

中华人民共和国机械工业部统编
机械工人技术培训教材

气 焊 工 工 艺 学

(中 级 本)

科学普及出版社

本书是机械工业部统编的工人技术培训教材。它是根据《工人技术等级标准》和原一机部审定的工人技术培训教学大纲编写的。本书内容主要包括：气焊过程的冶金原理，气焊焊接材料的性能和用途，气焊设备的构造和工作原理，常用钢材、铸铁及有色金属的焊接工艺，氧气切割工艺和其它切割方法，以及气体火焰加工等。另外，对焊接变形与应力及焊接检验等方面也作了介绍。

本书是气焊工技术培训的中级教材（适用于4~6级工），也可供有关技术人员和工人参考。

本书由徐初雄、陈宝龄、华茂昌同志编写，由杨耀庭、唐志贵、林春华同志审查。

中华人民共和国机械工业部统编

机械工人技术培训教材

气 焊 工 工 艺 学

（中 级 本）

责任编辑：戴生寅

*

科学普及出版社出版（北京海淀区白石桥路32号）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

唐山市印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：13¹/₂ 字数：308千字

1984年9月第1版 1984年9月第1次印刷

印数：82,000册 定价：2.00元

统一书号：15051·1107 本社书号：0831

目 录

第一章 气焊冶金原理	1
第一节 气体火焰	1
第二节 气体与金属的作用	4
第三节 气焊冶金过程的特点	9
第四节 焊接熔池的结晶	10
第五节 焊接热影响区的组织和性能	14
第六节 焊接时的气孔和裂纹	20
第二章 气焊焊丝与熔剂	30
第一节 气焊焊丝	30
第二节 气焊熔剂	35
第三章 气焊设备和工具	41
第一节 氧气瓶、乙炔瓶及瓶阀	41
第二节 减压器	42
第三节 乙炔发生器	45
第四节 回火防止器	56
第五节 焊炬	60
第四章 常用金属材料的焊接	63
第一节 可焊性的概念	63
第二节 碳素钢的焊接	64
第三节 低合金结构钢的焊接	68
第四节 奥氏体不锈钢的焊接	73
第五节 铸铁的焊接	78
第六节 铝及铝合金的焊接	84
第七节 铜及铜合金的焊接	94
第五章 气体火焰钎焊	104
第一节 钎焊接头的形成及分类	104
第二节 钎料	107
第三节 钎剂	114
第四节 气体火焰钎焊工艺	119
第六章 氧-乙炔焰金属粉末喷焊和喷涂	128
第一节 氧-乙炔焰金属粉末喷焊	128
第二节 氧-乙炔焰金属粉末喷涂	135
第七章 焊接应力及变形	143
第一节 焊接应力及变形的概念	143
第二节 焊接应力及变形的形成	145
第三节 影响焊接应力和变形的因素	149

第四节	防止焊接应力和控制焊接变形	150
第五节	消除焊后残余应力和矫正焊后残余变形	156
第八章	焊接缺陷的检验方法	163
第一节	检验的意义及检验的分类	163
第二节	焊接成品质量的检验方法	164
第九章	氧气切割	172
第一节	氧气切割的基本理论	172
第二节	割炬	176
第三节	氧气切割的规范和割口质量	178
第四节	氧气切割工艺	187
第五节	机械氧气切割	190
第六节	其它气割方法	197

第一章 气焊冶金原理

第一节 气体火焰

一、可燃气体的选择和对气体火焰的要求

自身能够燃烧的气体叫可燃气体。工业上常用的可燃气体有氢和碳氢化合物（如乙炔、丙烷、煤气、沼气等）。

几种常用可燃气体的发热量与火焰温度，见表 1-1。

可燃气体的发热量与火焰温度

表1-1

名 称	发热量 (卡/升)	火焰温度(℃)	名 称	发热量 (卡/升)	火焰温度(℃)
乙 炔	12600	3200	煤 气	5000	2100
氢	2400	2160	沼 气	7900	2000
丙烷-丁烷	2120	2000			

由表 1-1 可知，在可燃气体中，乙炔的发热量最大，火焰温度最高，而且制取方便。因此，气焊时主要采用氧-乙炔焰作为热源，只有在焊接低熔点材料时才选用其它可燃气体。

对气体火焰的要求如下：

(1) 火焰要有足够高的温度。

(2) 火焰体积要小，焰心要直，热量要集中，以减少焊接接头的热影响区宽度和焊件的变形程度。

(3) 火焰应具有还原性和保护性，以防止空气中的氧、氮对熔滴和熔池的氧化和污染。

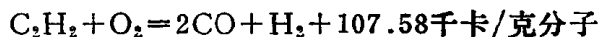
二、氧-乙炔焰的性质

(一) 氧-乙炔焰的燃烧反应

乙炔和氧的混合气体从焊炬喷出点燃后形成氧-乙炔焰。乙炔在完全燃烧后生成二氧化碳和水蒸气，并放出大量的热，其燃烧反应式为



可见，乙炔完全燃烧时需要 2.5 倍的氧。但由于火焰周围的空气可供给一部分氧，因而由氧气瓶供给的氧只需使乙炔燃烧成一氧化碳和氢就可以，其燃烧反应式为：



因此，从氧气瓶供给的氧量与乙炔量在焊炬中的混合比 β 理论上应为 1:1，但实际

上由于工业用氧总含有少量杂质，所以为了保证反应完全，从氧气瓶供给的氧量总要比理论上多一些。

正常的火焰一般由焰心、内焰和外焰三部分组成。

(二) 氧-乙炔焰的种类、构造和应用

1. 中性焰 在焊炬的混合室内，当 $\beta = 1.1 \sim 1.2$ 时，此时乙炔可充分燃烧，燃烧后的气体中既无过剩的氧，也无过剩的乙炔，这种火焰称中性焰。

