

远洋船舶大合拢垂直焊缝性能设计

虚拟仿真实验-电子教材

目 录

1.	船舶用钢 DH36 简介	1
2.	船舶大合拢气电立焊原理	2
3.	焊接前准备	3
4.	电弧模型与熔滴过渡	4
5.	热影响区 CCT 图	22
6.	焊接热循环	23
7.	接头性能的影响因素	27
8.	X 射线探伤技术	28

1. 船舶用钢 DH36 简介

DH36 是一种常用高强度钢，在涵养装备制造上用途广泛，这种钢材的基材是低碳钢，添加了锰、镍等合金元素，合金元素的含量如表 1 所示。提高了它的低温冲击韧性。它具有较高的耐腐蚀性，较高的强度和良好的韧性，并且焊接性能优良。

表 1 DH36 钢的化学成分(wt.%)

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	V
CCS 标准	≤0.18	≤0.5	≤0.9~1.6	≤0.035	≤0.035	≤0.4	≤0.2	≤0.02~0.25	≤0.05~0.1
试板	0.16	0.21	1.21	0.013	0.003	0.01	0.02	0.014	0.002

焊接接头的形式为对接接头，焊接的位置是立焊位置。选用的焊丝为 SC-EG2，这是一种新研发的用于焊接 DH36 的焊丝。保护气选择的是 CO₂ 气体，纯度至少为 99.5%。焊缝坡口采用 V 形坡口，坡口的角度要根据材料的厚度来决定，坡口示意图如图 1 所示。不同板厚坡口角度和间隙如表 2 所示。

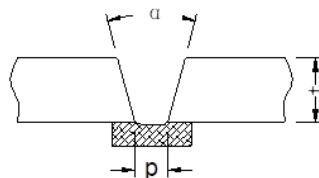


图 1 坡口示意图

上图中， α 为坡口角度、 p 为间隙、 t 为板厚。

表 2 不同板厚坡口的角度和间隙

板厚/mm	坡口角度/ (°)	间隙/mm
16	45-49	4-8
18	40-44	4-8
20	40-44	5-9
22	40-44	5-9

试样选择 DH36 材料，制作成 $\phi 6 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的圆柱试样。

垂直接缝装配时，应在坡口背面构架处装上“Π”形马，“Π”形马之间的距离值为 300-400 mm。每只衬垫至少要有两只“Π”形马，马的尺寸如图 2 所示。

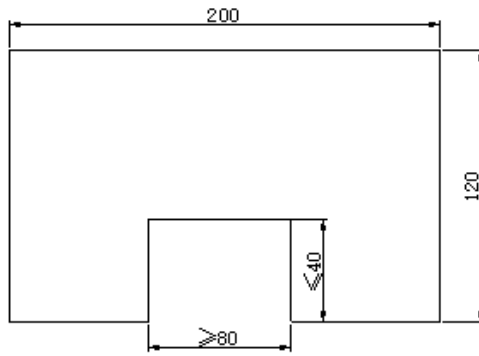


图2 U形马尺寸

2. 船舶大合拢气电立焊原理

气电自动立焊是一种高效、先进的焊接方法，目前普遍应用于船体结构中舷侧外板、隔舱壁等立向位置的对接焊。相应规范规定了气电自动立焊的焊接材料及辅助材料、作业环境、坡口形式及装配、焊接工艺和焊缝质量控制等。垂直气电自动焊示意图如图3所示。

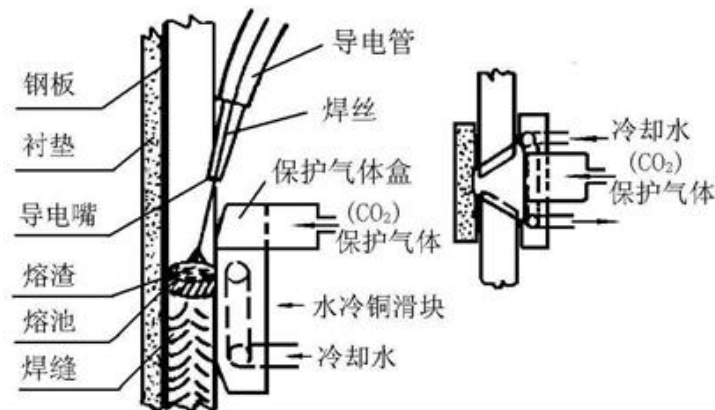


图3 垂直气电自动焊示意图

焊接过程中相关标准采用如下标准：

CB/T 3947-2001 《气电自动立焊工艺要求》

GB/T 6052-1993 《工业液体二氧化碳》

CB/T 3715-1995 《陶质焊接衬垫》

《焊缝返修通用工艺》

设备采用的是与各大船厂实际生产作业中一致的焊接设备，保证了实验中的焊接工艺可以直接运用到实际生产活动中。

具体的焊接设备如表3所示，利用表中所示的设备自行搭建焊接平台。其中送丝机构电源均来自日本大阪变压器厂，焊接接头产自日本神户制钢厂，水冷机

头产自日本大阪电器厂电气厂，其他设备均需要自己设计加工，将所有的设备组合成垂直气电焊的焊接装置。若有需要，可自行添加其他设备。

表 3 焊接设备

设备名称	型号	制造厂
电源	DYNA-AUTO 500M	日本大阪变压器厂
送丝机构	CM-231 型	日本大阪变压器厂
焊接机头	SG-2Z	日本神户制钢厂
水冷机头	CS-400	日本大阪电气厂

焊丝应包装完好，随用随拆，选用的衬垫应随用随拆，如拆封后未用完，需要将焊丝放进干燥柜中，储放时间过久，必须经 200~250 °C 培烘后才能使用。

如果板材没有余量只需要对坡口进行修正，若板材有余量需要现场进行切割。如果两块板材的厚度不相同，应该将高出的部分磨平，其斜度尺寸为(60~80) mm。

使用气动砂轮去除沟槽边缘两侧 50 毫米内的焊缝，马脚，金属飞溅和纵缝焊缝高度。确保前部水冷滑块平滑滑动，后垫片紧密贴合。

当安装垫圈时，必须确保成形槽与槽的中心对齐，并且垫圈被无间隙地推紧，并且垫圈紧紧地附接到钢板的背面。

将立式自动焊接设备悬挂在甲板上合适的位置，并安装风管，水管，控制线和电缆等。长度应满足整个长接头的焊接要求。

使用提升装置将导轨放置在离接缝 200 mm 的位置（称为磁钢边缘），并确保导轨之间的可靠连接。在安装导轨之前，必须清除磁钢表面上的灰尘和污垢。

3. 焊接前准备

完成焊前准备工作后，将试板进行固定，要注意固定时要保证牢固。由于正面焊缝会受到滑块的挤压作用很容易在焊接过程中出现松动的现象。

装配好之后进行打底工作，由于是垂直的焊接位置，如果不进行打底工作会导致熔池塌陷，严重的话可能会使焊接工件与工作台焊在一起。

接着根据坡口和装配间隙开始进行焊枪摆动的设置，由于焊接采用的板厚为 22 mm，所以焊枪的摆动是十分必要的，否则会出现，背面焊缝成型不良、未焊透等焊接缺陷。在摆动过程中，装配的间隙相对较小，注意焊枪的导嘴绝对不能接触到工件。

焊接过程中要注意观察电弧位置，根据电弧在焊接过程中的位置，进行手动的调整，使其保持在合适的位置，这样能够保证前后焊缝都有比较好的成型，且

焊缝宽度均匀。

焊接过程中要实时记录焊接速度。

焊接完成后，注意延迟断水断气，焊接时的温度很高，如果焊接完成后立刻关掉冷却水和气的情况下会对焊接设备造成损害，尤其是水冷滑块，水冷滑块加工比较复杂，一旦损坏会造成许多不必要的经济损失。

4. 电弧模型与熔滴过渡

(1) 焊接电弧

焊接电弧是在一定电压的两电极间或电极与焊接工件间的气体介质中产生的强烈而持久的放电现象。下面对电弧的物理本质及结构做出详细介绍。

(一) 焊接电弧的物理本质

气体放电的基本概念：气体放电分为非自持放电及自持放电。

气体的非自持放电指气体放电过程中，不能够产生足够的带电粒子使放电过程维持下去，而是要一直依靠外加措施(如加热、光照射等)，才能维持气体放电。

气体的自持放电指在气体放电过程中，能够产生足够多的带电粒子，使放电过程维持下去，这种放电只需要开始时通过外加措施产生放电所需要的带电粒子，一旦形成放电，即使取消外加措施，放电过程仍然可以维持下去。

气体放电过程中电压和电流之间的关系不遵守欧姆定律关系，而是一个十分复杂的关系，如图 4 所示。其中自持放电区包括暗放电、辉光放电和电弧放电三种形式，与其他气体放电形式相比，低电压、大电流是焊接电弧的显著特点之一。

