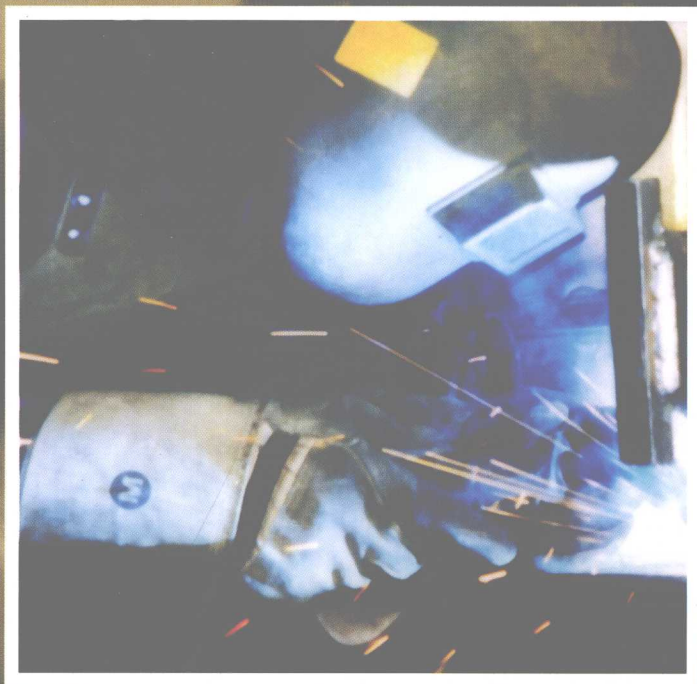


劳动预备制教材 职业培训教材

电焊工技术

(中级)



中国劳动社会保障出版社

劳动预备制教材
职业培训教材

电焊工技术

(中 级)

劳动和社会保障部教材办公室组织编写

中国劳动社会保障出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电焊工技术：中级/劳动和社会保障部教材办公室组织编写. —北京：
中国劳动社会保障出版社，2000.6

劳动预备制、职业培训教材

ISBN 7-5045-2803-X

I. 电…

II. 劳…

III. 电焊—技术培训—教材

IV. TG443

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 61486 号

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码：100029)

出版人：唐云岐

*

世界知识印刷厂印刷 北京顺义河庄装订厂装订

787毫米×1092毫米 16开本 9.25印张 230千字

2000年7月第1版 2007年5月第5次印刷

印数：2000册

定价：12.50元

读者服务部电话：010-64929211

发行部电话：010-64927085

出版社网址：<http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

举报电话：010-64911344

说 明

本书是劳动和社会保障部教材办公室组织编写的全国劳动预备制机械类电焊工培训教材，供全国职业培训、劳动预备制学员使用。

本书内容包括：焊接冶金知识、焊接工艺及设备、常用金属材料的焊接、焊接应力和变形、焊接检验、焊接质量控制、中级电焊工操作技能和设备的维护及故障排除等。

本书亦可供职业学校、在职培训和自学使用。

本书由井志华、林仁华、郑应国、李继三、王少清、郑祺、李峰编写。

本书在编写中采用了我社出版的有关教材的内容，特此说明。

前 言

目前，我国正在推行一项新的劳动制度——劳动预备制，即是对新生劳动力实行追加1~3年的职业教育和培训，帮助其提高就业能力，在具备相应的职业资格后，在国家政策指导和帮助下实现就业。

实施劳动预备制度是深化劳动制度改革的重要措施，是培育和发展劳动力市场的一项基本建设。实施这项制度，对缓解就业压力、保持我国就业局势的稳定和提高劳动者整体素质具有重要意义。

实施劳动预备制，搞好教材建设是重要的一环。为解决当前实施劳动预备制对教材的急需，我们会同中国劳动社会保障出版社组织编写了法律常识、职业道德、就业指导、实用写作、英语日常用语、交际礼仪、劳动保护知识、计算机应用、应用数学、实用物理知识等10门公共课教材，并根据劳动预备制培训的实际需要，编写了电工、计算机、交通、餐饮服务、商业、机械、电子、建筑、会计的专业课教材，供劳动预备制培训单位使用。

实施劳动预备制是一项新的工作，对教材建设提出了新的要求，我们正在抓紧做好这方面的工作。现在编写的这套教材，是劳动预备制教材建设的初步尝试。我们力求通过这套教材，使经过培训的人员掌握从业必备的基本知识和专业技能，具有良好思想品质和职业道德，成为素质较高的劳动者。

