

# 机械工人学习材料

JIXIE GONGREN XUEXI CAILIAO

## 异种金属的焊接

堵耀庭 张其枢 编著



机械工业出版社

**内容提要** 本书从异种金属材料焊接结构的应用范围和焊接的特点谈起，着重介绍常用的不同等级强度的普通低合金钢与碳钢、耐热钢的焊接，奥氏体不锈钢与其它黑色金属的焊接，不锈复合钢板的焊接。同时还介绍了在黑色金属上堆焊其它金属以及异种有色金属的焊接方法、焊接工艺及焊接缺陷产生的原因和防止措施等。

本书可供三级以上焊工与技术人员阅读。

## 异种金属的焊接

堵耀庭 张其枢 编著

责任编辑 俞逢英

\*

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登记证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张 3<sup>1</sup>/<sub>8</sub>·字数 67 千字

1986年5月北京第一版·1986年5月北京第一次印刷

印数 0,001—7,800·定价 0.66 元

\*

科技新书目： 117-89

统一书号：15033·6194

# 目 次

一	异种金属焊接结构的应用及其焊接特点.....	1
	1. 异种金属焊接结构的应用(1)——2. 异种金属焊接接头的一些特点(2)	
二	三种异种钢的焊接.....	6
	1. 普通低合金钢的焊接性(6)——2. 焊接工艺的拟定(8)——3. 举例(13)	
三	耐热钢与其它黑色金属的焊接.....	15
	1. 珠光体耐热钢与低碳钢的焊接(16)——2. 珠光体耐热钢与普通低合金钢的焊接(17)——3. 珠光体耐热钢的焊接(26)——4. 珠光体耐热钢与马氏体耐热钢的焊接(33)——5. 铁素体耐热钢与其它钢种的焊接(41)	
四	奥氏体不锈钢与其它黑色金属的焊接.....	43
	1. 奥氏体不锈钢与珠光体钢的焊接(43)——2. 奥氏体不锈钢与铁素体钢的焊接(55)	
五	不锈复合钢板的焊接.....	59
	1. 不锈复合钢板的焊接性(60)——2. 不锈复合钢板的焊接工艺(61)——3. 焊缝金属的晶间腐蚀检查(67)——4. 焊后热处理(67)	
六	在黑色金属上堆焊异种金属.....	68
	1. 在黑色金属上堆焊耐热不锈钢(68)——2. 在黑色金属上堆焊钛及钛合金(72)	
七	黑色金属与有色金属的焊接.....	75
	1. 钢与铝及铝合金的焊接(75)——2. 钢与铜及铜合金的焊接(78)——3. 钢与镍及镍合金的焊接(84)	
八	异种有色金属的焊接.....	87
	1. 铝和铜的焊接(87)——2. 铜与钛的焊接(94)	

# 一 异种金属焊接结构的应用 及其焊接特点

**1. 异种金属焊接结构的应用** 用两种或两种以上不同金属焊接而成的复合结构，首先在能源装置上得到应用，特别是用于制造蒸汽锅炉、蒸汽和燃气涡轮、原子能反应堆的部组件。例如，燃气涡轮的各部位的工作温度是不同的，涡轮盘的外圆周在工作时要加热到 $600^{\circ}\text{C}$ 以上，所以要用高合金钢制造，而涡轮盘的中心部位的工作温度大大低于 $600^{\circ}\text{C}$ ，则可用合金结构钢来制造。采用了两种性能、成分差异很大的金属材料焊接成复合结构，就可以不必全部采用高合金钢。这样，不仅充分发挥了不同钢种各自的性能特长，而且又可获得更好的经济效益。

异种金属的复合结构，在化工设备上应用更为广泛。许多接触气体或液体介质的容器、管道，其内壁接触高温强腐蚀的介质，所以常用高合金钢制造，而其它一些支架、法兰等不接触腐蚀介质的零组件则可用碳钢或低合金钢制造，然后将它们焊接成异种钢的复合结构。

有一些双金属材料，本身就是一种双层钢。它的基层就是承载层，用普通低碳钢或普通低合金钢；它的复合层（也称复层）则是高铬铁素体（半铁素体）或铬镍奥氏体钢。这种双金属材料在食品工业、化学工业、石油化工和石油加工领域中较广泛地推广应用，它可以大大减少高合金钢的消耗量（高合金钢用量最多可降低到只占零组件重量的30%）。

