



北京科技大学

University of Science and Technology Beijing

焊接原理与工艺

张 华

Email: zhwhq@163.com

Tel: 6233 4859

材料先进连接技术研究室

Lab. of Advanced Joining Technology for Materials

1.2 焊接电弧特性

电弧特性是指电弧在导电行为方面表现出的一些特征，其中的电弧电特性与电弧热平衡、电弧稳定性等有很深的联系，是很重要的事项。

- ☑焊接电弧静特性
- ☑焊接电弧动特性
- 阴极斑点和阳极斑点
- 电弧的阴极清理作用
- 最小电压原理
- 电弧的挺直性与磁偏吹

3. 阴极斑点和阳极斑点

电弧斑点是电弧燃烧中产生的一种现象，其形成主要与电极及熔池的区域导电性能有关

1) 阴极斑点

根据阴极材料性质及所处状态的不同，在某些场合下，电弧导电通道将主要集中在一个较小的区域，该区域电流密度、温度、发光强度远高于其他区域，称为阴极斑点。

因具体条件的不同电流流入阴极表面的情况可能有三种：

第一种情况是在阴极表面上电流导入的面积与弧柱的断面相近，在阴极上没有明显的收缩；

第二种情况是在阴极上的电流导入面积比弧柱的断面显著减小，在阴极上有显著的收缩；

第三种情况是阴极上的电流是通过许多微小的斑点导入的，这些斑点上的电流密度很高，成为阴极斑点。

① 当采用熔点较高的材料做阴极（C、W），并用较大的电流时

阴极温度很高，仅依靠其热发射就可以为弧柱提供足够的电子，弧柱与阴极相接外不产生收缩，阳极上的电流密度与弧柱的相近。
阴极端部的加热面积很大、均匀，不形成阴极斑点

② 当电流较小、阴极（C、W）温度较低

阴极温度降低，热发射不占主要地位，靠电场发射或等离子流型
伴随导电区域的自动收缩

③ 阴极材料熔点低、沸点低，导热性能很强（冷阴极型）

即使阴极温度达到材料的沸点还是蒸发，此温度也不足以产生充足的电子来维持电弧的稳定燃烧，阴极将进一步自动缩小其导电面积
热发射不占主要地位，面积缩小提高电流密度和产生足够的强的电场发射
此时阴极将形成面积更小，电流密度更大的斑点来导通电流，为阴极斑点

通常存在三种情况：

非熔化极材料做阴极；

低熔点材料做阴极（焊丝）；

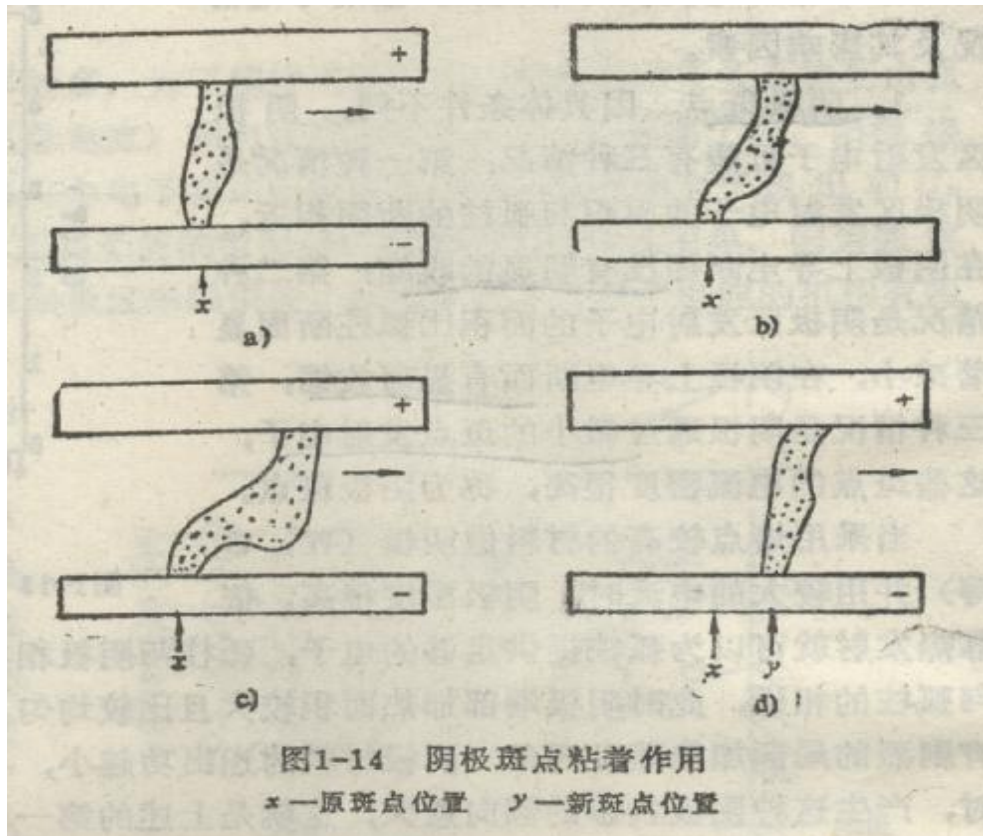
惰性气体保护下母材做阴极

一是非熔化极材料作为阴极、惰性气体保护时，在电流值较小的情况下出现阴极斑点。多说是由于电极直径较大、电极尖端角度接近于钝角、电极表面不平滑或存在有污染物，电子发射面积减小。

二是低熔点材料作为阴极（焊丝）时，冷阴极，使用氧化性气氛作为保护气，保护气对电弧有强烈的冷却作用，电场强度高，电弧趋于集中。

三是惰性气体保护下母材作为阴极，受母材尺寸大、导热量大等条件的影响，表面上更易形成阴极斑点。

这些分离的斑点在阴极斑点区内以很高的速度跳动，自动选择最有利于部分电场发射和部分热发射条件的点，电弧通过这些点进入阴极时消耗最低的能量。形成斑点压力，阻碍熔点下落



阴极斑点的形成要求一定的条件，首先该点应具有可能发射电子的条件，其次是电弧通过该点时弧柱的能量消耗较小

具备上述的条件点产生新的阴极斑点，失去上述条件的点则阴极斑点自动消失

这也是阴极斑点高速跳动的原因

阴极斑点有自动跳向温度高、热发射强物质上的性能，如果金属表面有低逸出功的氧化膜存在，阴极斑点会自动寻找氧化膜的倾向。

2) 阳极斑点

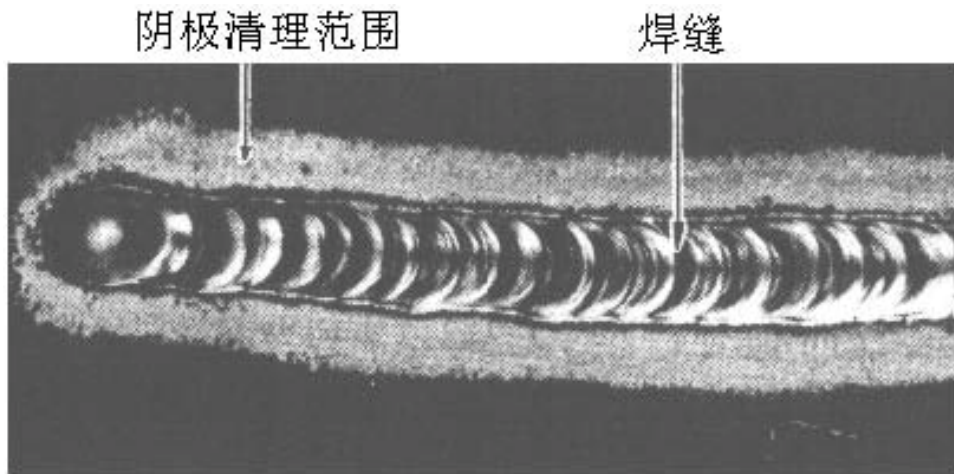
当采用低熔点材料做阳极，且电流较小，阳极表面个别点有熔化和蒸发时，该处更容易产生热电离生成正离子流，电子流更容易从这里进入阳极，而形成阳极斑点。

