

第一章 绪 论

焊接是一种重要的材料加工工艺，它广泛应用于现代工业的各个部门，特别是在金属结构制造方面。在船舶和海洋工程结构建造中，焊接的重要性尤为突出。

由于焊接技术具有一系列技术上和经济上的优越性，所以发展很迅速。从 20 世纪 30 年代起焊接就逐步代替了过去船舶业中的主要连接手段——铆接。这一变革对造船业产生的深远影响可与 19 世纪中叶造船用的材料由木材转变成钢铁相提并论，因此造船工艺由铆接变为焊接被认为是造船史上的第二次革命。

在现代造船业中，焊接已成为连接船体结构和金属构件的主要方法，是海洋工程结构和船舶建造的关键工艺之一，并直接影响船舶及海洋工程的质量和建造周期。

一、焊接方法的实质及分类

焊接是通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使工件达到结合的一种加工方法（GB3375—94）。

根据焊接过程的特点可将焊接方法分为三大类：熔焊、压焊和钎焊。

1. 熔焊 将待焊处的母材金属熔化，但不加压以形成焊缝的焊接方法称为熔焊。根据所用能源不同，可以分为电弧焊、电渣焊、等离子弧焊、电子束焊、激光焊、热剂焊等。

2. 压焊 焊接过程中、必须对焊件施加压力（加热或不加热）以完成焊接的方法称为压焊。压焊包括电阻焊、摩擦焊、扩散焊、爆炸焊、超声波焊、冷压焊、气压焊、热压焊、锻焊等。

3. 钎焊 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，但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，并与母材相互扩散而实现连接焊件的方法。根据使用钎料熔点的不同，可分为硬钎焊和软钎焊两类。根据熔化钎料时所采用的热源不同又可分为若干种钎焊。

焊接方法分类见图 1-1^①。

若将焊接方法细分类，总共可超过 150 种。仅造船行业采用的焊接方法就有几十种。然而尽管焊接方法种类繁多，它们区别于其他连接方法（如铆接、栓接、键连接、销连接等）的共同特点是：在连接处，不仅宏观上形成了永久性的接头，而且在微观也建立了联系。如在熔焊和压焊中，两结合面间形成了共同的晶粒和连续的组织；在钎焊中，填充金属和母材之间发生了相互扩散，在微观实现了金属键和其他化合键的连接。

二、焊接船体结构的特点

和铆接船相比，焊接船有一系列的优越性，但焊接船体结构又有一些需要注意的特点。正

① 为了与焊接科学技术的发展相适应，在《焊接术语》（GB3375—94 和 1996 年出版由中国机械工程学会焊接学会编写的《焊接词典》中对某些焊接术语进行了修改，给出了新的含义和解释。如对自动焊的定义和解释是“用自动焊接装置完成全部操作的焊接方法。例如采用数字程序控制系统、模拟控制系统、适应控制系统或机器人系统使焊接过程全部自动进行的焊接。因而，原称自动埋弧焊，现称埋弧焊；原称半自动埋弧焊，现称手工埋弧焊；原称手工电弧焊，现称焊条电弧焊；取消了半自动焊的提法；扩大了手工焊的范围。由于历史和习惯的原因，在本书中仍将用手工操纵焊条进行焊接的电弧焊接方法称为手工电弧焊，将小车自动沿坡口行走、自动送丝的埋弧焊称为自动埋弧焊。”

确认识这些特点并采取合理的措施是保证船体结构质量和安全的关键之一。

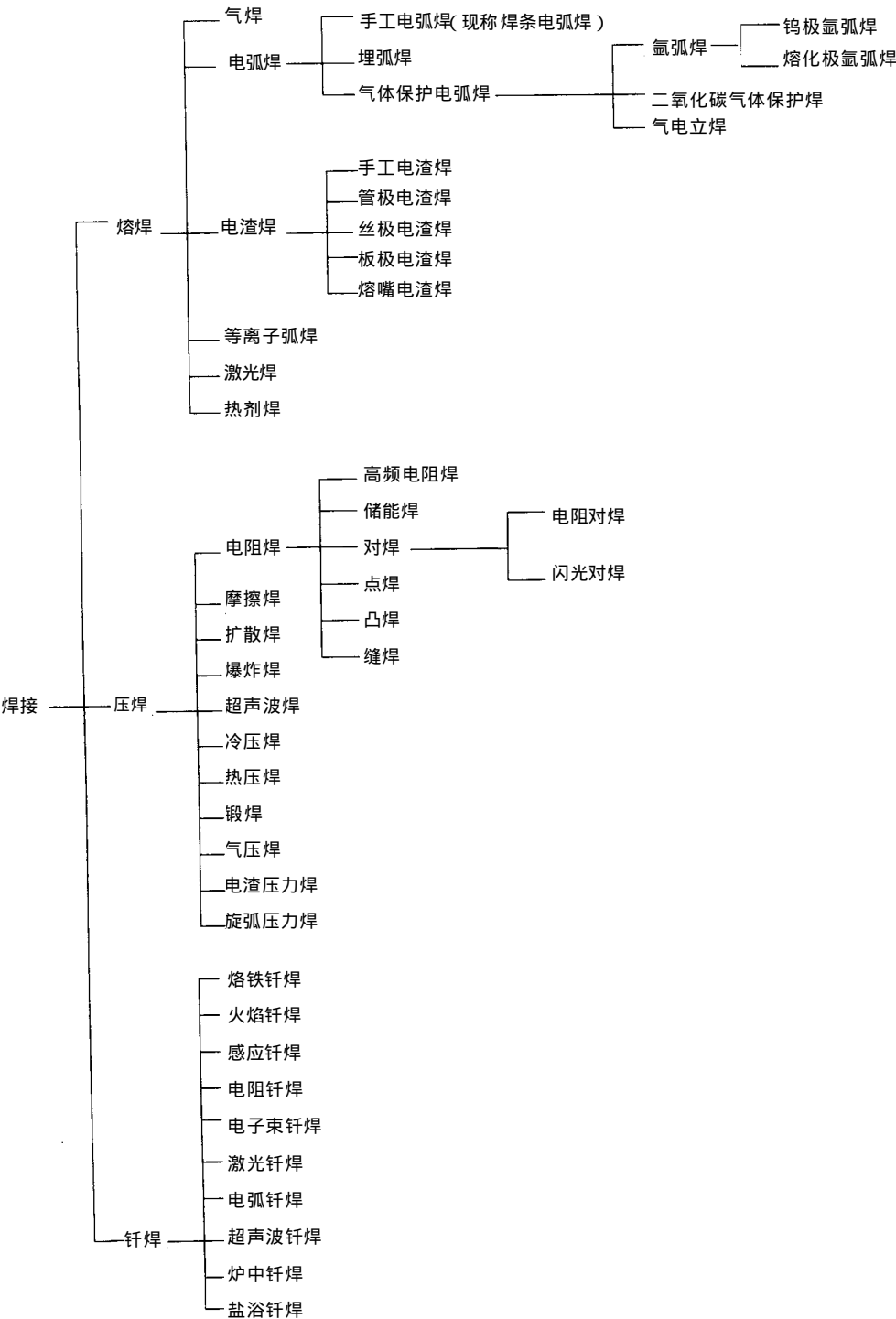


图 1-1 焊接方法分类

(一 焊接船体的优越性
1. 重量轻 省材料 成本低

焊接结构中熔敷金属约占构件重量的 1% ~ 1.5%。而在铆接结构中仅铆钉的重量就占构件重量的 3.5% ~ 4%，再加上接头处的重叠板条，使同样排水量的焊接船比铆接船减轻重量约 20% 因而提高了载重量。焊接船减少了材料用量 省去了用来加工铆钉、搭接垫板和钻孔的人力、物力和时间，使成本大大降低。