中性焰的外形和构造，见图 1-1 (a)。

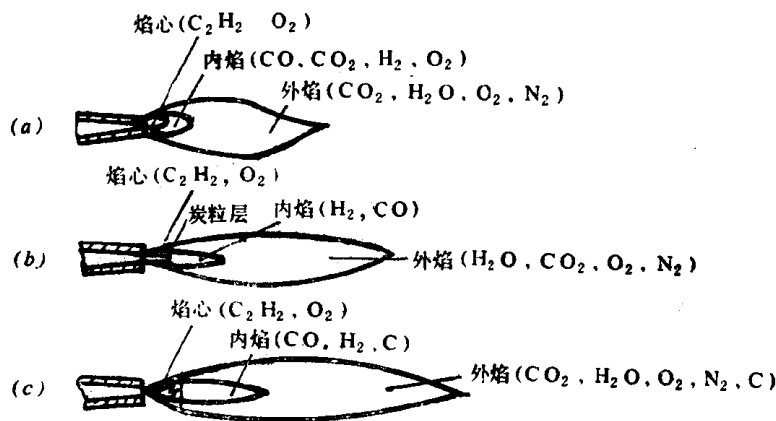


图 1-1 氧-乙炔火焰的种类与外形

(a) 中性焰；(b) 碳化焰；(c) 氧化焰

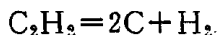
焰心呈光亮蓝白色圆锥形，轮廓清楚，这是由于部分乙炔分解产生了碳粒，炽热的碳粒发出明亮的白光。

在焰心部分进行着两种反应

部分乙炔氧化：



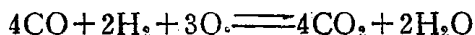
部分乙炔升温分解：



焰心虽然亮度很大，但由于乙炔的分解，吸收了部分热量，因此，温度却不很高，只有 $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 左右。

在焰心之外为内焰，呈蓝白色，有深蓝色线条。它是来自焰心的碳和氢与氧激烈燃烧的部分，生成物是一氧化碳和氢。在焰心前 $2 \sim 4$ 毫米处温度最高，可达 $3050 \sim 3150^\circ\text{C}$ ，一般即在这个温度区域进行焊接，称为焊接区。内焰中的气体主要是 $60 \sim 66\%$ 的一氧化碳和 $34 \sim 40\%$ 的氢，对许多金属的氧化物具有还原作用，所以焊接区又称还原区。

外焰和内焰没有明显的界限，只从颜色上可以略加区别。外焰的颜色从里向外由淡紫色变为橙黄色。来自内焰的一氧化碳和氢与空气中的氧化合后充分燃烧，变成二氧化碳和水蒸气，其化学反应式为：



外焰中由于 CO_2 和 H_2O 在高温时很容易分解，分解后产生的氧原子对金属有氧化作用，故外焰也称为焊接火焰的氧化层。外焰温度较低，在 $1200 \sim 2500^\circ\text{C}$ 之间，且具有

氧化性，故不适于焊接。

气焊各种不同材料时，大都使用中性焰。

2. 碳化焰 在混合室内，氧气和乙炔的混合比 $\beta < 1$ （一般在0.85~0.95）时，得到的火焰是碳化焰。这种火焰的气体中尚有部分乙炔未曾燃烧。火焰的外形，见图1-1(b)。

碳化焰的焰心较长，呈蓝白色，也是由氧气和乙炔组成。内焰呈淡蓝色，它的长度与碳化焰内乙炔的含量有关：乙炔过剩量较多时，则内焰就较长；相反，乙炔过剩量少时，内焰短小。当乙炔过剩量很大时，由于缺乏使乙炔充分燃烧所必需的氧气，所以火焰开始冒黑烟。内焰由一氧化碳、氢和碳素微粒组成。外焰带桔红色，它由水蒸汽、二氧化碳、氧及氮组成，也可能存在有碳素微粒。碳化焰三层火焰之间无明显的轮廓。

碳化焰的最高温度为2700~3000℃。由于火焰中有过剩的乙炔，它可分解为碳粒和氢气。焊接时，内焰中过量的炽热碳微粒能使氧化铁还原，因此碳化焰也称还原焰。用碳化焰焊接碳钢时，由于高温液体金属吸收火焰中的碳微粒生成二氧化碳，使熔池产生沸腾现象。同时碳化焰有使被焊钢件增碳的作用。如焊中碳钢时，使用中碳钢焊丝，碳化焰常使焊缝具有高碳钢的性质，不但脆性增大，而且还容易产生裂纹。此外，氢溶于金属中，使焊缝产生白点和增大冷脆性。但有时也利用碳化焰的增碳作用，如焊接高碳钢、铸铁及硬质合金等材料时，一般都使用碳化焰，以便对焊缝增碳和提高焊缝的强度和硬度。

3. 氧化焰 在混合室内，氧气与乙炔的混合比 $\beta > 1.2$ （一般在1.3~1.7）时，得到的火焰是氧化焰。它燃烧后的气体火焰中，尚有部分过剩的氧气。其火焰外形，见图1-1(c)。

氧化焰的焰心呈淡紫蓝色，轮廓也不太明显。由于氧化焰在燃烧过程中氧的浓度极大，氧化反应进行激烈，所以焰心和外焰都缩短。氧化焰没有碳素微粒层，外焰呈蓝紫色，火焰挺直，燃烧时发出急剧的“嘶嘶”噪声。它的大小决定于氧的压力和火焰中氧的比例。氧的比例越大，则整个火焰越短，噪声也越大。

氧化焰的最高温度可达3100~3300℃。由于氧气的供应量较多，整个火焰具有氧化性，所以焊接一般碳钢时，会造成熔化金属的氧化和元素的烧损，使焊缝产生气孔，并增强了熔池的沸腾现象，从而降低焊缝的质量。因此，这种火焰较少采用。但焊接黄铜和锡青铜时，利用轻微氧化焰的氧化性，生成氧化物薄膜，覆盖在熔池上，可保护低沸点锌、锡不再蒸发。由于氧化焰温度高，在火焰气体加热及气割时，为了提高效率，也