由于有金属蒸气的蒸发，阳极斑点也有斑点压力，但是由于电流密度比阴极小，所以斑点压力也小。并且也象阴极斑点一样有“粘着”作用。

熔化极焊接焊丝接阳极时，阻止熔滴过渡的作用力较小，而焊丝接阴极时阻力较大。这是MIG焊时多采用反接的主要原因之一。

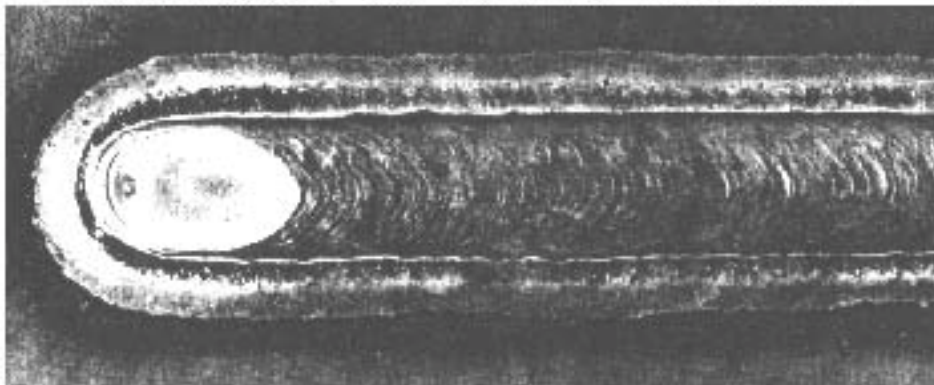
由于阳极斑点的形成需要金属的蒸发，而大多数金属氧化物的熔点和沸点都高于纯金属，因此阳极斑点与阴极斑点相反，有自动寻找纯金属表面而避开氧化膜的倾向。因此，铝合金氩弧焊当工件为阳极时没有去处氧化膜的作用。

4. 电弧的阴极清理作用



a) TIG焊

MIG焊接, 焊丝接正, 250A, 30cm/min, Ar



b) MIG焊

铝材料焊接中的氧化膜清理

惰性气体中的电弧在以金属板（丝）作为阴极的情况下，阴极斑点在金属板（丝）上扫动，除去金属表面上的氧化膜，使其露出清洁金属面，称作电弧的阴极清理作用或氧化膜破碎作用。

- ① 阴极压降高，正离子冲击
- ② 阴极斑点

5. 最小电压原理

在给定电流和周围条件的情况下，电弧稳定燃烧时，其导电区的半径（或温度）应使电弧电场强度具有最小的数值。就是说电弧具有保持最小能量消耗的特性。

如果电弧断面大于或小于自动确定的断面，都会引起 E 增大，即散失能量要增大。

利用最小电压原理可以解释电弧过程中的一些现象。例如，电弧被周围介质强烈冷却时，要求电弧产生更多的热量来补偿。

最小电压原理也决定着电弧其他区域（阴极区、阳极区）的电场强度 E 、温度及导电断面的自行调节作用，以达到在某一定条件下向外界散失热量最小。

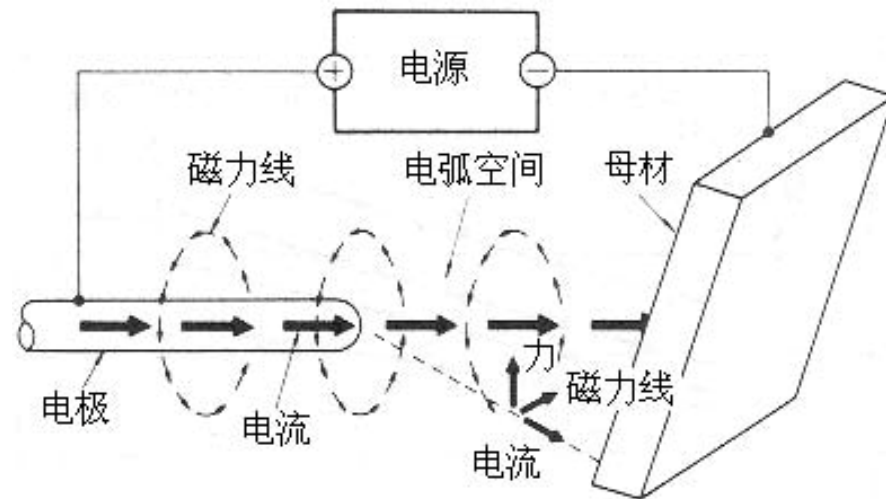
6. 电弧的挺直性与磁偏吹

1) 电弧的挺直性



(钨电极, 直径2.4mm, 正极性, 150A)

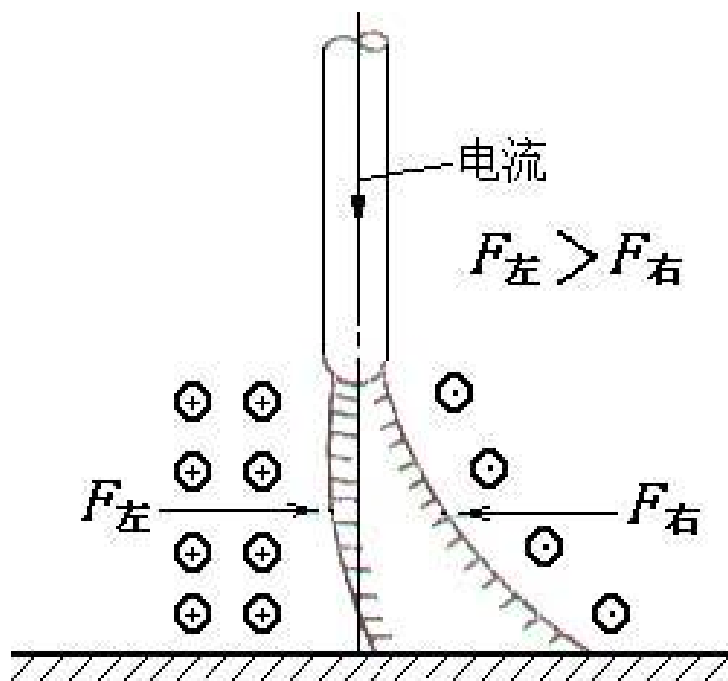
电弧挺直性



电弧挺直性产生原因

电弧挺直性指电弧作为柔性导体具有抵抗外界干扰、力求保持焊接电流沿电极轴线方向流动的性能。当电极产生倾斜后，电弧的指向亦随之倾斜，电弧中心线沿着电极的倾斜方向伸展。