2. 结构合理 强度高

焊接船体可根据设计需要制成不同的线型，外形连续光顺。而铆接船在接头处不连续，会产生较大的应力集中。焊接接头致密、连续，其强度一般与母材相等甚至稍微高一点。而铆接接头仅靠铆钉传递载荷，同时铆接接头在使用过程中易产生腐蚀和接头松动，降低连接强度和密性。因而焊接船体结构强度比铆接船高，且结构更为合理。

3. 不渗透性好

焊接接头中焊缝与母材形成一个整体，有可靠的不渗透性，可保证贮存液体或气体的船舱不会发生泄漏，特别是当船体一旦因碰撞或过载而发生塑性变形时，焊接接头一般仍能保持不会渗漏。而铆接接头由于发生铆接缝崩裂，会很快进水。

4. 生产效率高

焊接船体可采用分段建造、预舾装、以及区域建造等先进工艺，使船体焊接装配工作量的 60% ~ 70% 在车间进行。分段建好后在船台合拢，车间又开始第二条船的建造，大大缩短了船舶的建造周期。同时 各种高效焊接技术如气体保护焊、埋弧焊、电渣焊、下行焊、重力焊、铁粉焊条高效焊等的应用使生产效率大大提高。

（二 焊接结构的特点

焊接结构与铆接结构相比除了上述优点外，本身还具有对使用行为、承载能力有很大影响的一些特点。海运史上焊接船舶大量破坏事例的调查分析表明，当时由于没有制造焊接船的先例，对焊接船的特点不了解，设计上直接抄袭铆接船体的型式是导致焊接船在航行中大量破坏的重要原因之一。焊接结构的主要特点有：

1. 焊接结构不可避免地存在焊接应力和焊接变形，处理不好会对焊接结构的强度和精度带来不利影响。在船体下料、气割，部件和分段焊接时必须充分考虑焊接变形，以保证实现公差造船。对于高强度钢、高合金钢需要考虑焊接残余应力对结构强度和性能的影响。

2. 焊接结构整体性强、刚性大。焊接船体结构比铆接船整体性强，使其具有良好的不渗透性。但整体性强使船体结构刚性大，对应力集中敏感，焊接船的舱口、舷窗如果像铆接船那样设计成方的，就会在尖角处产生裂纹。同时整体性强、刚性大使焊接船止裂性比铆接船差，一旦开裂就很容易扩展到整个船体，而铆接船开裂一般会在铆接接头处止住。解决这个问题需要研究合理的船体结构设计和选材并在制造工艺方面采取一定的措施。

3. 焊接接头存在性能的不均匀性。大多数情况下，焊缝的化学成分与母材存在差异；焊接热过程或多或少会造成热影响区 HAZ 的晶粒长大 形成脆化区 对有些材料还会造成 HAZ 的软化；焊接过程会使焊缝或熔合区甚至热影响区产生宏观或显微缺陷；焊根、焊趾等截面突变处会产生应力集中等等。在进行焊接设计和结构制造时，应充分考虑到焊接接头不均匀性对结构使用性能的影响。

三、海洋平台建造与船舶建造的关系

海洋平台都是海上钢质建筑物，尤其是移动式钻井平台，无论从设计原理、建造工艺、技术特点、材料选用以及对制造厂生产设备、地理位置条件、生产场地诸方面要求而言，均和船舶建

造有很多相似之处。因此目前不少国家的造船业已经发展为兼顾船舶与海洋构筑物制造、综合性更高的工业部门，我国也不例外。这样做可以少投资甚至不投资就能设计制造出所需要的平台。我国自行设计制造的移动式平台全部都是在有关造船厂内建造的。就是固定式平台 除其导管架目前仍由渤海石油公司所属的平台制造厂(由原修造船厂改建而成的)制造外，其导管帽、甲板模块等也均由有关造船厂制造。因此本书在讲述船舶与海洋工程结构焊接时一般不单独将海洋平台等海洋构筑物拿出来讲述。

当然，海洋平台和船舶还是有一定区别的。就其制造方面而言，海洋平台比船舶施工质量要求更高 技术管理要求更细致 由于工程庞大、附件颇多 要求更为合理地组织施工 同时业主和验船师对平台的建造过程也监督得更为严格。

四、我国造船焊接技术的发展

在我国 从 50年代中期开始 焊接造船逐步取代了铆接造船。在这一阶段 造船焊接技术得到了迅速发展，并使船体放样、加工、装配及焊接工艺都进行了相应的改革；焊接结构的渔船、快艇已成批实现分段建造；在中小型船舶建造中实际应用的国产的低氢型焊条及埋弧焊技术，使焊接过程的机械化程度和质量有了很大提高。

从 60年代开始到 70年代初，开发应用了双丝埋弧焊、垂直气电焊、耐磨及耐蚀合金堆焊各种衬垫单面焊双面成型等高效焊接工艺。水下焊接技术开始发展。造船的材料从低碳钢发展到低合金高强度钢，且建造的船舶趋向大型化。同时电子计算机技术和数控技术也在船厂中逐步得到应用，促进了焊接技术的发展。在这期间我国先后成功地建造了万吨级远洋货船、50000t 油船。

70年代末，我国造船业不但能满足国内市场的基本需要，而且顺利地完成了 12500t、27000t、36000t 货船、三用工作船以及海洋钻探平台等出口船舶的建造任务 焊接质量均符合相关船级社的要求。70年代末我国船舶焊接高效化率(焊接高效化率是指实际生产中应用的高效焊接工艺占全部焊接工艺的百分比 以焊接材料消耗量计)达 13%~15%。

80年代世界造船行业普遍萧条，而我国的造船行业却呈现一片繁荣。为了适应多造船、快造船的需要，1983年中国船舶工业总公司大力研究开发和推广应用高效焊接技术，重力焊、低角度弹力焊、CO₂ 气体保护焊、下行焊条与高效铁粉焊条、单面焊双面成型等方法得到广泛应用。部分船厂还建立了平面分段流水线，实现了平面分段装配以及焊接的机械化和自动化，船舶的焊接高效化率逐年上升。不仅年造船吨位有较大幅度提高，而且为国外建造了大批新型、大型、特种用途船舶及多种类型海洋平台。在此期间我国还成功地建造了不锈钢内胆的化学品船、铝合金船、10万 t 以上的油船、散货船。船舶的设计、自动化程度、及使用性能达到了国际先进水平。随着我国海洋石油的开发及海洋工程结构的发展，水下焊接与切割技术、水下焊接材料和焊接设备也进入了新的发展时期。

90年代以来 焊接新材料不断涌现 焊接设备向多功能、多用途、逆变化、智能化发展。我国 1994年的船舶产量比 1982年增长了 2.9倍。船舶工业总公司系统的船厂焊接高效化率在“八五”末期平均达到 65%以上，到本世纪末，该公司系统各主要船厂的焊接高效化率可达 80%左右。