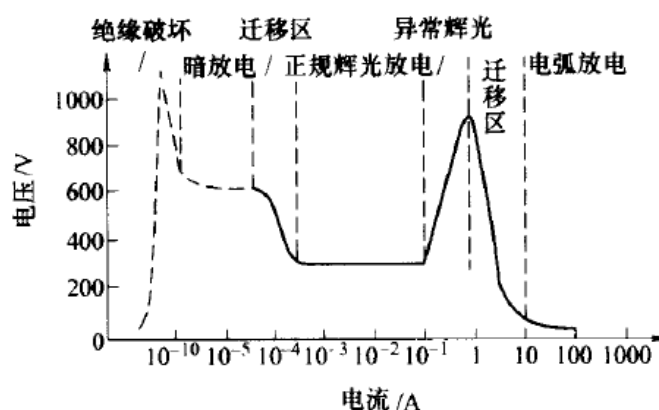


图 4 直流放电的电压与电流特性及放电形式

电弧中带电粒子产生的主要来源：

(1) 气体的电离：在一定条件下，中性气体粒子(分子或原子)分离为正离子和电子的现象。常态下的气体粒子(分子或原子)，受外来能量作用失去一个或多个

个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要的最低外加能量成为第一电离能，通常以电子伏(eV)为单位。生成的正离子称为一价正离子，这种电离称为一次电离。同理还有二次电离。普通焊接电弧中当焊接电流较小时只存在一次电离，而在大电流和压缩焊接电弧中，电弧温度达到几万度时可以出现二次或三次电离，即使这种情况下，一次电离仍然占主要地位。

在焊接电弧中，气体电离主要有以下几种：

1) 热电离：中性气体粒子受热的作用而产生的电离。弧柱中热电离是主要形式。

2) 场致电离：中性气体粒子受电场作用而产生的电离。动能增大，为碰撞电离提供条件。阴极压降区和阳极压降区，才可能产生电场作用下的电离现象。

3) 光电离：中性气体粒子吸收了光射线的光子能而产生的电离。电弧本身可以发出多种频率的光辐射，因此电弧本身具有向气体粒子提供辐射能量的条件。是电弧中产生带电粒子的一个次要途径。

4) 碰撞电离：带电粒子在定向运动过程中，与中性气体粒子发生碰撞而引起的电离。碰撞电离具有连锁反应的性质，会使带电粒子成倍增加，如图 5 所示。

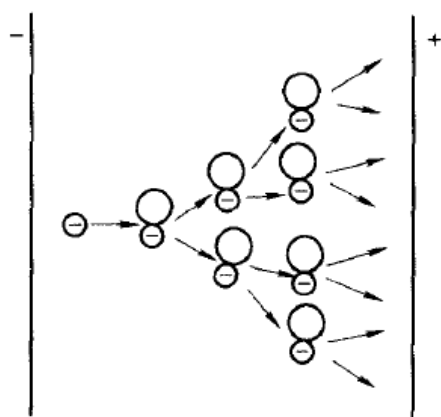


图 5 连锁反应电离过程示意图

电弧中高温和电场的存在都是提高粒子动能的有利条件，高温可以提高所有粒子(中性粒子、电子、离子)的动能，而电场强度是提高带电粒子(电子、离子)动能的条件。实际电弧过程通过粒子间的碰撞将能量传递给中性粒子并使之电离，是电弧本身制造带电粒子、维持其导电的最主要途径。

气体带电粒子运动过程中，带异性电荷的粒子也会发生碰撞，使正离子和电子复合成中性粒子，当气体的电离速度和复合速度相等时，就趋于相对稳定的动平衡状态。

(2) 电子的发射

电弧中起导电作用的带电粒子除依靠电离过程产生外,还可以从电极表面发射出来。在焊接电弧中电极只能发射电子而不能发射离子。

在焊接电弧中,阴极和阳极表面都可能发射电子,但是只有从阴极发射出来的电子在电场的作用下才参与导电过程,而从阳极发射出来的电子因受电场的排斥,不可能参与导电过程。因此,阴极发射电子对产生和维持电弧稳定是非常重要的。

电极的电子发射需要一定的外加能量,使一个电子由金属表面逸出所需要的最低外加能量成为逸出功 W , 逸出功的大小与电极材料种类、表面状态和金属电极表面氧化物情况有关。金属内部的电子只有在接受外加能量作用后,其能量升高超出逸出功才能冲破金属表面的束缚而发射到外部空间,由于外加能量形式不同,电子发射类型可分为如下四种:

(1) 热发射: 金属表面受热作用而产生的电子发射现象。电子发射将从金属表面带走能量对金属表面产生冷却作用。

(2) 电场发射: 当金属表面空间存在一定强度的正电场时,金属内的电子受此电场静电库仑力的作用,当此力达到一定程度时,电子可以飞出金属表面。当温度很低时,甚至是 0°C , 如果存在足够强的电场强度,也可以从电极发射足够数量的电子流密度以供电弧导电的需要。不产生冷却作用。

(3) 光发射: 当金属表面接受光辐射时,也可以使金属表面自由电子能量增加,冲破金属表面的制约飞到金属外面来。光发射在阴极发射现象中居次要地位。不产生冷却作用。

(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,使其能量增加而跑出金属表面。在一定条件下,离子碰撞发射是电弧阴极区提供导电所需电子的主要途径。

焊接电弧的形成和维持是在电场、热、光和质点动能的共同作用下,气体分子、原子不断地被激发、电离以及阴极电子发射的结果,同时伴随着一些其他过程,如扩散、复合、负离子的产生等。

(二) 焊接电弧的结构

以直流电弧为例,进行分析。焊接电弧包括阴极区、弧柱区及阳极区,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,阴极区和阳极区电压变化比较大,弧柱区电压变化比较小,而且比较均匀。阴极区和阳极区在长度方向的尺寸均很小,分别为 10^{-4}cm 和 10^{-6}cm 左右,其余为弧柱区,由于弧柱区的长度占电弧长度的绝大部分,因此可以近似认为两极间的距离即为弧柱区的长度,即为电弧的长度。弧柱压降与

弧柱长度成正比。

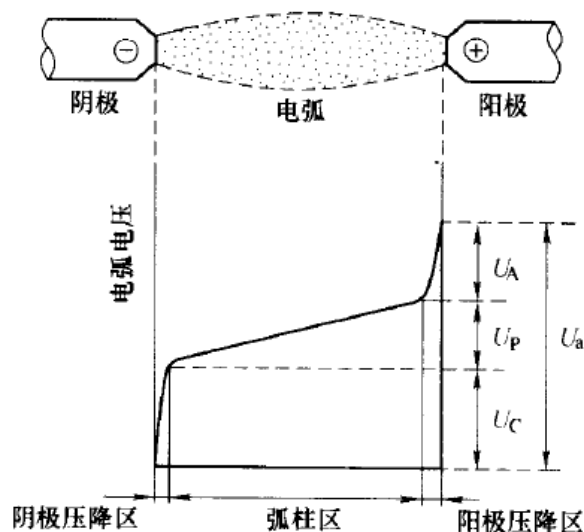


图 6 电弧各区域电压分布示意图

(三) 电弧的能量转换

(1) 弧柱的产热机构

带电粒子在外加电场的作用下产生运动，位能(电场能)转变为热能、动能。电子的运动由两部分组成：一部分是与正离子(或中性粒子)碰撞过程的散乱运动；另一部分是沿电场方向的定向运动。这种散乱运动的动能实质就是电子热能，这部分能量占电子总能量的大部分，而电子沿电场方向运动的动能只占较小部分，弧柱中外加电能以这种形式转变为热能。

弧柱的热损失分为对流、传导和辐射等，弧柱部分的热能对流损失约占 80% 以上，传导与辐射均为 10% 左右。

(2) 阴极区的产热机构

由于阴极区的长度很小(数量级为 10^{-5} - 10^{-6} cm)，所以阴极区热能直接影响阴极的加热，影响熔深。阴极区提供的电子流与总电流 I 相近，这些电子在阴极压降的作用下跑出阴极并受到加速作用，这是在阴极区由电能转变为热能的主要来源。阴极的产热表达式为：

$$E_c = I(U_c - U_w - U_T) \quad (1)$$

式中， E_c -阴极区的总能量(J)；

U_c -阴极压降(V)；

U_w -逸出功(V)；

U_T -弧柱温度的等效电压(V)。

阴极产热量主要用于阴极的加热和阴极区的散热损失，焊接过程中直接加热母材的热量主要由这部分能量提供。

(3) 阳极区的产热机构

阳极区往弧柱区输送的正离子流只占电流的 0.001，所以考虑能量转换时也可以考虑正离子流对阳极能量变化的影响，认为阳极区的电流等于电子流，只考虑接受电子流的能量转换。阳极总能量表达式如下：

$$E_A = I(U_A + U_w + U_T) \quad (2)$$

式中， E_A -阳极区的总能量(J)；

U_A -阳极压降(V)。

阳极产热量主要用于焊丝的加热、熔化和散热损失，这部分能量是焊接过程可以直接利用的能量。

(4) 焊接电弧的有效功率及能量密度

焊接时通过电弧将电能转换为热能，利用这种热能来加热和熔化焊丝与焊件。对于熔化电极焊接，焊接过程中焊条(或焊丝)熔化，熔滴把加热和熔化焊丝的热量带给熔池。

如果用 P_0 表示电弧的总功率，则

$$P_0 = IU_a \quad (3)$$

式中， I -焊接电流(A)；

U_a -电弧电压(V)。

设 P 为用来有效加热工件和焊丝的有效功率，则

$$P = \lambda P_0 \quad (4)$$

式中， λ 为电弧有效功率因数，与焊接方法、焊接规范及周围条件等有关。 $(1-\lambda)P_0$ 将消耗在辐射、对流等热损失上。各种弧焊方法的有效功率因数如表 4 所示。