有些大型铸、锻件和轧制件，用于制造原子能和石油化

8610626

工设备的零组件，这些零组件常与腐蚀性介质接触，因此可以采取在这些大型铸、锻、轧件的表面上堆焊一层高合金钢，使其与介质接触的表面具有良好的性能。

有些结构是由不同牌号的易淬火钢的零件焊成，为了防止焊接接头产生裂纹，焊接时一般需要对这些零件进行预热，焊后还要缓冷或回火，这就使工艺变得复杂化了。对有些零组件，由于无法预热或焊后热处理，如果选用填充焊接材料，就能保证焊缝得到高合金的奥氏体组织，使焊缝金属塑性变好，韧性有所提高，并免去焊前和焊后的热处理，同样可以得到一个满意的焊接接头。用这种方法来焊接淬火钢，就能形成一种特殊的异种金属焊接接头。

因此，不同成分、不同组织的金属材料，如碳素钢和中、低合金钢（珠光体钢）以及高合金钢（如奥氏体、铁素体、马氏体、奥氏体-铁素体、奥氏体-马氏体和马氏体-铁素体等组织）可以组成各种不同的复合结构。它们所采用的焊接工艺就是异种钢焊接的种子技术。表1列举了部分不同牌号钢种的复合结构。

## 2. 异种金属焊接接头的一些特点

一、焊接接头熔合线的组织 同种金属的焊接接头由于基本金属的轧制或锻、铸状态与焊缝的快速冷却，快速结晶铸态组织有较大的差距，加上填充金属的化学成分与基本金属总是有差异的，所以在基体过渡到焊缝的交界处能够从金相磨片上看到一个界面，我们称之为熔合线。但同种金属焊接接头各部分差异毕竟不大，特别是它们的晶格常数比较接近，从理论上讲晶格常数的差别不大于9%时，在结晶过程中伴随发生的结晶物质的晶格扭曲变形层很薄，而且随着结晶物质的继续增长而很快使晶格扭曲的程度变小了。因此，

表 1 部分不同钢种的复合结构

应用范围	用于制造复合结构的钢种牌号	
	作特殊钢用	作普通钢用
普通钢与淬火钢的结构	Cr5Mo; 12CrMoV; 15CrMoV; 20CrMo; 20CrMoV 装甲钢	10; 20; 45; ZG25; 20CrMnSi; 30CrMnSi 30CrMnSiNi 普通低合金钢
能源设备	奥氏体: 1Cr18Ni9Ti Cr18Ni12Ti 铁素体: 0Cr13; Cr17 马氏体: 1Cr13; 2Cr13; 20CrMoWV	10; 20; 208; 45; ZG25; 16Mn; 20CrMo 18CrNiW 12Cr1MoV
化工及石油设备	奥氏体: Cr18Ni9; 1Cr18Ni9Ti; Cr18Ni12; Cr25Ni20 铁素体: Cr17Ti; Cr17 马氏体及其它: 1Cr13; 2Cr13; Cr21Ni5	10; 20; 10MnSi 08Mn2Si; 20Cr3MoWV; 12CrMo; 30CrMo; Cr5Mo; 12CrMoV
双金属结构	A <sub>3</sub> + 1Cr18Ni9Ti A <sub>3</sub> + 0Cr13 09Mn2Si + 1Cr18Ni9Ti 20Cr2Mo + 0Cr18Ni9Ti	

它的变形层厚度只相当于单个分子或几十个原子的直径。熔合线就显得不那么鲜明；从金相磨片上看，其界面也不那么截然分明。

当结晶物质的晶格常数差距很大时，例如 Cr25Ti（铬25钛）+ Cr25Ni13（铬25镍13）钢，晶格常数差21.4%；35钢 + Cr25Ni13（铬25镍13）钢晶格常数差23.1%。在结晶的

