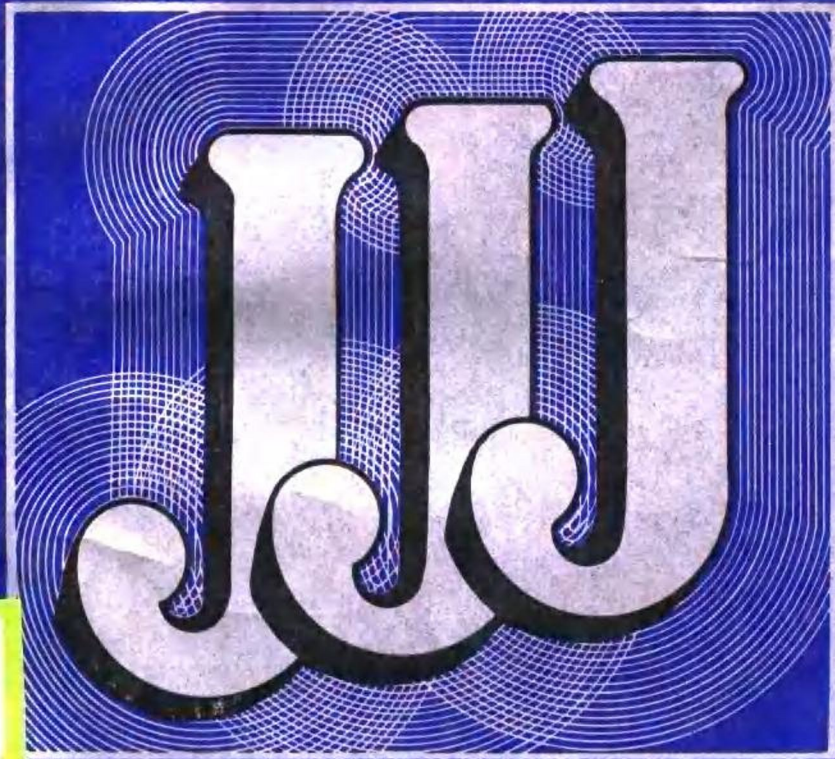


国家机械工业委员会统编

高级电焊工工艺学

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHULILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

本书着重讲解了异种金属的焊接方法及焊接原材料的选择；介绍了焊接接头中工作应力的分布及常用焊接接头静载强度的计算方法，焊接结构的脆性断裂和疲劳断裂产生原因及防止措施，典型金属结构（压力容器、梁和柱、常用机器结构）的焊接特点和焊接工艺。书中还对焊接结构的生产工艺流程作了系统的叙述。

本书内容理论联系实际，分析讲解具有针对性，有益于提高焊工的理论、技术水平。

本书是高级电焊工的理论培训教材，也是本专业有关工人和技术人员的参考读物。

本书由无锡锅炉厂徐初雄、陈宝龄编写，由南京汽轮机厂吕明辉、南京晨光机器厂堵耀庭、南京锅炉厂张洪飞审稿。

高级电焊工工艺学

国家机械工业委员会统编

责任编辑：俞逢英 责任校对：丁丽丽
封面设计：林胜利 版式设计：张伟行
方芬 责任印制：卢子祥

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）
（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

1201印刷厂印刷

机械工业出版社发行·新华书店经销

升本 787×1092¹/₃₂·印张10¹/₄·插页1·字数220千字
1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷
印数 00,001—46,200·定价·3.70元

ISBN 7-111-01159-7/TG·296

前 言

1981年，原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》，确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此，组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划、教学大纲(试行)》，编写了相应的教材，有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作，初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况，取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准(通用部分)》进行了全面修订，原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求，而且缺少高级部分；编写的教材，由于时间仓促、经验不足，在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此，原机械工业部根据新《标准》，重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》(初、中、高级)，于1987年3月由国家机械工业委员会颁发，并根据培训计划、大纲的要求，编写了配套教材149种。