我国海洋平台从向国外购买到自行设计制造，到目前已有一定规模。从 70年代初建成第一座工作水深为 30m 的自升式平台(渤海一号)之后，1977年后又相继建造了 5座工作水深为 40m 的自升式平台。1983年又建造设备更为完善的自升式平台。1984年首建半潜式平台。

同时从 1982 年开始建造了一批用于采油的固定式导管架平台。还建造了一定数量的钻井船、固井船、物探船、海洋平台供应船、海洋浮码头等钻井设施或其配套设施。这不仅说明我国已具备设计制造各种类型的平台及其配套设施的能力，同时也反映了我国造船焊接技术已发展到一个更高的水平。

可以预计 随着计算机、微电子、信息传感以及机器人等技术领域的发展 我国的造船焊接技术将会进入国际先进行列。

参 考 文 献

1. 中国机械工程学会焊接学会编,焊接词典.北京:机械工业出版社,1998.
2. 曾乐主编.现代焊接技术手册.上海:上海科学技术出版社,1993.
3. 应潮龙主编.实用高效焊接技术.北京:国防工业出版社,1995.
4. 张文钺主编.焊接冶金学(基本原理).北京:机械工业出版社,1995.
5. 中国机械工程学会焊接学会编,焊接手册 1) 焊接方法及设备.北京:机械工业出版社,1992.
6. 孔祥鼎 夏炳仁主编.海洋平台建造工艺.北京:人民交通出版社,1993.
7. GB/T 3375—94.焊接术语.北京:中国标准出版社,1994.
8. 《船舶焊接手册》编写委员会编写.船舶焊接手册.北京:国防工业出版社,1995.
9. 孙维善主编.船舶焊接(修订本).北京:国防工业出版社,1992.

第二章熔焊基本原理

§ 2-1 焊 接 电 弧

实现焊接过程必需由外界提供相应的能量，对于熔化焊来讲，采用的能源主要是热能源，而焊接电弧就是热能源中应用最为广泛的一种。焊接电弧就是一种大功率、持续的气体放电现象。电弧是由两个电极和它们之间的气体空间所组成，要理解电弧的导电机构必需首先了解电弧中带电粒子的产生过程以及带电粒子在电场作用下的运动特点。

一、电弧中带电粒子的产生过程

电弧中的带电粒子主要依靠气体空间的电离和电极的电子发射两个物理过程产生的。

1. 电离

在一定条件下中性气体分子或原子分离为正离子和电子的现象称为电离。气体分子或原子在常态下是由数量相等的正电荷（原子核）和负电荷（电子）构成的一个稳定系统，对外界呈电中性。要使其电离就是要破坏这个稳定系统，这就需要对这个系统施加外来能量。常态下的气体粒子（分子或原子），受外来能量的作用失去电子后则成为正离子。使中性气体粒子失去第一个电子所需的最低外加能量称为第一电离能，生成的正离子称为一价正离子，这种电离称为一次电离。如果要使中性气体粒子失去第二个电子就需要更大的能量，称其为第二电离能，生成的正离子称为二价正离子，这种电离称为二次电离，依次类推。

电离能的单位是电子伏特（eV），即一个电子通过一伏电位差的空间所取得的能量，其数值为 $1.6 \times 10^{-19} \text{J}$ 。在实用中常用电离电压来表示气体电离的难易，以伏表示的电离电压在数值上等于以电子伏特表示的电离能。

各种不同的气体电离所需要的能量是不同的，表 2-1 是一些常见气体粒子的电离电压。

常见气体粒子的电离电压

表2-1

元 素	H	O	Fe	Ar	H ₂	O ₂	H ₂ O	CO ₂
电离电压(eV)	13.5	13.5	7.8	15.7	15.4	12.2	12.6	13.7

气体电离电压的高低说明电子脱离分子或原子所需的外加能量的高低，亦说明某种气体粒子电离的难易，在相同的外加能量下电离电压低的气体粒子电离较容易，有利于维持电弧的稳定。

任何中性气体粒子受到外加能量作用的数值达到或超过电离电压时就会产生电离，外加能量可以通过不同的方式施加于中性气体粒子，但使之电离所必须的最低能量数值并不因施加方式的不同而改变，亦即电离电压是固定数值。

根据接受外加能量种类的不同气体粒子的电离分为三类：

(1)热电离：气体粒子受热作用而产生的电离称为热电离。根据物理学的气体分子运动理论可以知道，某一容积气体的温度的高低意味着气体粒子总体动能的高低，亦即气体粒子平均运动速度的高低。气体温度越高，气体粒子的运动速度也越高，即动能越大。由于气体粒子的热运动是无规则的运动，粒子之间将发生频繁碰撞，如果粒子的运动速度足够高亦即动能足够大，粒子之间则可能发生非弹性碰撞，而引起气体粒子的电离。因此，热电离实质上是由于粒子之间的碰撞而产生的一种电离过程。

(2)电场作用下的电离 当气体中不存在电场时 不论是带电粒子还是中性粒子 都做无规则的无定向的运动而且相互频繁碰撞。但是当气体空间有电场存在时，则带电粒子除了作无规则的热运动外还会受到电场力的作用产生一个定向运动，正负带电粒子定向运动的方向相反，此时带电粒子的实际运动是无规则的热运动与沿电场力方向的定向运动的合成，电场将对带电粒子在电场方向的运动起加速作用，电能转换为带电粒子的动能。当带电粒子的动能 在电场力的作用下增加到足够高的数值时，则可能与中性粒子产生非弹性碰撞而使之电离，这种电离称为电场作用下的电离。

(3)光电离：中性粒子接受光辐射的作用而产生的电离现象称为光电离。电弧本身就产生不同波长的光辐射，所以光电离也是产生带电粒子的一种可能的途径。

2. 电子发射

电弧中担负导电任务的带电粒子除依靠上述电离过程产生外，还需要从电极表面发射出来，电极只能发射电子而不能发射离子。当阴极或阳极表面接受一定外加能量的作用时电极内部的电子皆可能冲破金属电极表面的约束而飞到电弧空间，这种现象称为电子发射。使一个电子由金属表面飞出所需要的最低外加能量称为逸出功，单位是电子伏特(eV) 逸出功的大小与金属材料的种类、表面状态及金属表面氧化物的状态有关。表 2-2是几种金属的逸出功。

几 种 金 属 的 逸 出 功 表2-2

金 属 种 类		钨	铁	铝	铜	钾	钙	镁
逸出功(eV)	纯金属	4.54	4.48	4.25	4.36	2.02	2.12	3.78
	表面有氧化物		3.92	3.90	3.85	0.46	1.80	3.31

金属内部的电子只有在接受外加能量的作用后，其能量升高到超出其本身电子逸出功时才能冲破金属表面的制约而发射到金属表面外部的空间。由于外加能量形式不同，电子发射机构可分为如下四种：

(1)热发射：金属表面承受热作用而产生的电子发射现象称为热发射。这是因为金属内部的自由电子受热作用后其热运动速度增加。

(2)电场发射：当金属表面存在一定强度的正电场时，金属内的电子受到电场力的作用，当此力增大到一定程度时，电子可飞出金属表面，这种现象称电场发射。

(3)光发射：当金属表面接受光辐射时，也可使金属表面自由电子的能量增加，从而冲破金属表面的约制飞到外面来，这种现象称为光发射。产生光发射时，电子跑出金属表面并不从金属表面带走能量，不象热发射时那样对电极有冷却作用。