表 4 各种弧焊方法的有效功率因数 λ

弧焊方法	λ	弧焊方法	λ
药皮焊条电弧焊	0.65-0.85	熔化极氩弧焊(MIG)	0.70-0.80
埋弧焊	0.80-0.90	钨极氩弧焊(TIG)	0.65-0.70
CO ₂ 气体保护焊	0.75-0.90		

有效功率因数皆随电弧电压的升高而降低。

阳极区和阴极区产热之和对焊丝和母材的加热熔化起决定作用，产热之和

为:

$$E_C + E_A = I(U_C - U_W - U_T) + I(U_A + U_W + U_T) = I(U_A + U_C) \quad (5)$$

在焊接电流一定的条件下,两个电极区的产热之和决定于阴极和阳极压降数值的大小。电弧的有效功率因数可以近似地认看做两个电极区产热量与总电弧产热量之比,即

$$\lambda = \frac{I(U_C + U_A)}{IU_a} = \frac{U_C + U_A}{U_a} \quad (6)$$

(四) 电弧压力及其影响因素

电弧对焊接而言,不仅仅是一个热源,也是一个力源。电弧力与焊接中表现出的熔池形态、熔深尺寸、熔滴过渡、焊缝成形等都有密切关系,同时也是形成不规则焊缝、产生成形缺陷、造成焊接飞溅的直接原因。电弧力主要包括电弧静压力(电磁收缩力)、电弧动压力(等离子流力)、斑点力、爆破力及熔滴冲击力。

(1) 电弧静压力(电磁收缩力)

相互吸引力,大小与流过的电流大小成正比,与两根导线之间的距离成反比,导体断面有收缩的倾向。

电磁收缩力呈现上大下小的状态,轴向将产生压力差,从而产生一个由电极指向工件的推力,为电磁静压力。

(2) 等离子流力(电磁动压力)

电弧中的压力差使较小截面处的高温粒子向焊件方向流动,并由更小截面处的气体粒子补充到该截面上来,以及保护气氛不断进入电弧空间,从而形成连续不断的气流,称作等离子气流,到达焊件表面时形成附加的一种压力,称作等离子流力。

(3) 斑点力

斑点受到带电粒子的撞击,或金属蒸汽的反作用而对斑点产生的压力。阴极斑点力大于阳极斑点力。

(4) 短路爆破力

电弧从燃烧状态过渡到短路状态,电弧电流迅速上升,熔滴温度急剧上升,液柱汽化爆炸,产生较大的冲击力,导致飞溅产生。

(5) 熔滴冲击力

射流过渡时,在等离子流力的作用下,熔滴以很高的加速度(可达重力加速度的50倍)冲向熔池,到达熔池时速度可达每秒几百米的数量级,使焊缝极易形成指状熔深。

电弧力的影响因素包括以下几方面：(1)气体介质；(2) 电流和电压(弧长)；(3)焊丝的直径；(4)焊丝的极性。

(五) 焊接电弧特性

(1) 焊接电弧静特性

焊接电弧静特性的定义：在电极材料、气体介质和弧长一定的情况下，电弧稳定燃烧时，焊接电流和电弧电压变化的关系的曲线，也称伏-安特性。

电弧静特性曲线分为三个部分：**ab** 段的焊接电流较小时，电弧静特性为负阻特性，即随着焊接电流的增加而电弧电压减小，小电流 **TIG** 焊属于此种；当焊接电流稍大时，为 **bc** 段，焊接电流变化时，电弧电压基本不变，为水平特性，埋弧焊、焊条电弧焊和大电流 **TIG** 焊属于此种；当焊接电流更大时为 **cd** 段，电弧电压随焊接电流的增加而增加，电弧静特性为上升特性，**GMAW** 的电弧静特性大多为上升特性。

影响电弧静特性的因素：(1)弧长的影响：当弧长变化时，电弧静特性曲线将发生上、下移动。(2)保护气体的影响：热导率较好的气体，对电弧产生冷却作用，增大了电弧电场强度。气体压力越大，冷却作用越强，电弧电压越高。保护气体的流量越大，电弧的热量被带走得越多，而提高电弧的电场强度。(3)电极与母材的影响：焊丝成分及焊丝直径对电弧静特性有影响，母材的材料由于其导热能力和尺寸的不同，将影响散热能力，对电弧的冷却作用也不同，对电弧电压产生影响。

(2) 焊接电弧动特性

对于一定弧长的电弧，当焊接电流发生连续的快速变化时，电弧电压与电流瞬时值之间的关系称做电弧动特性。电弧动特性是指电弧电压对于焊接电流变化的响应能力。

(3) 最小电压原理

最小电压原理用以表征电弧的最小能量消耗的特性。焊接电弧通常是自由电弧，其截面积可以自由变大或缩小，当给定电流与边界条件一定的情况下，电弧稳定燃烧时，弧柱半径(**R**)或温度(**T**)应使弧柱电场强度(**E**)具有最小的数值。表达式如下：

$$\frac{\partial E}{\partial R} = 0 \text{ 或 } \frac{\partial E}{\partial T} = 0 \quad (7)$$

弧柱区电场强度 E 的大小意味着电弧导电的难易， E 是弧柱温度的函数。当电流与周围条件一定时，弧柱的断面只能在保证 E 为最小的前提下确定。

(4) 电弧斑点

电弧斑点也是一种电弧现象，可能出现在电极上或母材上，分为阴极斑点和阳极斑点，它的形成主要与电极及母材的区域导电性有关。

a) 阴极斑点

阴极区发射电子可能有三种情况：第一种情况是阴极区发射电子的面积与弧柱的截面相近，在阴极区上导电面积没有明显的收缩；第二种情况是阴极区发射电子的面积比弧柱截面显著减小，在阴极上的导电断面有显著收缩；第三种情况是阴极通过微小的斑点发射电子，这些斑点的电流密度很高，称为阴极斑点。

当采用熔点较高的材料(W、C 等)作阴极时，并用较大的焊接电流时，阴极温度高，依靠热发射就可以为弧柱提供足够的电子，弧柱与阴极相接处不产生收缩，此时不形成阴极斑点。

当焊接电流较小，阴极温度较低时，阴极依靠热发射不能提供足够数量的电子，阴极区将自动求助电场发射等途径提供导电所需的电子，为了保证阴极前面有较大密度的正离子堆积和减少向四周散失热量，电弧在与阴极接触处自动收缩断面。

当材料的熔点、沸点较低，并且导热性很强时，即使阴极温度达到材料的沸点开始蒸发，此温度也不足以通过热发射产生足够数量的电子，阴极将进一步缩小其导电面积，指导在阴极导电面积前面形成密度很大的正离子空间电荷，形成很大的阴极压降，足以产生较强的电场发射，以补充热发射的不足，向弧柱提供足够的电子流维持电弧燃烧，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，这种导电斑点称为阴极斑点。用高熔点材料做阴极时，只有在焊接电流很小、阴极温度很低的情况下，才可能产生这种斑点。当用低熔点材料做阴极时，大小电流都能产生阴极斑点。

阴极斑点的跳动，总是自动选择发射电子时消耗能量最低的点。

b) 阳极斑点

阳极斑点的定义为电弧放电时，正电极表面上集中接受电子的光亮微小区域。

当采用高熔点材料(W、C 等)，当电流较大，阳极温度很高时，依靠阳极前面中性粒子的热电离就可以提供 0.001I 的正离子流，则阳极压降 U_A 接近零，电弧与阳极接触处不产生任何收缩，也不形成阳极斑点，只存在阳极导电区。

当采用低熔点材料(Fe、Cu、Al 等)作用阳极时，一旦阳极表面某处有熔化和蒸发现象发生时，由于金属蒸汽的电离能大大低于一般气体的电离能，在有金属蒸汽存在的地方，更容易产生热电离而提供正离子流，电子流更容易从这里进入

阳极，阳极上的导电区将在这里集中而形成阳极斑点。阳极斑点电流密度比阴极斑点要小。

由于阳极斑点的形成条件之一是金属的蒸发，因此当金属表面覆盖氧化膜时，与阴极斑点的情况相反，阳极斑点有自动寻找纯金属表面而避开氧化膜的倾向，这是因为大多数金属氧化物的熔点和沸点皆高于纯金属，且金属氧化物的电离电压较高。