这套新教材的编写，体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神，坚持了文化课为技术基础课服务，技术基础课为专业课服务，专业课为提高操作技能和解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上，力求以

基本概念和原理为主，突出针对性和实用性，着重讲授基本知识，注重能力的培养，并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发，努力做到理论联系实际，通俗易懂，具有工人培训教材的特色，同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接，便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂、长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位，组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人，在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际，谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员，各地的组织领导者，以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意！

编好、出好这套教材不容易；教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误，我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题，及时提出批评和指正，以便再版时修订，使其更完善，更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会
技工培训教材编审组
1987年11月

目 录

前 言

第一章 异种金属的焊接	1
第一节 低碳钢与普通低合金钢的焊接	1
第二节 奥氏体不锈钢与其它黑色金属的焊接	5
第三节 耐热钢与其它黑色金属的焊接	33
第四节 钢与有色金属的焊接	40
第五节 异种金属的堆焊	57
复习题	62
第二章 焊接接头的静载强度计算	64
第一节 焊接接头的工作应力分布	64
第二节 焊接接头静载强度计算	81
复习题	102
第三章 焊接结构的破坏	103
第一节 焊接结构的脆性断裂	103
第二节 焊接结构的疲劳断裂	127
复习题	146
第四章 典型金属结构的焊接	148
第一节 压力容器的焊接	148
第二节 梁和柱的焊接	201
第三节 机器结构的焊接	227
复习题	244
第五章 焊接结构的生产	246
第一节 焊接结构生产工艺流程	246

V

第二节	典型焊接结构的制造工艺	266
第三节	焊接机械装备	276
第四节	焊接结构生产工艺规程	301
第五节	电弧焊技术定额	306
	复习题	315
附录一	国内焊接标准	317
附录二	焊接异种钢的焊条(焊丝)及焊后 热处理温度推荐表	插页

第一章 异种金属的焊接

第一节 低碳钢与普通低合金钢的焊接

一、低碳钢与普通低合金钢焊接时的焊接性

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，从而获得较高的屈服强度和较好的冲击韧性。随着钢中合金元素的增加，普通低合金钢的强度等级逐步提高，碳当量随之增加，因此钢的淬硬性增加，焊接性变差。

低碳钢具有最优良的焊接性，因此，低碳钢和普通低合金钢焊接时的焊接性仅决定于普通低合金钢本身的焊接性。

二、低碳钢与普通低合金钢的焊接工艺

对于这两类异种钢焊接时的焊前准备、焊接工艺和焊后热处理等工艺措施的拟定，应根据两种钢种中焊接性较差的一个钢种进行，即以普通低合金钢来拟定。

1. 焊前加工 300~400MPa级普通低合金钢，如09Mn2Si、16Mn和16MnCu等钢，气割性能和低碳钢一样良好，随着钢种强度等级的提高，气割性能相对会下降。强度等级为450MPa级的15MnVN钢，在周围环境温度不太低时，可以不预热，采用氧-乙炔火焰进行切割，切割后不需要加工，即可直接进行施焊，焊缝金属也决不会因焊接坡口是气割的而产生裂纹。强度等级超过500MPa级的钢种，如18MnMoNb、14MnMoV和14MnMoVB等钢，由于碳当量比较高，气割后

在气割边缘用磁粉探伤检查切口时，常会发现微裂纹，这些微裂纹必须用砂轮将其磨掉，才能进行施焊。对于强度等级更高或厚度较大的钢材，焊接坡口若用气割加工而成，为防止产生裂纹，可采用与焊接时相同的预热参数进行预热。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含碳量，而使其淬硬倾向增大，引起裂纹。