2) 电弧的磁偏吹

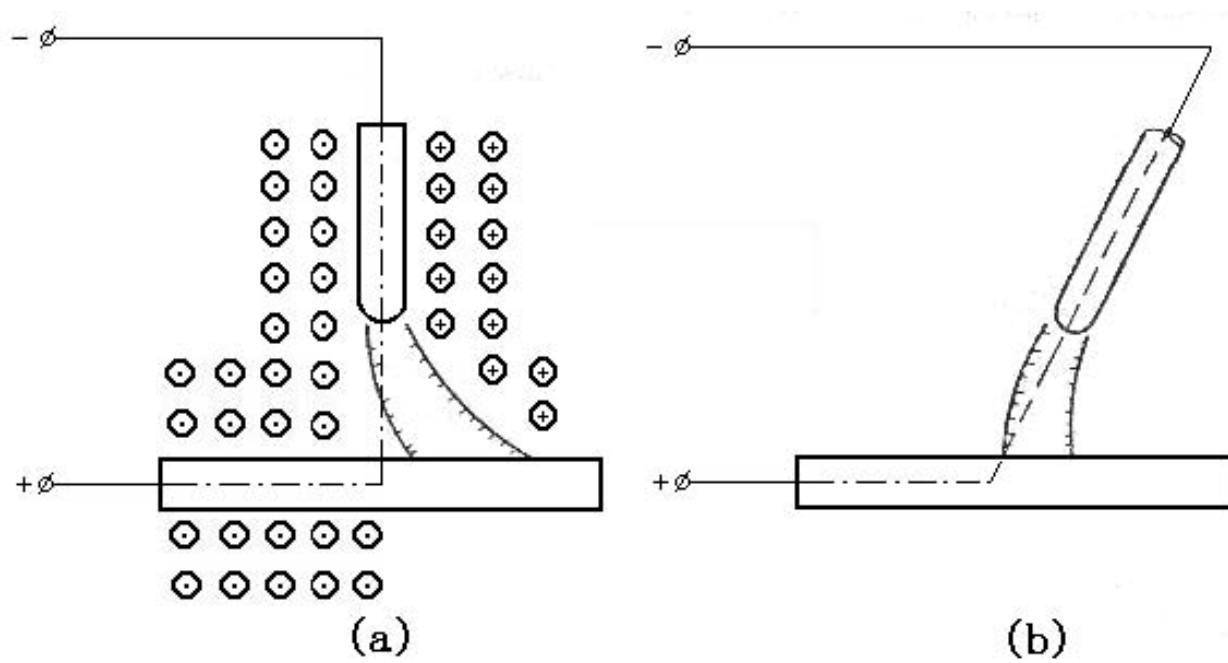


电弧磁偏吹起因示意图

电弧的挺直性是由于电弧中流动着的电流受到其自身磁场的作用而表现出现象。只有电弧周围的磁场是均匀的、磁力线分布相对电弧轴线是对称的，电弧才能保持轴向对称。

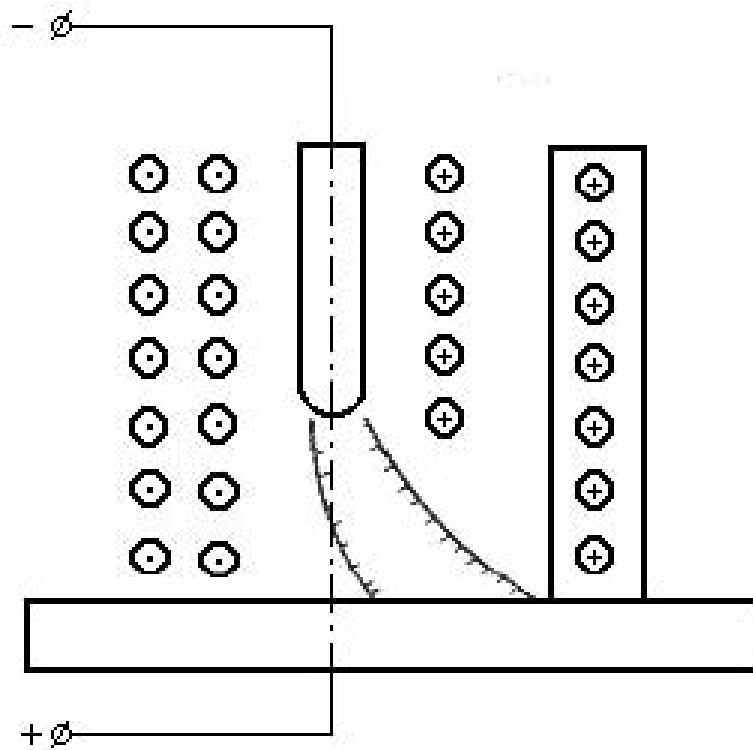
如果某种原因使磁力线分布的均匀性受到破坏，使电弧中的电荷受力不均匀，就会使电弧偏向一侧。