在编写这套教材的过程中，编写人员克服困难，在较短的时间内完成了这项工作，在此谨向为编写这套教材付出辛勤劳动的有关同志表示衷心感谢！

由于编写时间仓促，这套教材尚有许多不足之处，我们将在劳动预备制试点城市试用过程中，听取各方面的意见，再进行修订，使其更加完善。

劳动和社会保障部教材办公室

目 录

第一章 焊接电弧及焊接冶金知识	(1)
§ 1—1 电离及电子发射.....	(1)
§ 1—2 焊丝金属的熔化及熔滴过渡.....	(2)
§ 1—3 焊接化学冶金过程.....	(3)
§ 1—4 焊接结晶过程.....	(11)
§ 1—5 焊接中的气孔.....	(15)
§ 1—6 焊接裂纹.....	(19)
复习题.....	(24)
第二章 焊接工艺及设备	(25)
§ 2—1 气体保护焊 (CO ₂ 、Ar) 的工艺及设备.....	(25)
§ 2—2 等离子弧焊和切割的工艺及设备.....	(29)
§ 2—3 电渣焊的工艺及设备.....	(31)
复习题.....	(33)
第三章 常用金属材料的焊接	(34)
§ 3—1 钢的焊接性.....	(34)
§ 3—2 碳素钢的焊接.....	(36)
§ 3—3 普通低合金结构钢的焊接.....	(38)
§ 3—4 铬钼耐热钢的焊接.....	(41)
§ 3—5 不锈钢的焊接.....	(43)
§ 3—6 铸铁焊补.....	(49)
§ 3—7 铝及铝合金的焊接.....	(52)
§ 3—8 铜及铜合金的焊接.....	(55)
复习题.....	(59)
第四章 焊接应力和变形	(60)
§ 4—1 焊接应力和变形产生的原因及形式.....	(60)
§ 4—2 控制焊接残余变形的工艺措施和矫正方法.....	(61)
§ 4—3 减少和消除焊接残余应力的工艺措施和方法.....	(64)
复习题.....	(65)
第五章 焊接检验	(66)
§ 5—1 非破坏性检验.....	(67)
§ 5—2 破坏性检验.....	(73)
复习题.....	(76)
第六章 典型结构件的焊接和焊接质量控制	(77)

§ 6—1 典型结构件的焊接·····	(77)
§ 6—2 焊接质量控制·····	(81)
复习题·····	(85)
第七章 中级电焊工操作技能 ·····	(86)
§ 7—1 焊接材料·····	(86)
§ 7—2 焊接方法·····	(88)
第八章 设备的维护及故障排除 ·····	(112)
8—1 焊接设备的维护及故障排除·····	(112)
8—2 装焊夹具的正确使用及改进·····	(120)
复习题·····	(121)
附录 1 中级电焊工技能要求部分练习题评分标准 ·····	(122)
附录 2 中华人民共和国职业技能标准 ·····	(138)
附录 3 中华人民共和国职业技能鉴定规范 ·····	(140)

第一章 焊接电弧及焊接冶金知识

§ 1—1 电离及电子发射

一、电离

1. 概念 气体受到电场或热能的作用，就会使中性的气体分子中的电子获得足够的能量，以克服原子核对它的引力，而成为自由电子，同时中性原子由于失去电子而变成带正电荷的正离子，这种使中性的气体分子或原子释放电子形成正离子的过程称为气体电离。

不同元素的电离难易程度是不同的，一般排列顺序如下：

钾、钠、铝、钙、铬、钛、钼、锰、镁、铜、铁、硅、氢、氧、氮、氩、氟、氦
依次由左向右，其电离程度由易到难。

2. 电离的方式

(1) 热电离。气体粒子受热的作用而产生的电离称为热电离。温度越高，热电离作用越大。

(2) 电场作用下的电离。带电粒子在电场作用下，各作定向高速运动，产生较大的动能，当不断与中性粒子相碰撞时，则不断地产生电离。如两电极间的电压越高，电场作用越大，则电离作用越强烈。

(3) 光电离。中性粒子在光辐射的作用下产生的电离称为光电离。

二、电子发射

阴极的金属表面连续地向外发射出电子的现象称为阴极电子发射。

焊接时，气体的电离是产生电弧的重要条件，但是，如果只有气体电离而阴极不能发射电子，没有电流通过，那么电弧还是不能形成。因此，阴极电子发射也和气体电离一样，两者都是电弧产生和维持的必要条件。

电子逸出金属表面需要吸收能量，根据吸收能量的不同，阴极电子发射可分为以下三种形式：

1. 热电子发射 阴极表面温度升高，其中自由电子动能增加，当动能增加到一定值时，电子就会逸出金属表面而产生热电子发射。温度越高，电子发射能力越强。

2. 场致电子发射 当电极间有一定强度的电场时，电场促使阴极表面电子逸出，从而产生电子发射。电场强度与电极间电压成正比，与电极间的距离成反比。电场强度越大，场致电子发射的能力越强。

3. 撞击电子发射 当运动速度较高，能量较大的阳离子撞击阴极表面时，将能量传递给阴极表面的电子而产生电子发射称为撞击电子发射。电场强度越大，阳离子的运动速度也越快，则撞击电子发射的作用也越激烈。

§ 1—2 焊丝金属的熔化及熔滴过渡

一、焊丝金属的熔化

1. 焊丝金属的加热 熔化极电弧焊时，焊丝具有两个作用，一方面作为电弧的一个极；另一方面向熔池提供填充金属。焊接时加热并熔化焊丝的热量有：电阻热、电弧热、化学热（在一般情况下仅占1%~3%，常忽略不计）。

(1) 电阻热。从导电的接触到焊丝末端的长度称为伸出长度，当电流在焊条上通过时，将产生电阻热。电阻热的大小决定于焊条或焊丝的伸出长度、电流密度和焊条金属的电阻。

焊丝伸出长度越长，则电阻热越大；电流密度增加，电阻热加大；焊丝电阻率决定于焊条金属本身电阻率和焊条直径，同种材料的焊丝，其直径越大，则电阻越小，相对产生的电阻热也就减少。