焊接火焰的选择

表1-2

被 焊 材 料	应 用 火 焰	被 焊 材 料	应 用 火 焰
低碳钢	中性焰	紫铜	中性焰
中碳钢	中性焰	锡青铜	轻微氧化焰
低合金钢	中性焰	黄铜	轻微氧化焰
高碳钢	轻微碳化焰	铝及铝合金	中性焰或轻微碳化焰
灰铸铁	碳化焰或轻微碳化焰	铅、锡	中性焰或轻微碳化焰
镀锌铁皮	轻微氧化焰	铬不锈钢	中性焰或轻微碳化焰
锰钢	轻微氧化焰	铬镍不锈钢	中性焰

常使用氧化焰。

焊接不同材料时，应选择不同种类的火焰才能获得优质的焊缝。

表 1-2 是各种材料焊接时，焊接火焰的选择。

(三) 氧-乙炔焰的温度分布

图 1-2 是三种不同火焰沿中心线上的温度分布。从图中可以看出，氧化焰的温度峰值最高，中性焰其次，而碳化焰最低，且温度峰值随 β 的增加而有所提高。当 β 值从 1.2 增至 1.9 时，温度峰值将从 3100°C 左右升高到 3300°C 左右。同时还可看出，随着 β 值的降低，温度峰值离焊炬喷口的距离是增加的，这是因为燃烧速度变小和热量分散加剧的缘故。

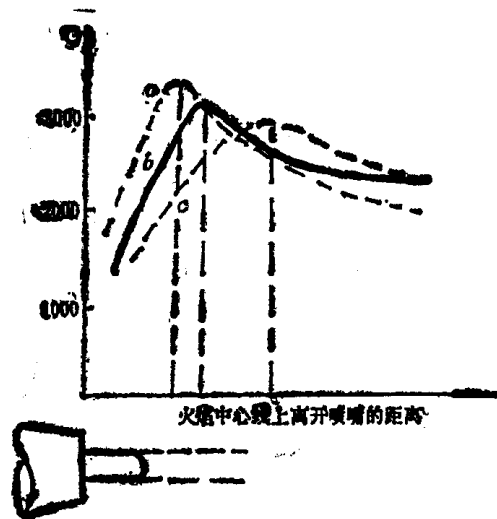


图 1-2 氧化焰 a 、中性焰 b 和碳化焰 c 沿中心线上的温度分布

温度峰值一般是在离开焰心 2~3 毫米的内焰内，所以焊接时应使焰心离开金属表面 2~3 毫米，以便尽量利用火焰的热量。

第二节 气体与金属的作用

一、焊 接 熔 池

气焊时，在气体火焰的作用下，母材发生了局部熔化。在母材上熔化的填充金属（焊丝）和母材，组成具有一定几何形状的液体金属，叫焊接熔池。

(一) 熔池的几何形状

熔池的形状类似于半个椭球，见图 1-3。熔池的形状可用最大深度 $H_{\max}$ 、最大宽度 $B_{\max}$ 和熔池长度 L 三个参数来表示。在一般情况下， $H_{\max}$ 、 $B_{\max}$ 和 L 随着火焰能率的增加而加大，随着焊速的增加而减小。

(二) 熔池中的温度分布

熔池中各点的温度分布是不均匀的。熔池纵向温度分布不均匀的情况，见图 1-4(a)。

在熔池的头部输入热量大于散走的热量，所以随着热源的移动，母材不断熔化。同时熔池头部的温度比较高，温度梯度比较大。熔池的最高温度位于火焰下面熔池的表面上。在熔池的尾部温度逐渐降低，到熔池的边缘下降到母材的熔化温度。在这一部分输入的热量小于散走的热量，所以开始发生金属的凝固。

同样道理，熔池各部分在横面（宽度方向）的温度分布也是不均匀的，见图 1-4 (b)。

(三) 熔池中液体金属的流动

熔池中的液体金属不是静止不动的，而是在作激烈的运动。促使熔池金属产生激烈运动的原因有三个方面：

(1) 由液体金属的密度差所产生的自由对流运动。熔池温度分布不均匀，必然使熔池中各处的金属密度产生差别。温度高的地方，金属密度小；温度低的地方，金属密度大。这种密度差将促使液态金属从低温区向高温区流动。显然，在熔池体积比较大和温度分布不均匀的情况下，这种自然对流运动将会明显地出现。相反，在熔池体积比较小和温度分布相对比较均匀的情况下，这种运动不明显。

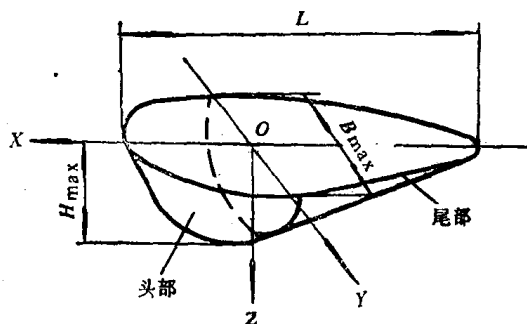


图 1-3 熔池形状示意图

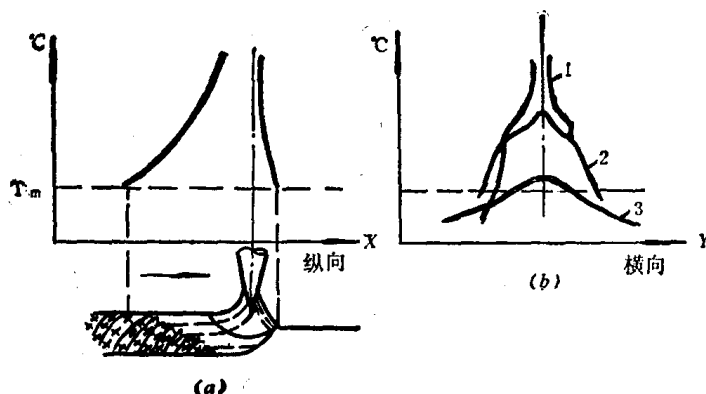


图 1-4 熔池的温度分布

(a) 纵向温度分布；(b) 横向温度分布
1—熔池中部；2—熔池头部；3—熔池尾部

(2) 由表面张力差所引起的强迫对流运动。因为液体金属的表面张力和温度有关，温度越高，表面张力越小。因此，熔池温度分布不均匀，就必然引起表面张力分布不均匀，这种表面张力差便引起熔池中的液体金属发生对流运动。