(六) 焊接用保护气作用

气体保护焊是以外加气体作为电弧介质，并保护电弧、熔化金属及焊接高温区金属的电弧焊方法。保护气体的作用有两个方面：一为作为电弧介质，涉及到电弧介质的电离、稳定电弧和功率变换等。二为起保护作用，用于屏蔽空气和水分，保护焊接区不受侵蚀和产生冶金作用，并提高接头性能。

CO₂是活性气体，它是多原子气体，比空气重 1.5 倍，无色、无味，略有刺激性酸味和轻微毒性。在高温时，CO₂ 气体吸收热量分解成 CO 和 O₂(如在 5000K 时分解度可达到 99%)。与 O₂ 等活性气体不同，CO₂ 气体可用作 GMAW 的保护气，但在 GMAW 时有强的氧化性，所以必须采用有效的工艺措施，使用脱氧力较强的焊丝，如选用含有 Si 和 Mn 元素的焊丝等。CO₂ 焊主要用于低碳钢和低合金结构钢。此外，CO₂ 气体还能与氩气混合成为混合气体，这将提高 GMAW 的生产率。

保护气流的影响

选择了合适的保护气体并不能保证得到良好的焊接质量，保护气流量对焊接质量具有直接的影响。

以焊枪喷嘴喷出的气流，在中心部分为层流，在其周围和远离喷嘴处逐渐成为紊流。在层流部分很少卷入空气，而在紊流区却卷入了很多空气，如图 7 所示。

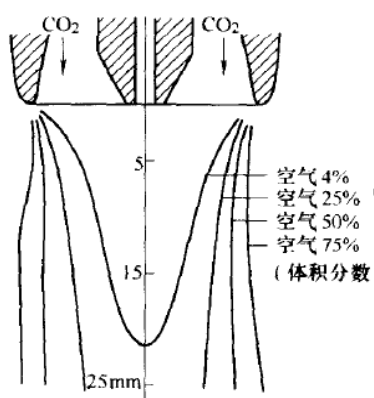


图 7 无风条件下 CO₂ 保护气流中空气的卷入程度示意图

把没有空气卷入的部分的气流长度称为层流长度，用作判断气体保护性好坏的基准。雷诺数 Re 决定层流和紊流， $Re < 2320$ 时，流体是层流；当 $Re \geq 2320$

时，流体是紊流。

从喷嘴喷出的保护气气流是层流时，有利于气体保护效果。如果气体流量小，尽管由于气体流速减慢，有利于喷出层流，但是易受外来气流的影响。在外部风速增大后，要得到无缺陷的焊缝需要加大保护气体的流量，否则会产生气孔缺陷。

焊接熔池中的气泡在凝固时未能溢出而残留下来所形成的空穴称之为气孔。气孔削弱焊接接头的有效工作面积，同时还会带来应力集中，降低接头的强度、塑性及疲劳强度。

气孔分类

根据气孔产生的部位不同可分为表面气孔和内部气孔。

根据气孔分布状态不同可分为单个气孔、疏散气孔、密集气孔、连续气孔。

根据气孔的形态可分为条状气孔、针状气孔和球形、椭圆形气孔等。

气孔缺陷在底片上的影像描述

气孔在底片上影像是黑色圆点，也有呈黑长条状的或其它不规则形状，气孔的轮廓比较圆滑，其黑度中心较大，至边缘稍减少。

密集气孔在底片上的形态如下图 8 所示：

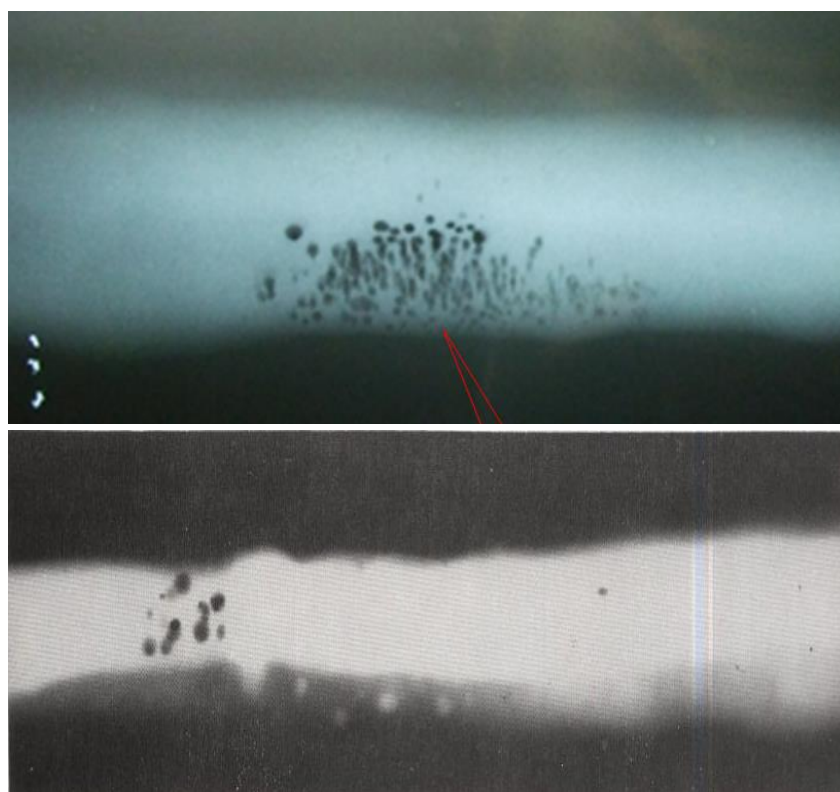


图 8 密集气孔在底片上的分布

为提高气体保护效果可采取如下措施：

- (1) 焊枪喷嘴尺寸应加大长度和直径，同时增大气体流量。
- (2) 气体流量应合适。对于一定孔径的喷嘴，保护气体流量过小，气流挺度

差,易受风的干扰,保护效果不好。但气体流量过大,易形成紊流,也不好。

(3) 喷嘴至焊件的距离应尽量减小。减小距离可以提高保护效果。但考虑到操作性和飞溅堵塞喷嘴等因素,喷嘴高度还不应该过小。

(4) 注意侧向风的影响,当侧向风较小(低于 1.5 m/s),可降低喷嘴至焊件的距离;当侧向风较大时必须采取防风措施。

(5) 接头形式影响保护气体的覆盖能力。水平对接及内角焊缝保护效果较好;外角或端角焊缝,保护效果较差。

(七) 焊接工艺参数与焊接线能量的关系

气电立焊自动上升控制系统对焊接过程实行全自动控制,能够自动改变焊接速度,以适应坡口截面积的变化。其焊接速度等于单位时间熔化金属的填充体积和坡口截面积之比,即:

$$v = V/S \quad (8)$$

在不考虑飞溅损失时,可认为焊丝熔化速度和坡口截面积之比为:

$$v = v_m/S \quad (9)$$

而焊丝的熔化速度与焊接电流成正比[1]:

$$v_m = k_t I \quad (10)$$

焊接线能量为:

$$E = \frac{IU}{v} \quad (11)$$

由式(2)(3)(4)得:

$$E = \frac{1}{k_t} \cdot U \xi \quad (12)$$

以上公式中 v —焊接速度,cm/s

v_m —焊丝的熔化速度, cm^3/s

S -坡口截面积, cm^2

I -焊接电流, A

U -电弧电压, V

E -焊接线能量, J/cm

k_t -焊丝的熔化系数, $\text{cm}^3/\text{A s}$

气电立焊焊接线能量由电弧电压和坡口截面积决定。毛为熔化系数,大小取决于焊丝的电阻率、直径、伸出长度等,当这些参数不变时,其值为常数,实际侧得:

国产焊丝 5L07 $kt=0.78(\text{cm}^3/\text{A} \cdot \text{s})$

日产焊丝 EG-60 $kt=0.81(\text{cm}^3/\text{A} \cdot \text{s})$

(八) 电弧作用高度设计

电弧作用高度主要和电弧电压有关,电弧作用高度增大,电弧电压相应增大,过高的电弧电压会出现焊缝咬边,过低的电弧电压会使电弧燃烧不稳定,电弧电压对电弧稳定性影响如图 9 所示。合理的电弧电压根据公式(10)进行计算,进而得到合适的电弧作用高度。

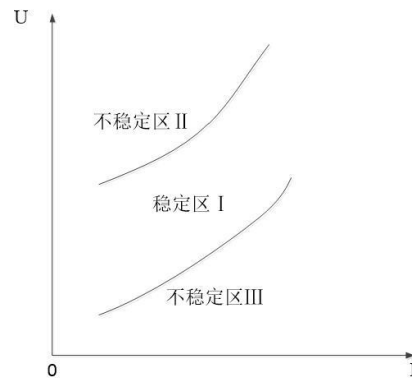


图 9 焊接规范的稳定区域说明示意图

(九) 电弧作用临界半径计算

电弧把热量传递给母材是通过焊件上一一定的作用面积进行的,这个作用面积即为加热斑点,对于气电立焊,这个加热斑点若大于坡口断面,则有一部分电弧热量将直接作用在侧壁母材上,形成对母材的挖掘作用,否则母材熔深主要由熔池对流传热方式产生,如图 10 所示,设电弧能够产生挖掘作用的临界半径为 r_H , o 点为坡口形心,即焊丝送入的燃烧点。