2. 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正式焊接时所用的焊接材料相一致，但直径要小些。定位焊缝的长度一般为40~100mm。如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 低碳钢和普通低合金钢进行焊接时，要根据普通低合金钢选用预热温度。当16Mn钢和15MnTi钢的厚度分别超过25、22mm时，以及强度等级超过500MPa级的普通低合金钢与低碳钢焊接时，均应进行预热。预热时，可以单独对普通低合金钢进行，也可以与低碳钢装配定位焊后预热，预热温度不应低于100℃。预热的范围为焊口两侧各100mm左右为宜。其方法可以用氧-乙炔火焰加热，也可以放入炉中整体加热。

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。预热温度和层间温度不应过高，否则，可能会引起某些钢种焊接接头组织和性能的恶化。

(3) 焊接材料 低碳钢和普通低合金钢焊接时,要求焊缝金属及焊接接头的强度应大于低碳钢的强度;其塑性和冲击韧性值不应低于普通低合金钢的。因此,焊接材料选择的原则是,强度、塑性和冲击韧性值都不能低于被焊钢种中的最低值。焊接材料具体的选择,见表1-1。

表1-1 低碳钢与普通低合金钢焊接用材料的选择

钢种	普通低合金钢		电 弧 焊		
	屈服强度 (MPa)		手弧焊	埋 弧 焊	
			焊 条	焊 丝	焊 剂
低 碳 钢	300		E4315	H08A	焊剂431
	350		E5015	H08MnA	焊剂431
	400		E5015	H08MnA	焊剂431
	450		E5015	H08MnA	焊剂431
钢种	电 渣 焊		CO ₂ 保护 焊焊丝	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	$\delta > 40$ 预热, 温度 $\geq 100^\circ\text{C}$	
	H08Mn2Si	焊剂360	H08Mn2Si	$\delta^{①} > 32$ 预热, 温度 $\geq 100^\circ\text{C}$	
	H08Mn2Si	焊剂360	H08Mn2Si		

① δ ——板厚(mm)。

(4) 焊接线能量 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,可以采用较大的线能量,即在焊接电压不变的情况下,可用较大的焊接电流和较慢的焊接速度。施焊时,允许焊条作横向

摆动，使焊接熔池缓慢凝固，以利于氢的析出。

(5) 焊后热处理 应根据普通低合金钢来决定是否需要焊后热处理。对于强度等级大于500MPa具有延迟裂纹倾向的普通低合金钢来说，焊后应及时进行高温回火，其作用是使焊接接头中的氢扩散逸出、改善热影响区的显微组织和消除焊接残余应力。

三、生产实例

直径为 $\phi 500\text{mm}$ 绕带合成塔内筒，设计压力为13MPa，是一种高压容器。内筒的板材厚度为18mm，是由16MnR钢和A3钢两种钢种焊接而成。

焊接工艺 坡口形式采用U形，坡口尺寸见图1-1。焊前不进行预热，焊后也不需热处理。焊接方法采用手弧焊，选用E5015焊条进行施焊。第一层焊缝，用直径 $\phi 4\text{mm}$ 的焊条，焊接电流160~170A，焊接电压22~23V，焊接速度12m/h，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 $\phi 5\text{mm}$ 的焊条，焊接电流为180~230A，焊接电压22~23V，焊接速度12m/h，层间的夹渣一定要清理干净。焊后对焊缝进行100% X射线检验，检验焊缝是否符合《钢焊缝射线照相及底片等级分类法》(GB 3323—82) II级片的标准规定，最后需进行水压试验，试验

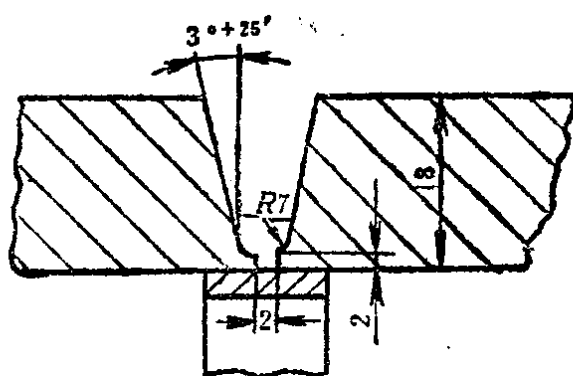


图1-1 U形坡口的尺寸

压力为 13MPa 历时 30 min，试验合格方可。

第二节 奥氏体不锈钢与其它黑色金属的焊接

一、奥氏体不锈钢与珠光体钢的焊接

许多接触气体或液体介质的容器、管道，其内壁接触高温、强腐蚀性介质，常用奥氏体不锈钢制造，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，然后将它们焊接起来，这两类异种钢的焊接在化工设备上的应用十分广泛。