(3) 由气体火焰的气流吹力所产生的搅拌运动。熔池中正是由于存在着强烈的对流运动和搅拌运动，才能使母材和填充金属的成分能够很好的混合，形成成分均匀的焊缝金属。此外熔池的这种运动也有利于有害气体和非金属夹杂物的外逸，因而对提高焊缝质量有很大的好处。

二、焊接区内的气体及其影响

焊接过程中，焊接区内充满了大量的气体，这些气体不断地与熔化金属发生化学冶金反应，从而影响焊缝金属的成分和性能。

(一) 焊接区内气体的来源

1. 来自气体火焰 气焊时，焊缝及熔化金属处在气体火焰的笼罩下，因此，焊接区内的气体主要来源是气体火焰。

气体火焰燃烧后的气体成分决定于气体的混合比 β 和离开焊嘴的距离，见表1-3。

2. 来自火焰周围的空气 因为气体火焰不能完全排除焊接区内的空气，所以焊后焊缝金属中还含有大约0.015~0.020%的氮（空气是氮的主要来源）。

3. 来自焊丝和母材表面的杂质 焊丝和母材表面上的杂质如油污、铁锈、油漆、吸附的水分等。这些物质受热后将分解产生出气体。

4. 来自高温蒸发产生的气体 如金属和熔渣中的气体。

氧-乙炔焰燃烧产物的组成

表1-3

混合比 β	分 析 位 置	燃 烧 后 生 成 气 体 的 组 成 (%)					
	离焊嘴距离 (毫米)	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
1.00	18	64.2	0.5	31.2	1.0	0.3	2.8
	30	55.9	2.5	25.0	4.0	0.2	12.4
	50	42.4	5.9	15.4	8.6	0.3	27.4
1.07	18	61.2	3.2	28.2	3.7	0.3	3.5
	32	52.0	3.9	19.5	8.5	0.5	15.5
	45	43.7	6.3	14.3	10.7	0.3	24.8
1.14	15	59.8	3.8	24.2	7.7	0.2	4.5
	30	50.0	5.5	20.2	8.6	0.5	15.2
	50	37.6	9.7	11.3	12.2	0.4	28.8
1.17	14	58.6	4.6	22.5	9.2	0.2	4.9
	26	51.5	6.1	17.7	11.3	0.4	13.0
	50	37.3	9.6	9.6	13.8	0.6	29.0
1.25	14	56.2	7.0	19.3	12.0	0.5	5.0
	25	49.5	8.4	15.5	13.3	0.3	13.0
	40	40.4	10.7	10.8	14.7	0.3	23.2
1.34	13	53.0	9.6	16.3	15.0	0.3	5.8
	25	45.6	11.4	17.8	15.5	0.5	14.2
	40	37.1	13.3	8.3	16.8	0.5	24.0
1.37	13	51.2	11.0	16.0	15.5	0.3	6.0
	25	44.0	12.2	11.3	16.7	0.3	15.5
	40	35.2	14.7	7.7	17.2	0.5	24.7

由表1-3可知，焊接区内的气体是由CO、CO₂、H₂O、O₂、H₂、N₂以及它们分解的产物和金属熔渣的蒸气所组成的混合物，其中对焊接质量影响最大的是N₂、H₂、O₂。

(二) 焊缝金属中的氢

1. 氢的来源 正常状态下, 钢料中的氢含量极少。气焊时, 氢的主要来源是乙炔分解和燃烧后的产物。另外, 还来源于焊件和焊丝表面上的杂质(如铁锈、油污)以及熔剂和空气的水分中。

2. 氢对焊缝金属的影响 氢是还原性气体, 它在气体火焰中有助于减少金属的氧化。但是在大多数情况下, 氢对焊缝金属质量的影响是有害的, 这主要表现在如下三方面。

(1) 氢脆性。氢引起钢的塑性严重下降的现象称为氢脆性(如图1-5)。焊缝含氢量越高, 脆化倾向越大。但焊缝经过时效后, 由于氢的逸出, 其塑性可以恢复。

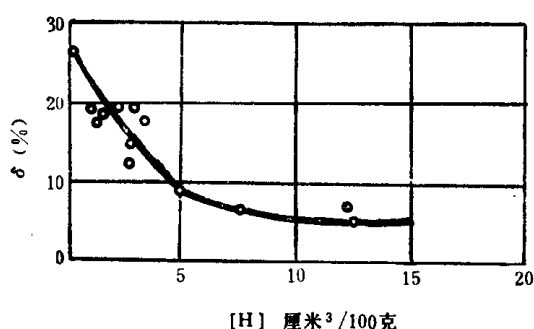


图 1-5 含氢量对低碳钢塑性的影响

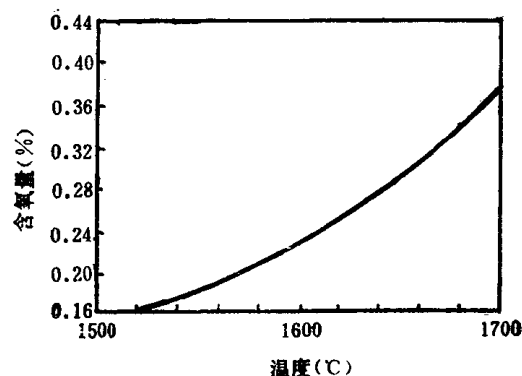


图 1-6 氧在液态铁中的溶解度

(2) 易产生白点。碳钢或低合金钢焊缝, 如含氢量较多, 则常常在其拉伸断面的试件上, 出现光亮圆形的局部脆性断裂点, 称之为白点。白点的直径一般为 0.5~3 毫米, 其周围为韧性断口, 故用肉眼即可辨认。在多数情况下, 白点的中心有裂纹、气孔或小的夹杂物, 好象鱼的眼睛一样, 故又称“鱼眼”。