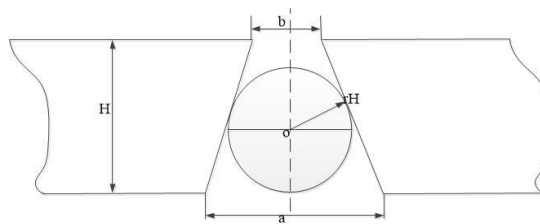


图 10 电弧作用临界半径计算示意图

形心确定后,可推导出临界半径 r_H 和坡口参数之间的关系:

$$r_H = \frac{2(a^2 + ab + b^2)H}{3(a+b)\sqrt{(a-b)^2 + 4H^2}} \quad (13)$$

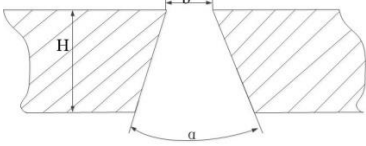
根据气电立焊板厚和坡口尺寸的对应关系,可计算得出 a 和 b 的数值。板厚用 H 表示,坡口角度用 α 表示,确定的板厚对应固定的 α 和 b 的数值,如表 5 所示。

通过计算 a 的表达式如下：

$$a = 2 \cdot H \cdot \tan \frac{\alpha}{2} + b \quad (14)$$

通过将 H、 α 及 b 代入(12)及(13)式中,可计算出电弧作用临界半径。当板厚为 22 mm 时, r_H 约为 6.8 mm。

表 5 板厚同坡口尺寸的对应关系

板厚 H/mm	坡口角度 $\alpha/^\circ$	根部间隙 b/mm	坡口形式
9-12	55	6	
12-15	50	6	
15-18	45	6	
18-23	40	5	
23-26	35	5	
26-29	30	5	
29-32	25	5	

(十) 电弧形态及焊接速度设计

电弧形态与焊接电压及焊接电流具有直接的关系。一般而言,焊接电压越大,弧长越长,电弧热源半径越大,熔宽增大,熔深随电弧电压变化关系复杂,先增大后减小。过高的电弧电压会出现焊缝咬边。但过低的电弧电压会使电弧燃烧不稳定。因此在保证焊接过程稳定和焊缝成型良好的情况下,应尽量降低电弧电压对防止气孔和减少合金元素的烧损都是有利的。电流越大,电弧热源半径越大,熔宽和熔深均增大。过大过小的焊接电流都会影响焊接过程的稳定性和焊道的成形良好。

合适的焊接速度视焊丝熔化速度而定。它与焊丝熔化速度间的关系,以水冷滑块内金属液面距进气口底部为(5-10)mm 较合适。焊接速度过快,滑块内金属液面逐渐降落,焊丝伸出长度增加,易使焊缝产生气孔。焊接速度过慢,水冷铜滑块内金属液面升高,飞溅增加,当金属液面升高到进气口底部时,电弧燃烧不稳定。甚至会迫使焊接过程中断。

对于气电立焊,焊接速度等于单位时间熔化金属的填充体积和坡口截面积之比,而焊丝的熔化速度和焊接电流成正比,从而得到焊接速度和焊接电流的关系表达式如下:

$$v = \frac{k_t I}{S} \quad (15)$$

式中, k_t 为熔化系数, 取值 $0.78(\text{cm}^3/\text{A s})$; S 为坡口截面积; I 为焊接电流。因此, 根据焊接电流, 坡口截面积及熔化系数就可计算得到相应的焊接速度。

(2) 焊丝的加热和熔化特性

焊接过程中, 焊丝不断地被电弧加热、熔化, 形成熔池并向熔池过渡, 和熔化的母材金属相互融合, 冷凝后形成焊缝。

焊丝有两个作用: 一方面可作为电弧的电极; 另一方面可作为填充金属。焊丝的熔化速度与焊接条件有着密切的关系。焊接条件发生变化, 经常能引起焊丝熔化速度的变化。焊丝的表面状态不同, 也会影响焊丝的熔化速度。焊丝的极性也会影响焊丝的熔化速度。保护气成分对焊丝熔化速度的影响也较大。熔滴过渡形式对焊丝的熔化速度也有很大的影响, 尤其对铝合金的影响更为突出。从大滴过渡向喷射过渡转变时, 焊丝的熔化速度出现一个阶跃, 即喷射过渡时, 焊丝熔化速度明显降低, 同时, 焊丝熔化速度正比于焊接电流的变化。

因此, 焊丝的熔化速度不仅取决于焊接电流, 还与焊接电流的极性、保护介质的成分、熔滴过渡形式、焊丝材料及焊丝表面状态等有关。

(一) 焊丝加热相关理论

焊丝的加热与熔化是电弧热作用的结果, 电弧的热功率等于电弧电压与焊接电流的乘积, 即

$$P_a = I_a U_a \quad (16)$$

式中 I_a -焊接电流(A); U_a -焊接电压(V)。

并不是所有的电弧热都用于加热焊丝。焊丝的加热与熔化主要决定于靠近焊丝的阴极区(EN)或阳极区(EP)所产生的热量。阴极区和阳极区的产热可用下式计算:

$$P_A = I_a (U_a + U_w + U_T) \quad (17)$$

$$P_C = I_a (U_C - U_w - U_T) \quad (18)$$

式中, P_A 和 P_C -阳极和阴极的产热(J);

U_A -阳极压降(V);

U_C -阴极压降(V);

U_w -电极材料的逸出功(V);

U_T -电极温度的等效电压(V)。

如果弧柱温度为 6000K 时, U_T 小于 1V。当电流密度很大时, U_A 近似于 0, 所以上式可进一步简化为下式:

$$P_A = I_a U_w \quad (19)$$

$$P_C = I_a (U_C - U_w) \quad (20)$$

可见，阳极区与阴极区的产热主要决定于阴极压降和电极材料的逸出功。一般情况下 $U_C \gg U_w$ ，因此阴极产热总是大于阳极产热，所以阴极的熔化速度总是大于阳极的熔化速度。

对于垂直气电立焊，电源通常采用直流反接(焊丝接正极)，即焊丝为阳极，母材为阴极，用于熔化焊丝的热主要决定于焊丝材料的逸出功及焊接电流。

除了电弧热以外，焊丝伸出长度部分的电阻热的影响也很大，焊丝伸出长度是指从焊丝与导电嘴的接触到电弧端头的这段焊丝的长度，如图 11 所示。

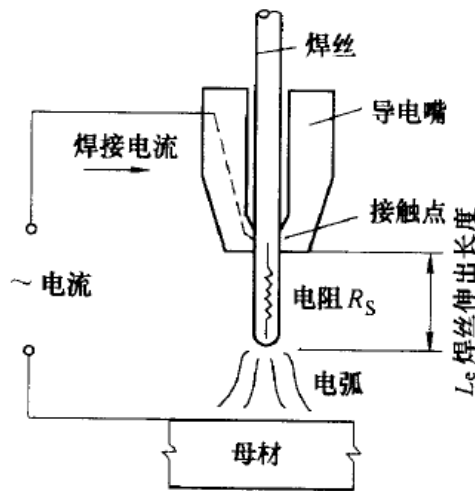


图 11 焊丝伸出长度示意图

电阻热计算公式如下：

$$P_R = I^2 R_S \quad (21)$$

$$R_S = \rho \frac{L_e}{A} \quad (22)$$

式中， P_R -焊接电流通过焊丝伸出长度时产生的电阻热；

R_S -焊丝伸出长度 L_e 的电阻值；

ρ -焊丝材料的电阻率；

L_e -焊丝的伸出长度；

A -焊丝的断面积。

对于导电良好的铝和铜等金属， P_R 与 P_C 或 P_A 相比是很小的，可以忽略不计。对于不锈钢和钛等电阻率高的材料，特别是在细丝大电流时，焊丝伸出长度越大，电阻热的影响也越大。电阻热对焊丝熔化起到预热作用。

因此，用于加热和熔化焊丝的总热量 P_m 主要由两部分组成：一部分为电弧的近电极区产热；另一部分为电阻热，可用下式表示

$$P_m = I_a(U_m + I_a R_s) \quad (23)$$

式中 U_m 为电弧热熔化焊丝的等效电压。

在稳定的焊接过程中，当弧长保持一定时，单位时间内提供给焊丝的热量应该等于脱离焊丝的熔滴金属所带走的热量 Q_m ，可用下式表示

$$Q_m = v_m(cT_f + H) \quad (24)$$

式中， v_m -熔化速度(单位时间内焊丝熔化的质量)(g/min)；

c -比热容[J/(kg K)]；

T_f -熔滴金属脱离焊丝时的平均温度(K)；

H -熔化金属的潜热(cal/kg)。

焊接过程稳定时，得到下式

$$v_m = \frac{U_m + I_a R_s}{(cT_f + H)J} I_a \quad (25)$$

式中 J -热功当量，数值为 4.2J/Cal.