结合面上，结晶物质的晶格扭曲变形层就显著增厚了，这就有利于生成成分不定的固溶体，因而生成的晶粒就不能保持它的定向，在熔合线上也不能生成与基本金属相近的组织，异种材料原子相密接，就会产生晶格扭曲变形的过渡区，这就是异种金属焊接熔合区的特殊性。晶格扭曲变形的过渡层就是组织不均一的场合，它能导致产生高强度区或高脆性区，这是异种钢焊接接头提前被破坏的主要原因。在实际生产应用中，容易出现熔合线脆断的事故，特别是奥氏体钢与非奥氏体钢的不同材料的焊接结构，因此更要注意防止这种不良情况的出现。

二、异种金属焊接接头熔合线附近的化学成分 异种金属焊接熔合线的化学成分可分为四个阶段来说明它的变迁。以碳元素的迁移为例，第一阶段焊缝金属还处于液态熔池的状态，碳在固态金属中的溶解度远远低于液态金属，所以碳由基本金属的固态向焊缝金属的液态过渡；第二阶段从熔池结晶开始，由于碳在焊缝固溶体中浓度大，而熔合线靠近基本金属一侧的浓度小，随着冷却的过程，碳又从焊缝向基本金属方向位移，这种反向位移有可能与第一阶段迁移的结果达到平衡；第三阶段是异种钢焊接所特有的，随着焊接接头继续冷却下来，碳从固溶体中析出并与碳化物生成元素结合生成碳化物，一直到 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ 为止。当降到这个温度以下时，碳元素的扩散能力就显著下降了，但是实验证明，这个阶段不是经常必然出现的。

如果采用多层焊，复合结构经焊后热处理或者在高温条件下工作，就会出现类似于第二阶段的碳迁移，这一种熔合线成分的变化为第四阶段。但总的来说，如果复合结构焊后不进行热处理，又不是在长时间的高温下工作，异种钢焊接

结构还是能够具有一定的工作性能的，熔合线化学成分的变化可不必过多的考虑。

三、异种钢焊接接头的裂纹 异种钢结构常选用具有淬火倾向的高合金马氏体钢和一般低、中合金的珠光体钢，焊接这类异种钢的困难主要是克服热裂纹的产生。对淬火钢来说，主要是近缝区的裂纹。近缝区裂纹，是指平行于熔合线并与熔合线略有一点距离处所出现的裂纹。对形成这类裂纹的机理有两种观点：一种认为是由于焊接加热后引起基体金属淬火而产生的，因为淬火钢在焊接时近缝区产生马氏体，它的比容增大造成组织应力加大，导致近缝区出现微裂纹，在焊接应力作用下，微裂纹扩大发展成为宏观裂纹。另一种观点，认为是氢致裂纹，淬火钢近缝区的冷裂纹是由于氢从焊缝金属中扩散到近缝区并使之饱和，增加了近缝区脆性而开裂。观点不同，采取措施也不同。第一种观点，是在焊接时预热和缓冷，以降低焊接接头淬火倾向。第二种观点，就是要控制进入焊接熔池中的氢气来源，如采用低氢型焊条，并保持干燥等等。

还有另外一种裂纹，是指焊缝金属本身的热裂纹。这是高合金钢焊缝金属中易于出现的缺陷，特别是纯奥氏体组织的焊缝最易出现焊缝中心裂纹。从理论上阐明这个问题的也有几种观点，其中有一种，就认为焊缝中还存在未结晶低熔点液膜，在相应的应力作用条件下生成了裂纹。防止措施还是与焊接奥氏体高镍铬钢的措施一样，在焊接材料选择方面，采用形成双相或多相（ $\delta + \gamma$  或  $\delta + \text{碳化物} + \text{氮化物}$ ）成分，在单相奥氏体的焊缝金属中加入钼、钨、钽、钪和其它元素，使之在略低于固相线的温度区间内能部分或全部阻止位错的活动。

为了得到优质可靠的异种钢的焊接接头，应该采用如下



的焊接工艺:

- (1) 它能避免淬火钢的复合结构近缝区产生裂纹;
- (2) 它要保证焊缝金属中没有热裂纹;
- (3) 它要保证不使高合金钢有显著的稀释;
- (4) 它要尽可能排除熔合线的组织不均匀性;
- (5) 它能保证焊接接头与基本金属有较近的膨胀系数。