1. 奥氏体不锈钢与珠光体钢焊接时的焊接性 奥氏体不锈钢与珠光体钢（碳钢或低合金钢）是两种组织和成分都不相同的钢种，因此，这两类钢焊接在一起时，焊缝金属是由两种不同类型的母材以及填充金属材料熔合而成。这就产生了与焊接同一金属所不同的一系列新的问题。

(1) 焊缝的稀释 由于珠光体钢中不含有合金元素（碳钢）或合金元素含量较低（低合金钢），所以它对整个焊缝金属的合金具有稀释作用。由于珠光体钢这种稀释作用，使焊缝的奥氏体形成元素含量减少，结果焊缝中可能会出现马氏体组织，从而恶化了接头质量，严重时甚至可能出现裂纹。

焊缝的组织决定于焊缝的成分，而焊缝的成分决定于母材的熔入量，即熔合比。因此，一定的熔合比决定了一定的焊缝成分和焊缝组织。熔合比发生变化时，焊缝的成分和组织都要随之发生相应的变化，这种变化可以根据不锈钢的组织图来表示，见图 1-2。

图中横坐标为铬当量 ($Cr_{\text{当量}}$)，即把焊缝中某些合金元素的含量折算成相当的铬含量 (%)，其计算式为：

$$Cr_{\text{当量}}\% = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb (\%)$$

