

高 效 率 焊 接 法

第一机械工业部情报所編

机械工业出版社

本资料收集国内外高效率焊接法共15篇资料，有窄剖口焊接、单面焊双面成型，合金粉末填料焊接等。主要介绍利用现有设备，稍作改进后可提高效率的经验，文章多偏重于生产应用。

本资料可供工矿企业、教学及研究单位的工人和科技人员参阅。

高效率焊接法

第一机械工业部情报所编

(只限国内发行)

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 7 3/4·插页 1·字数 187千字

1973年 8月北京第一版·1973年 8月北京第一次印刷

印数 00,001—45,500·定价 0.87 元

*

统一书号：15033·(内) 560

目 录

1. 厚板窄间隙熔极气体保护焊试验.....	(1)
2. 薄钢板单面焊接双面成型自动焊机.....	(17)
3. 自动焊接不锈钢——单面焊双面成型.....	(18)
4. 不开剖口不加熔剂垫双面自动焊.....	(19)
5. 气电垂直自动焊.....	(20)
6. 滑轨式焊接工艺.....	(30)
7. 日本船厂单面自动焊技术.....	(37)
8. 不用翻转宽厚板的机械化双面焊.....	(54)
9. 采用微粒填充金属的高效率焊接法.....	(59)
10. 在接缝中填充金属粉末的埋弧焊.....	(72)
11. 采用粉状填充金属的埋弧自动焊.....	(78)
12. 将焊条躺置于接缝中的 $\text{CO}_2\text{-O}_2$ 电弧焊.....	(83)
13. 采用分叉焊丝的埋弧单面焊.....	(100)
14. 热丝焊.....	(104)
15. 连续躺弧焊接法.....	(113)

厚板窄间隙熔极气体保护焊试验

焊接研究所
哈尔滨锅炉厂

近十年来, 在我国的锅炉容器制造业中, 厚板的焊接技术获得了很大的发展。其中最主要的成就是具有高生产率的埋弧焊和电渣焊的实际应用。最近, 锅炉和化工容器开始进入高参数的发展阶段, 这必然对厚板的焊接技术提出一些新的要求, 特别是大量采用各种高强度低合金钢以来, 人们普遍发现, 埋弧焊和电渣焊等熔焊工艺已不能适应新的生产形势发展的需要。

例如, 在埋弧自动焊中, 为了便于脱渣和保证获得无缺陷的焊缝, 焊件必须加工成图1a所示的大坡口。并且随着板厚的增大, 坡口的开口必然加大。这不仅导致生产效率的降低和生产成本的提高 (消耗大量优质焊丝), 并且由于焊缝体积的增大, 焊后的残余应力显著提高, 导致焊缝的内在质量、特别是抗脆断性能的降低。在低合金钢厚板的埋弧焊接中, 如焊接工艺的掌握略有疏忽 (预热温度和层间温度控制不当或焊药烘干程度不足等等) 就极易在焊缝金属内形成后果危险的横向冷裂缝。

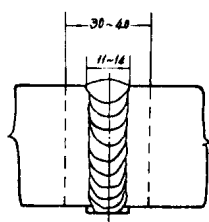


图1a 窄间隙焊缝与电渣焊焊缝之比较

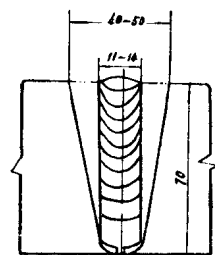


图1b 窄间隙焊缝与埋弧焊焊缝之比较

在电渣焊接法中, 虽然能一次成型焊成任意厚的焊件, 但对要求较高的焊缝必须将整个焊件进行正火处理。因此, 总的生产周期较长。对于某些强度级别较高的低合金钢, 电渣焊缝还必须经过较复杂的调质处理 (水淬+回火) 才能达到所要求的机械性能。因此, 电渣焊接法对于一些重要结构的焊接尤其是低合金钢的焊接, 并不是一种十分适宜的焊接法。

为了克服这二种通用焊接法中不可忽视的缺点, 近年来发展了很多厚板焊接技术, 窄间隙熔极气体保护焊就是其中有较大发展前途和现实意义的新焊接法。

窄间隙熔极气体保护焊是一种以很高的熔焊率在窄小的间隙内完成焊缝的高效率焊接法。它利用了气体保护焊无需清渣的特点。接头的坡口不论钢板厚度多大, 均采用宽10~15毫米的间隙; 并仅以单道多层焊缝将被焊件两侧连接起来。图2示出厚90毫米典型的窄间隙焊缝横截面的宏观照片。该焊缝仅以15道焊波完成。

窄间隙焊接法与埋弧焊或电渣焊相比有下列优点:

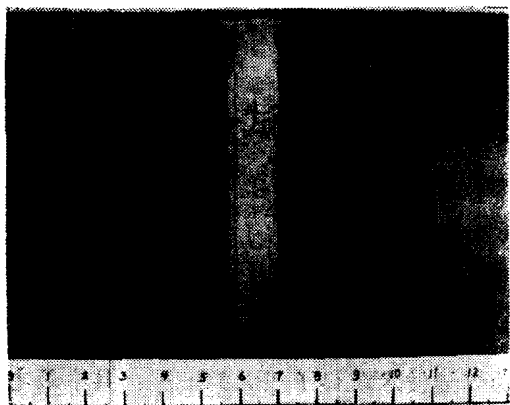


图2 板厚90毫米典型的窄间隙焊缝横截面

金属电弧在窄间隙内形成焊缝的独特性，再加上焊接线能量较低，焊缝热影响区比埋弧焊或电渣焊小得多，有害热影响区仅在0.4毫米的级数，这对焊接热循环敏感的合金钢材具有重要的意义。