① 导线接线位置引起的磁偏吹



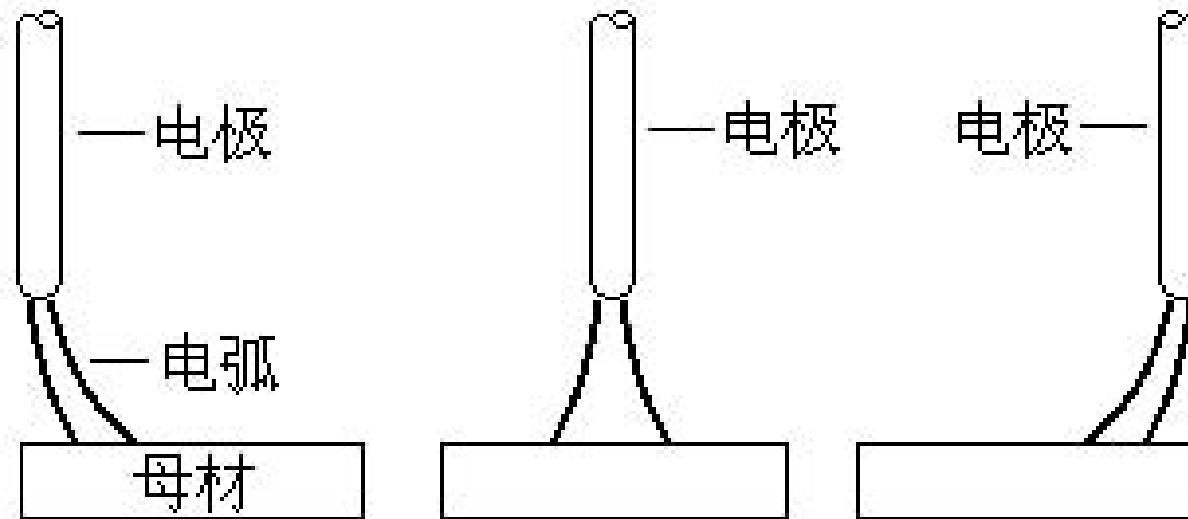
地线接线位置产生的磁偏吹

② 电弧附近的铁磁性物质引起的磁偏吹



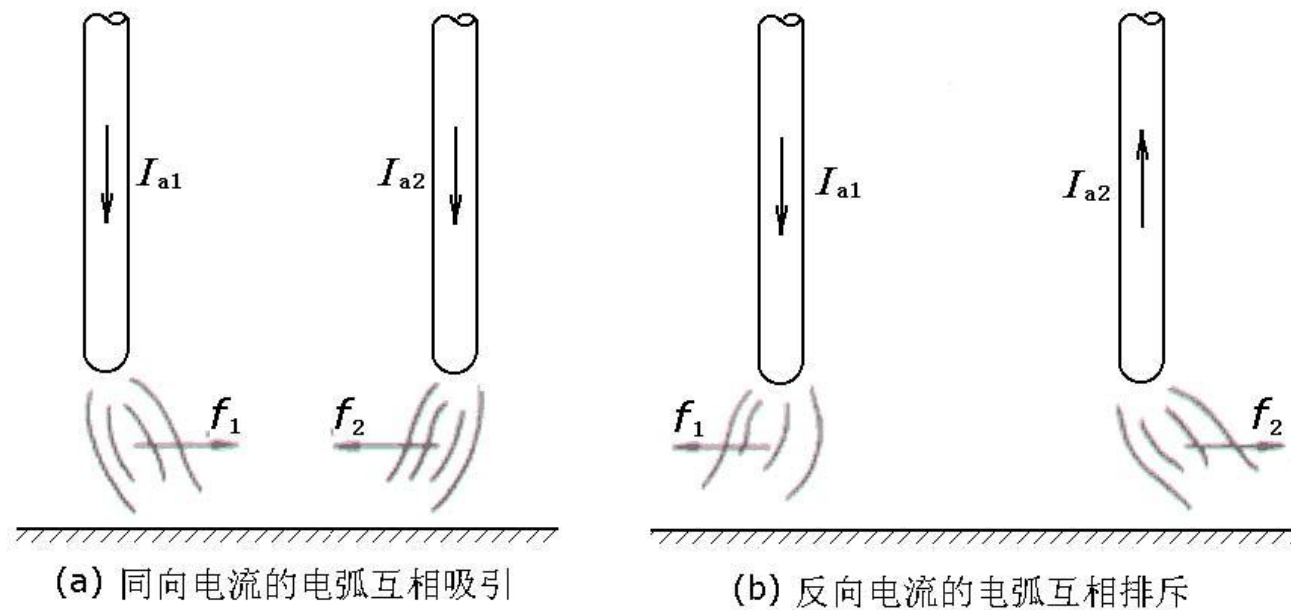
电弧一侧铁磁性物体引起的磁偏吹

③ 电弧处于工件端部时产生的磁偏吹



电弧在工件端部产生的磁偏吹

④ 平行电弧间的磁偏吹



平行电弧间产生的磁偏吹

消除和减少磁偏吹的方法

- 采用较短弧长进行焊接，电弧越短磁偏吹越小
- 对工件采取分布式接地的办法，比如两侧接地或多点接地
- 操作中调整焊枪或焊条角度
- 避免铁磁性物质的影响
- 考虑使用脉冲焊或高频电弧焊
- 考虑使用交流焊接

1.3 电弧焊中的保护气

电弧焊中的保护气有几个方面的作用：

向电弧空间提供气体介质；

保护作用，保护电弧、保护电极、保护被焊件受到大气的侵蚀

- 保护气种类与纯度
- 保护气的分解及在金属中的溶解
- 混合气体的选择及作用
- 保护气气流与保护效果

1. 保护气体种类与纯度

保护气的种类和纯度除对电弧行为、焊接过程的稳定性有影响外，对焊接区的冶金性质、焊缝的形成、气孔等缺陷的产生也有很大的影响。

普遍使用的焊接保护气

焊接方法	氩气 (Ar)	混合气 (Ar-O ₂ 或Ar-CO ₂)	二氧化碳气 (CO ₂)
短路电弧焊	×	○	◎
潜弧电弧焊	×	△	◎
喷射电弧焊	◎	○	×
脉冲电弧焊	◎	○	×
大电流电弧焊	◎	○	△

◎最为使用， ○可以使用， △不太使用， ×不能使用

保护气体及混合气体的选择主要根据焊接金属的材质和焊接厚度确定

各种金属焊接中使用的保护气种类

母材性质	保护气种类
普通钢	CO₂, CO₂+ (5~10) %O₂, Ar+ (10~50) %CO₂
低合金钢	Ar+ (10~50) %CO₂, Ar+ (1~5) %O₂
高合金钢	Ar, Ar+ (1~5) %CO₂, Ar+ (1~2) %O₂
不锈钢	Ar+ (1~5) %O₂, Ar+ (30~50) %He
铝合金	Ar, Ar+ (50~80) %He
铜合金	Ar, Ar+ (50~80) %He
钛合金	Ar, Ar+ (10~30) %He
镁合金	Ar
镍合金	Ar

混合气体事先混合好。气瓶中的标准见下两表：

二氧化碳气体的纯度

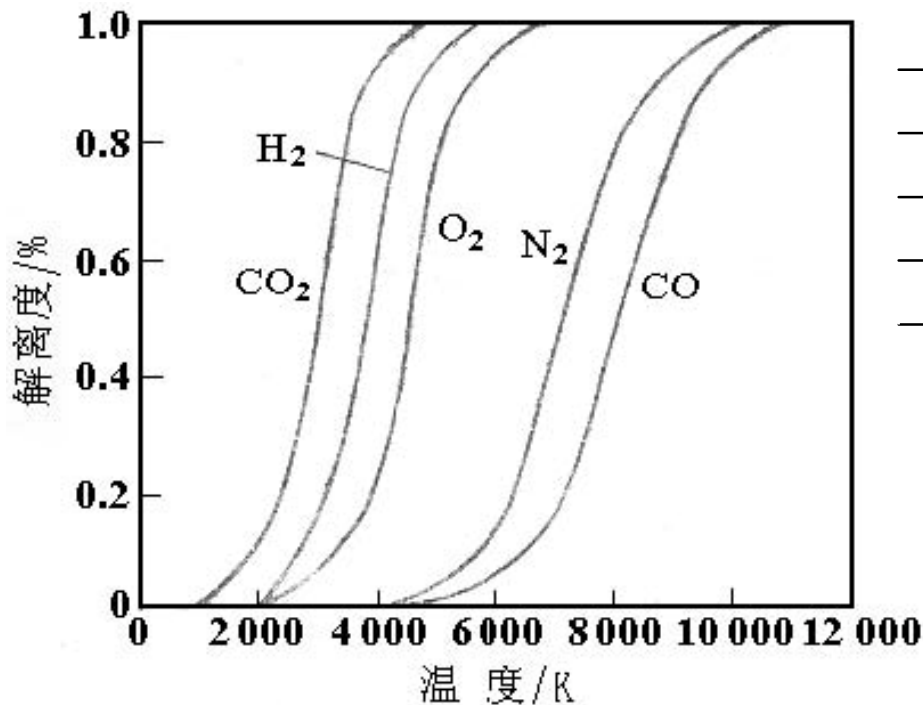
种类	CO ₂ （体积分数%）	水分（体积分数%）	臭氧
第1种	≥99.0	—	无
第2种	≥99.5	<0.05	无
第3种	≥99.5	<0.005	无

焊接用氩气的纯度

纯度（体积分数%）	>99.9
氧气（体积分数%）	<0.002
氢气（体积分数%）	<0.01
水分（质量浓度mg/l）	<0.02
氮气（体积分数%）	<0.1

2. 保护气的分解及在金属中的溶解

1) 保护气的分解



分子气体解离度与温度的关系

电弧中常见分子气体的解离能

解离式	解离能 /eV	解离式	解离能 /eV
$H_2 \rightarrow H+H$	4.4	$NO \rightarrow N+O$	6.1
$N_2 \rightarrow N+N$	9.1	$CO \rightarrow C+O$	10.0
$O_2 \rightarrow O+O$	5.1	$CO_2 \rightarrow CO+O$	5.5
$H_2O \rightarrow OH+H$	4.7		