(4)粒子碰撞发射：高速运动的粒子（电子或离子）碰撞金属表面时，将能量传给金属表面的电子，使其能级增加而跑出金属表面，这种现象称为粒子碰撞发射。

二、焊接电弧的产生过程

在手弧焊中焊条和焊件各接到焊机的一个电极上，焊接时当焊条接触焊件而又随即拉开的瞬间，在焊条端部和焊件之间就会产生明亮的电弧，在电弧产生的这一短暂的过程中，实际上经历了三个阶段：“短路—空载—燃弧”。它们的机理是这样的：

1. 短路过程：焊条接触焊件形成短路，由于焊条表面与焊件表面都不可能是绝对的平整，因此这个接触只能是一些突出部位的微小的点的接触，所以流过这些点的电流密度极大，在触点上产生大量电阻热，使接触点上的温度骤然升高，部分金属熔化和蒸发，并使焊条中某些易分解的或低沸点的物质变成蒸汽，这样就使两极间充满了具有低电离能的物质的蒸汽，为后面的电离做好物质准备。同时由于短路引起的大量电阻热使阴极表面的电子获得了能量迅速产生电子的热发射，这就是短路阶段的主要作用。

2. 空载阶段：焊条与焊件短路并随之将焊条拉开的瞬间，电弧尚未形成，此时电源处于空载状态。空载时电压较高，这个较高的电压完全加在焊条端面与焊件之间的很短距离内，在焊条与焊件之间形成很大的电场强度。在这个强大的电场作用下，将产生电场作用下的电离和电子的电场发射。在这个阶段里，由电离和电子发射所产生的带电粒子浓度逐渐增加，为燃弧创造了条件。

3. 燃弧阶段：电子和离子在电场的作用下产生加速运动，以很高的速度射向阳极和阴极，它们在通过两极空间时，又与两极间的气体中性质点碰撞，产生碰撞电离使中性质点分解为电子和离子，这些电子和离子又被电场加速，又可能与中性质点碰撞产生新的电离，这样周而复始，连锁反应，自由电子数和离子数就迅速增多起来，电子跑向正极，正离子跑向负极进行放电，于是就产生了电弧。

上述三个阶段是在极短的时间内连续进行的，通常称为引弧。

三、焊接电弧的构造及温度

当电弧引燃时，在电弧长度方向的电场强度并不是均匀的，通过实际的测量得到的电弧沿长度方向的电压分布如图 2-1 所示。由图可以看到电弧由三个电场强度不同的区域构成，阳极附近的区域称为阳极区，阴极附近的区域称为阴极区，而中间部分称为弧柱区。

阳极区：其电压降称为阳极压降，沿弧长方向的尺寸约为 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{cm}$ ，该区电流主要由电子流组成，阳极表面上存在一个光亮的斑点叫阳极斑点是电子流集中射击的地方。温度比阴极斑点的温度高。

阴极区：其电压降称为阴极压降，沿弧长方向的尺寸约为 10^{-5}cm ，该区电流主要由电子流和正离子流组成，阴极表面上同样存在一个光亮的斑点叫阴极斑点，是电子流集中发射的地方。

弧柱区：它的长度比阴极区和阳极区大的多，占弧长的绝大部分，可以认为弧柱长度基本等于电弧的长度。

电弧的温度分布为沿径向是中心处温度高而四

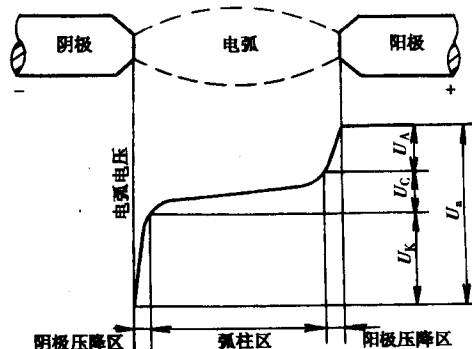


图 2-1 电弧各区域的电压分布示意图

U_A —阳极电压降； U_K —阴极电压降；

U_C —弧柱电压降； U_s —电弧电压

周低 如图 2-2 所示 沿轴向是弧柱的温度较高 可达 $5000 \sim 8000\text{K}$ 甚至更高 而两个电极上温度较低 如图 2-3 所示。这是因为电极温度的升高受到电极材料导热性能，熔点和沸点的限制，而弧柱的温度则不受材料的限制。

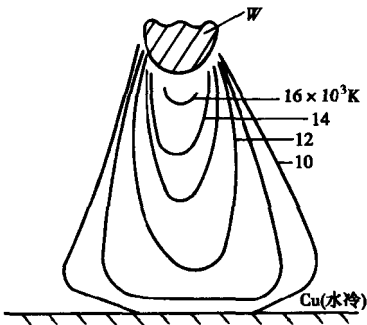


图 2-2 W-Cu 电极之间电弧等温线
(电流 200A 电压 14.2V 保护气 Ar)

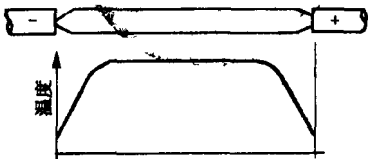


图 2-3 电弧温度的轴向分布

四、焊接电弧的静特性

在电弧长度一定时，电弧两端的电压与焊接电流之间的关系称为电弧的静特性，电弧静特性曲线呈 U 型 如图 2-4 中曲线 2 所示，由图可以看出，电流较小时，由于气体电离程度不够高 电弧电阻较大 所以电弧电压较高 随着焊接电流的增加 气体电离度上升 导电情况改善，电弧电阻减小，所以电弧电压很快下降，呈现下降特性。当电流继续增大时，电弧电压不再随电流的增大而变化，基本保持某一数值不变，呈现平特性。当焊接电流更大时电弧电压随电流的增大而升高，电弧静特性呈上升特性。虽然由于电极材料、周围气氛、电弧长度、电极形状、电极直径、气体压力和温度等因素的不同，电弧静特性曲线的形状会稍有变化，但都有图 2-4 那样的趋势。

当弧长变化时，电弧的静特性曲线做上下的平行移动，如图 2-5 所示 即当电弧长度增加时，电弧电压也增加，静特性曲线向上移动，在手弧焊应用的电弧范围内，可以近似的认为电弧电压仅取决于电弧长度，而与电流大小无关。手弧焊时，一般电弧电压在 $16 \sim 25\text{V}$ 范围内变化 其值与电极材料、大小、气体介质及电弧长度等因素有关。

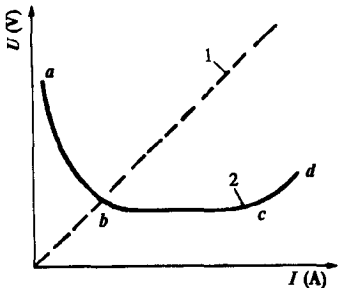


图 2-4 普通电阻静特性与电弧静特性曲线
1-普通电阻静特性 ;2-电弧静特性

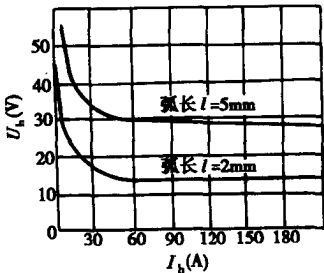


图 2-5 不同弧长的电弧静特性曲线

从电弧的静特性曲线可知，电流不同时，电弧的电阻（即电弧电压与电流的比值）不是常数，所以它不符合欧姆定律，故对电源而言，电弧是一个较特殊的非线性电阻负载，为了能使电弧稳定燃烧，需要有一个专用的焊接电源供电。