第三、减少了焊前准备和焊后的热处理。

窄间隙焊的坡口准备极为简单，甚至可以采用平整的半自动气割面。

低合金钢焊接时，焊前预热工序比埋弧自动焊简单得多（即所要求的预热温度显著降低），在板厚不大或强度级较低的钢种中，甚至可取消焊前的预热。

由于窄间隙焊缝在焊后状态就具有令人满意的机械性能，且焊后残余应力小，因此可以大大地扩大需经焊后热处理的厚度极限，并可避免一些复杂的焊后热处理。

一、窄间隙熔极气体保护焊的工艺流程

窄间隙焊的基本工艺流程如下：将待焊部件装配成I型对接接头。采用直径3毫米的焊丝，在一定的伸出长度下，将焊丝插入到坡口的底部，并对准中心；通过特制的焊枪喷嘴向间隙内送入氩+二氧化碳混合的保护气体，然后引燃电弧，焊丝以比例于给定焊接电流的速度送入焊接熔池，建立一稳定的焊接过程。鉴于在窄缝内运动的气体金属电弧具有与在平板上燃烧的电弧截然不同的特性，故可借助单道焊缝将底面与焊件二侧熔合在一起。完成无缺陷的焊接接头。

图3示出窄间隙熔极气体保护焊的原理图。图4为试验设备的外观照片。

在窄间隙熔极气体保护焊中，坡口间隙值应控制在一定的范围之内。例如，当板厚在50—100毫米时，间隙值最好控制在13毫米左右。为了获得稳定的焊接过程，最好采用直径3毫米的焊丝。在所进行的窄间隙焊接中，由于焊丝是借助伸出长度插入到间隙底部的，导电嘴位于坡口的上面。因此，焊丝伸出长度一般均大于被焊件的板厚。当伸出长度较大时，焊丝将由于原有的弯度，在窄间隙内偏离中心。所以必须采用能够精细校正焊丝的校直机构，以使焊丝在焊接过程中始终保持一定的垂直度。此外，焊丝伸出长度对焊接规范（亦即对焊接过程的稳定性）有很大的影响。在整个焊接过程中，焊丝伸出长度应保持不变。为此，设计了特殊的焊枪。使其导电嘴能随焊道的增高而提高，而保护气体喷嘴应始终保持在靠近坡口表面。

对于窄间隙焊接法，根据被焊材料的不同和质量要求可以采用不同比例的氩+二氧化碳

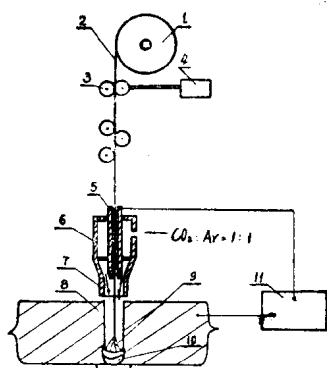


图3 窄间隙熔极气体保护焊原理图

1—焊丝盘；2—焊丝；3—给送轮；4—给送马达；5—移动式导电嘴；6—焊枪喷嘴；7—可换喷嘴；8—焊件；9—焊接电源；10—已熔敷之焊缝；11—硅整流焊接装置。

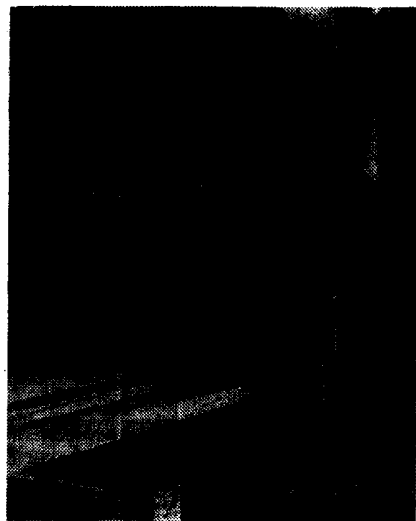


图4 试验设备外观

混合气体。本试验采用50%氩和50%二氧化碳混合气体，能够获得成型美观无缺陷的焊缝及实现稳定无飞溅的焊接过程。

二、窄间隙熔极气体保护焊过程的特点

窄间隙熔极气体保护焊具有一般气体保护焊所共有的特性，但正因为金属电弧在窄缝内燃烧，故它亦具有一些独特之处。其中，主要的特点之一在于：无论是正极性电弧，还是反极性电弧，它们在窄间隙内的燃烧总是比在平板上的电弧来得稳定，且飞溅少。就熔化金属的过渡形式来说，在窄间隙熔极气体保护焊时依所选定的焊接电流和电弧电压，可以获得熔滴状、喷射状或两者的混合过渡形式。不过，出现喷射状熔滴过渡的临界电流值比常用气体保护焊来得低。例如，在直流反极性电弧中，采用3毫米的焊丝，一般的气体保护焊需在650安培以上出现喷射状过渡，而在窄间隙内只要500安培即可。当出现喷射状过渡时，熔滴尺寸极小，过渡速度极快，在电弧中间形成一条液线，电弧压力增大，能将金属熔池吹出凹坑。焊丝端部呈锥形，如图5所示。

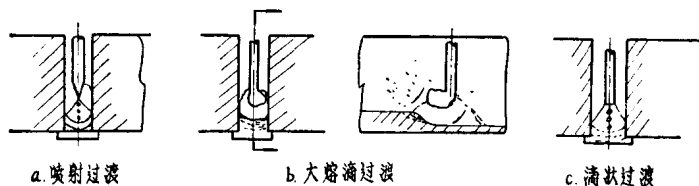


图5 窄间隙熔极电弧焊的金属过渡形式

当出现滴状过渡时，熔滴的尺寸、外形、过渡频率和过渡速度与极性、电流、电压、焊接速度、焊丝伸出长度等成较复杂的关系。在直流反极性条件下，熔滴尺寸一般不会超过焊丝直径或与焊丝直径相当。熔滴过渡频率较高，按焊接电流的大小，每秒钟过渡的熔滴数量约为10~20个左右。而在正极性电弧的条件下，就可能在一定的焊接电流下形成比焊丝直径大得多的熔滴，最大者可达7~8毫米(图5b)。熔滴的过渡频率可在每秒3~5个。即使是

大熔滴过渡，但过渡周期却很有规律、合节拍，且无飞溅。这在一般的气体保护焊中是无法实现的。仔细观察熔滴的过渡可以发现，这种大熔滴受到一种向金属熔池的作用力，当熔滴长成一定尺寸时，熔滴就以较快的速度向熔池过渡，因此飞溅极少，而在平板上焊接时熔滴缓慢下降，以致形成短路，建立过渡金属桥。当金属桥爆炸时，则形成粗大的飞溅。在窄间隙焊中只有当焊丝偏离中心太多，与侧壁打弧时则正常的熔滴过渡被破坏，随之产生大滴的飞溅。