其中，

$$\frac{U_m + I_a R_s}{(cT_f + H)J} = \alpha_m = \alpha m \quad (26)$$

α_m 为熔化系数，熔化系数的意义是：单位时间内通过单位电流时熔化焊丝金属的重量。

(二) 熔滴过渡及分类

(i) 熔滴过渡概念及熔滴上的作用力

熔滴过渡是指在电弧热作用下，焊丝或焊条端部的熔化金属形成熔滴，受到各种力的作用从焊丝端部脱离并过渡到熔池的全过程。它与焊接过程稳定性、焊缝成形、飞溅大小等有直接关系，并最终影响焊接质量和生产效率。

焊丝端头上的熔滴受以下几个力的共同作用：表面张力、重力、电磁收缩力、斑点压力及等离子流力等。

1 表面张力

若焊丝的半径为 R ，则熔滴的表面张力为

$$F_a = 2\pi R\sigma \quad (27)$$

式中， σ 为表面张力系数

2 重力

当焊丝直径较大而焊接电流较小时，在平焊位置的情况下，使熔滴脱落的力主要是重力。如果熔滴的重力大于表面张力时，熔滴就要脱离焊丝。

3 电弧力

在大电流时，重力对熔滴过渡的影响已降到次要的地位了，而与电弧形态有关的力对熔滴的作用力将成为主要因素。

电磁力对熔滴过渡有阻碍力和促进力之分，如图 12 所示。

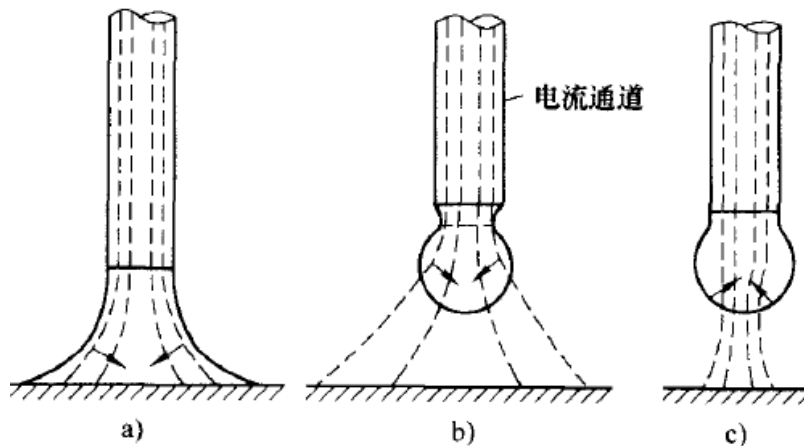


图 12 作用在液柱或熔滴上的电磁收缩力

a) 促进熔滴过渡 b) 促进熔滴过渡 c) 阻碍熔滴过渡

一般情况下，当阳极区直径大于焊丝直径时，电磁力起到促进熔滴脱落的作用，当阳极区直径小于焊丝直径时，电磁力阻碍熔滴的脱落。

4 爆炸力

当熔滴在电弧空间停留时间较长时，在熔滴内部由于冶金反应生成较多的气体，气体逐渐积聚，并使熔滴体积膨胀，当内压力足够大时，熔滴将发生爆破，其中大部分液体金属向熔池过渡，而少量金属成为飞溅。

(ii) 熔滴过渡分类

熔滴过渡行为大体上可分为两种类型，即自由过渡和接触过渡。自由过渡是指熔滴经电弧空间自由飞行而焊丝端头和熔池之间不发生接触的过渡形式。

其中，自由过渡包括如下几种：

(1) 当熔滴直径大于焊丝直径时，为大滴过渡；其中当焊接电流较小时为下垂滴状过渡，而在 CO_2 气体保护焊时可出现排斥滴状过渡。

(2) 当熔滴直径小于或等于焊丝直径时为喷射过渡；其中，当熔滴直径接近焊丝直径时为射滴过渡；而当熔滴直径大约为焊丝直径的 $1/3-1/2$ 时称为射流过

渡；当焊接电流和焊丝伸出长度都较大，焊丝端头的液柱一方面绕焊丝轴线旋转，另一方面还随意甩动，同时沿焊丝端头抛出细滴，熔滴的尺寸小于焊丝直径，为旋转射流过渡。

(3) 焊丝接头的液体金属熔滴中形成气体，体积突然膨胀，当其中气体压力较高时，液球破碎，并以较细的熔滴四散开去，其中一部分成为飞溅。

接触过渡：焊丝端头的熔滴与熔池表面相接触而过渡。分为短路过渡与搭桥过渡，液体金属小桥通焊接电流时为短路过渡，而不通电时为搭桥过渡，一般为填丝焊。

(ii) 垂直气电立焊熔滴过渡分类

对于垂直气电立焊，不同的电弧电压和焊接电流将获得不同的熔滴过渡形式，如图 13 所示，具体可分为 5 个区，分别为大滴排斥过渡区，顶丝区及中间的合适规范区，合适规范区包括 A_1 、 B_1 及 C_1 区。其中 A_1 区为细滴过渡区， B_1 区为表面张力过渡区(瞬时短路过渡的排斥颗粒过渡)， C_1 区为短路过渡区。

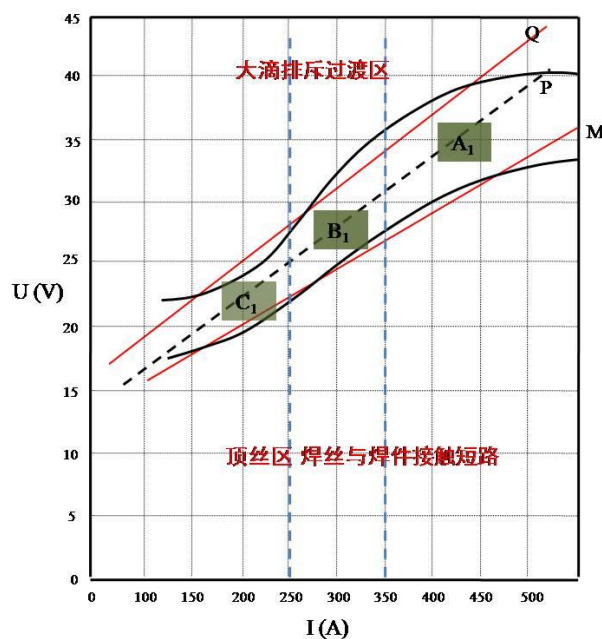


图 13 熔滴过渡方式同电弧电压及焊接电流的关系

图中 Q 线及 M 线为拟合线， P 为负载线，表达式分别如下：

$$\begin{aligned}
 V_Q &= 0.056A + 13.5 \\
 V_P &= 0.06A + 10.5 \\
 V_M &= 0.048A + 10.4
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

5. 热影响区 CCT 图

CCT 曲线指的是过冷奥氏体连续转变温度曲线。它反映了在连续冷却条件下过冷奥氏体的转变规律，是分析转变产物组织与性能的依据，也是制订热处理工艺的重要参考资料。

CCT 曲线反映的是过冷奥氏体的冷却时组织转变的规律，针对 DH36 而言，研究其冷却时组织的变化规律对以后的焊接工作有指导性的作用。焊缝的组织决定性能，而我们在焊接过程中只能观察到最终成型的组织，而对于焊缝在冷却过程中进行了怎样的组织变化一无所知。但是如果我们将焊缝区域冷却时的温度记录下来，用它冷却时的温度来进行 CCT 曲线的实验，可以得出焊缝金属冷却时的组织变化，帮助我们更好的分析焊缝组织。我们也可以根据绘制的 CCT 曲线来控制冷却速度，得到我们想要的组织结构，使焊缝有良好的力学性能。

图 14 为 DT36 钢的动态 CCT 曲线，图 15 为其对应的不同冷却速度下的粗晶区的相组成及体积分数，图 16 为硬度随着时间的变化关系。

由图 15 可以看出，当粗晶区的冷却速度小于 $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时，焊接后粗晶区由铁素体 (F) 和珠光体 (P) 两相组成，在此冷却速度区间内 F 的体积分数随着冷却速度的增加而降低，P 的体积分数随着冷却速度的增加而增加；当冷却速度大于 $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时，粗晶区内的贝氏体 (B) 体积分数急剧增加，而 P 的量急剧减少到基本消失；当冷却速度进一步增加到大于 $60^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时，粗晶区出现马氏体 (M)，并且 M 的含量随着冷却速度的增加而增加。