五、焊接电弧的稳定性

焊接电弧的稳定性是指电弧电压和焊接电流能否保持相对稳定，同时保持一定的弧长、不偏吹、不摇摆、不熄灭。影响电弧稳定性的因素有以下几个方面。

1. 弧焊电源

弧焊电源的种类和极性都影响电弧的稳定性。直流电源的电弧要比交流电源的电弧稳定；空载电压较高的弧焊电源其电弧较空载电压低的稳定；有良好动特性的弧焊电源容易保证电弧稳定；采用直流电源焊接时，如果用碱性焊条则必须采用直流反接才能使电弧稳定燃烧，而不能用直流正接。那么什么叫直流正接，什么叫直流反接呢？这是因为直流弧焊电源有正、负两极，因而有两种不同的接法：将焊件接到直流弧焊电源的正极，焊条接至负极，这种接法叫直流正接 又称正极性 如图 2-6a) 所示 反之 将焊件接至负极 焊条接至正极称为直流反接，又称反极性 如图 2-6b) 所示。

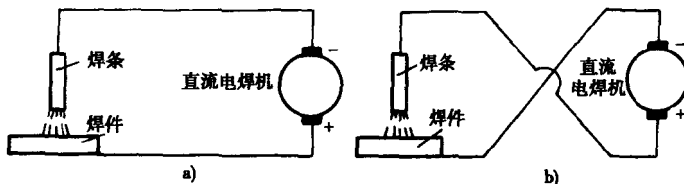


图 2-6 用直流电焊机时极性的不同接法
a 正接 b 反接

2. 焊条药皮

当焊条药皮中含有较多低电离电位元素 如钾 钠等 或它们的化合物时 容易保持电弧稳定燃烧。而药皮中含有较多氟化物时，由于在气体电离过程中，氟容易获得电子而形成负离子，使自由电子大量减少，而且负离子还能与正离子结合成中性质点，使电弧导电性变差，因而降低了电弧的稳定性。焊条偏心容易引起电弧偏吹，药皮局部剥落的焊条，电弧偏吹更为严重。也影响电弧的稳定性。

3. 气流

在露天 如室外船台 进行焊接时 风对电弧的稳定性影响很大 特别是对气体保护焊 严重时甚至无法施焊。

4. 焊接处不清洁

焊接处若有铁锈、水分及油污等物质，它们在焊接时要吸热分解，因此消耗了电弧的热能，影响电弧的稳定性。

5. 电弧的磁偏吹

因为电弧是一种导通电流的导体，而任何通电导体周围都要产生磁场，而磁场又会反过来对电流产生力的作用。在正常情况下电弧在焊条轴线周围产生的磁场强度是均匀的，电弧保持焊条轴向位置，如果由于种种原因使这种磁力线分布的均匀性受到破坏，电弧就会受到周围不均匀的电磁力的作用而偏离焊条轴线方向。这种由于电弧自身磁场促使电弧偏离焊条轴线方向的现象叫做电弧的磁偏吹。它极大地影响焊接质量，严重时使焊接过程难以进行。什么

情况下会引起电弧的磁偏吹呢？

导线接线位置不当：焊接时不只是通过焊条的电流会在电弧空间产生磁场而且通过工件的电流也会在电弧空间产生磁场，如果接线位置不当如图 2-7c)、d)那样接线，由于电流通路在电弧处相互垂直，则在电弧左侧(c图)或右侧(d)图)的空间为两段电流导体(电弧和工件)产生的同方向的磁力线相互迭加从而提高了该处的磁力线密度，而电弧另一侧的空间只有电弧本身产生的磁力线，因此电弧两侧的磁力线分布不均匀，故磁力线密度大的一侧对电弧产生的推力大，磁力线密度小的一侧对电弧产生的推力小，由此使电弧偏离焊条轴线。

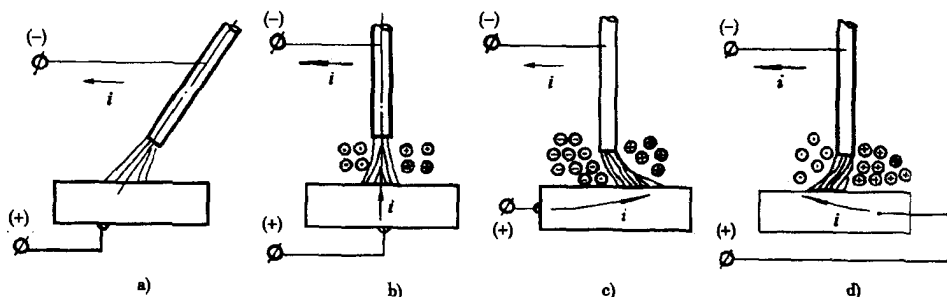


图 2-7 正常的焊接电弧和电弧的磁偏吹

另外还有一种情况也会引起磁偏吹，这就是电弧附近有铁磁性物质，当电弧一侧放置一块钢板(良导磁体)时，则电弧将离开焊条轴线偏向钢板，如图 2-8 所示。这是因为在电弧一侧放置钢板以后，钢板是良导磁体，磁力线将力求走磁阻小的通路，较多的磁力线集中到钢板中，电弧右侧的空间的磁力线密度显著降低，破坏了空间磁力线分布的均匀性，使电弧偏向有了钢板的一侧，看上去好似钢板吸引了电弧，实质上是被电弧另一边较强的磁场推了过来，电弧一侧放置的钢板越大或距离越近，引起的磁力线分布的不均匀性就越大，电弧的磁偏吹就越厉害。

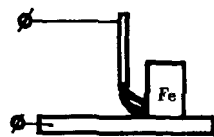


图 2-8 铁磁物质对电弧磁偏吹的影响

为了防止和减少电弧的磁偏吹现象，可适当改变接线的位置，例如把图 2-7c)的接线改为图 b)的方式，尽可能使弧柱周围的磁力线分布均匀；适当调整焊条的倾斜角度使焊条朝电弧偏吹的方向倾斜；采用短弧焊或改用交流电源。

§ 2-2 焊接热过程

焊接热过程所研究的内容主要是母材和焊条上热的分布及流动的规律性。焊接时焊接热源不断地把热能传递到母材的焊接区，使母材局部受热，焊件上存在着一个温度场，并与周围介质之间存在着温度差。因此，在焊件内部以及焊件与周围介质之间就要发生热能的流动。这些热能的传递和流动直接影响着焊件的最高温度、高温停留时间和冷却速度，进而影响焊缝的性能、焊件质量，所以必须认真研究焊接热过程。

一、焊接热效率

在焊接热过程中由热源所产生的热量并不是全部被利用，而是有一部分热量损失于周围介质和飞溅，也就是说焊件吸收到的热量要少于热源所提供的热量，我们把焊件吸收的热量与热源提供的热量之比称为焊接热效率，常以字母 η 表示。在一定条件下焊接热效率 η 主要取