窄间隙熔极气体保护焊时，这种特殊的金属过渡形式有待专门的研究以获得清楚的解释。

图6示出，不同规范下，电弧在窄间隙内燃烧时，电流电压波形图。这些波形图清楚表明，在所选定的焊接电流和电弧电压下，焊接过程是极其稳定的。

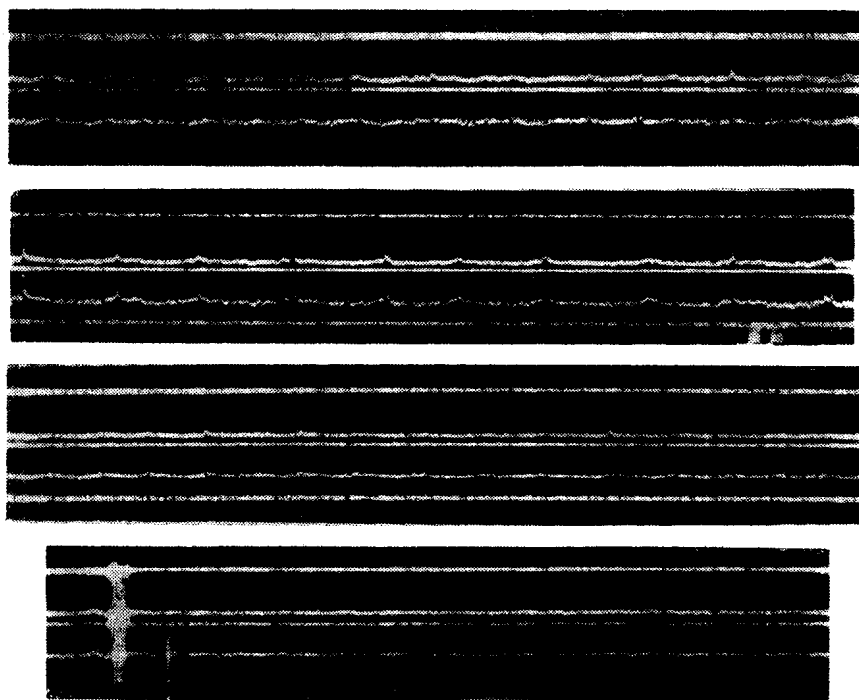


图6 窄间隙熔极气体保护时，不同规范下的电流电压波形图。

窄间隙熔极气体保护焊的另一个主要特点是：焊缝的成形机理与普通焊接法不同。在窄间隙焊接时，焊接电弧的一次行程就能保证焊件的底部和二侧壁同时熔合，形成无缺陷的焊道。

这是因为金属电弧在窄间隙内受到了一定的机械压缩，加上保护气流冲刷，电弧区的电离气体增加，整个等离子区扩大。因此，焊接电弧区的温度得到很大的提高，以致焊件两侧能够获得充分的加热。另一方面，由于电弧热量在窄间隙内从三个方向传导，电弧的热作用主要集中于垂直方向，故侧壁的熔深不会很大，一般约在1毫米左右。而垂直方向的熔深却可不受限制的增加。当焊接电流在500安培时，每道焊缝的熔深可达10毫米左右。每层焊道的堆积高度可达6~8毫米。因此，在窄间隙焊接时，焊缝的成型系数总是比较小，平均在1.4左右。为了使这种深而窄的焊缝不致产生裂缝，就必须严格控制焊丝成分及焊接规范。其次，为了获得无边缘缺陷的焊缝，所选定的规范参数应使焊缝表面由于液态金属的表面张力

而呈凹月形。在这种情况下，焊接区的各部分均能获得良好的熔合。

三、窄间隙熔极气体保护焊设备

1. 送丝机构的改进

本实验采用上海电焊机厂出产的 AK-1000-2 型自动焊机。这种焊机适用于粗丝埋弧焊 ($\phi 4 \sim 5$ 毫米)，焊丝的给送速度较低。因此当用作熔极气体保护焊机时，由于采用 $\phi 3$ 毫米的焊丝，特别是在正极性电弧中，熔化速度很高，故焊机原有的给送速度满足不了需要。为了提高焊丝给送速度，我们对焊机的电气线路作了二处修改。一处是将发电机的激磁绕组与焊接电源断开，在激磁绕组整流器的交流侧附加自耦变压器，使该激磁绕组的电压比原来的高。这样提高了发电机的输出电压，亦即提高了送丝电动机电枢电压，电动机转速加快。第二处是将送丝电动机的激磁绕组回路内串接一变阻器，限制电动机激磁电流，使电动机转速进一步提高。经上述改装后，送丝速度基本满足窄间隙熔极气体保护焊的需要。

2. 焊枪结构

本试验采用图 7 所示的气体保护焊焊枪。其结构形状与普通的气体保护自动焊焊枪大致相同。主要差别在于导丝管连同导电嘴与保护气体喷嘴可相对移动，保证焊丝伸出长度不变。本试验所用的焊枪相对移动距离为 100 毫米。为保证焊接区保护良好，在焊枪的气室部分设计有压缩段，使保护气体从直径较小的喷嘴喷出时具有一定的流速。考虑到窄间隙焊接的特点，曾采用过椭圆形的喷嘴，以改善焊接熔池的保护。但试验表明，圆柱形喷嘴在焊接 90 毫米以内的厚板时，可以满足要求，而椭圆形喷嘴的加工比较复杂。

3. 焊接电源

在熔极气体保护焊过程中，规范参数的控制要比普通埋弧自动焊严格得多。因为焊接电流与焊接电压之间有一个严格的匹配关系。如果焊接电流与电压选配不当，焊接过程就不易稳定，甚至被破坏。尤其在窄间隙熔极气体保护焊中，必须严格控制焊接电弧电压。我们在试验中发现，电弧电压 2 ~ 3 伏之差，即能破坏焊接过程顺利进行。因此，对焊接电源不但要求调压方便、精确、无级，而且还要求输出电压不受调级电压波动的影响，保持恒定的给定电压。

对焊接电源的外特性没有严格的要求。如果焊丝的给送系统与焊接电压有较灵敏的反馈联系，则可采用陡降特性的电源。如焊丝给送为独立的系统，与焊接电压无任何电气联系，则应采用平特性电源。本试验装置为独立给送系统，故必须采用平特性的焊接电源。