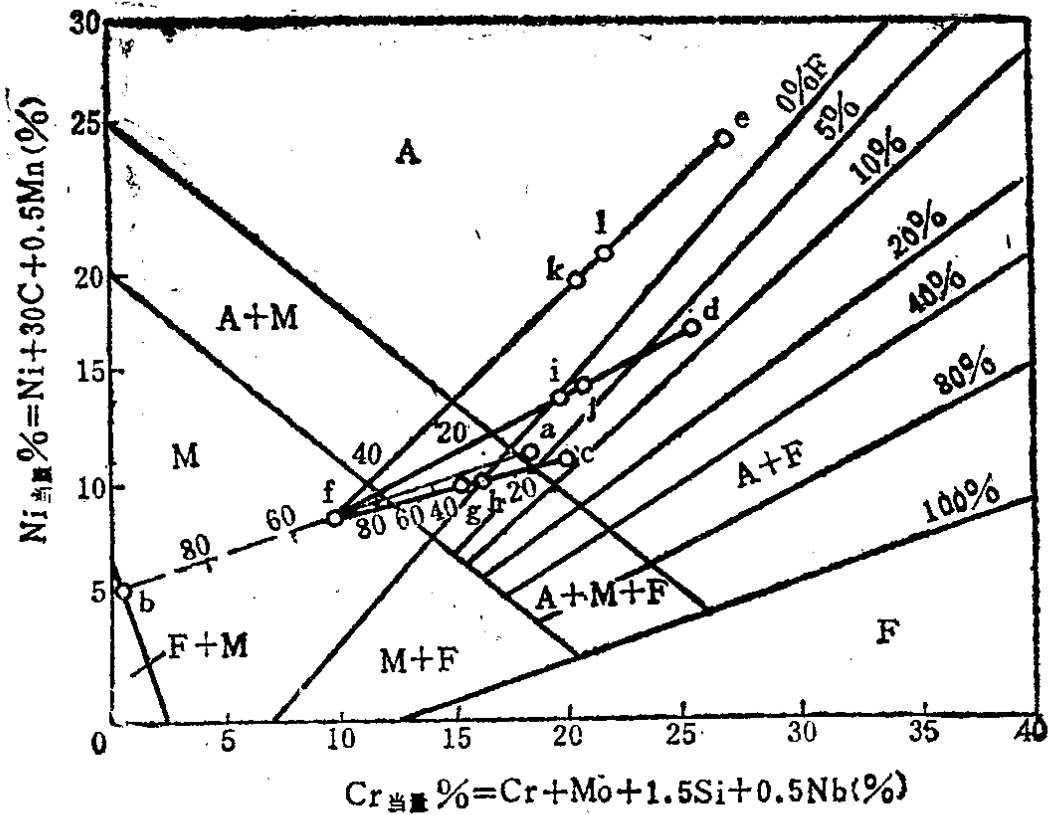


图1-2 不锈钢组织图

A—奥氏体 F—铁素体 M—马氏体

图中纵坐标为镍当量 ($Ni_{\text{当量}}$)，即把焊缝中某些合金元素的含量折算成相当的镍含量 (%)，其计算式为：

$$Ni_{\text{当量}}\% = Ni + 30C + 0.5Mn (\%)$$

当知道了两种母材金属的化学成分后，将其分别折算出铬当量和镍当量，然后根据铬当量和镍当量的值在不锈钢组织图上找出相应的点，再根据熔合比，就能估计出焊缝的组织状态。

今以1Cr18Ni9不锈钢和A3低碳钢焊接为例，说明不锈钢组织图的具体应用。1Cr18Ni9不锈钢和A3低碳钢的铬、镍当量值及其在图上的位置，分别见表1-2和图1-2。

1) 手工钨极氩弧焊 如不加填充焊丝进行焊接，且假设两种母材熔化数量相同，其熔合比分别是50%，则为图1-2

表1-2 1Cr18Ni9不锈钢和A3低碳钢的铬、镍当量值

母 材	化 学 成 分 (%)					铬当量 (%)	镍当量 (%)	图上 位置
	C	Mn	Si	Cr	Ni			
1Cr18Ni9钢	0.07	1.36	0.66	17.8	8.65	18.79	11.42	a
A3钢	0.18	0.44	0.35	—	—	0.53	5.62	b

中的 f 点。由图中看出焊缝组织为马氏体组织。由此可见，1Cr18Ni9不锈钢和A3低碳钢采用手工钨极氩弧焊焊接在一起时，如果不加填充焊丝，则在焊缝中要避免出现马氏体组织是不可能的。

2) 手弧焊 今分别采用奥102 (18-8型)、奥307(25-13型)和奥407 (25-20型) 三种焊条进行焊接，该三种焊条的铬、镍当量值及其在图上的位置，分别见表1-3和图1-2。

表1-3 奥氏体不锈钢焊条的铬、镍当量值

焊条牌号	化 学 成 分 (%)					铬当量 (%)	镍当量 (%)	图上 位置
	C	Mn	Si	Cr	Ni			
奥102(18-8)	0.07	1.22	0.46	19.2	8.50	19.89	11.15	c
奥307(25-13)	0.11	1.32	0.48	24.8	12.80	25.52	16.76	d
奥407(25-20)	0.18	1.40	0.54	26.2	18.80	27.01	24.90	e

①采用奥102焊条 此时焊条的铬、镍当量值相当于图1-2中的c点。如果假定两种母材的熔化数量相同，则两种母材熔化混合后的当量成分相当于f点，此时，焊缝金属可视为当量成分为f点的母材金属与焊条金属熔化混合而成。所以当母材熔合比发生变化时，焊缝的当量成分将沿f-c线段上各点变化。当母材的熔合比为40%，即两种母材在焊缝中各占20%时，见图1-3，焊缝的当量成分相当于图