(2) 电弧热。电弧产生热量仅有一部分用来熔化焊丝，大部分热量是用来熔化母材、药皮或焊剂，另外还有相当部分的热量消耗在辐射、飞溅和母材传热上。

2. 焊丝金属的熔化 焊丝金属受到电阻热和电弧热的加热后，开始熔化。表示金属熔化特性的主要参数是熔化速度。

在正常焊接参数内，熔化速度与焊接电流成正比，即：

$$g_m = \frac{G}{t} = \alpha_p I$$

式中 g_m ——焊丝金属的熔化速度，g/h；

G ——熔化的焊丝质量，g；

I ——焊接电流，A；

t ——电弧燃烧时间，h；

α_p ——焊丝的熔化系数，g/(A·h)。

焊条（或焊丝）的熔化系数 α_p 表示在1h内1A电流所能熔化的焊丝金属质量，是表示熔化速度快慢的一个参数。如果忽略电阻热对金属加热的影响，则当焊丝的材料及其直径一定时，其熔化系数为一常数。

二、焊丝金属的熔滴过渡

弧焊时，在焊丝端部形成的向熔池过渡的液态金属滴叫熔滴。熔滴通过电弧空间向熔池转移的过程叫熔滴过渡。

1. 熔滴上的作用力

(1) 重力。焊接时，熔滴由于本身的重力而具有下垂的倾向。平焊时起促进熔滴过渡的作用。

(2) 表面张力。金属熔化后，在表面张力的作用下形成球滴状，使液体金属不会马上脱离焊条。表面张力的大小与熔滴的成分、温度及环境气氛有关；与焊丝直径成正比。另外还与保护气体的性质有关。平焊时表面张力阻碍熔滴过渡，其他位置则有利于过渡。

(3) 电磁压缩力。当两根平行载流导体通过同方向电流时，会产生使导体相吸的电磁力。焊接时，可以把熔滴看成由许多平行载流导体所组成，这样熔滴上就受到由四周向中心

的电磁压缩力。在任何焊接位置，电磁压缩力的作用方向都是促使熔滴向熔池过渡的。

(4) 斑点压力。电弧中的带电质点——电子和阳离子，在电场的作用下向两极运动，撞击在两极的斑点上而产生机械压力，这个力称为斑点压力。斑点压力的作用方向是阻碍熔滴向熔池过渡。并且正接时的斑点压力较反接时大。

(5) 等离子流力。由于电弧截面处电磁压缩力大小不同，使电弧气流的两端形成压力差，使等离子体迅速流动产生压力，这种压力称为等离子流力。这种流力有利于熔滴过渡。

(6) 电弧气体的吹力。焊条末端形成的套管内含有大量气体，并顺着套管方向以挺直而稳定的气流把熔滴送到熔池中去。不论焊接的空间位置如何，电弧气体的吹力都将有利于熔滴金属的过渡。

2. 熔滴过渡的形态

(1) 滴状过渡。当电弧长度超过一定值时，熔滴依靠表面张力的作用，自由过渡到熔池，而不发生短路。

滴状过渡形式又可分为粗滴过渡和细滴过渡，粗滴过渡时飞溅大，电弧不稳定，成形不好。熔滴尺寸的大小与焊接电流、焊丝成分有关。

(2) 短路过渡。焊丝端部的熔滴与熔池短路接触，由于强烈的热和磁收缩的作用使其爆断，直接向熔池过渡，这种形式称为短路过渡。如图 1—1 所示。短路过渡能在小功率电弧下（小电流、低电弧电压），实现稳定的金属熔滴过渡和稳定的焊接过程。所以适合于薄板或需低热输入的情况下的焊接。

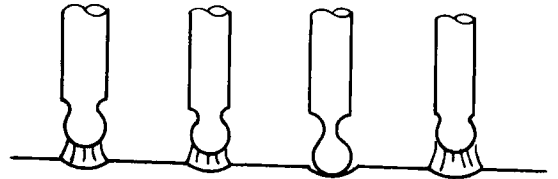


图 1—1 熔滴短路过渡的情况

(3) 喷射过渡。熔滴是细小颗粒并以喷射状态快速通过电弧空间向熔池过渡的形式称为喷射过渡。产生喷射过渡除了要有一定的电流密度外，还必须要有一定的电弧长度。其特点是熔滴细、过渡频率高、电弧稳定、飞溅小、熔深大、焊缝成形美观、生产效率高。

3. 熔滴过渡时的飞溅 熔焊过程中，熔化的金属颗粒和熔渣向周围飞散的现象叫飞溅。

(1) 气体爆炸引起的飞溅。由于冶金反应时在液体内部产生大量 CO 气体，气体的析出十分猛烈，造成液体金属（熔滴和熔池金属）发生粉碎形的细滴飞溅。

(2) 斑点压力引起的飞溅。短路过渡的最后阶段，在熔滴与熔池之间发生烧断开路，这时的电磁力使熔滴往上飞去，引起强烈飞溅。

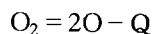
4. 熔滴过渡时的蒸发 液态金属在任何温度下都能够蒸发，温度越高，蒸发越快。

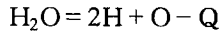
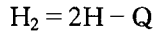
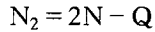
§ 1—3 焊接化学冶金过程