为此，我们设计试制了 I-1500 型硅整流焊接装置。该整流装置由三相降压变压器、三相磁放大器、硅整流器组自动稳压器、控制电路及保护系统等组成。详见图 8 电气线路图。

本装置的主要特点在于变压器二次输出电压由三相内反馈磁放大器控制，从而实现了焊

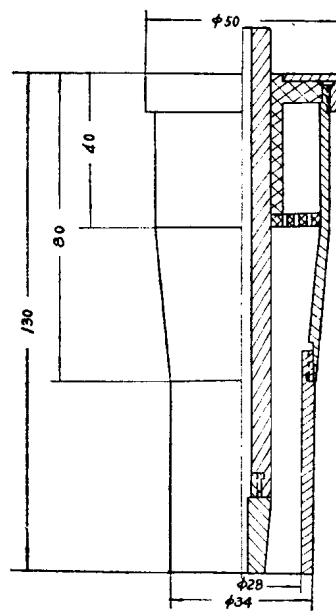


图 7 $\phi 34$ 焊枪结构图

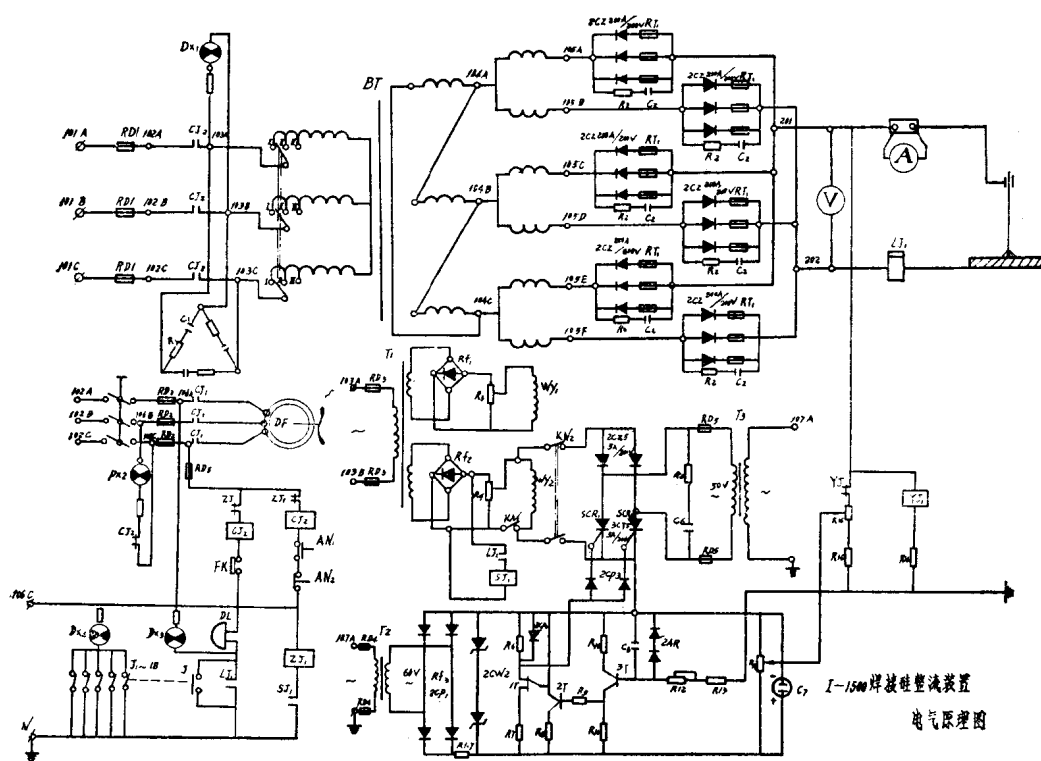


图 8 I-1500型硅整流焊接装置电气线路图。

接电压的无级调节。磁放大器直流绕组由与焊接电压成反馈联系的可控硅整流电路供电，故可使焊接电压稳定在某一给定值。此外，焊接电流经过磁放大器的工作绕组改善了电源的动特性，使焊接过程比较稳定。

试验表明，改变磁放大器直流绕组和偏移绕组的激磁电流，可使焊接电压在20~55伏范围内实现无级调压。满足了窄间隙气体保护焊的要求。

本试验的大部分工作是采用I-1500型硅整流焊接装置完成的。在试验工作的初期，曾使用过普通的刚特性硅整流装置。这种硅整流装置的变压器二次线圈直接连硅整流器建立直流输出。焊接电压的调节借改变变压器的一次线圈匝数进行分级调压。因此，焊接电压不能任意调整。甚至不能获得所需的焊接电压值。从而不能实现稳定的焊接过程。

从焊接过程的稳定性和焊缝外貌来看，I-1500型硅整流焊接装置亦较普通硅整流装置优越得多。使用前者焊接时焊接过程相当稳定，焊缝成型美观、波纹很细、飞溅极少。因此它特别适用于厚板窄间隙熔极气体保护焊。

四、窄间隙熔极气体保护焊的规范参数

如前所述，为了获得无缺陷成型良好的窄间隙焊缝，必须严格地控制焊接规范参数。

窄间隙熔极气体保护的主要规范参数包括：1.焊接电压、2.焊接电流(焊丝给送速度)、3.焊接速度、4.电弧的极性、5.焊丝伸出长度、6.焊缝间隙、7.保护气体流量及其混合比。这些规范参数都直接影响到焊接过程的稳定性及焊接的成型。

采用不同的焊接规范，在窄间隙内的焊道外形可出现两种不同形式。一种焊道表面呈凸

月形，另一种呈凹月形。前一种形式的焊道对焊接质量很不利，因为在这种焊道的两侧存在深的凹槽，容易在这里造成焊道层间的未熔合和夹渣。而凹月形的焊道却有利于消除这种边缘的未熔合及夹渣等缺陷。当然，凹月形焊道的受力条件较恶劣，当熔深过大时，容易在焊道的中心线产生结晶裂缝（见图9）。但只要正确地选择焊接规范，将焊缝的成形系数提高到1.3以上，裂缝即行消除。

1. 焊接电压、电流和焊接速度

焊接电压、电流和焊接速度是确保焊缝成形良好的最主要的三个规范参数。必须强调指出，在窄间隙熔极气体保护焊中，这三个规范参数之间存在着比较严格的匹配关系。当提高（或降低）某一参数时，其他二个参数亦必须相应的提高（或减少）。只有这样，才能获得成形良好的无缺陷的焊缝。例如，当焊接电流提高时，电弧电压必须相应地提高，焊接速度亦应加快。如果当焊接电流增大时，其他参数不作相应的调整，