决于焊接方法、焊接规范和焊接材料，此外电流的种类、极性、焊接速度以及焊接位置等都对加热过程的热效率有一定影响。一般情况下 η 值的大小如表 2-3 所示：

不同焊接方法的 η 值 表 2-3

焊接方法	碳弧焊	厚皮焊条手工电弧焊	埋弧自动焊	钨极氩弧焊		熔化极氩弧焊	
				交 流	直 流	钢	铝
η	0.5~0.65	0.77~0.87	0.77~0.99	0.68~0.85	0.78~0.85	0.66~0.69	0.70~0.85

二、焊接温度场

焊接时，焊件得到热源提供的热量，使其上各点的温度每一瞬时都在变化，我们把某瞬时工件上各点温度的分布称为温度场。可用如下函数式表示：

$$T=f(x\ y\ z\ t)$$

式中： T ——焊件上某点某瞬时的温度；
 $x、y、z$ ——焊件上某点空间坐标；
 t ——时间。

温度场的分布情况可用等温线或等温面来研究，所谓等温线、等温面就是把焊件上瞬时温度相同的各点连接在一起，形成一条线或一个面，各个等温线或等温面不能彼此相交，它们之间存在着温度差 如图 2-9 所示。

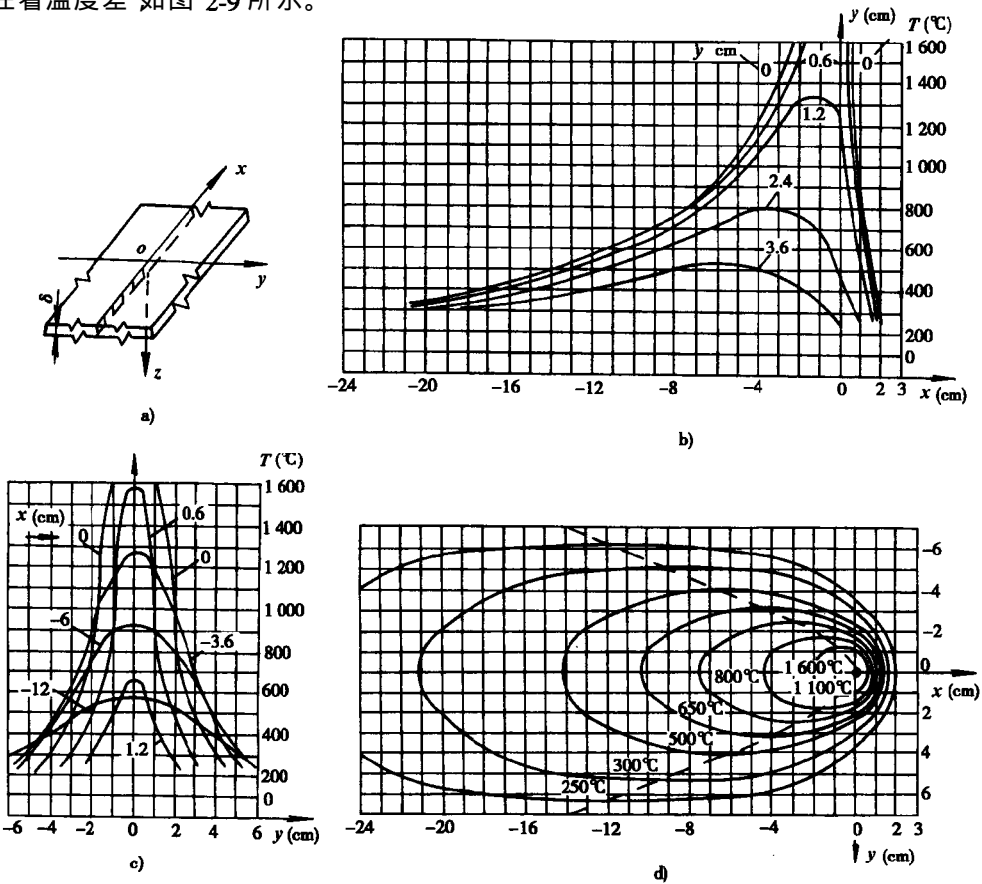


图 2-9 焊接温度场

三、焊接热循环

在焊接过程中热源沿焊件移动时，焊件上的某点温度随时间由低而高，达到最大值后，又由高而低的变化称为焊接热循环。在焊缝两侧距焊缝远近不同的各点所经历的热循环是不同的。如图 2-10 距焊缝越近的各点，加热最高温度越高，越远的各点加热最高温度越低。

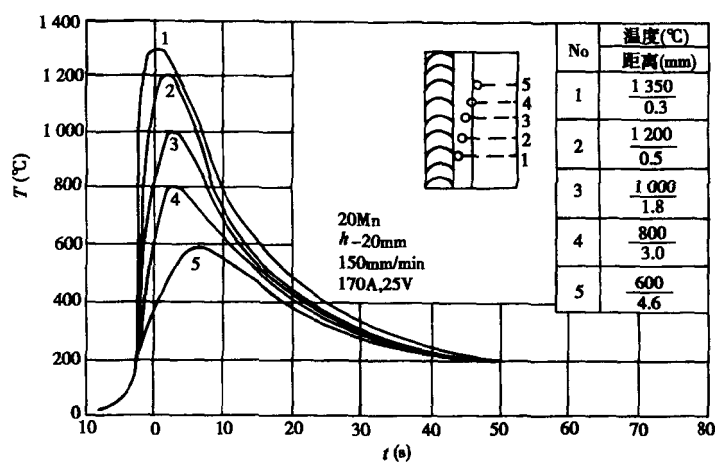


图 2-10 距焊缝不同距离各点的焊接热循环

研究焊接热循环主要考虑以下四个参数：

1. 加热速度 ω_H

在焊接条件下的加热速度比热处理条件下的要快得多，而且随着加热速度的提高，相变温度也随之提高。同时奥氏体的匀质化和碳化物的溶解过程也随加热速度的提高而不充分，因此必然影响到冷却过程中热影响区的组织和性能。

2. 加热的最高温度 T_m

我们知道，金属组织的变化除受化学成分影响之外，主要与加热温度和冷却速度有关。焊接时焊件上不同的点加热的最高温度不同，冷却速度不同就会有不同的组织和不同的性能。例如，在融合线附近，由于温度高母材晶粒发生严重长大，促使塑性降低。

3. 在相变温度以上的停留时间 t_H

在相变温度以上的停留时间越长，就越会有利于奥氏体的匀质化过程。

4. 冷却速度 ω_c

冷却速度是决定热影响区组织性能最重要的参数之一，是研究热过程的主要内容。

以上焊接热循环的四个主要参数如图 2-11 所示。焊接热循环是焊接接头经历的特殊热处理过程，也是对焊件上热分布的清晰描述，研究它对于了解应力变形，接头组织，提高焊接质量都是十分重要的。