## 二 三种异种钢的焊接

这里所说的三种异种钢,是指强度等级不同的普通低合金钢之间的焊接,以及普通低合金钢与碳钢的焊接。

普通低合金钢是在碳钢的基础上,加入少量或微量的合金元素(不超过3%),使碳钢的组织发生变化,从而使这类钢具有较高的屈服强度和较好的韧性,又有良好的焊接性能。如大型化工容器、锅炉和矿山设备的重要部件,都大量选用这类钢。这样,不仅可以节省材料,同时又能保证产品质量,延长产品的使用寿命。

普通低合金钢的品种很多,总的可分为结构钢(又称强度钢)和专用钢。结构钢又按强度等级作进一步划分。所谓按强度等级分类,实际上是以钢材的屈服强度高低而分,常用的强度等级为30~45公斤级,其焊接性尚可,牌号如表2所述。

**1. 普通低合金钢的焊接性** 焊接普通低合金钢结构时,主要特点:

一、热影响区有比较大的淬硬倾向 强度等级为30~40公斤级的普通低合金钢,其碳当量比较低,如09Mn2(09锰2)、09Mn2Si(09锰2硅)、16Mn(16锰)等钢,淬硬

表 2 常用普通低合金钢的牌号

屈服强度等级	常用牌号
30公斤级	09MnV; 09MnNb; 09Mn2; 12Mn; 18Nb
35公斤级	09MnCuPTi; 10MnSiCu; 12MnV; 12MnPXt; 14MnNb; 16Mn; 16MnXt
40公斤级	10MnPNbXt; 15MnV; 15MnTi; 16MnNb
45公斤级	14MnVTiXt; 15MnVN

倾向很小，与低碳钢似乎没有区别，也就是说焊接性很好。随着强度等级的提高，碳当量的增加，热影响区的淬硬倾向也随着变大。对强度等级为 45 公斤级的 15MnVN (15 锰钒氮) 钢来说，由于焊接热循环的影响，从熔合线到离熔合线 0.5 毫米的区域内能产生脆化现象。此区域的特点是：硬度提高，晶粒长大，冲击韧性值下降，形成了焊接接头中的韧性薄弱区。其结果，使焊接接头产生裂纹或者结构在较小负荷作用下，就有可能产生脆性破坏。

二、焊缝中的白点 焊缝中的白点主要取决于焊缝金属所吸收氢的含量多少。在普通低合金钢的焊缝中，随着铬、镍合金元素的增加，特别是钼合金元素的含量增加，将增加焊缝金属中产生白点的可能性。焊缝金属中的白点，只出现在焊缝金属经过拉伸变形的断口上（如拉伸试件），它是一种直径约 1~10 毫米的圆形缺陷。白点常与焊缝中夹渣等缺陷一起存在，是一种具有微裂纹性质的缺陷。它将显著地降低焊缝金属的塑性，而对强度的影响并不明显。

三、焊缝或热影响区的冷裂纹 冷裂纹可以在温度为 200~300℃ 以下出现，也可以在焊后产生。按发生的时间可能在焊后几小时，几天甚至更长的时间以后才发生，有时又称它为延迟裂纹。具有延迟性质的冷裂纹，会造成预料不到

的重大事故，因此它比一般裂纹具有更大的危险性。这种缺陷随着钢材强度等级的提高而增大，在高强度等级的普通低合金钢中最容易发生。

产生冷裂纹的因素，主要是：

(1) 在焊缝金属凝固时，特别是奥氏体向铁素体转变中，氢的溶解度激烈减少。急冷时，氢的过饱和程度激烈增大，逸出大量的氢，造成很大的静压力。当压力足够大时，使晶粒边缘的薄弱地方撕开而产生裂纹；

(2) 钢材的强度等级越大，碳当量愈高，热影响区的淬硬程度越大，对冷裂纹的敏感性就愈大；

(3) 焊接接头的刚度与钢板的厚度及结构型式对它的影响也很大，随着刚性增大，则焊接接头残余应力越大，产生冷裂纹的倾向也大。

**四、焊缝热影响区的表面微裂纹** 在强度等级高的普通低合金钢中，焊缝热影响区产生的表面微裂纹是一个比较普遍性的缺陷。用电弧焊施焊时，这种裂纹小的在一个至几个晶粒范围内，大的一般不超过1毫米，通常只有通过显微镜观察时才能发现或辨认。这种表面微裂纹的特点很鲜明，大都位于多层焊缝的盖面焊或单层焊道的弧坑区。方向基本垂直于熔合线，有时也稍许伸入熔合线，而伸入熔合线部分则沿焊缝金属柱状晶分布，可能是热裂纹；有的位于热影响区的粗晶区，在粗晶区中沿原奥氏体晶界分布，有可能是冷裂纹。这种表面微裂纹，在一般条件下，不会扩大，对焊接接头的性能没有影响。