焊接化学冶金是在焊接过程中通过冶金处理的方法，消除焊缝金属中的有害杂质，增加焊缝金属中某些有益的合金元素，从而保证焊缝金属的各种性能。

一、焊接化学冶金过程的特点

1. 温度高及温度梯度大 焊接电弧的温度很高，一般可达到 6 000~8 000℃，使金属剧烈蒸发，电弧周围的气体 CO₂、N₂、H₂ 等大量分解：





分解后的气体原子或离子很容易熔在液态金属中，随着温度下降溶解度也降低，如果来不及析出，易造成气孔。

熔池温差大，熔池的平均温度在 2 000°C 以上，并被周围的冷却金属所包围，温度梯度大，两者温差相当大。因此，使焊件产生内应力并引起变形，严重者还产生裂纹。

2. 熔池体积小，熔池存在时间短 焊接熔池的体积极小，手工电弧焊时熔池的质量通常是 0.6~16 g。同时，加热及冷却速度很快，由局部金属开始熔化形成熔池，到结晶完了的全部过程一般只有几秒钟的时间，而温度又在急剧变化，因此整个冶金反应常常达不到平衡。在很小的金属体积内化学成分就有较大的不均匀性，形成偏析。

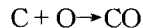
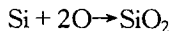
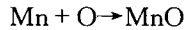
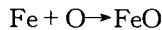
3. 熔池金属不断更新 在焊接时，由于熔池中参加反应的物质经常改变，不断有新的铁水及熔渣加入到熔池中参加反应，增加了焊接冶金的复杂性。

4. 反应接触面大、搅拌激烈 焊接时，熔化金属是以滴状从焊条端部过渡到熔池的，因此熔滴与气体及熔渣的接触面就大大超过了一般炼钢的情况。接触面大可以加速反应的进行，但同时气体侵入液体金属中的机会也增多了，使焊缝金属易产生氧化、氮化及气孔。此外熔池搅拌激烈有助于加快反应速度，也有助于熔池中气体的逸出。

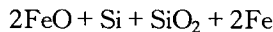
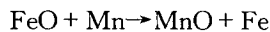
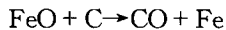
二、气体与金属的作用

在焊接过程中，熔池周围充满着各种气体，这些气体主要来自以下几个方面：焊条药皮或焊剂中造气剂产生的气体；来自周围的空气、焊芯、焊丝和母材在冶炼时残留的气体；焊条药皮或焊剂未烘干在高温下分解成的气体；母材表面未清理干净的铁锈、水分、油、漆等，在电弧作用下分解出的气体。这些气体都不断地与熔池金属发生作用，有些还进入到焊缝金属中去，其主要成分为 CO、CO₂、H₂、O₂、N₂、H₂O 及少量的金属与熔渣的蒸气，气体中以 O₂、N₂、H₂ 对焊缝的质量影响最大。

1. 氧与焊缝金属的作用 焊接区的氧气主要来自电弧中氧化性气体（CO₂、O₂、H₂O 等）、药皮中的高价氧化物和焊件表面的铁锈、水分等的分解产物。氧在电弧高温作用下分解为原子，原子状态的氧比分子状态的氧更活泼，能使铁和其他元素氧化。



其中 FeO 能熔于液体金属，由于有 FeO 存在，还使其他元素进一步氧化。



由于氧化的结果，使焊缝中有益元素大量烧损，氧化的产物一般上浮到熔渣中去，有时也会以夹杂形式存在于焊缝中。焊缝金属中的含氧量增加，使它的强度极限、屈服点、塑性

和冲击韧性降低，尤以冲击韧性降低更为明显。此外，还使焊缝金属的抗腐蚀性能降低，加热时有晶粒长大趋势，冷脆的倾向增加。

氧与碳、氢反应，生成不溶于金属的气体 CO 和 H₂O，若这种反应是在结晶温度时进行的，那么，由于熔池已开始凝固，CO 和 H₂O 不能顺利逸出，便形成气孔。

由于氧有这些危害，所以焊接时必须脱氧。手工电弧焊焊缝中氧的含量除与焊条的成分有关以外，还与焊接电流、电弧长短有关。电流越大，熔滴越细，则增大了熔滴与氧的接触面积；电弧越长，使熔滴过渡的路程越长，从而增加了熔滴与氧的接触机会与时间，结果都使得缝金属的含氧量增加。

2. 氢与焊缝金属的作用 焊接区的氢主要来自受潮的药皮或焊剂中的水分、焊条药皮中的有机物、焊件表面的铁锈、油脂及油漆等。

通常情况下，氢不和金属化合，但是它能够溶于 Fe、Ni、Cu、Cr、Mo 等金属，氢在铁中的溶解度如图 1—2 所示。氢在铁中的溶解度与温度和铁的同素异构体有关，还与氢的压力有关。氢溶于铁中，只能以原子状态或离子状态溶入金属。由图 1—2 可以看出，温度越高，氢溶于金属中的数量也越多，而在相变时气体的溶解度发生突变。焊接时的冷却速度很快，容易造成过饱和的氢残留在焊缝金属中，当焊缝金属的结晶速度大于它的逸出速度时，就形成气孔。