就会形成成形系数小、表面凸起的焊道，从而使焊道边缘熔合不良，甚至还会产生裂缝。相反，若增高焊接电压，焊接电流未相应跟上去，就会出现电弧不稳、飞溅剧增、焊道严重咬边等现象。多次反复试验表明，当焊接电流在380~550安培时，相应的匹配电压为33~36伏。焊接速度视间隙的宽度相应应在18~25米/小时的范围内变动。

焊接电流和焊接电压也是影响熔滴过渡的主要因素。随着电流的增加，熔滴颗粒由大变小，过渡频率由低变高。当焊接电流增至一定值后，就会出现喷射状的熔滴过渡。提高焊接电压可使出现喷射状过渡的临界电流值增加，即有推迟喷射过渡的作用。当出现喷射状熔滴过渡时，焊接电弧燃烧比较稳定，飞溅减少；但焊缝成形变坏，成形系数减小，并容易产生结晶裂缝。当焊接电流降至某一数值时，就会出现有规律的大熔滴过渡。这种大熔滴过渡由于熔滴过渡速度很慢，使电弧对焊件侧壁的加热更加充分，而且还显著地减弱了对熔池的穿透作用。这对于改善焊缝边缘的熔合、提高焊道的成形系数及防止裂缝等都十分有利。试验表明，在窄间隙熔极气体保护焊中，采用这种大熔滴过渡的低规范，更容易获得成形良好无缺陷的优质焊缝。产生大熔滴过渡的典型焊接规范是：焊接电流420~450安培，焊接电压34~35伏，焊接速度20~22米/小时。图10所示照片即为低规范焊成的焊缝横截面。由照片可见焊道均整，无任何边缘和层间缺陷。



图10 低规范焊接焊缝横截面外观

2. 焊丝伸出长度

在窄间隙熔极气体保护焊中，焊丝伸出长度是一个很重要的规范参数。如上所述，窄间隙焊的特点决定了焊丝伸出长度总是大于被焊件的厚度。因此，当焊丝的伸出长度很大时，就不能忽视伸出部分焊丝的电阻热对焊丝熔化速度的影响。同时，我们还发现，这种电阻热的作用还影响到熔滴的过渡形式及一些规范的电参数（如：电流、电压等）。测量表明，伸



图9 焊道中心的结晶裂缝

出长度改变10毫米,就会引起焊接电流变化数十安培。因此,为使整个焊接过程稳定,应将焊丝伸出长度在焊接过程中基本保持不变。

在试验中我们发现,焊丝伸出长度根据其对熔滴过渡形式的影响存在一个最佳值。在这种焊丝伸出长度下,当电流选配合适,就能建立十分稳定的规律的大熔滴过渡。本试验确定的焊丝伸出长度最佳值为60~70毫米。在焊接厚度超过70毫米的接头时,焊丝伸出长度势必大于推荐的最佳值。此时,应适当地降低焊接电流。当随着焊道的增高,焊丝伸出长度缩短到最佳值时,保持标准的焊接规范。

3. 电弧的极性

在窄间隙熔极气体保护焊中,其中一个主要特点是可以采用直流正极性电弧进行焊接。正极电弧在窄间隙内运动时,燃烧极其稳定,这点已由图6的波形图所证实。而在平板上燃烧的气体金属电弧总是反极性比正极性来得稳定。我们的试验证明,只要规范参数选配得合适,无论采用正极性电弧,还是反极性电弧,在窄间隙内均能稳定地燃烧,并都能获得成形良好的焊缝。采用正极性电弧和反极性电弧焊接各有利弊,但总的来说,采用正极性电弧比反极性电弧有利。因为反极性电弧的熔深比较大,焊缝成形系数小,结晶裂缝的倾向性就比较高。例如,当采用焊接电压35伏、焊接电流550安培、焊接速度25.2米/小时的相同规范进行焊接时,反极性焊道的成形系数为1.06,正极性焊道的成形系数为1.30,前者焊道中心产生2~4毫米深的结晶裂缝,而后者却全无裂缝。此外,在焊接效率方面,反极性电弧也不如正极性电弧高,因为在正极性电弧中,阴极辉点在焊丝上,焊丝熔化速度提高,一般比反极性电弧高50%左右。可见,正极性电弧的熔敷率比反极性电弧高一倍。例如,我们在焊接66毫米厚钢板时,反极性焊时,需12道焊缝填满接头间隙,而在正极性焊接时,只需9道即可。因此,从抗裂性和焊接效率出发,采用正极性电弧焊接比较合适。

4. 接头间隙

焊件接头的装配间隙是窄间隙熔极气体保护焊的主要规范参数之一。因为它直接影响焊道成形、焊缝的质量及焊接过程的稳定性。在焊丝直径给定的情况下,间隙宽度应保持在一定的范围内。间隙太小,一方面容易使焊丝与工件侧壁打弧,另一方面,焊道熔宽受到限制,成形系数过小,容易产生结晶裂缝。如间隙过大,则会造成焊道两边未熔合,也丧失了窄间隙效应。试验表明,对于直径3毫米的焊丝,板厚30~100毫米的情况下,最佳的间隙值为 13 ± 1 毫米。接头间隙超过15毫米时,焊缝质量就不易保证。在平板纵缝对接焊时,考虑到焊缝的横向收缩,坡口的顶部间隙宽度应大于底部的间隙宽度。例如,在装配厚65毫米平板工件时,底部间隙13毫米,顶部间隙可在15~16毫米。

5. 保护气体的流量及其混合比

在气体保护焊中,保护气体的种类及其各种混合物对电弧特性、熔滴过渡形式、焊缝成形乃至焊缝金属的性能都有很大的影响。本试验根据客观条件的许可,主要采用氩和二氧化碳混合气体,因为在纯二氧化碳的保护气氛内,用粗焊丝在窄间隙内焊接时,焊接过程不易稳定,飞溅较大,焊道的成形也较差,很难保证接头的质量。在二氧化碳保护气体中加入氩气,可以使焊接过程趋于稳定,飞溅减少,焊缝成形改善,焊缝质量容易得到保证。当二氧化碳与氩的混合比为1:1时,即能获得所要求的保护气氛的特性。在碳钢和低合金钢的窄间隙焊时,对这两种气体的纯度无特殊要求,即二氧化碳纯度大于97%,氩的纯度大于99%。

