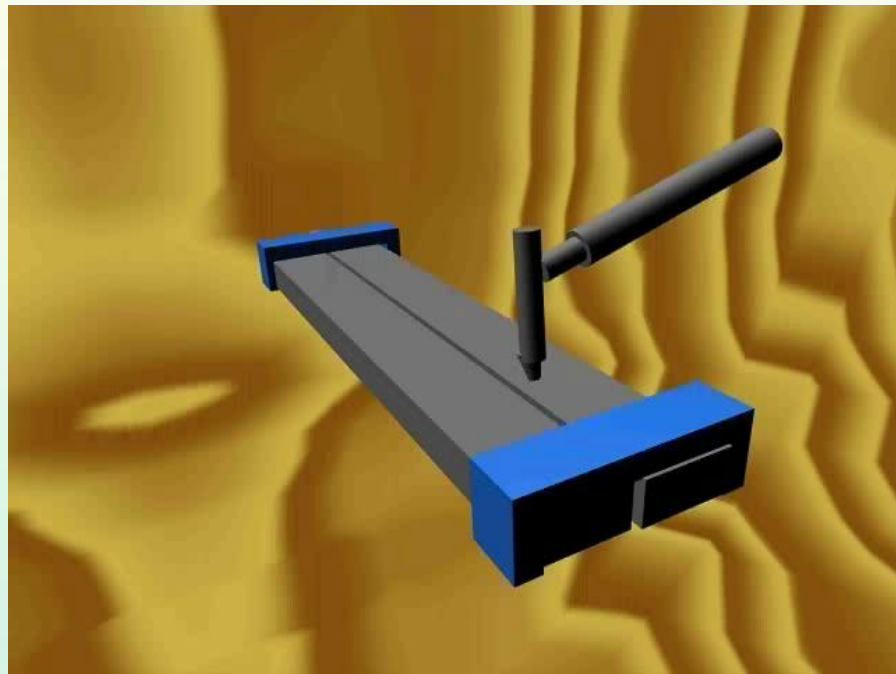


采用定位焊组装也可防止焊接变形。

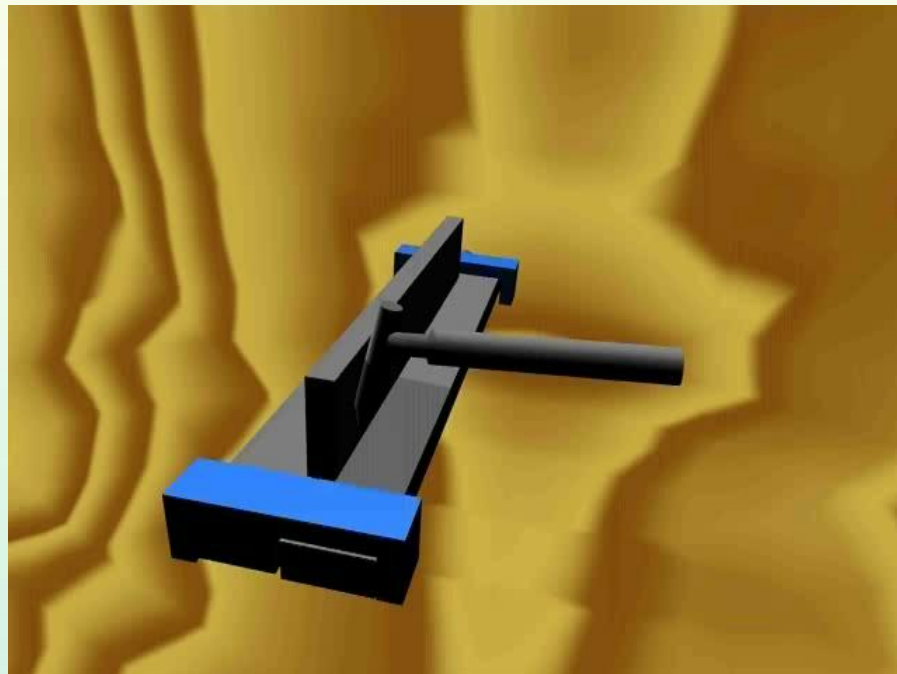
刚性固定法可以限制产生焊接变形，但这样会产生较大的焊接应力，所以此法不适合于焊接淬硬性较大的钢构件和铸铁件。