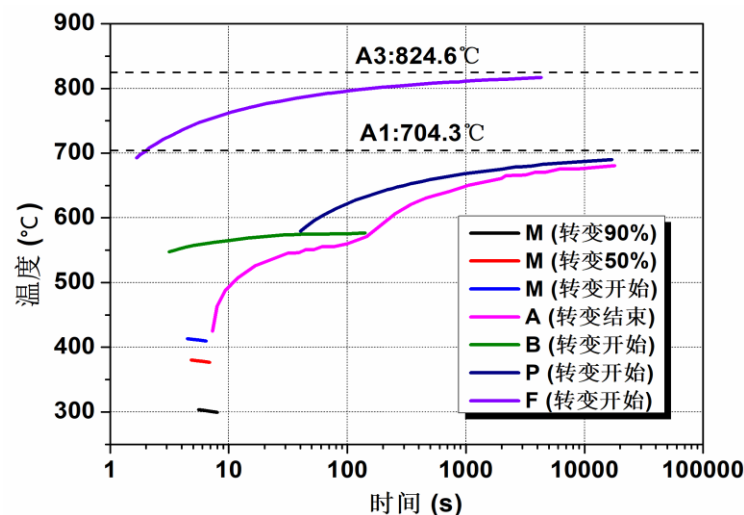


图 14 DH36 钢的 CCT 曲线

冷却速度与 $t_{8/5}$ 时间成反比， $t_{8/5}$ 时间越小对应的冷却速度越大。对比图 15 和图 16 可以看出，小的时间（高的冷却速度）对应的粗晶区的相组成大部分为贝氏体和马氏体组织。马氏体和贝氏体较铁素体和珠光体有更高的硬度和强度，

所以低的 $t_{8/5}$ 时间粗晶区的硬度较高。但是，当粗晶区的硬度过高时，其韧性将下降，在焊接工艺设计过程中要综合考虑其热影响区的硬度和韧性。

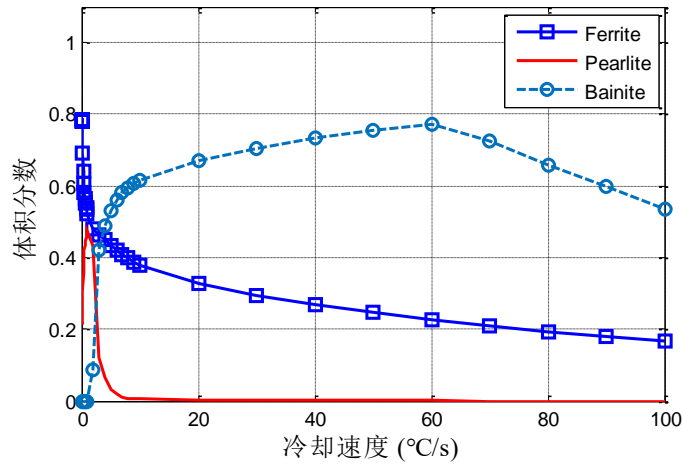


图 15 不同冷却速度下近缝区的相组成

图 16 为实验获得的粗晶区的硬度对时间的依赖关系，一般粗晶区的硬度与强度的具有正相关关系，粗晶区较高的硬度是保证焊接件在服役过程中不从粗晶区断裂的前提条件之一。

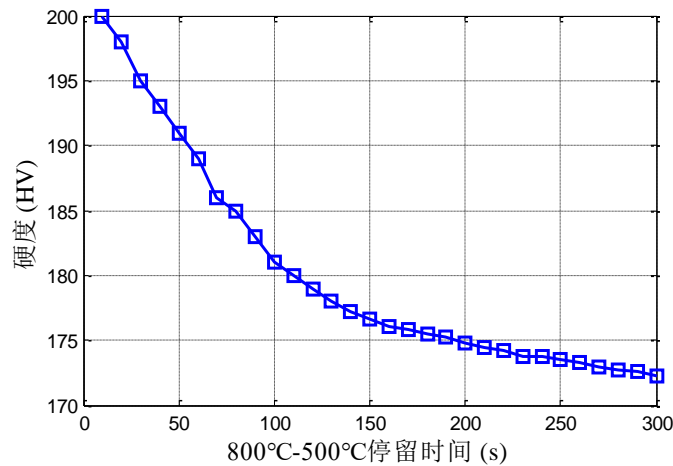


图 16 硬度随着 $t_{8/5}$ 时间的变化关系

6. 焊接热循环

(1) 焊接热循环关键参数设计

在焊接过程中热源沿焊件移动时，焊件上某点的温度随时间由低而高达到最大值后又由高到低变化的过程称焊接热循环,如图 17 所示。焊接热循环是焊接工艺中的一个重要因素，加热速度很快，在最高温度下停留时间很短，随后各点按照不同的冷却速度进行冷却。它给母材造成了不均匀的组织和不均匀的性能，其中最容易出现问题的部位就是近缝区（熔合区和部分热影响区）。因此掌握近

缝区的热循环，对于控制和提高焊接质量相当重要。

影响焊接热循环的主要因素有：焊接热输入、预热和层间温度、工件厚度、接头形式及材料本身的导热性能等。

焊接热循环主要参数有：峰值温度 T_{max} 、相变点停留时间 t_H 、熔合线冷却速度 ω_c 。

关键知识点：线能量与峰值温度 T_{max} 、相变点停留时间 t_H 、熔合线冷却速度 ω_c 之间的关系。

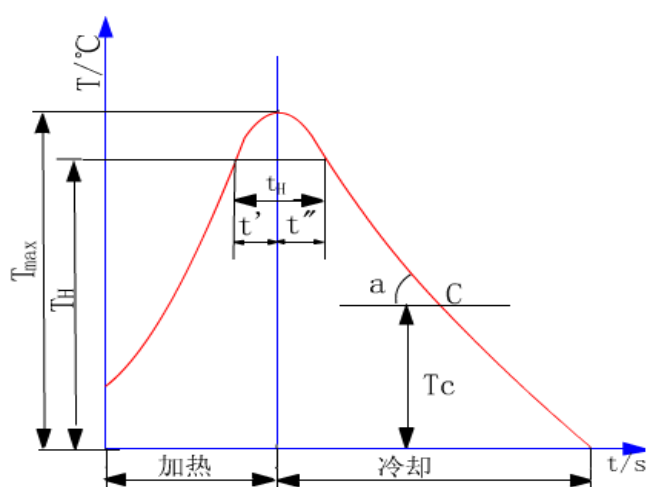


图 17 焊接热循环

1) 加热速度

焊接加热速度要比热处理时的加热速度快得多，这种快速加热使体系处于非平衡状态，因而在其冷却过程中必然影响热影响区的组织和性能；它受焊接方法、焊接热输入、板厚及几何尺寸和金属热物理性质的影响。焊接钢材时，加热速度越快，钢中奥氏体的均质化和碳化物溶解就越不充分，必然影响到焊接热影响区冷却后的组织与性能。

通常随着加热速度的提高，钢的固态相变温度 A_{c1} 和 A_{c3} 也相应提高，而且 A_{c1} 和 A_{c3} 之间的温差也变大。随着钢中碳化元素的增多，这一效果更为显著。

学习思路：加热速度增大，相变温度升高，会导致奥氏体化程度下降和碳化物溶解程度下降。

2) 峰值温度

T_{max} 即加热最高温度，它决定着焊后母材热影响区的组织与性能，例如，接头熔合线附近的过热段，就是因为温度高，产生了过热粗晶区，致使韧性下降。峰值温度过高，将使晶粒严重长大，甚至产生过热的魏氏组织，造成晶粒脆化。峰值温度 T_{max} 与焊件的初始温度、焊接线能量 E ，被焊金属的板厚及离热源中心

距离有关。

例如：熔合线附近（对一般低碳钢和低合金钢来说，其 T_{max} 可达 1300—1350℃），由于温度高，其母材晶粒发生严重长大，导致塑性降低。

学习思路：位置不同，最高温度不同，冷却速度不同，焊接组织不同，性能不同。

T_{max} 的确定方法：根据传热理论，焊件上某点的温度经过 t_m 秒后达到最高温度，此时其温度变化速度应为零，即：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (29)$$

因此，可利用相应的热源传热公式求得值 T_{max} 。

快速移动线热源作用下进行平板对接焊接时，其温度为：

$$T = \frac{q}{2vh(\pi\lambda c\rho t)^{1/2}} \exp\left(-\frac{y_0^2}{4at} + bt\right) \quad (30)$$

当 $\partial T/\partial t = 0$ 时，

$$y_0^2/4at_m = 1/2 + bt_m \quad (31)$$

对于靠近热源移动轴的点，其散热来不及显著降低，即： $bt_m \ll 1/2$ ，如果考虑散热，则

$$T_m(y_0) = \frac{q}{vc\rho h \cdot 2y_0} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi e}} = 0.242 \frac{q}{vc\rho h y_0} \quad (32)$$

$$T_m(y_0) = 0.242 \frac{q}{vc\rho h y_0} \left(1 - \frac{by_0^2}{2a}\right)$$

3) 高温停留时间

高温停留时间指在相变温度 A_{c1} 以上停留的时间，该时间对于金属相的溶解、析出、扩散均质化以及晶粒粗化等影响很大。对于低碳钢和低合金钢，相变温度以上的停留时间是指 1100℃ 以上的停留时间，这时间越长，越有利于奥氏体的均质化和奥氏体晶粒长大。常把高温停留时间分成加热过程的高温停留时间和冷却过程的高温停留时间。

4) 冷却速度 ω_c 和冷却时间 $t_{8/5}$

ω_c 是影响焊接热影响区组织与性能的主要因素。在热循环曲线上，每一温度下的瞬时冷却速度都不相同，各点的冷却速度可用该点切线的斜率表示。但是准确地测量瞬时冷却速度有一定困难，因此目前多采用一定温度范围内的冷却时