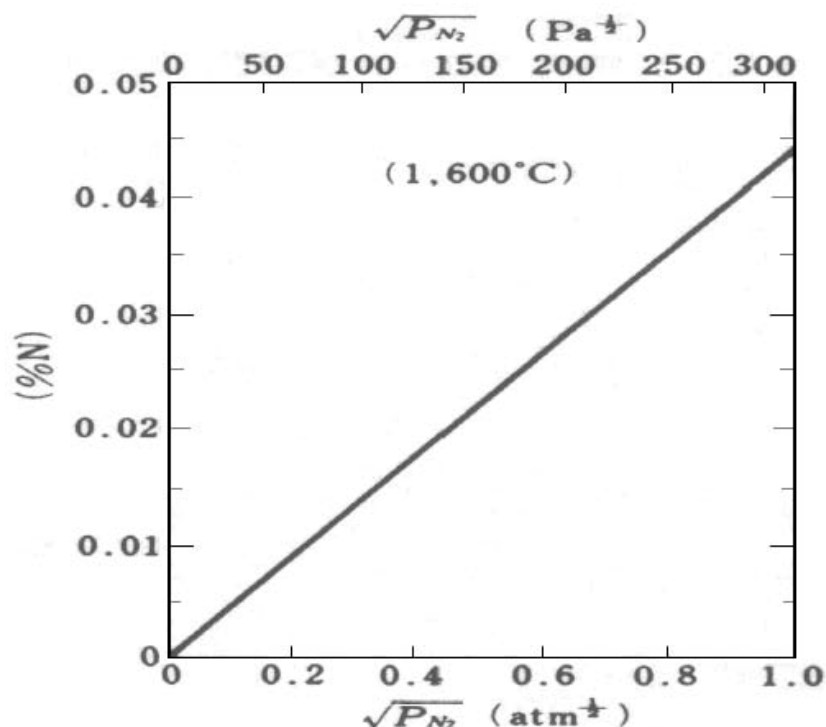
气体解离是吸热反应，即对电弧有冷却作用。比如在氩气中混入多原子分子气体时，相同的电弧长度下，电弧电压和电弧温度要比纯氩中的电弧电压和电弧温度高，电弧更为收缩。

2) 气体在金属中的溶解

溶解的途径有两种：即溶解到液体中的气体以与气相中相同和不同的状态存在

第一种情况：溶解的气体在水中仍然为分子状态。能溶解的气体的浓度与气相中气体的分压成比例。

第二种情况：比如氮气溶解到钢水中，是通过界面上的反应以原子形态N溶解到钢水中。钢水中氮元素的含量与气相中氮原子分压的平方根成比例。

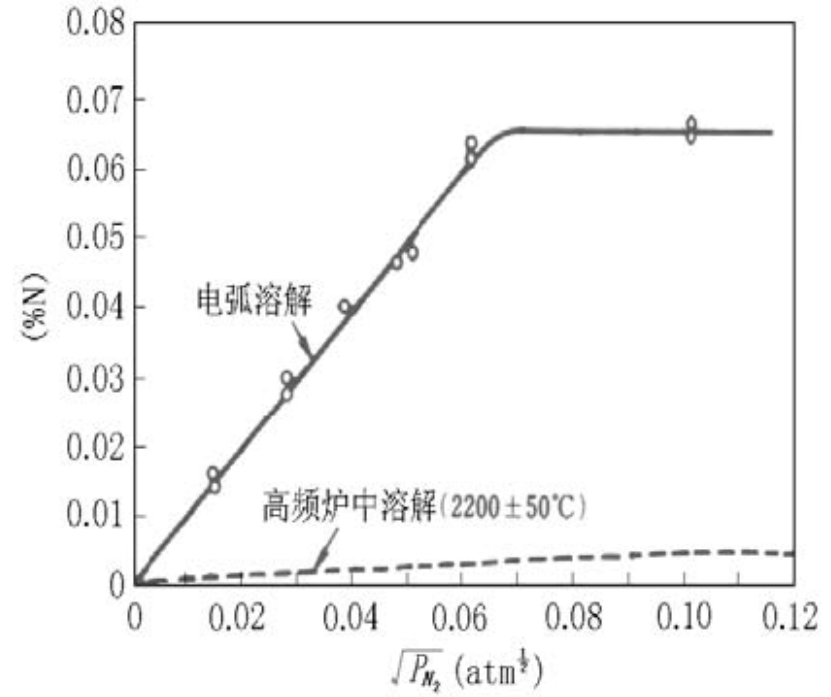


液态铁水中氮的含量与气相中氮的分压的关系

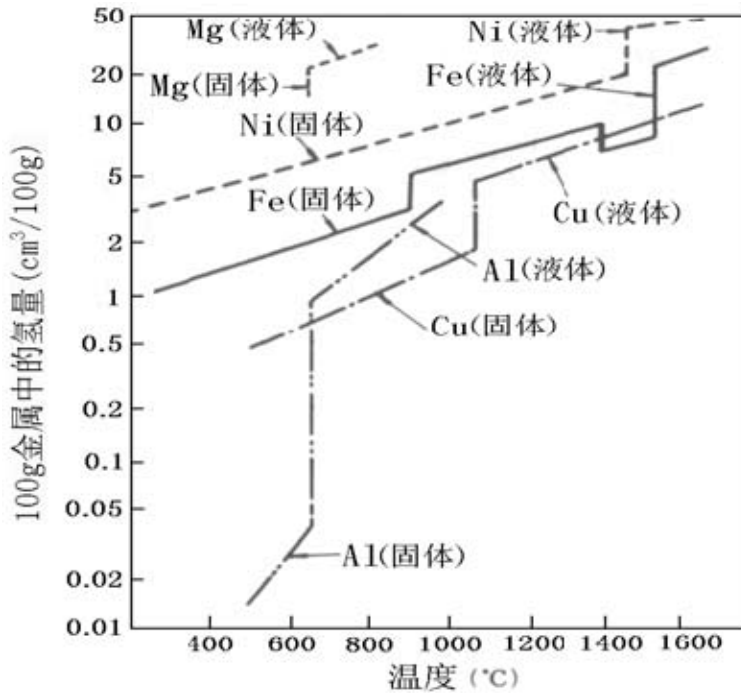
双原子分子的氧、氢在液态金属中的溶解同样适用。

2) 气体在金属中的溶解

对于电弧焊接，保护气体在高温电弧弧柱中多数被分解成原子状态，并被活性化，与分子状态气体在同一温度液态金属中的溶解量相比，电弧情况下溶解的更多，有时达到数倍到数十倍。



电弧与高频炉两种条件下氮在铁水中溶解量的对比



金属处于固相及液相情况下，氢的溶解度有着显著差别。

氢在各种金属中的溶解度与温度的关系

高温液态金属对气体的溶解是无法避免的。焊缝金属中即使含有很少量的氧原子、氮原子、氢原子，对焊缝的机械性能就会发生影响，产生气孔及非金属夹杂物。

采取措施：熔化金属与大气隔绝，加入适量的脱氧剂以及精炼物质。

高纯Ar、He气，惰性。可以采用与母材成分接近的焊丝。

即使保护气体 $>99.9\%$ 的纯度，也不可能完全排除有害气体。
有可能产生气孔。

气孔产生的条件是焊缝金属的凝固速度大于气泡的上浮速度。

高的热输入，气孔少

平焊和横焊，气泡排出困难

铝合金MIG焊中气孔主要是氢
低碳钢及高强钢主要是CO和N

3) 混合气体的选择及使用

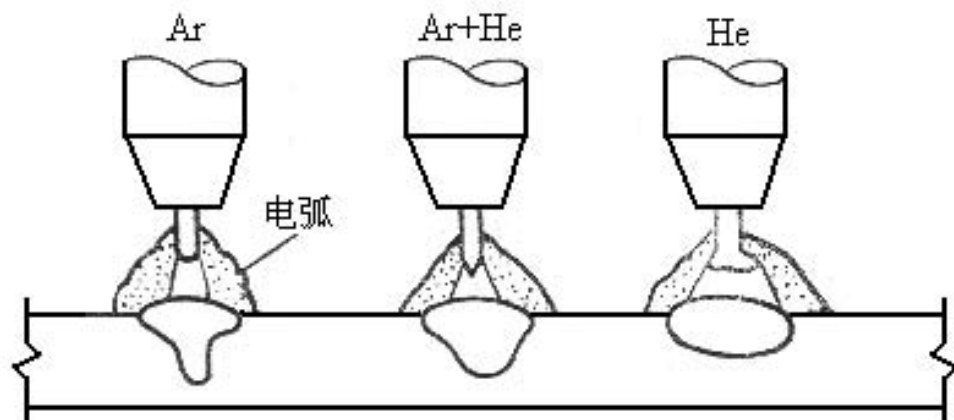
在一种气体中加入一定量另一种或两种气体后，可以分别在减少飞溅、提高电弧稳定性、改善成形和熔深、提高电弧温度、提高焊接生产率等方面获得满意的结果。