## 防止角变形

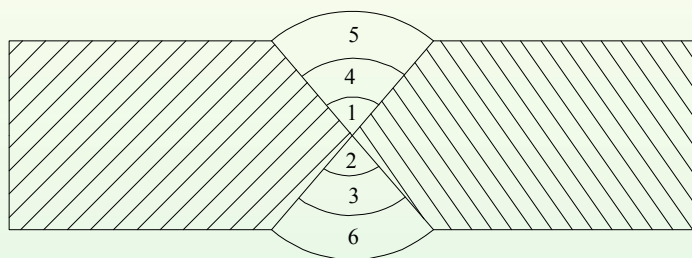


## 防止扭曲变形

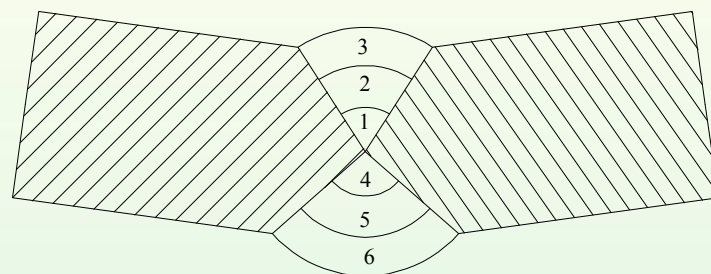


### (3) 合理安排焊接次序

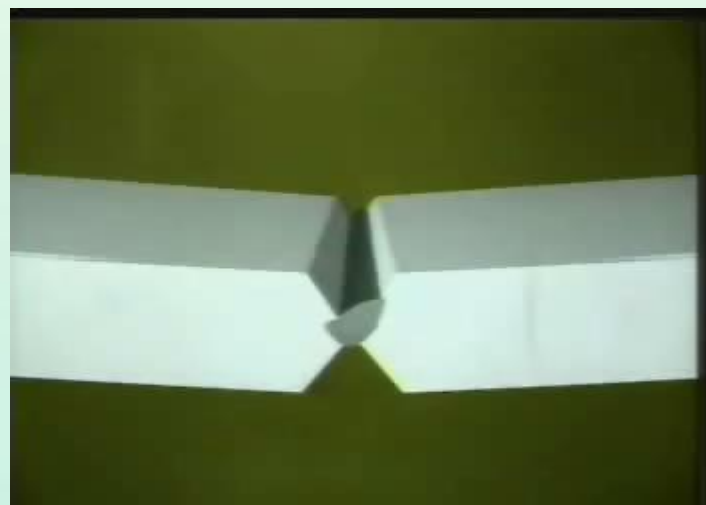
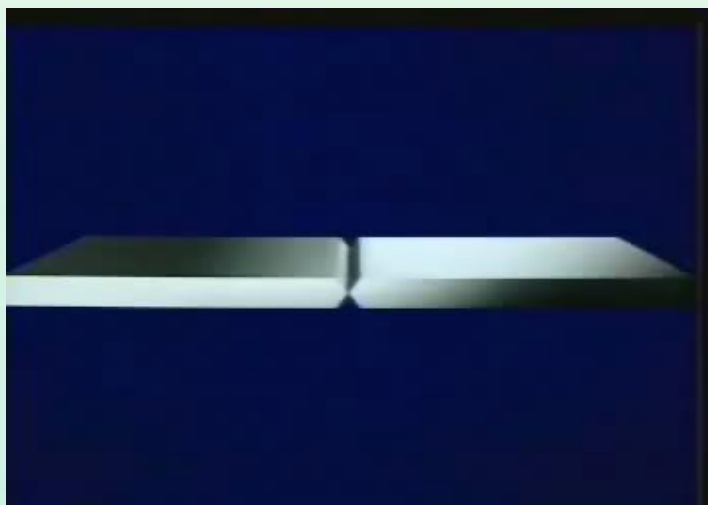
正确选择焊接参数和焊接次序，对减小焊接变形也很重要，这样可使温度分布更加均衡，开始焊接时产生的微量变形，可被后来焊接部位的变形所抵消。



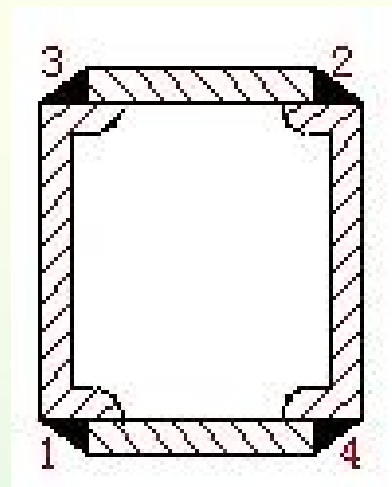
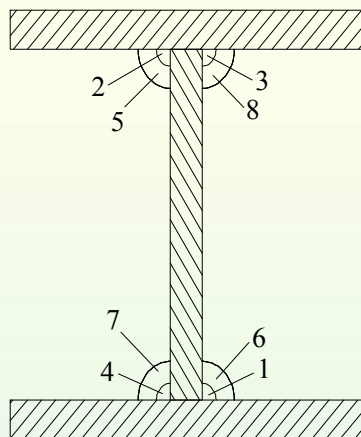
a)合理