窄间隙焊的特点是坡口窄而深,故为了焊接区的可靠保护,所需的气体流量总是比一般

的气体保护焊来得大。试验证明,当气体流量达40升/分以上时,对于厚度90毫米以下的钢板,已能达到足够的保护。二氧化碳和氩的混合是从各自的流量计出来后,经过三叉管进行。应注意的是,这二种气体在管内的压力应基本保持相同。本试验低压管路压力为2.5公斤/厘米²。

综上所述,窄间隙熔极气体保护焊时规范参数的选择有其独特的规律性。表1得出可实现稳定焊接过程的规范参数的范围。

表1

焊丝直径:	3毫米	混合气体:	氩+二氧化碳
间隙:	13±1毫米	混合比:	1:1
空载电压:	65~75伏	气体流量:	(20~30)×2升/分
焊接电压:	33~36伏	焊丝伸出长度:	30~100毫米
焊接电流:	380~550安	电源极性:	直流正极性
焊接速度:	18~30米/小时		

五、窄间隙熔极气体保护焊的焊缝缺陷

在窄间隙熔极气体保护焊时,可能产生的焊缝缺陷有:裂缝、气孔、未熔合和夹渣等等。

在窄间隙焊缝中,产生的裂缝主要是结晶裂缝。结晶裂缝的形成主要有二方面的原因,如前所述,一是焊接规范参数的影响,即由于焊接电流过大,焊缝成形系数太小以致焊缝中形成明显的对生结晶组织,裂缝就从集聚低熔点共晶物的中心面产生。其二是焊丝化学成分的影响。降低焊丝中的碳、硫、磷含量,或是提高锰含量都能增强焊缝抗结晶裂缝的能力。如本试验所用的6#焊丝,含锰量达2.03%,其抗裂性就明显地高于含锰量1.44%的7#焊丝。因此,为了防止窄间隙焊缝内的裂缝,一方面从焊接规范的调整上着手,另一方面应选用低碳(碳含量应为0.06~0.04%)和高锰(1.6~2.0%)的焊丝。

在窄间隙气体保护焊中,气孔的形成亦有二方面的原因,其一是工艺方面的原因,诸如焊接电压过高、焊速太快、工件温度过高、气路堵塞或泄漏等。其二是冶金方面的原因,如气体流量不足、二氧化碳气体含水量超过允许值以及焊丝内Si、Mn等脱氧元素不足等。例如,我们在试验中曾采用过二批08Mn2Mo焊丝,第一批08Mn2Mo焊丝, Si含量达0.32%,施焊时未发现气孔,而第二批08Mn2Mo焊丝, Si含量为0.22%,在这种Si含量下,脱氧能力显得不足,多层焊时就很难避免气孔。图11照片示出采用这种08Mn2Mo焊丝焊接时,在焊到第六层至第七层,就产生密集气孔。为防止焊缝内气孔的形成,焊丝内的Si含量应控制在0.4%以上。

焊缝中的夹渣和未熔合与前二种缺陷相比是窄间隙焊接较容易产生的缺陷。这些缺陷主要由于焊接规范选配不当,或者焊接过程中规范突然波动,或者是机械故障焊丝偏离中心等。图12示出窄间隙焊缝典型的夹渣缺陷。

为了消除这些缺陷,应使焊接规范在整个焊接过程中保持恒定。这就需要良好的焊接设备给予保证。例如采用稳压电源或带反馈系统的焊丝给送机构。其次,应当利用专用的机构使焊丝始终对准焊缝中心,不致偏离中心太多。

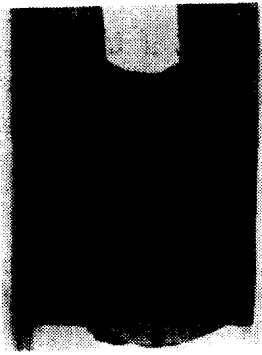


图11 窄间隙焊缝中典型的密集气孔



图12 窄间隙焊缝中典型的夹渣

六、焊接接头的机械性能和显微组织

在本试验中，结合锅炉、容器制造业的需要，有针对性地选择了二种不同类型的钢材。一种是厚度50毫米20g锅炉钢板。20g钢板是锅炉制造厂制造锅炉汽包、联箱等最常用的钢材。另一种是厚为66毫米的15MnMoVN 高强度低合金钢。这种钢是强度级别 $\sigma_s = 50$ 公斤/毫米² 的调质钢，它既有较高的强度，又有较好的韧性（-20℃却贝冲击值在3.5公斤·米/厘米² 以上），是一种对制造高压容器有较大发展前途的低合金钢材。对于在锅炉、容器制造中也较常用的14MnMoV、18MnMoNb 等正火低合金钢我们没有进行重点试验。因为，这些钢的强度级别与调质钢相同，而韧性要求却低得多（+20℃梅氏冲击值 8 公斤·米/厘米² 即可）。所以，如果15MnMoVN钢焊接接头的各项机械性能均能达到所规定的指标，则 14MnMoV、18MnMoNb 等钢的焊接亦就不成问题。

20g锅炉钢板焊接接头的机械性能

焊接20g锅炉钢板时，我们采用了直径3毫米的 08Mn2Si 标准焊丝，焊丝成分见表2。试验表明，这种焊丝应用于窄间隙熔极气体保护焊具有较高的抗气孔性和抗裂性。焊接接头和焊缝金属的各项机械性能均大大超过 20g 锅炉钢板的规定指标（详见表3数据）。值得指出，20g锅炉钢板窄间隙焊接接头，无论在焊后状态，还是在650℃消除应力状态，其强度、塑性和韧性各种指标试验值均十分稳定，并大大高于规定的标准。图13示出各种状态下20g钢焊接接头弯曲试样外观，鉴于窄间隙焊焊后的残余应力较低，因为完全有可能取消厚度50毫米以下的简单容器的焊后消除应力处理工序。当然，这有待于进一步的试验加以证实。