① Ar+He

He传热系数大，和Ar相比，相同弧长下，电弧电压高，电弧温度高

其优点：电弧温度高，母材热输入量大

Ar的优点：电弧燃烧稳定，熔化极焊时焊丝金属容易呈轴向射流过渡，飞溅小



大厚铝：
铜及铜合金：改善润湿性
钛、锆：
镍基：

Ar、Ar+He、He三种保护气体下的焊缝断面形状（直流反接）

② Ar+H₂

利用Ar+H₂混合气体的还原性，可用于焊接镍及其合金，可以抑制和消除焊缝中CO气孔，但H₂的含量必须低于6%，否则会导致产生H₂气孔。

③ Ar+N₂

电弧温度比纯Ar要高，主要用于焊接铜及铜合金，混合比为Ar/N₂=80/20
焊接奥氏体不锈钢时，加入少量的N₂（1%~4%），可提高电弧的挺直性以及改善焊缝成形

④ Ar+O₂

一种含O₂量较低，1%~5%，用于焊接不锈钢等高合金及级别较高的高强钢；
另一种为O₂含量高，可达20%，用于焊接低碳钢及低合金结构钢

用Ar+20%O₂，进行高强钢的窄间隙垂直焊（立焊），可减少焊缝金属产生树枝状晶间裂纹的倾向。

用纯Ar，焊缝为蘑菇形

⑤ Ar+CO₂

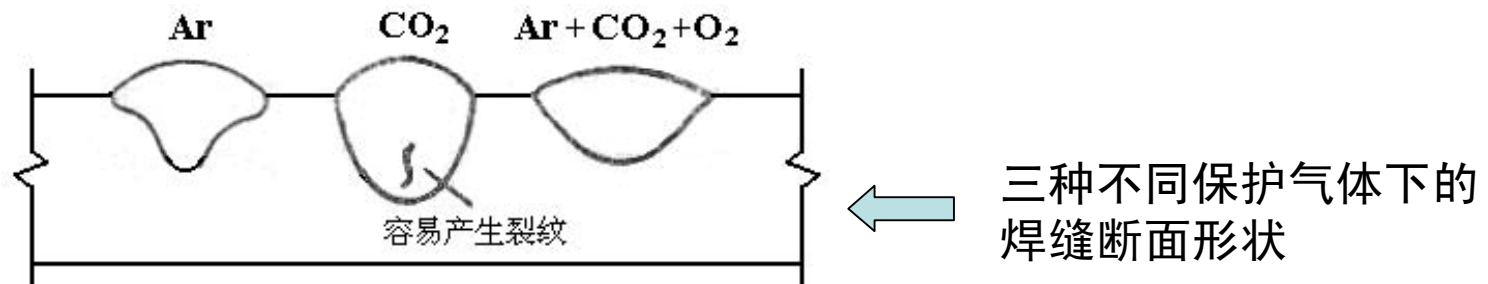
混合气体被广泛用于焊接碳钢和低合金钢。既具有Ar气的优点，如电弧稳定、飞溅少、容易获得轴向射流过渡等，又因为具有氧化性，克服了纯Ar气焊接时的阴极斑点漂移现象及焊缝成形不良等问题。

比例，通常为（70~80） / （30~20），可用于喷射过渡、短路过渡和脉冲过渡焊接

为防止CO气孔及减少飞溅，须使用含有脱氧元素的焊丝

⑥ Ar+CO₂+O₂

试验证明，80%Ar+15%CO₂+5%O₂混合气体对于焊接低碳钢、低合金钢最佳。



⑦ CO₂+O₂

优点:

熔覆速度快、熔深大;