氢是还原性气体，它在电弧气氛中有助于减少金属的氧化，但是，在大多数情况下，这种好作用不仅完全被抵消，而且还产生许多有害的作用，如引起氢脆性、白点、硬度升高，使钢的塑性严重下降，严重时将引起裂纹。

3. 氮与焊缝金属的作用 焊接区中的氮主要来自空气，它在高温时熔入熔池，并能继续溶于凝固的焊缝金属中。氮随着温度下降，溶解度降低，析出的氮与铁形成化合物，以针状夹杂形式存在于焊缝金属中。氮的含量较高时，对焊缝金属的力学性能有较大的影响，如硬度和强度提高，塑性降低。此外，氮也是形成气孔的原因之一。由于氮主要来源于空气，故电弧越长，氮侵入熔池也越多；熔池保护差，氮侵入也越多。目前使用的气体保护电弧焊，埋弧自动焊或常用的手工电弧焊，保护情况都比较好，因此能显著地降低焊缝中的含氮量。

三、焊接熔渣的酸、碱性

焊接过程中，焊条药皮或焊剂熔化后经过一系列化学变化，形成的覆盖于焊缝表面的非金属物质，称为熔渣。钢焊条熔渣主要由氧化物组成，这些氧化物有的是金属氧化物，有的是非金属氧化物。如果按化学性质来分，可分为碱性氧化物（CaO、MgO、FeO、MnO 等）、酸性氧化物（SiO₂、TiO₂、P₂O₅ 等）和两性氧化物（Al₂O₃、Fe₂O₃、Cr₂O₃ 等）。熔渣中除氧化物外，还有氟化物（CaF₂、NaF、KF 等）和氯化物（KCl、NaCl 等）及少量的硫化物、

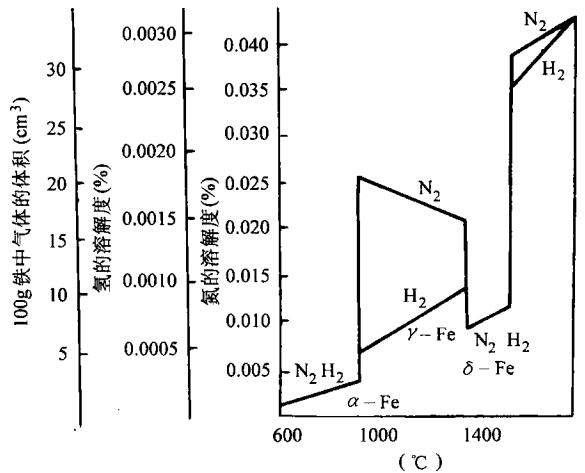


图 1—2 压力为 0.1 MPa 时氮和氢在铁中的溶解度

碳化物。

碱性氧化物多时，熔渣表现为碱性，反之，熔渣的酸性氧化物多时表现为酸性。为了表示熔渣碱性的强弱，我们用“碱度”表示：

$$K = \frac{\text{各种碱性氧化物的总质量}}{\text{各种酸性氧化物的总质量}} \quad (1-1)$$

式中 K 代表熔渣的碱度，当 $K > 1.5$ 时，化学性质呈碱性的熔渣称为碱性渣； $K < 1.5$ 时，化学性质呈酸性的熔渣称为酸性渣。

E4320 焊条的焊接熔渣由 FeO 、 SiO_2 、 MnO 构成，是以酸性氧化物为主的；E4303 焊条的熔渣由 TiO_2 、 SiO_2 、 CaO 构成，也以酸性氧化物为主，所以称为酸性焊条。E5015 焊条的熔渣由 CaO 、 CaF_2 构成，是以碱性物为主，称为碱性焊条。

四、焊缝金属的脱氧

焊缝金属的含氧量增多，将使焊缝金属的强度、硬度、塑性、韧性及抗腐蚀性能均降低，而且使飞溅、气孔和冷、热脆性倾向增大。因此，为了保证焊缝金属的力学性能，必须在熔池结晶前进行脱氧（对低碳钢和低合金钢来说危害性最大的主要是 FeO ），使焊缝金属中氧化夹杂物减少到最低限度。

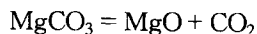
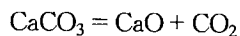
焊缝金属的脱氧主要有两个途径：脱氧剂脱氧（根据脱氧的时间可分为先期脱氧、沉淀脱氧）及扩散脱氧。

选择脱氧剂的原则是：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。元素对氧的亲合力大小顺序为： Al 、 Ti 、 C 、 Si 、 Mn 、 Fe 。在实际生产中，常用它们的铁合金或金属粉，如锰铁、硅铁、钛铁、铝粉等作为脱氧剂。元素对氧的亲合力越大，脱氧能力越强；脱氧后的产物应不溶于金属而容易被排除入渣固定；脱氧后的产物熔点应较低，密度应比金属小，易从熔池中上浮入渣。