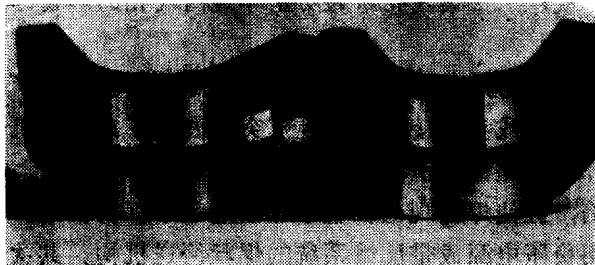


图13 焊接接头冷弯试样外观

表 2

材 料	牌 号	化 学 成 分 %								
		C	Si	Mn	Mo	V	N	Ni	S	P
母 材	15MnMoVN	0.16	0.43	1.66	0.20	0.07	0.13	—	0.018	0.014
	20g									
焊 丝	1*08Mn2Mo	0.07	0.32	1.51	0.46					
	2*08Mn2Mo	0.08	0.22	1.94	0.49					
	3*08Mn2NiMo	0.10	0.38	1.70	0.56			1.3		
	6*08Mn2MoSi	0.095	0.98	2.03	0.39					
	7*08Mn2MoSi	0.094	0.55	1.44	0.40					
	08Mn2MoSi	0.056	0.71	1.80						
焊 缝 金 属	15MnMoVN + 08Mn2NiMo	0.09	0.28	1.55	0.51	0.01		1.09	0.006	0.015
	15MnMoVN + 6*08Mn2MoSi	0.086	0.77	1.74	0.40	0.015		—	0.010	0.023
	15MnMoVN + 7*08Mn2MoSi	0.054	0.42	1.18	0.37	0.03		0.008	0.008	0.013
	20g + 08Mn2Si	0.14	0.21	1.24					0.011	0.016

从表 3 数据可见, 用 08Mn2Si 焊丝完成的窄间隙焊缝金属的屈服极限达 45 公斤/毫米²。因此, 这种焊丝完全可推广应用于 16Mn、15MnV、15MnVN 等普通低合金钢的窄间隙熔极气体保护焊。

15MnMoVN 钢焊接接头的机械性能

对于 15MnMoVN 钢我们曾先后选用并试制了 Mn-Mo 系低合金钢焊丝进行工艺和接头性能试验。这些焊丝的化学成分列于表 2。表列的前三种焊丝均系高强度钢埋弧焊用焊丝, 其中 Si 含量普遍较低。正如前所述, 其中 2*08Mn2Mo 焊丝的 Si 含量对于气体保护焊来说显得过低。试验亦证明, 采用这种焊丝焊接, 很难在多层焊缝中避免气孔的产生。而 1*08Mn2Mo 和 3*08Mn2NiMo 焊丝, 虽然其 Si 含量亦不太高, 但由于其他合金元素的含量很高, 故它们具有一定的抗气孔的能力并能获得无气孔的多层窄间隙焊缝, 但是在高规范的情况下使用这种焊丝在焊缝金属内偶尔会出现气孔, 这说明这些焊丝的 Si 含量正处于所要求的下限值。

根据前三种焊丝的试验结果, 特试制了 Si、Mn 含量较高的 6*和 7*焊丝。试验表明, 在新焊丝内, 由于 Si、Mn 含量的提高, 各方面的性能均基本满足窄间隙熔极气体保护焊的要求, 获得致密而无气孔的窄间隙焊缝。

用这些焊丝焊接接头的机械性能试验结果列于表 3。由表载数据可见, 采用 1*08Mn2Mo、3*08Mn2NiMo 焊丝和 6*、7*08Mn2MoSi 新焊丝, 焊接接头和焊缝金属的各项指标均能满足对 15MnMoVN 调质钢的要求。特别是 -20℃ 时的低温冲击值大多超过标准值。因此, 这四种焊丝成分均能适用于 50 公斤/毫米²级低合金高强度钢窄间隙熔极气体保护焊。

从比较这几种焊接接头的机械性能数据可以看出, 用 7*08Mn2MoSi 焊丝焊接的接头具有良好的综合机械性能。而 6*08Mn2MoSi 焊丝的焊缝强度偏高, 韧性偏低。为了获得更良好的接头性能, 特别是从保证强度的前提下提高冲击韧性出发, 我们认为可将焊丝的成分作进

表 3

试 件 编 号	材 料 与 焊 接 规 范	热处理 状 态	拉 伸 性 能				卸 贝 V 缺 口 冲 击				弯 曲 α°	备 注	
			σ		$\delta\%$	$\psi\%$	焊 缝 -20℃	熔 合 线 +20℃	热 影 响 区 +20℃	-20℃			
			σ_b 公斤/ 毫米 ²	σ_s 公斤/ 毫米 ²									
36*	20g + 08Mn2Si I = 500~520 U = 35~36 V = 25米/小时 正极性	650℃ 3小时	59.0	47.7	24.0	65.4	16.5	15.0	8.6	5.1	9.0	6.4	冲击试样开梅 氏缺口
			56.9	45.6	20.7	64.0	17.8	13.9	9.5	6.4	9.8	4.7	
			58.2	46.5	26.2	67.0	17.3	13.6	10.1	5.4	10.4	4.7	
12*	15MnMoVN + 1*08Mn2Mo I = 500~450 U = 34.5 V = 3.5米/小时 反极性	焊 后 状 态					15.1	14.6	9.4	5.3	8.0	6.0	厚10毫米 小弯曲试样
						15.4	11.0	9.0	5.5	9.0	5.3		
						15.6	10.5	—	3.3	7.8	5.3		
25*	15MnMoVN + 08Mn2NiMo I = 500~525 U = 33 - 43 V = 26米/小时 反极性	640℃ 3小时	67.7	61.6	20.0	63.4	11.8	8.2	11.3	3.4		180°	接头拉伸、 接头弯曲试 样厚为 10 毫米
			68.1	57.0		68.0	10.4	9.1	9.5	4.4	9.3	5.9	
			69.2	58.7	16.7		12.6	5.9	10.7	—	7.5	4.6	
35*	15MnMoVN + 6*08Mn2MoSi I = 500 U = 35 V = 25 米/小时 正极性	640℃ 3小时	65.5	60.0		66.3	11.9	4.2	6.8	—	11.5	8.2	焊缝拉伸取 自上层
			73.8	64.7	17.5	63.3	7.5	3.1	10.7	5.0	11.0	7.5	
			75.4	66.1	18.0	63.2	4.0	5.4	7.0	9.8	7.0	2.5	
44*	15MnMoVN + 7*08Mn2MoSi I = 435~450 U = 34 V = 22米/小时 正极性		75.3	67.1	16.0	50.6						180°	焊缝拉伸取 自下层
			77.7	70.1	18.8	61.7							
		640℃ 3小时	66.2	59.2	21.7	65.4	11.2	4.5	8.1	4.1	15.1	5.6	
			68.0	61.2	23.3	64.2	11.5	3.8	10.1	5.4	14.0	10.3	180°
						11.3	3.1	12.5	4.3	8.1	6.4		