氧化反应, 增加电弧能量。75%CO₂+25%O₂, 熔池温度可以提高205~308℃

焊缝金属含氢量低

焊丝具有较强脱氧能力, 焊缝含氧量不会增高。具有较强的抗氢气孔的能力

能采用强规范(大电流)进行焊接

电弧稳定, 飞溅很小, 并且熔池表面覆盖有较多的熔渣, 可改善焊缝表面成形

氧化性强, 必须配备强脱氧能力的焊丝

根据具体国情, 美国, He气价格便宜, Ar+He使用普遍

欧洲, 常用Ar+N₂气焊铜

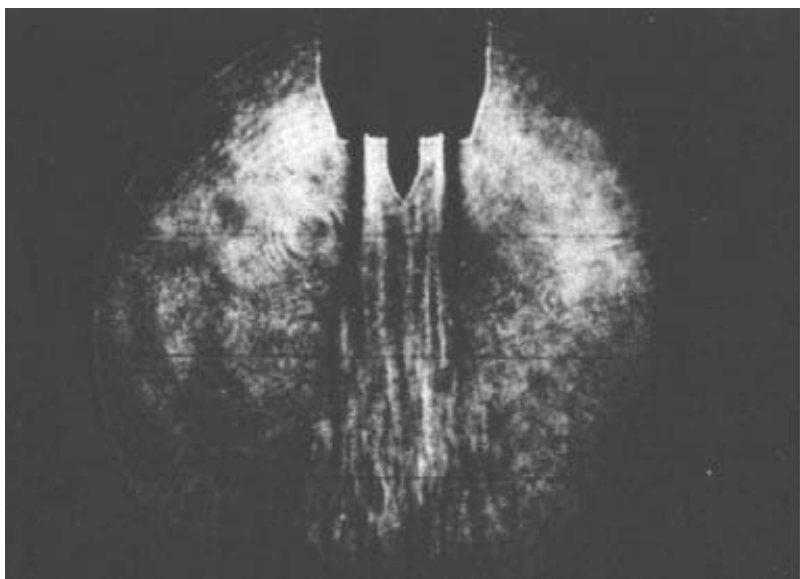
日本, 则对CO₂+O₂研究较多

保护气的电离能对弧柱电场强度及母材热输入的影响是轻微的, 起主要作用的是保护气的传热系数、比热容和热分解性质。

一般说来, 熔化极反极性焊接时, 保护气对电弧的冷却作用越大, 对母材的热输入量大

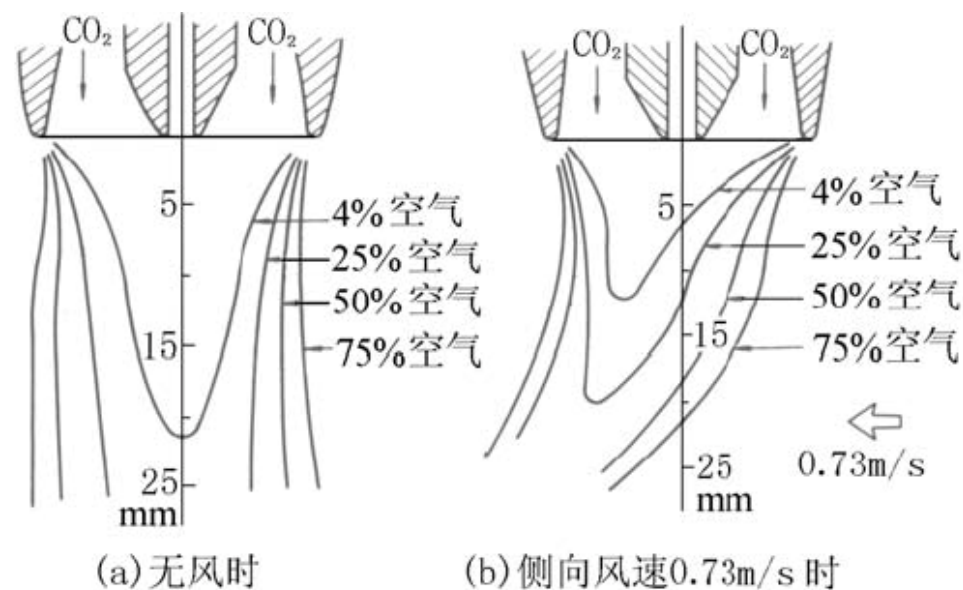
4) 保护气气流与保护效果

① 保护气气流



喷嘴流出的保护气流动状态
CO₂, 20L/min, 喷嘴孔径19mm

一般情况下，雷诺数 Re 增大，层流长缩短。同一直径下的喷嘴，其长度越短，层流长也越短；流量增大流速增加，层流长变短，紊乱度增加。如果流量少，虽然紊流减小，但由于流速减慢，易受外来风的影响。



CO₂保护气流中空气的卷入及侧向风的影响

② 气体保护效果的决定因素

■ 气体流量

保护气流量过小，气流挺度差，排除周围空气的能力弱，易偏离和散乱
流量过大，近壁层流很薄，甚至形成紊流

■ 喷嘴至工件距离

距离减小，保护效果提高，可相应减小保护气流量
但要考虑焊接操作性、电弧的可观察性、喷嘴温度的提高、飞溅等

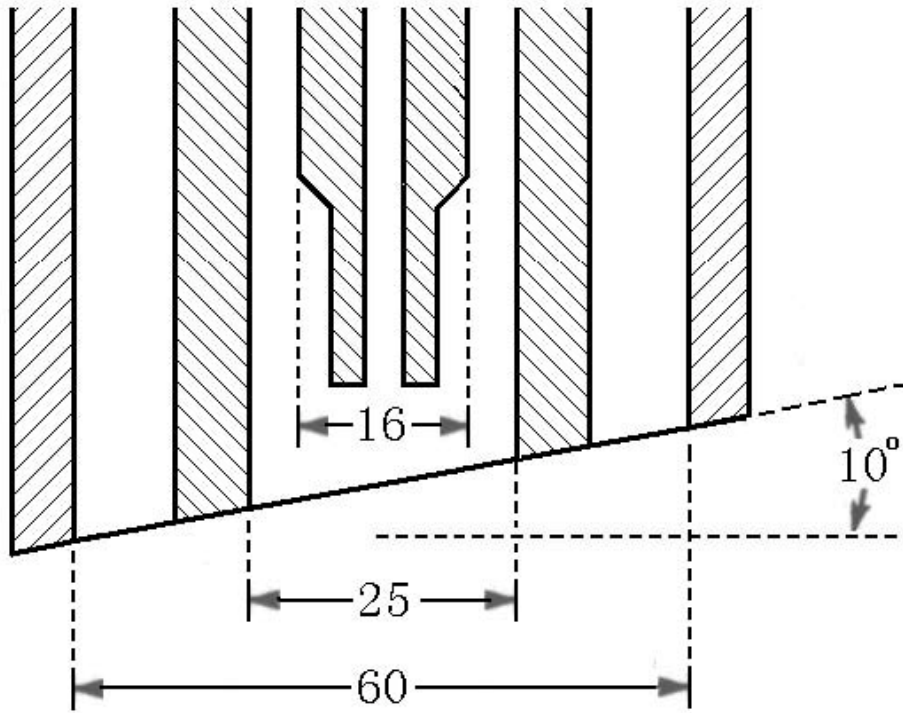
■ 焊接速度和侧向风

焊速达120m/h，气柱偏角只有0.5度
抗风能力差，当偏向风小时，降低喷嘴至工件的距离；大时，防风措施

■ 焊接接头形式

接头形式不同，保护气流在其表面的覆盖程度不同
水平位置、内角焊接，保护效果好
外角或端角焊接时，保护气流沿接头表面流散，可加气流挡板、增大气流、
控制焊枪角度

电弧功率越大，电弧对保护气流的热骚动越大。



增加电流会使等离子气流增大，外部空气的卷入量增多，故在大电流MIG焊中，为了可靠保护电弧及熔池，可采用双重喷嘴。

增强保护效果的双重喷嘴

1.4 电弧的引燃与稳弧措施

电弧的引燃通常采取两种办法：一种是接触引弧，适用于熔化极焊接如熔化极气体保护焊、埋弧焊、焊条电弧焊；一种是非接触引弧，适用于非熔化极焊接，如GTA焊接和等离子弧焊接。电弧引燃后需要保持稳定，在交流焊接时需要采取相应的稳弧措施。

- 接触引弧
- 非接触引弧
- 交流电弧稳弧措施

1. 接触引弧

对于熔化极电弧焊，焊接开始时，通过送丝机构把焊丝向工件方向送进，焊丝前端与工件接触瞬间，在焊接电源空载电压的作用下，焊丝中开始流通电流，由于焊丝端部与工件接触面积较小，在很大的接触电阻中产生很大的热量，使端部被迅速熔化并被烧断，在焊丝端部、气隙空间及工件表面建立起电场，立即在焊丝与工件的气隙间隔中引燃电弧。

简便易行，引燃电弧的可靠性高，通常伴随少量的飞溅产生

- ① 粗丝焊接时，一般需要附加焊丝接触后的回抽动作，防止大面积固体短
- ② 路细丝焊接时，如果上次焊接结束后在焊丝端头留下较大尺寸的未过渡熔滴，需要剪掉，防止飞溅，增加引弧功率

接触引弧以焊丝端头预先剪切成斜面为好。

2. 非接触引弧

采取非接触引弧有两个原因：

- ① 不允许电极与工件接触；
- ② 电极无法与工件接触

■ 钨极氩弧焊，如果电极与工件接触，会产生两种不利的情况：

一是钨极被污染，影响电子发射能力，产生烧损，影响断面尺寸和电弧稳定性，长期使用易形成电极斑点

二是可能造成焊缝夹钨，在重要构件场合，影响焊缝性能

■ 等离子弧焊接时，电极无法与焊件接触，保持电极前端形状更为重要，电弧稳定性、防止双弧

钨极内缩到焊枪喷嘴内部，气隙空间长度大，一般需要在电极和喷嘴间首先引燃电弧，然后在电极与工件间空载电压下，电弧很容易转移到电极与工件间燃烧，称作**转移弧方式引燃**。