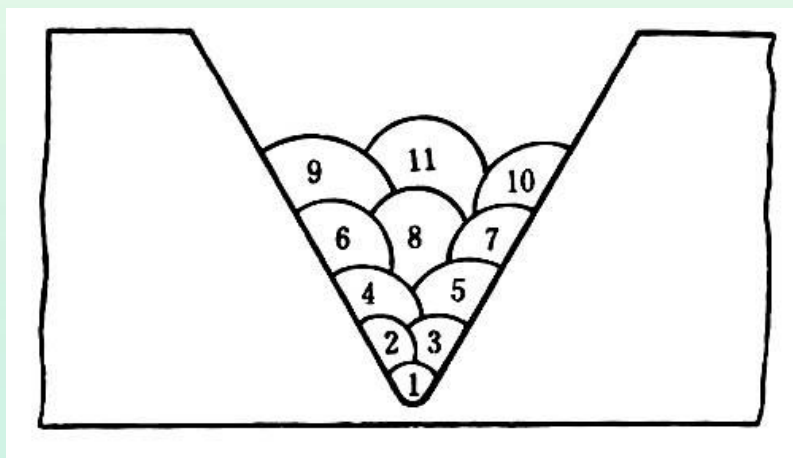
b)不合理



## 采用对称焊和分段倒退焊



## 采用多层多道焊，能减少焊接变形



## (4) 焊前预热和焊后缓冷

这是最常用、最有效的方法，其目的是减小焊缝区与其他部分的温差，使工件较均匀地冷却，减小焊接应力和变形。

通常在焊前将工件预热到 $300^{\circ}\text{C}$ 以上再进行焊接，焊后缓冷。

## (5) 焊后热处理

对重要结构件焊后应进行去应力退火，以降低应力，减小变形，提高承载能力。

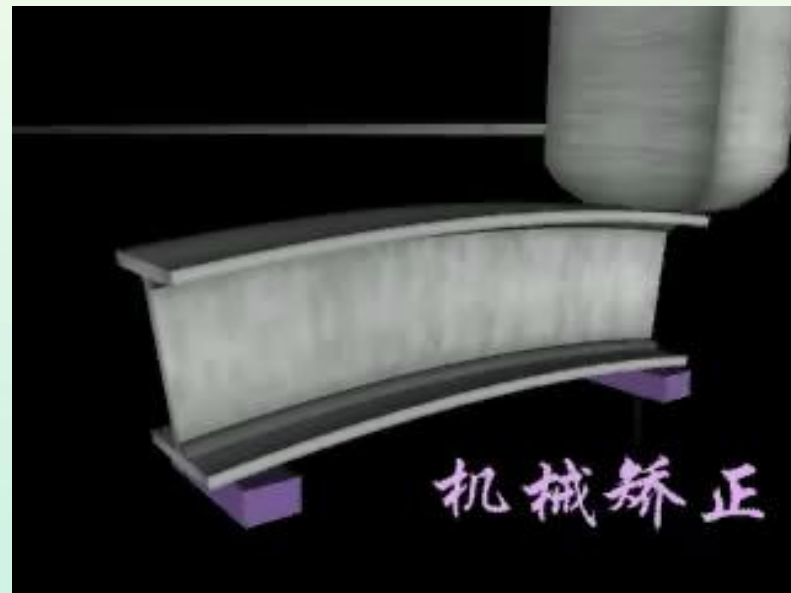
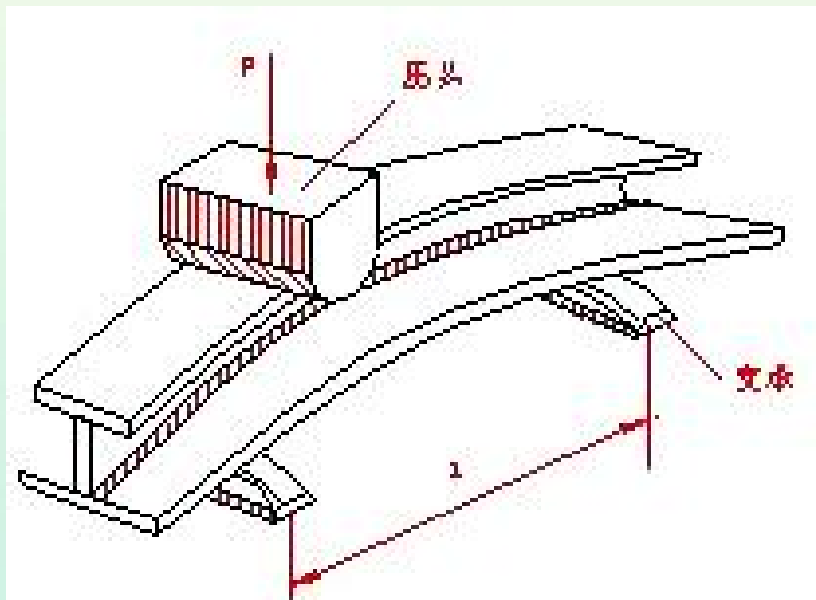
小型工件可整体退火，大型工件可进行局部退火。