白点使焊缝接头金属的塑性下降。

(3) 易形成气孔和冷裂纹。氢是在焊缝和焊接接头中引起气孔和冷裂纹的主要因素之一。

从上述可知, 氢在焊缝金属中是属于有害的气体。

(三) 焊缝金属中的氧

1. 氧的来源 气焊时, 焊缝金属中的氧主要来自周围的空气、焊接材料(包括焊丝和熔剂)、母材以及气体火焰。

高温时, 氧在铁中的溶解度很大, 随着温度的降低, 氧的溶解度急剧减少, 见图1-6。

氧在焊缝金属中主要以 Fe_mO_n 、 MnO 和 SiO_2 等化合物的形式存在并构成焊缝金属的夹杂。如焊丝中含有较多的碳、硅、锰时, 氧大部以 MnO 的形式残留在焊缝中; 而当焊丝中碳、硅、锰含量较少时, 氧便以 Fe_mO_n 的形式存在于焊缝中。

2. 氧对焊缝金属的影响 其影响主要表现在如下几个方面。

(1) 降低机械性能。随着焊缝金属含氧量的增加, 其硬度、强度和塑性明显下降, 见图 1-7。

(2) 易形成气孔。溶解在熔池中的氧与碳发生作用，会生成不溶于金属的CO，在熔池结晶时如来不及逸出，就会在焊缝中形成气孔。

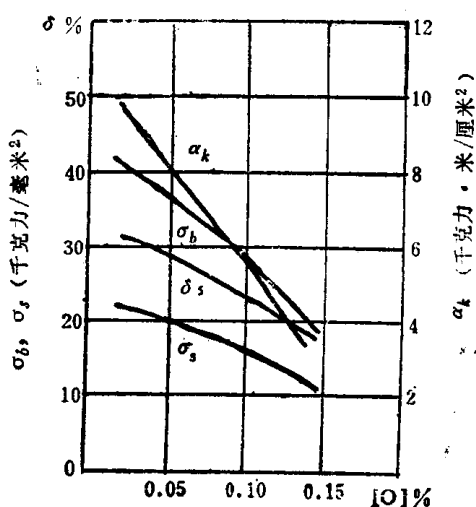


图 1-7 氧 (以FeO形式存在) 对低碳钢机械性能的影响

(3) 易烧损合金元素。氧是化学活泼性很大的元素，可以和绝大部分元素相化合。因此，氧能和熔滴和熔池中有益的合金元素起氧化反应，烧损这些合金元素，从而降低了焊缝金属的性能。

此外，氧还会引起焊缝金属红脆、冷脆和时效硬化，降低焊缝金属的导电性、导磁性和抗腐蚀性，并且会在焊接过程中引起飞溅，影响焊接过程的稳定性。所以，氧在焊缝中是属于有害的元素。

(四) 焊缝金属中的氮

1. 氮的来源 焊缝金属中的氮主要来源于焊接区周围的空气。虽然气焊时熔池处于还原区的保护下，但总还有少量氮侵入焊接区。焊缝金属中的含氮量随着混合比β的增高而增加，见图 1-8。这是因为β值增高时，火焰中的氧产生过剩，使得火焰紊乱，引起空气的卷入和熔池的搅拌，使得焊缝含氮量增加。