**2. 焊接工艺的拟定** 对于该类异种钢的焊前准备、焊接工艺和焊后热处理等工艺规范，应参照两种钢种中焊接性较差的一个钢种（普通低合金钢）来拟定。

一、焊前加工工艺 30~40公斤级的普通低合金钢，如 09Mn2Si(09 锰 2 硅)、16Mn (16 锰)和 16MnCu(16 锰铜)等钢，气割性能与低碳钢一样良好。在气割边缘 1 毫米内虽有淬硬现象，但由于淬硬区很窄小，焊接过程中可以将淬硬区熔入焊缝金属的熔池中，气割边缘不需要进行机械加工就可以直接施焊。如果选用碳弧气割方法来加工焊接坡口或刨削焊根时，也与低碳钢一样，当规范和操作技术选择恰当时，气刨边缘一般都没有明显的增碳层。某厂曾用碳弧气刨和机械加工的焊接坡口，分别进行过焊接试验(试验材料是 16Mn 钢，用 T50-7 焊条施焊)，两者焊接接头的金相组织完全相同，焊缝金属为柱状珠光体 + 铁素体，过热区为低碳贝氏体，正火区为珠光体 + 铁素体。

随着钢种的强度等级的提高，碳当量也随之增加，淬硬性也大，气割性能相对下降。强度等级为 45 公斤级的 15MnVN (15 锰钒氮) 钢，在周围环境温度不太低时，可以不预热，采用氧-乙炔火焰进行气割，切割后不需要加工，可以直接进行施焊，焊缝金属决不会因为焊接坡口是气割的而产生裂纹。强度等级超过 50 公斤级的钢种，如 18MnMoNb(18 锰钼铌)、14MnMoV(14 锰钼钒)和 14MnMoVB(14 锰钼钒硼)等钢由于碳当量比较高，气割边缘的淬硬倾向比较大，气割前，如果不经过退火，气割后在气割边缘用磁粉探伤检查切口时，有时会发现微裂纹。这些微裂纹必须用砂轮将其磨掉，才能进行施焊。当然，这类钢在低温退火状态下，不预热还是可以切割的，也不会发现微裂纹。

对于强度等级较高、厚度较大的钢材，焊接坡口若是用气割加工而成，为防止裂纹的产生，则可采用与焊接时相同的预热规范。碳弧气刨时，必须仔细清除残余的碳屑粒，以

避免进入焊接熔池；否则，由于提高了焊缝中的碳当量，而使其淬硬倾向增大，引起裂纹。

## 二、焊接工艺

(1) 装配、定位焊：装配时不允许强制组装，对角变形和错边量要严格控制，避免未焊透和应力集中而引起的裂纹。为了防止装配定位焊点开裂，定位焊的焊缝应长些和厚些。定位焊所选用的焊接材料要与这两类异种钢所选用的焊接材料一致，但直径要小些。定位焊点的长度一般应大于40毫米，最好到100毫米。定位焊的焊接顺序，应以防止产生过大的结构拘束力为好；允许在工件上有适当的变形，以防止产生裂纹。一旦发现定位焊点有裂纹时，要立即清除，并移位重新进行定位焊。定位焊时应与正式焊接一样采取预热措施。

(2) 预热和层间保温：这两种异种钢焊接时，要根据其中焊接性差的材料选用预热温度。当16Mn（16锰）钢和15MnTi（15锰钛）钢的厚度分别超过25、22毫米时，以及强度等级为50~55公斤级的普通低合金钢，它们相互之间进行焊接或者与低碳钢焊接时，对这些钢均要进行预热。可以单独对这些钢预热，也可以与低碳钢装配定位焊后预热，预热温度不低于100℃。当强度等级更高的普通低合金钢与其它钢种焊接时，不管这类钢的厚薄和结构的刚性如何，都需要预热，并且预热温度也相应提高。预热的范围，在待焊处100毫米左右（两侧），保持一个匀热区。预热的目的，使焊接接头避免或减少出现淬硬的马氏体组织，又能促进氢的扩散逸出，减少热影响区中氢的含量，从而防止冷裂纹的产生。预热还能使焊缝金属缓慢地冷却，有利于消除夹渣、气孔和白点等缺陷，同时还能减少焊接残余应力。预热的方法可以