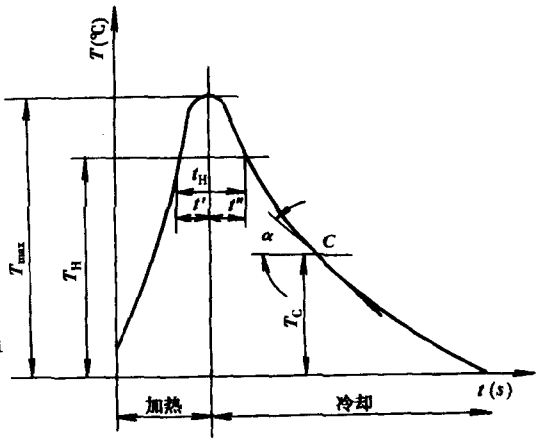


图 2-11 焊接热循环的参数

§ 2-3 焊 接 冶 金

在熔焊过程中，焊接区内各种物质之间在高温下相互作用的过程，称为焊接化学冶金过程。其中不仅包括化学变化，而且包括物质在作用相之间的迁移和分布过程，是个极为复杂的物理化学变化过程。这些过程对焊缝金属的成分、性能、焊接缺陷（如气孔，裂纹）以及焊接工艺性能都有很大的影响，因此引起人们广泛深入的研究，现已发展成为焊接理论的一个重要分支——焊接化学冶金学。研究它们的主要目的就是在寻找一些合适的方法和途径来消除焊缝金属中的有害杂质，增加焊缝金属中所需的有益合金元素，减少可能产生的焊接缺陷，保证焊缝金属的性能。

本节我们主要介绍焊接冶金中的合金过渡、脱氧、脱硫、脱磷等几个问题。

一、合金过渡

所谓合金过渡就是把所需要的合金元素通过焊接材料过渡到焊缝金属中去的过程。

合金过渡的目的，首先在于补偿焊接过程中由于蒸发、氧化等原因造成的合金元素的损失；其次是消除焊接缺陷，改善焊缝金属的组织 and 性能。例如，为了消除因硫引起的热裂纹需要向焊缝中加入锰。在焊接某些结构钢时，常向焊缝加入钛、铝等，以细化晶粒，提高焊缝的韧性；第三是获得具有特殊性能的堆焊金属。例如，当要求某些零件表面具有耐磨性、红硬性、耐热性和耐腐蚀性时，在生产上常常用堆焊的方法过渡 Cr、Mo、W、Mn 等合金元素。由此看来，研究合金过渡的方式具有重要意义。

常用的合金过渡的方式有以下几种：

1. 应用合金焊丝或带极

这种方式是把所需要的合金元素加入焊丝内，从而使合金元素过渡到焊缝中去。该方法的优点是可靠、焊缝成分稳定、均匀、合金损失少。缺点是制造麻烦，改变成分不灵活，某些硬质合金不宜于轧制、拔丝。

2. 应用药芯焊丝

药芯焊丝的结构是各式各样的，比较简单的是具有圆形端面的，其外皮是用普通低碳钢带卷制成的圆管，里面充满铁合金、铁粉和矿物的混合物。这种药芯焊丝也叫管状焊丝。在埋弧焊时，它可与普通熔炼焊剂配合使用。这种方法的优点是药芯中各种合金成分的比例可以任意调节，从而可以得到任意成分的堆焊金属；合金的损失比较少。缺点是不易制造，合金成分难以混合均匀。

3. 应用合金药皮或陶质焊剂

这种方式是将所需要的合金元素以纯金属或铁合金粉的形式加入焊条药皮或陶质焊剂中，配合普通焊丝使用。它的优点是简单方便，制造容易。但由于氧化损失较大并有一部分残留在渣中，故合金利用率比较低。

这些合金过渡的方式，在实际生产中可根据具体条件和要求来选择。有时可以两种方式同时使用。

二、脱氧

氧在焊缝中不论以何种形式存在，对其性能都有很大的影响。随着焊缝含氧量的增加，使

其硬度、强度、塑性明显下降，尤其是使低温冲击韧性急剧降低。此外，它还引起红脆、冷脆和时效硬化。氧对焊缝金属的物理和化学性能也有影响，如降低焊缝的导电性、导磁性、抗腐蚀性等。在焊接有色金属、活性金属和难熔金属时，氧的有害作用则更加突出。因此，必须设法减少氧在焊缝中的含量，即脱氧。

所谓脱氧，就是通过焊丝或药皮加入某种元素，使它本身在焊接过程中被氧化，从而保护被焊金属及其合金元素不被氧化的过程。这种用来脱氧的元素或铁合金叫脱氧剂。

脱氧的目的是尽量减少焊缝中的含氧量。这一方面要减少在液体金属中溶解的氧；另一方面要排除脱氧的产物，因为它是焊缝中金属氧化物夹杂的主要来源。

为了满足上述基本要求，选择脱氧剂的原则是：

(1)脱氧剂在焊接温度下对氧的亲合力应比被焊金属对氧的亲合力大。焊接铁基合金时，C、Al、Ti、Mn、Si等可以作为脱氧剂。在实际生产上。常用它们的铁合金或金属粉，如锰铁、硅铁、钛铁、铝粉等。在其他条件相同的情况下，元素对氧的亲合力越大，脱氧能力越强。

(2)脱氧的产物不溶于液体金属，并且它的比重应小于液体金属的比重。应该指出，如果生成的脱氧产物处于固态，则容易造成夹杂，而且其颗粒越小，造成夹杂的可能性越大。相反，脱氧产物处于液态，则由于它在液态金属中容易聚集长大，并浮到熔渣中去，故可减少夹杂物的数量，提高脱氧效果。

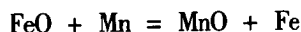
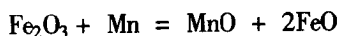
在选择脱氧剂时还必须考虑脱氧剂对焊缝成分，性能以及焊接工艺性能的影响。在满足技术要求的前提下还应考虑成本。

脱氧反应是分阶段和区域进行的，按其进行的方式和特点可分为先期脱氧、沉淀脱氧和扩散脱氧。

1. 先期脱氧

在药皮加热阶段，固态药皮中进行的脱氧反应叫先期脱氧，其特点是脱氧过程和脱氧产物与熔滴金属不发生直接关系。

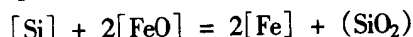
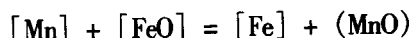
当含有脱氧剂的药皮被加热时，其中的高价氧化物或碳酸盐分解出的氧和二氧化碳便和脱氧剂发生相互作用，如：



反应的结果使气相的氧化性减弱，起到先期脱氧的作用。

2. 沉淀脱氧

沉淀脱氧是在熔滴和熔池内进行的，其原理是利用溶解在液态金属中的脱氧剂和 FeO 直接反应把铁还原，脱氧产物浮出液态金属。这是减少焊缝含氧量的具有决定意义的一环。常用的脱氧反应有：锰的脱氧反应、硅的脱氧反应和硅锰联合脱氧，化学方程式如下：



所谓硅锰联合脱氧就是把锰和硅按适当的比例加入金属中进行联合脱氧，可以得到更好的脱氧效果。实践证明 当 $[\text{Mn}]/[\text{Si}] = 3 \sim 7$ 时 脱氧产物可形成复合硅酸盐 它的比重小 熔