氮在焊缝中一部分以过饱和的形式存在于固溶体中，另一部分则以针状氮化物(Fe₄N)分布在晶界和固溶体内。

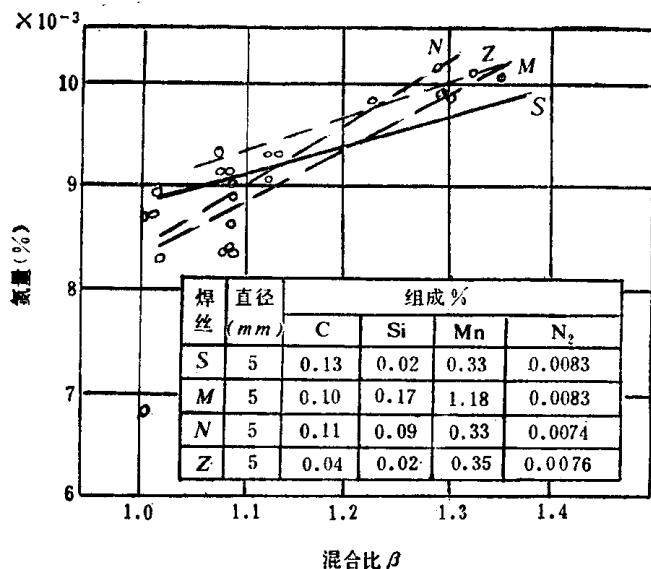


图 1-8 焊缝金属中的含氮量

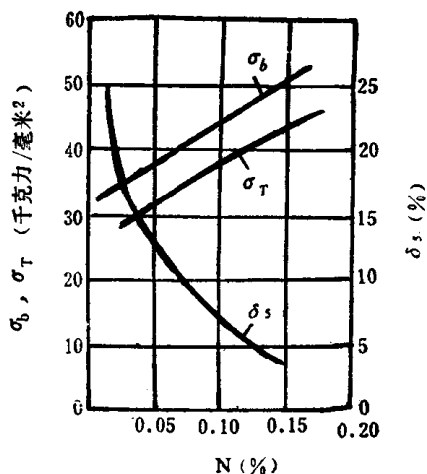


图 1-9 氮对低碳钢常温机械性能的影响

2. 氮对焊缝金属的影响 其影响主要表现为如下。

(1) 对机械性能的影响。氮是提高焊缝强度、降低塑性和韧性的元素，见图 1-9。

(2) 易形成气孔。气焊时，当焊接区保护不良时，氮是引起气孔的原因之一。

(3) 时效脆化。氮是促进时效的元素。因焊缝中的过饱和氮是处于不稳定状态，随着时间的延长，过饱和氮逐渐析出，形成稳定的针状 Fe₄N，使得焊缝金属的塑性和韧

性大大下降，这种现象称为时效脆化。对低碳钢来讲，由于不含有与氮亲和力强能形成稳定氮化物的元素，氮的侵入会发生时效脆化现象。

所以，氮在焊缝金属中是属于有害的元素。

第三节 气焊冶金过程的特点

气焊时，焊接区内各种物质之间在高温下相互作用的过程，称为气焊冶金过程。

气焊冶金过程包括母材和焊丝金属受火焰加热以至熔化而形成熔池，并与熔剂、母材表面杂质、火焰气流以及周围空气所起的一系列复杂的物理、化学反应，最后形成焊缝金属和熔渣的整个冶炼过程。

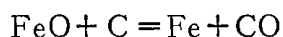
一、气焊化学冶金过程

(一) 氧化

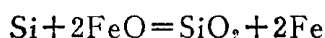
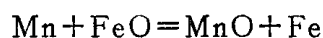
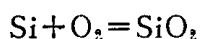
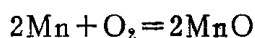
氧化是指合金元素与氧化合。焊接火焰中过多的氧（用氧化焰时）以及空气中的氧均会使熔池金属氧化。当火焰中过剩的氧超过20~25%时，金属的氧化作用将进行得十分激烈，焊后，往往在焊缝表面形成一层多孔的氧化皮。

金属被空气中的氧所氧化的现象还和气焊的方法有关：当用左焊法时，因焊接火焰指向待焊金属，此时焊缝金属在赤热状态下即与空气接触而被氧化；而右焊法，火焰指向赤热金属并在焊缝逐步冷却中脱离火焰的保护，故被空气氧化的可能性减小。

低碳钢焊接时，其中所含碳、锰、硅等元素极易烧损。碳的烧损多半是由于碳和氧化铁作用的结果，其反应式为：



锰和硅的烧损除由于火焰中或空气中氧的作用外，还由于被氧化铁氧化所造成，其反应式如下：



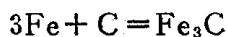
焊接黄铜时，因为锌的燃点甚低，所以被烧损得特别激烈。

(二) 还原

还原是指熔池金属氧化物的脱氧反应。火焰中的CO和H₂、基本金属、焊丝或熔剂中的各种合金元素（如铝、钛、磷等）均可作为还原剂，与熔池内金属氧化物起作用，使铁和某些合金元素被还原。

(三) 碳化

碳化是指气焊过程中熔池内渗入碳而形成碳化物的过程，其反应式为：



碳化后会使焊缝金属的强度、硬度增加，而塑性降低。

用碳化焰焊接时，碳化现象比较严重。

二、气焊物理冶金过程

(一) 扩散

扩散是指气焊时熔池内的金属和熔合线内的金属中各元素的相互渗透和均匀化的过程。扩散主要是在熔池尚未凝固时发生的，但是在熔池已经凝固而温度很高的时候，也可能继续扩散。

(二) 熔池内气泡的生成与上浮

气焊过程中，熔池内会吸收大量的气体，当熔池开始冷却凝固时，这些气体就要分离出来。气焊过程中熔池内析出的气体，在凝固过程中来不及逸出，就可能形成气孔。

(三) 熔池内熔渣的生成与上浮

在气焊过程中，许多还原剂（如Mn、Si等）会与金属氧化物作用生成熔渣（ MnO 、 SiO_2 等）。这些熔渣因为密度较熔池金属小，所以能聚合在一起上浮。如果熔池冷却凝固比较慢，则熔渣就能浮出熔池而覆盖在熔池表面。如果熔池凝固得很快，以至使熔渣尚未浮出就被凝固住，结果在焊缝内就产生夹渣。

(四) 熔池金属的喷溅

在气焊过程中，熔池内生成了压力相当高的气体，这些气体的膨胀与冲击，就形成了熔池金属的喷溅。

第四节 焊接熔池的结晶

气体火焰离开熔池后，由于周围冷态金属的导热，使熔池温度迅速降低，熔池便逐渐凝固成为焊缝。

气焊时，除焊缝金属被加热至高温以外，焊缝两侧的母材金属也被加热至不同温度，从而使组织或性能发生了变化，这个区域叫做热影响区。通常将焊缝、热影响区和附近未被加热的母材金属统称为焊接接头，见图 1-10。

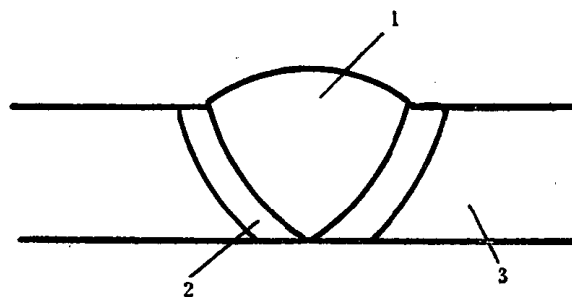


图 1-10 焊接接头的组成

1—焊缝金属；2—热影响区；3—母材

一、焊接熔池的一次结晶

焊接熔池从液态向固态转变的过程，称为焊接熔池的一次结晶。

(一) 焊接熔池一次结晶的特点

焊接熔池的一次结晶与铸锭的结晶相比，具有一系列自身的特点：

- (1) 由于熔池的体积小，周围又被冷金属所包围，所以熔池的冷却速度很大。
- (2) 熔池中的液体金属处于过热状态。
- (3) 由于熔池中液体金属的流动，所以熔池是在运动状态下进行结晶。