1-2中的g点；当母材的熔合比为30%时，焊缝的当量成分相当于h点。因此，当母材的熔合比为30~40%时，焊缝的组织为奥氏体+马氏体。

② 采用奥307焊条
此时焊条的铬、镍当量值相当于图1-2中的d点。如果母材的熔合比为40%，

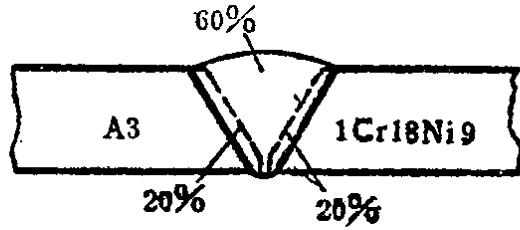


图1-3 母材的熔合比

在f-d线段上求得焊缝的位置在i点，则焊缝为纯奥氏体组织；若熔合比为30%，在f-d线段上求得焊缝的位置在j点，则焊缝为含2%铁素体的奥氏体+铁素体双相组织。

③ 采用奥407焊条 此时焊条的铬、镍当量值相当于图1-2中的e点，则当母材的熔合比为30~40%时，相当于线段f-e上的k、l点，此时焊缝均为单相奥氏体组织。

综上所述，当1Cr18Ni9不锈钢和A3低碳钢用手弧焊焊接在一起时，由于A3钢母材的稀释作用，使焊缝的成分和组织都发生了变化。通过选择不同的焊条和控制熔合比，能在相当宽的范围内调整焊缝的成分和组织。此时，如选用18-8型的奥102焊条，则焊缝会出现脆硬的马氏体组织，如果要想得到不含马氏体的奥氏体+铁素体的双相组织，非用极小的熔合比不可，这在工艺上是很困难的。若选用25-20型的奥407焊条，则焊缝通常为单相奥氏体组织，其热裂倾向较大。比较理想的是选用25-13型的奥307焊条，此时只要把母材的熔合比控制在40%以下，就能得到具有较高抗裂性能的奥氏体+铁素体双相组织。

(2) 过渡层的形成 上面讨论的是当母材与填充金属材料均匀混合的情况下，珠光体钢母材对整个焊缝的稀释作用。事实上，在焊接热源的作用下，熔化的母材和填充金属材料

料相互混合的程度，在熔池内部和熔池边缘是不相同的。在熔池边缘，液态金属温度较低，流动性较差，在液态停留时间较短。由于珠光体钢与奥氏体填充金属材料的成分相差悬殊，在熔池边缘上，熔化的母材与填充金属就不能很好地熔合，结果在珠光体钢这一部分焊缝金属中，珠光体钢母材所占的比例较大，而且越靠近熔合线，母材所占的比例越大。所以，珠光体钢和奥氏体不锈钢焊接时，在紧靠珠光体钢一侧熔合线的焊缝金属中，会形成和焊缝金属内部成分不同的过渡层。离熔合线越近，珠光体的稀释作用越强烈，过渡层中含铬、镍量也越少，因此，其铬当量和镍当量也相应减少。对照不锈钢组织图可以看出，此时过渡层将由奥氏体+马氏体区和马氏体区组成。过渡层的宽度决定于所用焊条的类型，见表1-4。

表1-4 过渡层的宽度 (μm)

焊条类型	马氏体区	马氏体+奥氏体区
18-8型	50	100
25-20型	10	25
15-35型	4	7.5
16-67型	≤ 3	≤ 5

当马氏体区较宽时，会显著降低焊接接头的韧性，使用过程中容易出现局部脆性破坏。因此，当工作条件要求接头的低温冲击韧性较好时，应选用含镍量较高的焊条。

(3) 熔合区扩散层的形成 在由奥氏体不锈钢和珠光体钢组成的焊接接头中，由于珠光体钢的含碳量较高，但合金元素含量较少（主要指碳化物形成元素），而奥氏体不锈钢则相反，这样在熔合区珠光体钢一侧两边形成了碳和碳化