### 3、焊后矫形处理

当焊后的变形超出允许值时，必须进行焊后矫形。常用的矫形方法有机械矫形和火焰矫形。

#### (1) 机械矫形

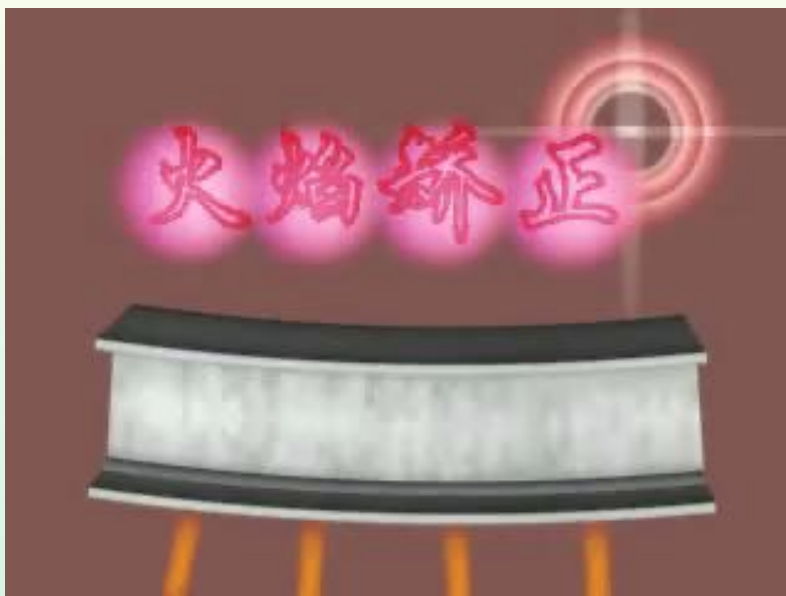
机械矫形可利用机械外力所产生的变形，抵消焊接变形并降低内应力。对塑性差的材料不宜采用机械矫形。



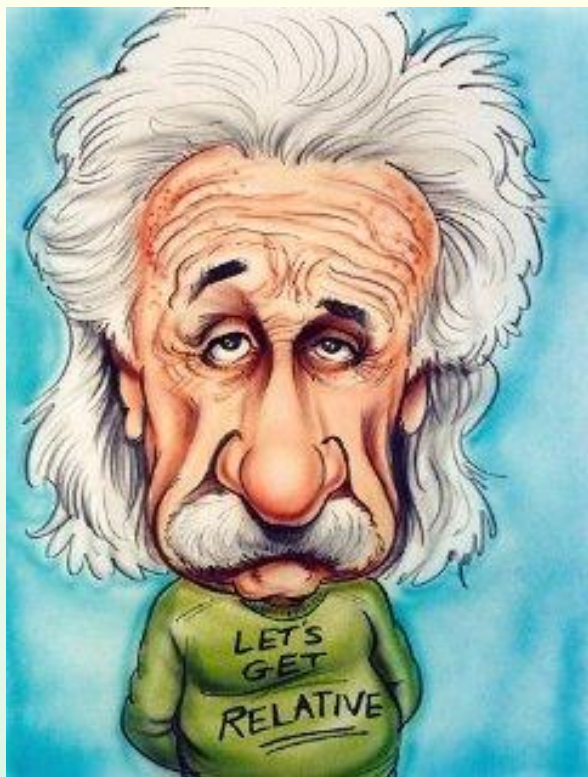


## (2) 火焰矫形

采用氧乙炔火焰在被焊工件的适当部位加热，利用冷却收缩产生的新应力造成新变形，来克服和抵消原变形。



对易淬硬材料和脆性材料不宜采用火焰矫形。



\* 减少焊接应力考虑，拼焊如下图所示的钢板时，应怎样确定焊接顺序？试在图中标出，并说明理由。