(二) 焊接熔池一次结晶的过程

焊接熔池的一次结晶和普通铸锭结晶一样，包括产生晶核和晶核长大两个过程。

熔池开始结晶时所需的晶核，一种是合金元素或杂质的悬浮质点，这种晶核在一般情况下所起作用不大；另一种也是主要的，就是结晶从熔化边界的晶粒表面开始。焊缝金属同母材金属长合在一起，形成“交互结晶区”，见图 1-11。因此，熔池金属开始结晶时，大都是从熔化边界上开始成长起来的。

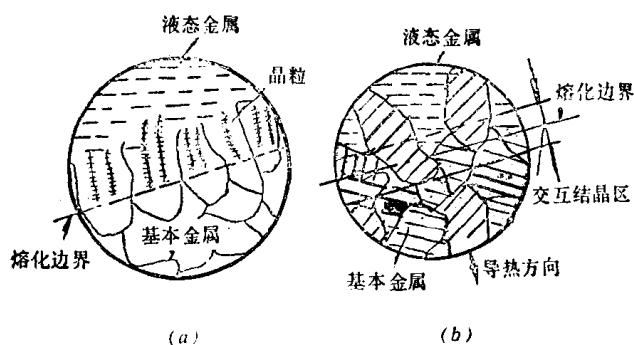


图 1-11 熔池开始结晶的状态

(a) 熔化边界上晶粒的生长；(b) 熔化边界上的交互结晶区

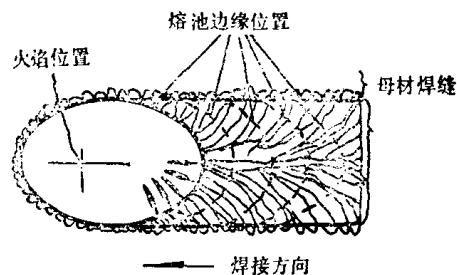


图 1-12 椭圆状熔池柱状晶长大的形态

结晶开始出现的晶体总是向着散热方向相反的方向长大。由于熔池的散热方向是垂直于熔化边界指向金属内部，所以晶体的方向总是垂直于熔化边界指向熔池中心，即形成柱状晶。当柱状晶不断长大至互相接触时，熔池的一次结晶即告结束，见图 1-12。

焊接时，随着火焰的移动，熔池的结晶过程一直在连续地进行着，它的结晶速度等于焊接速度。也就是说，火焰移动得越快，熔池结晶得越快。

(三) 焊缝中的偏析

在熔池进行一次结晶的过程中，由于冷却速度很快，已凝固的焊缝金属中的合金元素来不及扩散，因此，焊缝中化学成分分布是不均匀的，这种现象称为偏析。例如，低碳钢的焊缝在晶界上碳和其它杂质元素的含量要比焊缝的平均含量就要来得高一些。

根据焊接过程的特点，焊缝中的偏析主要有以下几种。

1. 显微偏析 熔池结晶时，最先结晶的结晶中心金属最纯。后结晶部分含合金元素和杂质较高，而最后结晶的部分，即晶粒的外缘和前端含合金元素和杂质就最高。因此，在一个晶粒内部和晶粒之间的化学成分都是不均匀的，这种现象称为显微偏析。

影响显微偏析最重要的因素之一，就是金属的化学成分。因为金属的化学成分决定了金属结晶区间的大小。结晶区间越大，就越容易产生显微偏析。一般对于低碳钢来说，因其结晶区间不大，所以显微偏析现象并不严重。而在高碳钢、合金钢焊接时，显微偏析现象就很严重，常常会因此而引起热裂纹等缺陷。

2. 区域偏析 熔池结晶时, 由于柱状晶的不断长大和推移, 会把低熔点夹杂物“赶”向熔池中心, 这样熔池中心的杂质含量要比其它部分高得多, 这种现象称为区域偏析。

熔池的断面形状对区域偏析的分布有很大的影响。窄而深的焊缝, 各柱状晶交界在焊缝的中心面上, 因而聚集了较多的杂质, 使得焊缝中心面成为一个脆弱面, 该处容易形成热裂纹, 见图 1-13(a)。宽而浅的焊缝, 杂质便聚集在焊缝的上部〔见图 1-13(b)〕, 它具有较高的抗热裂纹能力。

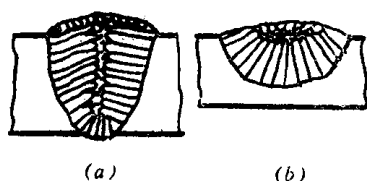


图 1-13 熔池形状与区域偏析的关系
(a) 窄而深的熔池; (b) 宽而浅的熔池

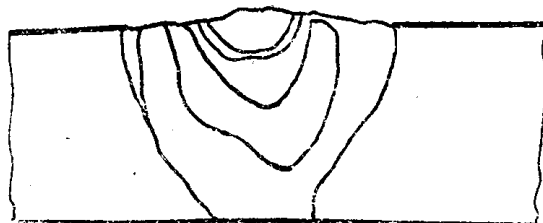


图 1-14 焊缝上的层状偏析

3. 层状偏析 熔池在结晶过程中要放出结晶潜热, 当结晶潜热达到一定数值时, 熔池的结晶出现了暂时的停顿, 以后随着熔池的散热, 结晶又开始。如此结晶即产生周期性地变化, 也就是晶体的成长速度出现周期性地增加或减少。当晶体快速长大时, 在结晶前沿的液体金属中杂质较少, 而慢速长大的晶体, 结晶前沿液体金属中杂质就较多, 这样就形成周期性地偏析现象, 称为层状偏析, 见图 1-14。