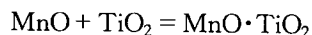
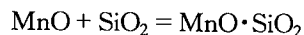
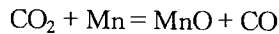
根据酸性焊条和碱性焊条的药皮类型不同，它们采用的脱氧途径及脱氧剂选用的元素也有所区别，现分别讨论如下：

1. 酸性焊条（以 E4303 为例）

(1) 先期脱氧。焊接开始后，在焊条药皮加热过程中，药皮中的碳酸盐（ CaCO_3 、 MgCO_3 ）等，受热分解放出 CO_2 ，其化学反应式如下：



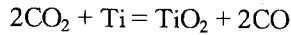
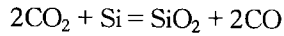
这时药皮内锰铁中的锰和 CO_2 反应，氧化物转入渣中固定。反应式如下：



这样就尽可能早期把氧去除，以免与熔化金属发生作用后使金属氧化，这种脱氧方式称为“先期脱氧”。它主要发生在焊条端部反应区，脱氧过程和脱氧产物一般不和熔滴金属发生直接关系。

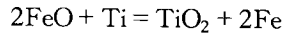
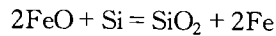
MnO 是碱性氧化物。E4303 熔渣中酸性氧化物 SiO_2 和 TiO_2 很多，约占一半以上。酸性氧化物与碱性氧化物可以生成稳定的复合硅酸盐或钛酸盐而进入熔渣，因此上述反应容易向右进行，也就是说脱氧效果好。

如果 E4303 焊条的药皮主要采用硅铁 (Si—Fe) 和钛铁 (Ti—Fe) 作脱氧剂, 则:

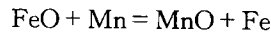


由于 E4303 熔渣中 SiO_2 及 TiO_2 已经很多, 因此上述反应不容易向右进行, 因而不易脱氧。

(2) 沉淀脱氧。沉淀脱氧 (又称熔池脱氧), 是利用熔池中的合金元素进行脱氧, 并使脱氧后的产物不溶于熔池而排入熔渣, 脱氧对象主要是溶于熔池的 FeO 。在 E4303 焊条药皮中用 Mn 脱氧效果很好。Si、Ti 对氧的亲合力比 Mn 和氧的亲合力大得多, 按理脱氧作用比 Mn 强, 那么为什么 E4303 焊条中, 不用 Si 及 Ti 而必须用 Mn 来脱氧呢? 这是由于 E4303 焊条的熔渣中含有大量的 SiO_2 及 TiO_2 , 而用 Si 及 Ti 脱氧后的生成物也是 SiO_2 及 TiO_2 均系酸性氧化物, 这些生成物无法与熔渣中存在的大量酸性氧化物结合成稳定的复合化合物而进入熔渣。因此以下脱氧反应难以向右进行而无法脱氧:



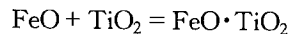
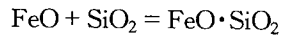
而 Mn 的脱氧反应是:



MnO 系碱性氧化物, 因此很容易与酸性氧化物 (SiO_2 、 TiO_2) 结合成复合物 ($\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ 及 $\text{MnO} \cdot \text{TiO}_2$) 而进入熔渣, 所以反应不断向右进行有利于脱氧。

铝的脱氧是依靠铝与氧的强烈反应和所生成的 Al_2O_3 不溶于铁水的性质。但 Al_2O_3 不易上浮, 易形成夹渣, 另外在先期脱氧时由于铝对氧的亲合力大, 因而抑制了碳和其他合金元素的脱氧作用, 从而使脱氧作用延迟到熔池中进行, 导致熔池结晶期产生 CO 而形成气孔。同时铝的脱氧是放热反应, 会引起气体突然膨胀, 使飞溅倾向增大, 所以在这类焊条中不宜采用。

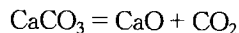
(3) 扩散脱氧。 FeO 既可熔于 Fe 中, 也可从熔池扩散到熔渣。当熔池中 FeO 不断扩散到熔渣, 使熔池的含氧量降低, 这种方法称为扩散脱氧。由于 FeO 系碱性氧化物, 在 E4303 焊条的熔渣中有大量 SiO_2 和 TiO_2 (酸性氧化物), 因此可结合成稳定的复合化合物, 降低熔渣中自由 FeO 的含量。



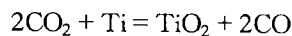
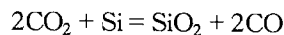
这更有利于熔池中 FeO 不断向熔渣中扩散, 但焊接过程的冶金时间很短, 而扩散脱氧是一个扩散过程, 需要较长时间, 所以扩散脱氧效果是有限的。但熔池的搅拌作用有利于扩散脱氧。

2. 碱性焊条 (以 E5015 为例)

(1) 先期脱氧。E5015 焊条药皮中含有大量的大理石, 在加热时放出 CO_2 气体:

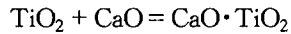
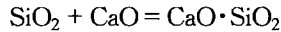


药皮中主要依靠硅铁和钛铁来脱氧, 脱氧反应是:



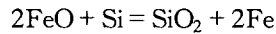
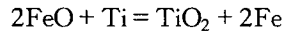
SiO_2 和 TiO_2 是酸性氧化物, E5015 焊条熔渣碱性氧化物多, 占熔渣的 2/3 以上, 熔渣

的碱度很大，这样脱氧产物的酸性 SiO_2 和 TiO_2 很容易和熔渣中碱性氧化物结合，生成复合化合物。

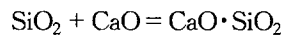
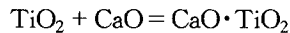


如果 E5015 焊条采用锰铁作脱氧剂，则脱氧产物 MnO 是碱性的，由于 E5015 碱度大，碱性氧化物已很多， MnO 不易形成稳定的渣，用 Mn 脱氧反应不易进行，故不利脱氧。因此锰铁在 E5015 焊条中只起渗合金作用。

(2) 沉淀脱氧。E5015 焊条药皮中用 Ti 、 Si 对熔池中的 FeO 脱氧效果好，脱氧反应是：



脱氧后的产物入渣固定：



碱性焊条中为提高脱氧能力，有时采用铝铁 ($\text{Al}-\text{Fe}$) 来脱氧，铝铁虽有造成夹渣、气孔和产生飞溅的缺点，但铝在某种条件下可与氮结合和生成氮化铝 (AlN)，因而能减少氮对产生气孔和焊缝时效性能的影响。因此有时酌情采用，或与其他合金配合作为联合脱氧中的一个组元。对 Al 和 Ti 一般只是在先期脱氧时起作用，因而碱性焊条在沉淀（熔池）脱氧时主要是用 Si 。

扩散脱氧在碱性焊条中基本上不存在，这是因为在碱性熔渣中存在着大量的强碱性的 CaO ，而熔池中的 FeO 也是碱性氧化物，因此扩散脱氧难以进行。

五、焊缝金属的脱硫

硫是钢中的有害杂质之一，在钢材和焊芯中都要加以限制，但在焊条药皮中某些物质常含有硫，如钛白粉在未经处理前含硫量高达 0.14% 以上，因此需经高温焙烧使含硫量降至 <0.05%，才能满足焊条生产的要求。

硫在低碳钢中主要以 FeS 和 MnS 形式存在。 FeS 可无限地溶于液态铁中，而溶于固态铁却很少，只有 0.015% ~ 0.020%，因此熔池凝固时 FeS 即析出，并与 $\alpha\text{-Fe}$ 、 FeO 及 $(\text{FeO})_2 \cdot \text{SiO}_2$ 等形成低熔点共晶（其熔点见表 1—1），在焊缝结晶过程中析集于晶界上呈液态薄膜，因而在焊缝冷却时所造成的内应力作用下容易引起晶界处的开裂——热裂纹。

表 1—1 硫化物的熔点比较

共晶物	$\text{FeS} + \alpha\text{-Fe}$	$\text{FeS} + \text{FeO}$
熔 点	985°C	940°C

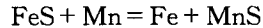
MnS 在液态铁中溶解度极小，所以容易排除入渣，即使不能排走而留在焊缝中，也由于 MnS 熔点高（1 620°C）并呈球状分布于焊缝中，因而不易开裂。

1. 脱硫方法 在焊接过程中脱硫的主要办法有元素脱硫和熔渣脱硫。

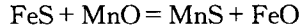
(1) 元素脱硫。各种常见元素与硫的亲合力大小排列如下：



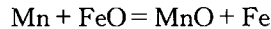
这些元素中 Al、Ca、Mg 的脱硫能力较强，但因极易氧化，故一般不采用。在焊接中最常用的是 Mn。其反应式为：



(2) 熔渣脱硫。MnO 脱硫反应式为：

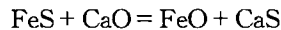


从反应式可知，当焊缝和熔渣中 MnO 增加或 FeO 减少时，反应易向右进行，脱硫作用加强，这说明脱硫反应和脱氧同时进行，如果有足够的 Mn，则按下列公式反应：



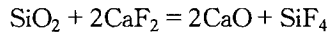
即 Mn 的增加既减少 FeO，又增加了 MnO 用以脱硫，但因焊接冶金时间短，MnO 脱硫反应不可能进行充分。

CaO 脱硫反应式为：



Ca 比 Mn 对硫的亲合力强，并且 CaS 完全不溶于金属，所以 CaO 脱硫效果好，要增加 CaO 的脱硫能力，同样要增加 CaO 或减少 FeO，也就是以 CaO 脱硫时也必须同时脱氧。

CaF₂ 脱硫，一方面是氟与硫化合成挥发性的氟硫化物 (SF)，另一方面 CaF₂ 与 SiO₂ 作用可增加 CaO，有利于脱硫。



2. 酸性焊条和碱性焊条的脱硫

(1) 酸性焊条 (以 E4303 为例)。E4303 焊条的熔渣中有大量的酸性氧化物 SiO₂ 及 TiO₂，容易和碱性氧化物 MnO 及 CaO 结合成复合化合物，同时，酸性焊条的药皮中不加入萤石，因此在 E4303 焊条药皮中加入大量锰铁，以促进脱硫。此外在 E4303 焊条药皮中提高大理石的含量几乎对脱硫没有影响，其原因是 E4303 焊条的熔渣碱度很小，而酸性氧化物的数量很大，增加一点 CaO 并不能发挥 CaO 脱硫的作用。