物形成元素的浓度差。当接头在温度高于 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ 长期工作时,熔合区便出现明显的碳的扩散,即碳从珠光体钢通过熔合区向奥氏体焊缝扩散。结果,在靠近熔合区的珠光体母材上形成了脱碳层而软化,在奥氏体焊缝一侧产生了与脱碳层相对应的增碳层而硬化。

影响脱碳层发展的因素有:

1) 接头加热温度和在高温停留的时间 焊后状态,特别是在单层焊缝的接头中,即使采用大功率的焊接工艺参数,扩散层也是很弱的。但把接头重新加热到较高温度(500°C 左右),并保留一定时间,扩散层就开始明显发展起来,到了 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ 时最为强烈, 800°C 时达到最大值,并且随着加热时间的延长,扩散层加宽。因此,在通常情况下,这种异种钢接头进行焊后热处理是不适宜的。

2) 碳化物形成元素的影响 奥氏体不锈钢中碳化物形成元素的种类和数量对珠光体钢中脱碳层的宽度有不同的影响。碳化物形成元素按其对于碳亲和力的大小,由弱到强按下列次序排列: Fe、Mn、Cr、Mo、W、V、Nb、Ti。数量相同时,对碳亲和力越大的元素,在珠光体钢中形成的脱碳层越宽。对于某一种碳化物形成元素,随着其数量增加,脱碳层加宽。

反之,当珠光体钢中碳化物形成元素增加时,能降低扩散层的发展。因此,在珠光体钢中加入Cr、Mo、V、Ti等元素,而且其数量要足以完全把碳固定在稳定碳化物中,是抑制这两类异种钢熔合区扩散层的有效手段之一,这种钢通常叫做稳定珠光体钢。

3) 母材含碳量的影响 珠光体钢中含碳量越高,扩散层的发展越强烈。

4) 镍的影响 镍是一种石墨化元素, 它会降低碳化物的稳定性, 并削弱碳化物形成元素对碳的结合能力, 因而提高焊缝中的镍含量, 可以减弱扩散层。因此, 提高填充金属材料的含镍量, 是一种抑制熔合区扩散过程的有效手段。

扩散层是这两类异种钢焊接接头中的薄弱环节, 它对接头的常温和高温瞬时机械性能影响不大, 但将降低接头的高温持久强度, 一般要降低10~20%左右。

(4) 焊接接头应力状态的特点 由于奥氏体母材和焊缝金属的线膨胀系数比珠光体母材大30~50%, 而热导率却只有珠光体母材的50%左右。因此, 这类异种钢的焊接接头便会产生很大的热应力, 特别当温度变化速度较快时, 由热应力引起的热冲击力象合金钢淬火一样容易引起焊件开裂。此外, 在交变温度条件下工作时, 由于珠光体钢一侧抗氧化性能较差, 易被氧化形成缺口, 在反复热应力的作用下, 缺口便沿着薄弱的脱碳层扩散, 形成所谓热疲劳裂纹。

这类异种钢焊接接头加热到高温时, 借助于松弛过程能降低焊接应力, 但在随后冷却过程中, 由于母材和焊缝金属热物理性能的差异, 不可避免地又会产生新的残余应力。所以, 这类异种钢接头焊后热处理并不能消除残余应力, 只能引起应力的重新分布, 这一点与同种金属的焊接有很大的不同。

(5) 延迟裂纹 氢在不同的组织中, 溶解度并不相同, 并且与温度有关。当温度为500℃时, 氢在奥氏体组织中的溶解度为 $4\text{cm}^3/100\text{g}$, 而在铁素体组织(珠光体是渗碳体和铁素体的机械混合物)中为 $0.75\text{cm}^3/100\text{g}$; 在100℃时, 氢在奥氏体组织中的溶解度降到 $0.9\text{cm}^3/100\text{g}$, 在铁素体组织中的溶解度只有 $0.2\text{cm}^3/100\text{g}$ 。这类异种钢的焊接熔池在结晶过程