点低，在钢液中处于液态，因此容易聚合为半径大的质点，浮到熔渣中去，减少焊缝中的夹杂物，从而降低了焊缝中的含氧量。

3. 扩散脱氧

焊接过程中产生的 FeO 既溶于渣又溶于液态钢，在一定温度下平衡时，它在两相中的浓度应符合分配定律：

$$L = \frac{(\text{FeO})}{[\text{FeO}]}$$

式中： L ——分配常数；

(FeO) —— FeO 在渣中的浓度；

$[\text{FeO}]$ —— FeO 在液态钢中的浓度。

当温度下降时分配常数 L 增大，发生如下扩散过程： $[\text{FeO}] \longrightarrow (\text{FeO})$ 这意味着在熔池尾部的低温区进行扩散脱氧。

在焊接条件下 冷速大 扩散时间短 氧的扩散又慢 所以扩散脱氧是不充分的。

三、脱硫

硫是焊缝金属中有害的杂质之一。当硫以 FeS 的形式存在时危害性最大，因为它与液态铁几乎可以无限互溶，而在室温下它在固态铁中的溶解度仅为 $0.015\% \sim 0.02\%$ 因此在熔池结晶时它容易发生偏析 以低熔共晶 $\text{Fe} + \text{FeS}$ （熔点为 985°C 或 $\text{FeS} + \text{FeO}$ 熔点为 940°C ）的形式呈片状或链状分布于晶界。这样就增加了焊缝金属产生结晶裂纹的倾向，同时还会降低冲击韧性和抗腐蚀性。在焊接合金钢，尤其是高镍合金钢时硫的有害作用更为严重。因为硫与镍形成 NiS 而 NiS 又与镍形成熔点更低的共晶 $\text{NiS} + \text{Ni}$ （熔点为 644°C ）所以产生结晶裂纹的倾向更大。当钢焊缝含碳量增加时，也会促使硫发生偏析，从而增加它的危害性。

由于上述原因，应尽量减少焊缝中的含硫量，一般在低碳钢焊缝中应控制含硫量小于 0.035% 而合金钢焊缝则应小于 0.025% 。

减少含硫量的措施有以下几点：

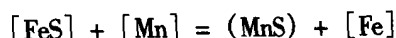
1. 限制焊接材料中的含硫量

焊缝中的硫主要来原与三个方面：一是母材，其中的硫几乎可以全部过渡到焊缝中去；二是焊丝 其中的硫约有 $70\% \sim 80\%$ 可以过渡到焊缝中去 三是药皮或焊剂 其中的硫约有 50% 可以过渡到焊缝中去。可见，严格控制焊接材料的含硫量是限制焊缝含硫量的关键措施。

在通常情况下，应按有关的标准选择原材料，低碳钢及低合金钢焊丝的含硫量应小于 $0.03\% \sim 0.04\%$ 合金钢焊丝应小于 $0.025\% \sim 0.03\%$ 不锈钢焊丝应小于 0.02% 。药皮 药芯和焊剂的原材料 如锰矿、赤铁矿、钛铁矿、锰铁等都含有一定的硫而且含量变动幅度较大 对焊缝含硫量有较大影响应严加控制。

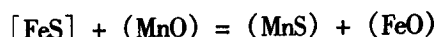
2. 用冶金方法脱硫

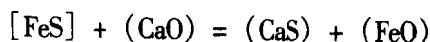
为了减少焊缝金属中的含硫量 如同脱氧一样 可以选择对硫的亲合力比铁大的元素进行脱硫。在焊接化学冶金学中常用的脱硫元素是锰，其脱硫反应方程式为：



反应的产物 MnS 进入熔渣。

熔渣中的碱性金属氧化物，如 MnO 、 CaO 等也能脱硫 其反应如下：





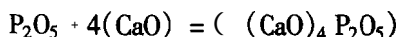
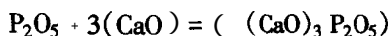
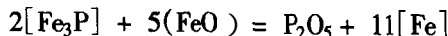
生成的 CaS 和 MnS 不溶于金属而进入熔渣中。根据质量作用定律可以看出，增加渣中的 MnO 和 CaO 的含量，减少渣中的 FeO 的含量，有利于脱硫。由于碱性渣中 MnO 和 CaO 的含量较多，而酸性渣中 FeO 的含量较多，所以酸性渣的脱硫能力比碱性渣差，增加熔渣的碱度可以提高脱硫能力。

四、脱磷

磷在多数钢焊缝中是一种有害的杂质。在液态铁中可溶解较多的磷，并认为主要以 Fe_2P 和 Fe_3P 的形式存在，而磷在固态铁中的溶解度只有千分之几。磷与铁和镍还可以形成低熔共晶，如 $\text{Fe}_3\text{P} + \text{Fe}$ (熔点为 1050°C)， $\text{Ni}_3\text{P} + \text{Ni}$ (熔点为 880°C)。因此在熔池快速结晶时，磷易发生偏析。磷化铁常分布于晶界，减弱了晶粒之间的结合力，同时它本身既硬又脆。这就增加了焊缝金属的冷脆性，即冲击韧性降低，脆性转变温度升高。焊接奥氏体钢或焊缝含碳量高时，磷也促使形成结晶裂纹。因此有必要限制焊缝的含磷量。

为减少焊缝的含磷量，首先必须限制母材、填充金属、药皮、焊剂中的含磷量，药皮和焊剂中的锰矿是导致焊缝增磷的主要来源。

磷一旦进入液态金属，就应当采用脱磷的方法将其清除。脱磷反应分为两步：第一步将磷氧化生成 P_2O_5 ；第二步使之与渣中的碱性氧化物生成稳定的磷酸盐，反应方程式为：



从这两阶段的脱磷反应可以看出，要同时有足够的 FeO 和 CaO ，脱磷效果才好。但无论是酸性焊条还是碱性焊条，都不同时具备这两种氧化物。酸性焊条熔渣中自由 FeO 虽多，但较少 CaO ，而碱性焊条熔渣中 CaO 虽多，但 FeO 较少。所以两种焊条的脱磷能力都不理想，一般是要严格控制原材料中的含磷量，以预防为主。

五、焊缝中的气孔

气孔是焊接生产中常常遇到的一种缺陷，它不仅削弱了焊缝的有效工作断面，同时也使应力集中增加，显著降低焊缝金属的强度和塑性。气孔对在动载下，特别是在交变载荷下工作的焊接结构更为不利，它显著降低焊缝的疲劳强度。

气孔不仅出现在焊缝的表面，有时也出现在焊缝的内部，并且在焊接生产中不易用简单的方法检查出来，因此它的危害性更为严重。

焊缝中常出现有各式各样的气孔，有时以单个的形式分布在焊缝的表面或内部；有时以成堆的形式聚集在焊缝的某个地方。在焊缝的纵断面上，气孔有时呈链状沿着焊缝长度分布；也可以成条虫状沿结晶方向分布。气孔有时出现在焊缝的表面；有时在焊缝的根部；也有时贯穿整个的焊缝厚度；还有时以弥散状分布在整个焊缝的断面上，从形成气孔的气体种类来看，气孔还可以分为氢气孔、氮气孔和一氧化碳气孔。总之，气孔的类型十分繁多。

1、焊缝中气孔产生的原因

焊接过程中熔池周围充满大量气体，这些气体来自周围的空气、焊条药皮和焊剂的分解，焊件上的铁锈、油漆、油脂和水分等受热后也能产生大量气体，这些气体在电弧高温下通过化学反应或溶解等作用进入熔池，使熔池金属吸收了相当数量的气体；同时，在熔池中进行的冶