引燃电压与气隙的长短、保护气成分、电源电流上升速率、工件条件（尺寸、导热性能）、电弧初始电流大小、引弧电源的电能持续

引弧电压的施加方式有并联引弧和串连引弧两种：

并联方式是直接把引弧电压接续到电极和工件上；

串联方式是把引弧电压串联到焊接主回路中，通过变压器回路或旁路电容施加到电极和工件

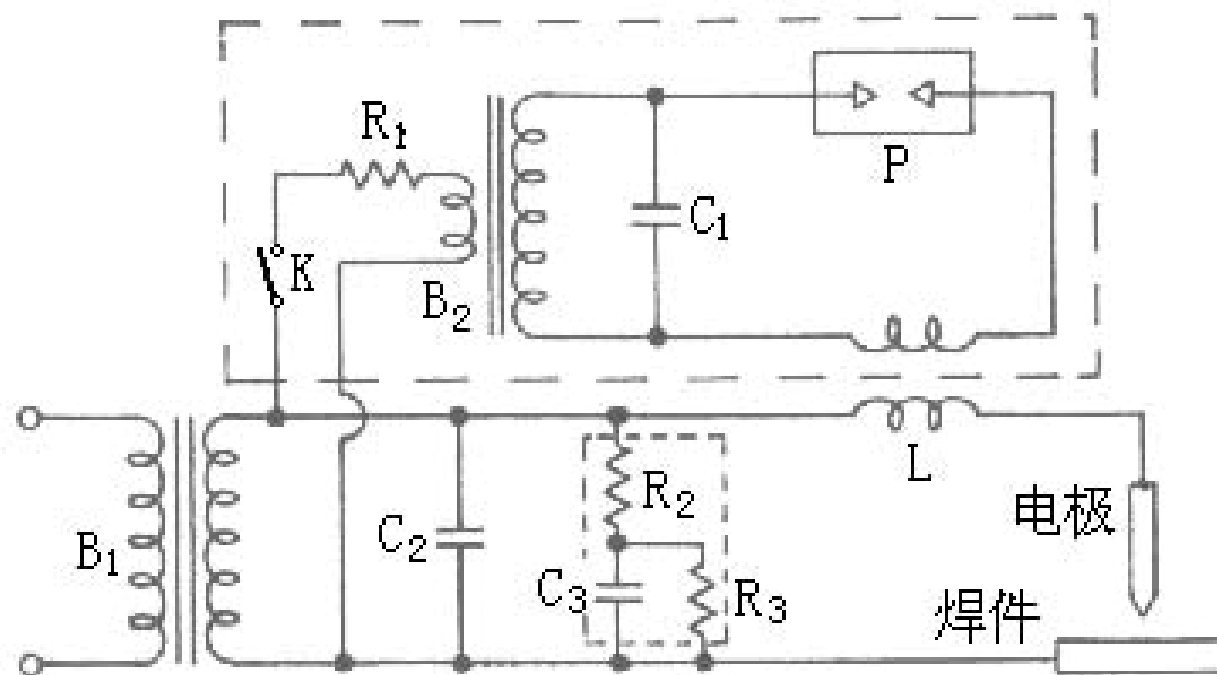
串联方式引弧效果好，主回路构成简单，不需要有大的电抗器

根据引弧电压的特点有高压脉冲式引弧和高频振荡式引弧两种：

高压脉冲多采用电容储能形式，需要引弧的时刻，接通电容放电回路，把电容上的高压通过主回路中的电磁线圈耦合施加到电极和工件上。

电容储能量有限，可持续时间短，一般需要给出更高值的引弧电压，电路构造相对复杂，引弧效果一般

高频振荡方式是利用电容—电感—气隙回路高频放电的特点，如下图，也显示了串联引弧接发。



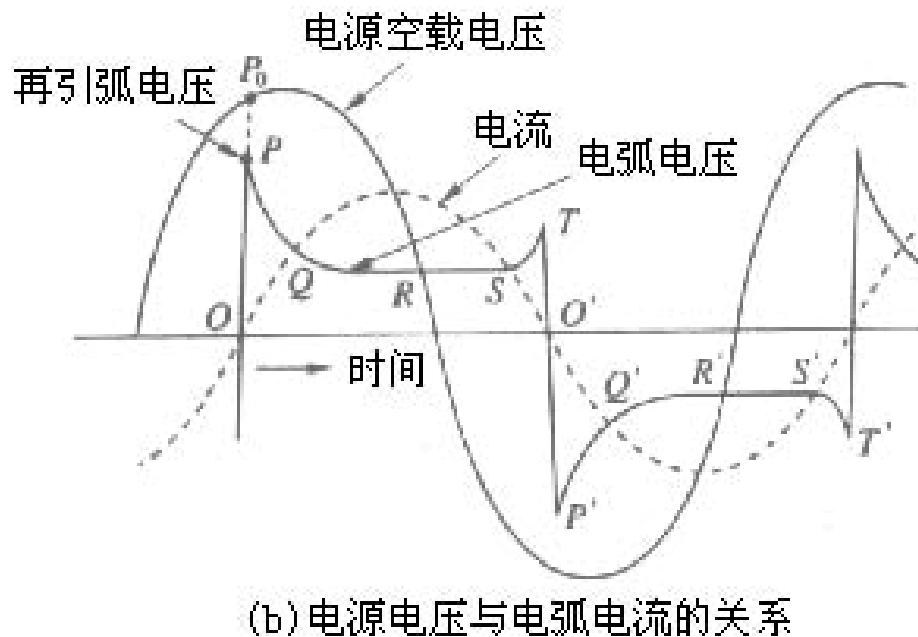
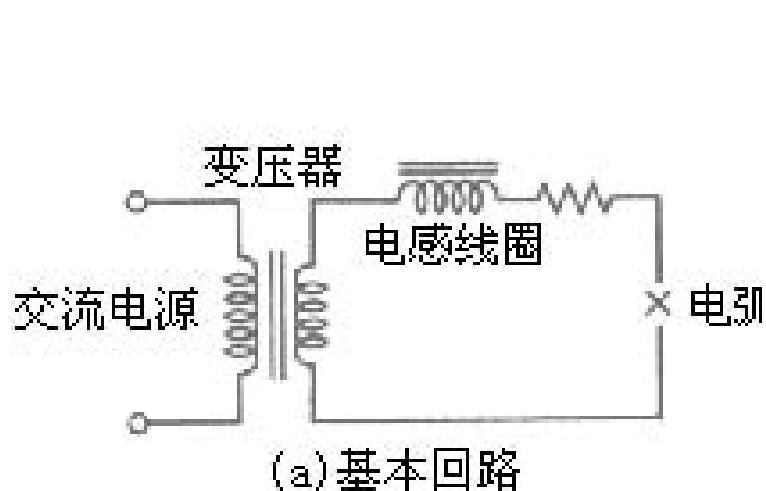
非熔化极焊接中的高频振荡引弧电路

3. 交流电弧稳弧措施

交流电弧焊由于电流过零问题，焊接中需要采取稳弧措施。

一是焊条电弧焊，除了在焊条药皮中加入稳弧剂外，还需要在电源构造方面采取措施

二是对铝合金材料的焊接，需要采取更为严格的稳弧措施



普通交流焊机的稳弧措施

回顾第1章焊接电弧的内容

1.1 电弧的物理基础

- 气体放电与焊接电弧
- 电弧中带电粒子的产生
- 电弧各区域的导电特点
- 电弧产热及温度分布
- 电弧压力与等离子气流
- 直流电弧与交流电弧

1.2 焊接电弧特性

- 焊接电弧静特性
- 焊接电弧动特性
- 阴极斑点和阳极斑点
- 电弧的阴极清理作用
- 最小电压原理
- 电弧的挺直性与磁偏吹

1.3 电弧焊中的保护气

- 保护气种类与纯度
- 保护气的分解及在金属中的溶解
- 混合气体的选择及作用
- 保护气气流与保护效果

1.4 电弧的引燃与稳弧措施

- 接触引弧
- 非接触引弧
- 交流电弧稳弧措施