推荐的50公斤/毫米²级气体保护焊焊丝成分%

表 4

C	Si	Mn	Mo	S	P
0.06~0.04	0.5~0.8	1.7~2.0	0.2~0.4	≤0.025	≤0.025

一步的调整。例如将7#号焊丝的C、Mo含量适当降低，Si、Mn含量适当提高，或者是将6#焊丝中C、Si含量适当降低均能使接头性能进一步改善。表4列出我们根据上述试验结果推荐的50公斤/毫米²级气体保护焊焊丝成分。

从焊接规范和机械性能的对比我们可以发现，电弧的极性对焊缝金属的冲击值有一定的影响，采用直流反极性电弧焊接时，焊缝金属的冲击值一般均高于正极性电弧。这是因为反极电弧焊接时，熔深较大，对前道焊缝的热作用（即热处理区域）较大，其每层焊道在相同的规范下也较薄，致使在整个焊缝截面上的层间正火区比例增大，结果使冲击韧性值提高。因此，在焊接一些对冲击韧性有特殊要求的钢材时，可以采用直流反极性电弧。

窄间隙焊接接头的硬度分布

为了查明窄间隙熔极气体保护焊时焊接热对母材的影响，测定了20g钢与15MnMoVN调质钢焊接接头各区的硬度值HRB。图14a为20g钢窄间隙焊接接头在焊后状态与消除应力状态下的硬度曲线。图14b、c示出15MnMoVN钢接头横截面在两种不同极性下的硬度曲线。

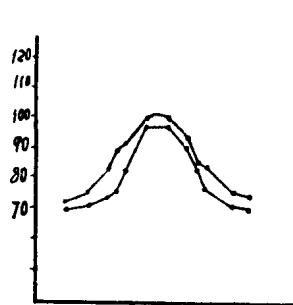


图14a 20g钢窄间隙焊接接头的硬度曲线。

上·焊后状态；下·650°C
消除应力状态。

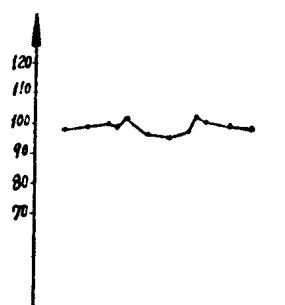


图14b 15MnMoVN 钢窄间隙接头的硬度曲线直流正极性

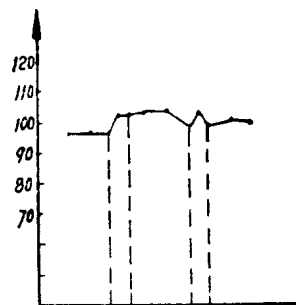


图14c 15MnMoVN 钢窄间隙焊接接头硬度线。
直流反极性

试验结果表明：窄间隙焊接接头各区的硬度值，不论是碳钢，还是低合金调质钢，都是相当均匀的。尽管所测定的硬度是HRB与宏观硬度，但也足以说明窄间隙熔极气体保护焊的热循环对母材未产生有害的影响。特别值得指出，调质钢热影响区的硬度既不降低，也不

提高，处于母材与焊缝相同的水平。这在一般的熔焊法中是很难达到的。

窄间隙焊接接头的宏观与微观组织

图15照片示出二种不同厚度的窄间隙熔极气体保护焊焊接接头的典型宏观组织。由图可见，各道焊缝与母材的熔合是良好的，无任何缺陷。焊缝的初次结晶也比埋弧焊缝细得多，这已由焊缝焊后状态高的冲击值所证实。

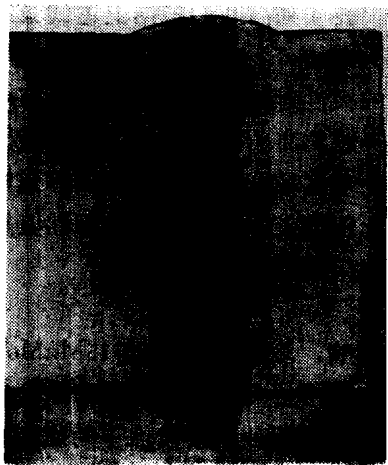


图15a 厚50毫米20g钢板窄间隙焊接接头的宏观照片

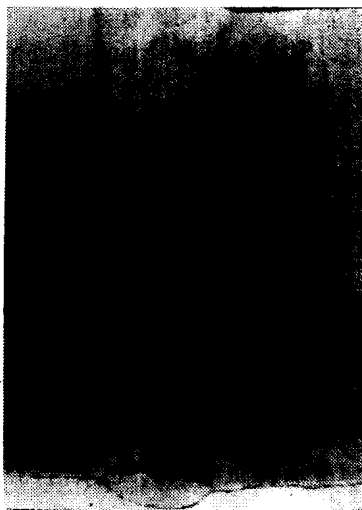


图15b 厚66毫米15MnMoVN 钢板窄间隙焊接接头的宏观照片

20g钢和15MnMoVN钢接头各区的显微组织分别列于图16、17照片。由这些照片可见，无论是碳钢焊缝还是合金钢焊缝，其显微组织均为细晶粒的铁素体+珠光体，未出现任何淬硬组织。在20g钢接头的热影响区的过热段有魏氏组织，但其宽度甚小，仅0.10毫米左右，且硬度Hv亦很低，只有244公斤/毫米²。在15MnMoVN调质钢接头的热影响区，除了铁素体和珠光体外，还出现部分贝氏体。热影响区（过热区正火区）的宽度为0.2毫米，最高硬度值Hv310公斤/毫米²。远远低于可能出现裂缝危险的Hv=400公斤/毫米²临界值。