表5 低碳钢与普通低合金钢焊接方法和焊接材料的选择

钢种	普通低合金钢		电 弧 焊		
	屈服强度等级		手工焊	埋 弧 焊	
			焊条	焊丝	焊剂
低 碳 钢	30公斤级		T42-7	H08A	焊剂431
	35公斤级		T50-7	H08MnA	焊剂431
	40公斤级		T50-7	H08MnA	焊剂431
	45公斤级		T50-7	H08MnA	焊剂431
钢种	电 渣 焊		CO <sub>2</sub> 保护 焊丝	预热条件及温度 (°C)	
	焊丝	焊剂			
低 碳 钢	H08A	焊剂360	H10MnSi	不 预 热	
	H08Mn2Si	焊剂360	H08Mn2Si	$\delta \leq 40$ 不预热 $\delta > 40$ 预热, 温度 $\geq 100^{\circ}\text{C}$	
	H08Mn2Si	焊剂360	H08Mn2Si	$\delta \leq 32$ 不预热 $\delta > 32$ 预热, 温度 $\geq 100^{\circ}\text{C}$	
	H08Mn2Si	焊剂360	H08Mn2Si	$\delta > 32$ 预热, 温度 $\geq 100^{\circ}\text{C}$	

注:  $\delta$  ——板厚, 单位: 毫米。

用氧-乙炔火焰加热,也可以放入炉中整体预热。为了保持预热的作用并促进焊缝和热影响区中氢的扩散逸出,层间温度通常应等于或略高于预热温度。预热温度与层间温度过高时,都可能引起某些钢种的焊接接头组织和性能的恶化。

(3) 焊接材料的选择: 当强度等级不同的普通低合金钢之间焊接或者普通低合金钢与低碳钢焊接时,一般要求异种钢的焊缝金属及焊接接头的强度应大于被焊钢种中最低的强度;其塑性和冲击韧性值,则不应低于强度较高而塑性和冲击韧性较差的钢种或者按设计规定要求。因此,当这两类钢

焊接时，所选用的焊接材料也要遵循这一原则：即强度、塑性和冲击韧性值都不能低于被焊材料的最低值。有关普通低合金钢之间焊接或者和低碳钢焊接时，所选用的焊接材料应匹配，参见表3。焊条药皮类型大多采用低氢型，为的是消除或减少焊缝金属中氢的含量。焊丝应仔细清除油污，以减少氢的来源，并要求焊丝中碳的含量低些，而锰的含量要高些，希望锰/硅的比值提高，以减少热裂纹的产生。

(4) 焊接线能量的选择：为了减少这两类钢焊接接头热影响区的淬硬倾向和消除冷裂纹，使氢能从焊缝金属中大量逸出，希望焊接线能量大些。也就是说，在焊接电压不变的情况下，焊接电流要大些，焊接速度要慢些。施焊时，允许焊条进行摆动焊接，使焊接熔池缓慢凝固，有利于氢的析出。焊缝金属的冷却速度减慢，还有利于在高温奥氏体组织发生相变时，可以转变为强度高，塑性和冲击韧性好的珠光体+铁素体组织，避免或减少马氏体组织的出现。如果焊缝金属冷却速度过快，不但会使焊缝金属形成又硬又脆的马氏体组织，提高焊缝的淬硬倾向，而且还不利于氢的析出，容易形成冷裂纹。这两类钢焊接时，对于易形成淬硬组织（即马氏体组织）的钢种，希望它熔入焊缝金属中的体积越小越好。也就是说，熔合比要小些，可以减少焊缝金属的淬硬倾向。这两类钢种焊接的方法，可以采用手工电弧焊、埋弧焊和气体保护焊等。

(5) 焊后校正：对强度等级30~40公斤级的普通低合金钢如16Mn（16锰）钢与低碳钢一样，可以采用火焰加热，矫正焊接变形。火焰矫正时，经三次加热后再给以水冷（喷水），对机械性能仍无明显影响。热矫后，也可以空冷。加热温度一定要控制在900℃以下，不然会出现过热的魏氏