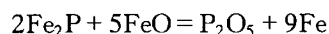
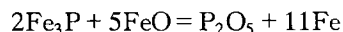
(2) 碱性焊条 (以 E5015 为例)。E5015 焊条药皮中含有大量大理石、萤石和铁合金，脱氧能力强，熔渣中有大量的碱性氧化物，这就使 CaO 及 CaF₂ 的脱硫效果显著。显然药皮中锰铁含量少，元素脱硫作用不大，但总的来说 E5015 焊条的脱硫能力强。由于焊接冶金时间短，脱硫反应来不及达到完全，加上其他条件的限制，因此焊接冶金的脱硫总比炼钢冶金时的脱硫效果差，所以必须严格控制焊接材料 (包括焊芯及药皮) 中的含硫量。

六、焊缝金属的脱磷

磷以铁的磷化物 (Fe₂P、Fe₃P) 形式存在于钢中，它能与铁形成低熔点共晶，聚于晶界，易引起热裂。更严重的是，这些低熔点共晶削弱了晶粒间的结合力，使钢在常温或低温时变脆 (即冷脆性)，造成冷裂，故磷在钢中是有害的杂质。因此，在低碳钢和低合金钢焊缝中，含磷量一般限制在 0.045% 以下；合金焊缝限制在 0.035% 以下。

脱磷的过程有两个阶段：

1. 将 P 氧化成 P₂O₅

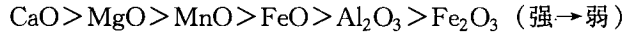


上述反应是放热反应，高温时反应不易向右进行。这些反应虽然可以脱去一些磷，但远

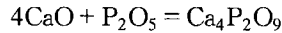
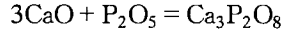
远不够，还需要使 P_2O_5 变成稳定的复合化合物而进入熔渣，以促进反应加速向右进行。因此需要第二阶段。

2. 利用碱性氧化物与 P_2O_5 复合成稳定的磷酸盐

碱性氧化物与 P_2O_5 结合的能力依次如下：



CaO 效果最好，因此常用 CaO 脱磷。



从上述讨论中可知，熔渣中如同时有足够的自由 FeO 和自由 CaO（在渣中未形成稳定复合化合物的 FeO 或 CaO），则脱磷效果好。但具体在碱性焊条或酸性焊条中，要同时具有上述两个条件是困难的。

碱性焊条熔渣中含有自由 CaO 较多，但碱性焊条脱氧性能强，因此不能同时有较多的自由 FeO，如一定要增加 FeO，势必引起焊缝金属中含氧量上升，以致降低焊缝性能。此外要求熔渣中 FeO 含量高，这又和脱氧要求相矛盾，因为脱硫同时要求脱氧。

酸性焊条中含自由 CaO 极少，因此脱磷效果较碱性焊条更差。由于脱磷较难，所以一般是以严格控制原材料中的含磷量为主。

七、焊缝金属的渗合金

焊接过程中，熔池金属中的合金元素会由于氧化和蒸发等造成烧损，因而降低了焊缝金属的合金成分和力学性能。为了使焊缝金属的成分、组织和性能符合预定的要求，就必须根据合金元素可能损失的情况，向熔池中添加一些合金元素，这种方法称为焊缝金属的渗合金。渗合金不但可以获得成分、组织和力学性能与母材相同或相近的焊缝金属，还可以向焊缝金属中渗入母材不含或少含的合金元素，造成化学成分、组织和性能与母材完全不同的焊缝金属，以满足焊件对焊缝金属的特殊要求。例如用堆焊的方法来提高焊件表面耐磨、耐热、耐蚀等性能，就是通过渗合金来达到的。

手工电弧焊时，向焊缝中渗合金的方式有两种：一种是通过焊芯（即利用合金钢焊芯）过渡；一种是通过焊条药皮（即将合金成分加在药皮里）过渡。也有的是这两种方式同时兼有。

通过焊芯渗合金时，焊芯中的合金元素含量应高于母材。但要炼制和拉成这样成分的焊芯，在生产上有一定的困难。采用合金钢焊芯，外面再涂以碱性熔渣的保护药皮，渗合金的效果与可靠性都好。

通过药皮渗合金，是在焊条药皮中加入各种铁合金粉末和合金元素，然后在焊接时，把这些元素过渡到焊缝金属中去，这种方法在生产上应用得较广泛。通常是采用在低碳钢（H08、H08A）焊条药皮中加入合金剂，从而达到渗合金的目的。通过药皮渗合金，一般均采用氧化性极低的碱性熔渣，以减少合金元素的烧损。有时也采用氧化性不大的酸性钛钙型熔渣。

焊条药皮常用的合金剂有：锰铁、铬铁、钼铁、钨铁、钛铁、硼铁等。

为了说明合金过渡情况，常用过渡系数（焊接材料中的合金元素过渡到焊缝金属中的数量与其原始含量的百分比）来表达：

$$\eta = \frac{C_F}{C_T} (\%) \quad (1-2)$$

式中 η ——合金元素过渡系数，%；