间来代替冷却速度,并以此作为研究焊接接头的组织、性能及抗裂性的重要参数。

对于一般碳钢及低合金钢采用固态相变温度范围的800-500℃冷却时间 $t_{8/5}$; 而对于淬硬倾向比较大的钢种有时采用800-300℃冷却时间 $t_{8/5}$ 或由峰值时间冷却至100℃的冷却时间 t_{100} 。

试验证明,焊缝和熔合线附近的冷却速度几乎相同,因为距焊缝的不远的各点,某瞬时温度的冷却速度相差不多,最大约差 5-10%,因此在计算时只需计算焊缝的冷却速度即可。

①移动点热源时 ω_c 的计算。

由传热公式:

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda vt} \exp\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right) \quad (33)$$

取 $r_0=0$ (即在焊缝上), 并对 t 进行微分, 得到下式,

$$\omega_c = \frac{dT}{dt} = -2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{q/v} \quad (34)$$

②移动线热源 (薄板对接) 时 ω_c 的计算

由传热公式:

$$T - T_0 = \frac{q}{vh(4\pi\lambda c\rho t)^{1/2}} \exp\left(-\frac{y_0^2}{4at}\right) \quad (35)$$

令 $y_0=0$, 并对 t 求微分, 得到下式

$$\omega_c = \frac{dT}{dt} = -\frac{2\pi\lambda c\rho(T - T_0)^2}{(q/vh)^2} \quad (36)$$

一般来说, 当板厚大于 25 mm 时, 可将其视为厚板, 板厚小于 8 mm 时, 可视为薄板, 分别套用上述二公式。当板厚介于 8-25 mm 之间时, 可利用原板公式并乘以一个修正系数 K , 即:

$$\omega_c = -K \frac{2\pi\lambda (T - T_0)^2}{q/v} \quad (37)$$

其中修正系数 $K=f(\epsilon)$, $\epsilon = \frac{2q/v}{\pi h^2 c\rho(T - T_0)}$, ϵ 为无量纲系数。先求出 ϵ , 再查得

K , 代入上式, 即可求出中厚板的冷却速度 ω_c 。

ω_c 是影响焊接热影响区组织与性能的主要因素。在热循环曲线上, 每一温度下的瞬时冷却速度都不相同, 各点的冷却速度可用该点切线的斜率表示。试验证明,

焊缝和熔合线附近的冷却速度几乎相同，一般只需计算焊缝在 540℃时的冷却速度即可。

7. 接头性能的影响因素

首先进行试焊，调整焊接参数。焊接参数参考表 6 至 8 所示。

表 6 焊接参数

板厚/mm	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	电源极性	送丝速度 v/cm*min ⁻¹
22	360-380	36-38	直流反接	8.0-8.7

垂直气电焊的焊接电流和电压的范围比较大，要根据实验条件进行进一步的选择，通过进行试焊的方式确定最佳的焊接电压焊接电流的匹配。当我们选择的焊接电流较小的时候，可能会给引弧造成一定的困难，电弧在焊接过程中也不稳定，弧长可能也会发生变化。由于电流较低，热量输入不够，熔池成型不美观甚至会出现未焊透、夹渣和熔合不良等焊接缺陷。当焊接电流过大时，会导致背部焊缝太宽。

若设置的焊接电压过高，会使熔宽增加，也容易产生咬边这种焊接缺陷。电压过小时，会导致焊接过程中飞溅严重。

表 7 焊丝摆幅

板厚/mm	摆动	摆幅/mm	前停/s	后停/s
21-25	必须采用	6-10	0.6-1.0	0.3-0.6

当焊接材料厚度达到一定程度时，焊丝必须要进行前后摆动，在实验中我们采用的是 22mm 厚的 DH36 钢板，如果焊丝在焊接时不摆动，那么正反面的焊缝会有一面成型差甚至两面成型均不好。如果在焊接过程中采用了摆动器，焊接完成后会得到致密均匀的焊缝。焊接电弧在焊接时也不会跳动，十分稳定，飞溅也会减小，热输入稳定，焊缝上的温度均匀，焊缝金属的组织也会得到改善。所以在焊接之前要调整好焊丝的摆幅，包括摆幅、前停和后停，都要根据板厚进行调整。

表 8 焊缝外形尺寸

板厚	正面焊缝宽度	正面焊缝高度	背面焊缝宽度	背面焊缝高度
/mm	/mm	/mm	/mm	/mm
16-26	28-32	2	14-22	2

完成焊前准备工作后，将试板进行固定，要注意固定时要保证牢固。由于正

面焊缝会受到滑块的挤压作用很容易在焊接过程中出现松动的现象。

图 18 为使用 SC-EG2 焊接的金相组织分析

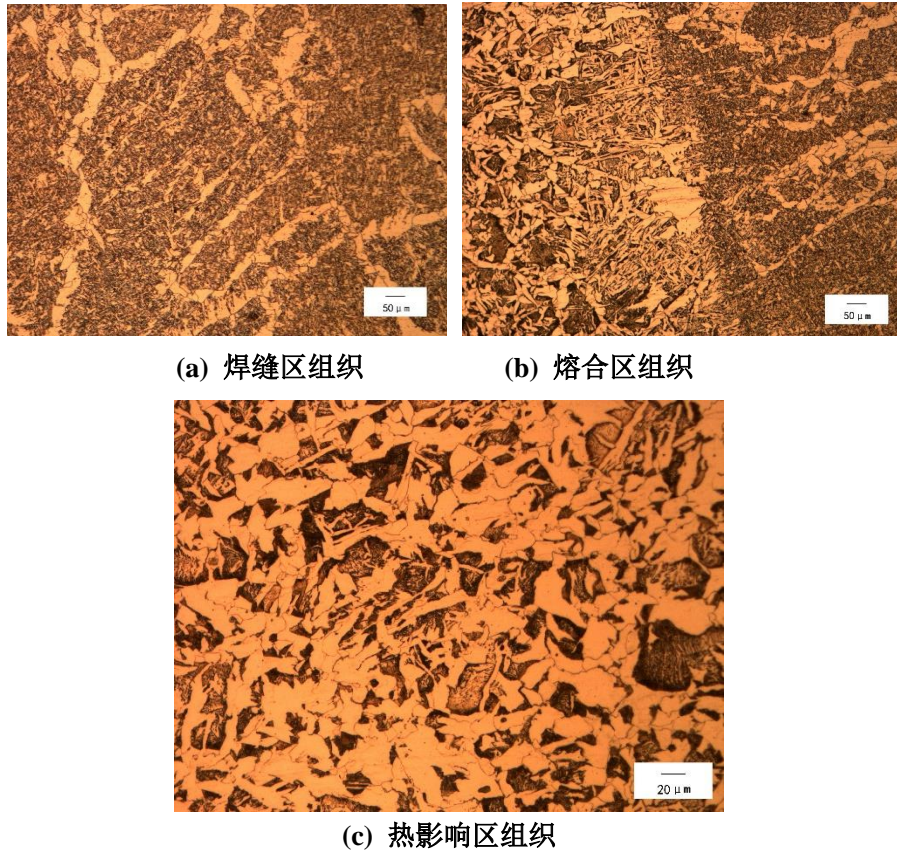


图 18 试样的金相组织

号试样采用 GSC-EG2 型药芯焊丝进行焊接。在金相图中可以看出它的铁素体组织为条状，属于先共析铁素体。先共析铁素体不同于针状铁素体。针状铁素体的力学性能要比条状铁素体的力学性能好一些，尤其是在塑韧性这方面。在焊接时，希望在焊缝中得到针状铁素体。熔合线附近几乎看不到魏氏组织的存在。热影响区的铁素体数目更多。在焊缝区、热影响区和熔合区均表现出低碳钢的组织特征。

8. X 射线探伤技术

如果焊接存在着缺陷，就有可能造成结构断裂、渗漏，甚至引起船舶沉没。因此，在船舶建造中焊接质量是重点验收工作之一，射线探伤能直接判断船体焊缝中存在的缺陷的种类、大小、部位及分布情况，直观可靠，重复性好，容易保存，当前船厂普遍采用X射线探伤来进行船体焊缝的内部质量检查。X射线是一种波长很短的电磁波，波长范围为0.0006—80 nm，具有很强的穿透力，能穿透一般可见光不能穿透的各种不同密度的物质。

X射线检测原理是：当射线透过被检物体时，有缺陷部位与无缺陷部位对射线吸收能力不同，因而可以通过检测透过被检物体后射线强度的差异，来判断被检测材料内部是否存在缺陷。放在适当的位置，使其在透过射线的作用下感光，经过暗室处理后就得到X射线底片。底片上各点的黑色程度取决于射线强度和照射时间的乘积，由于缺陷部位和完好部位的透过射线的强度不同，底片上相应部位就会出现黑度差异。把底片放在观片灯上，借助透过光线观察，可以看到由黑度差异构成的不同形状的影像。评片人员据此判断缺陷情况并做出评价，这样就完成了对被检对象的无损检测。