体组织，这种组织具有又硬又脆的特性，会大大降低钢材的冲击韧性值。

(6) 焊后热处理：这两类钢的焊接结构是否需要热处理，取决于其中一种钢材的强度等级的高低，对于强度等级大于 50 公斤级具有延迟裂纹倾向的普通低合金钢来说，要求焊后及时进行回火热处理。回火热处理的主要作用是为氢扩散逸出创造有利条件，改善近缝区的显微组织和消除焊接残余应力，从而防止延迟裂纹的产生。回火热处理的温度一般控制在钢材加热到  $A_{c1}$  线（即奥氏体转变为珠光体的温度线）以下的某一温度。对含有钒，特别是含钒又含钼的普通低合金钢，在  $600^{\circ}\text{C}$  左右保温会造成冲击韧性值明显地降低，而强度提高。其原因，一般认为是在  $600^{\circ}\text{C}$  左右析出钒的二次碳化物所引起的。因此，这类钢的焊后热处理，应避开这一温度范围。保温时间按每毫米厚度 4~5 分钟计算（但不少于 1 小时），然后空冷或炉冷。进行热处理的炉内温度应要求均匀一致，在操作中还应遵守规定的加热速度、加热温度、保温时间和冷却速度等制度。否则，如果炉温或操作不当，不仅达不到预期目的，反而可能产生相反的结果，这对于强度等级大于 50 公斤级钢材的焊接接头更为重要。

**3. 举例** 直径为  $\phi 500$  毫米绕带合成塔内筒，设计压力为  $1300 \text{ 牛/厘米}^2$ ，是一种高压容器。内筒的板材厚度为 18 毫米，是由 16MnR (16 锰容) 钢和 20MnMo (20 锰钼) 钢两种钢种焊接而成。两种钢种的化学成分和机械性能如表 4 所示。为了考核内筒的环形焊缝焊接工艺的正确性，对焊接接头进行了焊接工艺评定。经过焊接工艺评定后，这种筒内的环形焊缝采用了如下焊接工艺：焊接坡口型式如图 1 所示，焊前不需要预热，焊后也不必进行热处理。采用手工电弧焊，选



表4 16MnR和10MnMo的化学成分和机械性能

钢号	化 学 成 分 (%)						机 械 性 能			
	C	Si	Mn	S	P	Mo	$\sigma_s$ (牛/毫米 <sup>2</sup> )	$\sigma_b$ (牛/毫米 <sup>2</sup> )	$\delta_5$ (%)	$a_k$ (牛·米/厘米 <sup>2</sup> )
16MnR	≤0.20	0.20~0.60	1.20~1.60	0.04	0.045		330	500	20	60
10MnMo	0.17~0.23	0.17~0.37	1.10~1.40	≤0.04	≤0.04	0.20~0.35	360	520	18	60

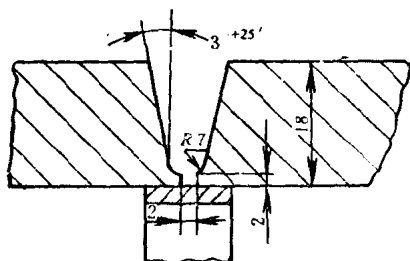


图1 U型坡口的尺寸

用T50-7焊条进行施焊。第一层焊缝，用直径 $\phi 4$ 毫米的焊条，焊接电流160~170安，焊接电压为22~23伏，焊接速度12米/时，第一层焊缝要保证焊透，与衬垫牢牢结合。从第二层焊缝开始直至焊满为止，全部采用直径 $\phi 5$ 毫米的焊条，焊接电流180~230安，焊接电压为22~23伏，焊接速度12米/时。层间的夹渣一定要清理干净，以保证焊缝内部的质量。焊后要对焊缝进行100% X光探伤检验，检验焊缝是否符合“焊缝射线探伤标准”(GB3323-82)的Ⅱ级合格标准。最后进行强度试验1300牛/厘米<sup>2</sup>，历时30分钟，不允许发现渗漏现象。

对附在产品上的焊接试片要按“锅炉受压元件焊接接头