层状偏析常集中了一些有害的元素, 因而缺陷就往往出现在层状偏析中。由层状偏析所引起的气孔, 见图 1-15。

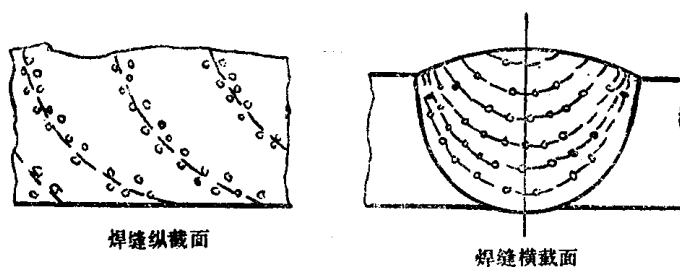


图 1-15 呈层状分布的气孔带

4. 火口偏析 焊接时, 由于熔池连续存在的杂质始终聚集在焊缝中心, 当断火时, 因熔池中搅拌不够强烈, 熔池周围 (包括熔池前沿) 都被冷却, 因此较多的低熔点杂质向火口中心区域析集, 这种现象称为火口偏析。火口偏析处常易产生裂纹, 称为火口裂纹。

(四) 焊缝中的夹杂物

熔池在结晶过程中, 因为冷却速度较快, 一些非金属夹杂物在结晶过程中, 常来不及浮至熔池表面而残存在焊缝内部。

焊缝中有夹杂物存在时, 不仅降低焊缝金属的塑性, 增加低温脆性, 同时也增加了产生热裂纹的倾向。因此, 在气焊作业中应尽可能减少焊缝中的夹杂物。

焊接低碳钢时, 焊缝中的夹杂物主要有两类: 一类是氧化物, 如 SiO_2 、 MnO 等; 另

一类是硫化物，如 MnS 、 FeS 等。

(五) 改善焊缝一次组织的途径

焊接熔池一次结晶完了时的组织是柱状晶。柱状晶的形态对于焊缝的机械性能有很大的影响。图 1-16 表示出焊缝晶粒粗细对冲击韧性的影响。从图中可以看出，细晶组织能显著提高焊缝金属的冲击韧性。

改善焊缝一次组织的途径有以下两方面。

1. 变质处理 通过填充材料（焊丝、熔剂）向熔池中加入碳化物或氮化物形成元素，如 V 、 Ti 、 Nb 、 Mo 、 Al 、 N 等，以便形成弥散细小的高熔点化合物质点，作为人工晶核，使在柱状晶还没有发展时，熔池中的液体金属就借助这些人工核心长大，从而得到细晶组织。

2. 控制焊接热规范 适当选择火焰能率、焊接速度等规范参数，以提高熔化边界前方液体内的温度梯度，有利于形成细晶组织。

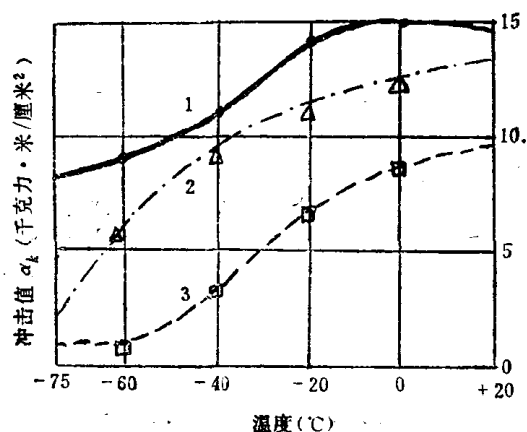


图 1-16 焊缝晶粒粗细对冲击韧性的影响
1—细晶组织；2—粗晶组织；3—粗大柱状晶组织

二、焊缝金属的二次结晶

一次结晶结束，焊接熔池就转变为固态的焊缝。高温的焊缝金属冷却到室温时，要经过一系列的相变过程，这种相变过程就称为焊缝金属的二次结晶。

(一) 低碳钢焊缝的二次结晶组织

在室温时，由于低碳钢的焊缝金属含碳量很低，故二次结晶后的组织大部分是铁素体加少量珠光体。由于铁素体一般首先沿原奥氏体晶界析出，呈现出一次组织的柱状轮廓，故又称为柱状铁素体，其晶粒十分粗大。此外，焊缝中的一部分铁素体还具有魏氏组织的形态。

钢中柱状晶消失的临界温度大约在 A_{c3} 点以上 $20\sim 30^{\circ}C$ 。图 1-17 为低碳钢的柱状组

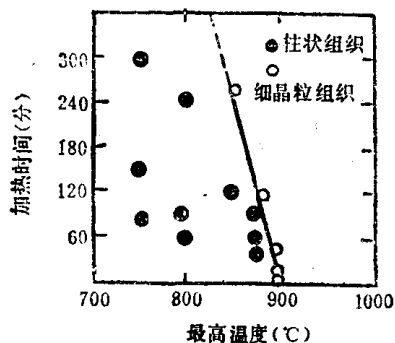


图 1-17 低碳钢单层焊缝再加热时的组织变化

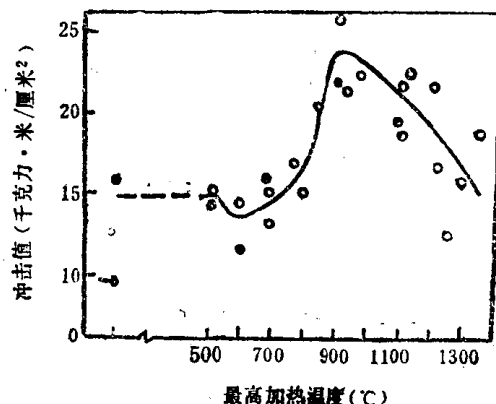


图 1-18 低碳钢单层焊缝再加热时冲击值的变化