

异种钢焊接

HK-40 离心铸管的维修

南京化工设计院
广州石油化工厂 译

兰州石油机械研究所
广州石油化工厂 校

7811
2

上海化学工业设计院石油化工设备设计建设组

1975年6月

异 种 钢 焊 接

附：HK-40 离心铸管的维修

南京化工设计院 译
广州石油化工厂

兰州石油机械研究所 校
广州石油化工厂

上海化学工业设计院石油化工设备设计建设组

1975年6月

026837

异 种 钢 焊 接

(附: HK-40 离心铸管的维修)

上海化学工业设计院石油化工设备设计处编

(上海南京西路1856号)

上海海峰印刷厂印刷

工本费: 0.80 元

毛主席语录

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。

……一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

前 言

为适应当前化肥及石油化工生产发展的需要,配合引进大型合成氨及乙烯装置的建设,了解并掌握国外有关技术动向及水平,我组准备针对石油、化工设备的有关课题,分专题组织翻译、出版国外有关资料、文献。本册包括了异种钢焊接及 HK-40 离心铸管的维修二个专题。

异种钢焊接,尤其是碳素钢、低合金钢与奥氏体不锈钢之间的焊接是炼油、化工设备设计、施工中经常接触的问题,异种钢焊接有其特殊的一些施工与焊接问题,为此我们选译了日本“金属材料”1973年12月号的异种金属焊接专辑,由南京化学工业公司设计院张弦同志承译,兰州石油机械研究所郑国华同志校对。

HK-40 离心铸管是石油裂解及制氢转化炉用炉管材料,材料于高温长期使用后会由于过热、氧化、渗碳、蠕变破裂等原因而破坏,因此炉管的维修问题是大型乙烯及化肥装置能否安全、长期运转的关键问题之一,为此本册中收集了美国 A.P.I.等有关论文,供化肥及乙烯生产及维修、按装部门参考。最后一篇介绍了国外近年来发展的一种新型炉管生产方法及性能。本专题由广州石油化工厂建设指挥部梁华滋、杨志超同志译校。

由于水平所限,错误之处望不吝指正。

本译文集在出版过程中承上海高桥化工厂大力支持,一并于此致谢。

上海化学工业设计院石油化工设备设计建设组

1975年6月

目 录

异 种 钢 焊 接

一、设计与施工防止焊接缺陷的措施.....	1
二、异种钢焊接融合区的韧性下降及剥离.....	12
三、碳钢、低合金钢与奥氏体不锈钢焊接裂纹的解决办法.....	18
四、堆焊施工与防止缺陷的办法.....	26
五、不锈复合钢板的焊接施工及防止缺陷的办法.....	33
六、异种金属焊接的焊接缺陷及存在问题.....	38

HK-40 离心铸管的维修

一、制氢转化炉的检查方法.....	40
二、现场固溶退火.....	44
三、制氢转化炉焊接工艺总结.....	50
四、连续晶界析出处理挤压耐热钢管.....	57

设计与施工防止焊接缺陷的措施

(日) 渡边竹春等

近年来,首先在炼油、石油化工,接着在化工、电力和原子能等工业装置上,出于经济性和生产效率的考虑,已发展到装置大型化和操作条件的极限化。随之而来,操作条件的苛刻程度增加了,装置耗材量也比以前增多,对材料的强度、韧性和耐腐蚀性的要求就更为突出。但是,用单一的金属材料要满足各种所要求是很困难的,且从经济上考虑亦存在问题,所以这些装置上的反应器、热交换器、塔、管道等所用的结构材料,大多数以堆焊或组成复合材料的形式,把各种耐蚀材料与基体的强度材料组合起来。此外,也在同一装置上,由于操作条件的需要,把几种钢材组合使用。因此构成这些装置的材料焊接就存在着异种金属之间的焊接问题。迄今为止,在这方面已作了许多研究,在技术上已有很多成果。

但是,为了对不同化学成分、物理性能,且金相组织上也具有不同性质的金属材料彼此之间的焊接,也还有很多问题尚未解决;首先是冶金学上的问题;其次是施工和试验检查上的问题;还有使用上的问题,错综复杂地存在在一起。本文仅从防止异种金属材料的焊接缺陷角度,介绍一下在炼油、化工装置内由异种金属材料的焊接所产生的破坏事例,简单地叙述一下化学工业上所采用的异种金属材料的焊接方法与设计和施工中为防止破损所需考虑的措施。

1. 装置中的破坏实例

炼油化工装置中有碳钢、钼钢、铬钼钢的焊接,这种纯属铁素体钢之间的焊接称为化学成分不同的钢材的焊接(也可称为第一类的异种金属焊接),再有铬钼钢与奥氏体不锈钢之间的焊接(亦称为第二类异种金属焊接),这二种是主要的异种钢焊接。

关于前者,焊接材料用的是同系的,而据作者所知,以异种金属为原因的损坏事例的报告至今几乎还没有。所以化学装置内异种金属焊接的破坏可以说是第二类异种金属焊接的破坏,破损主要是在铁素体钢与奥氏体钢焊接时发生的,尤其当母材彼此都是铬钼钢,而焊接时使用了奥氏体不锈钢焊接材料的场合为多。

例如,铬钼钢母材用 25Cr-20Ni 型焊接材料焊接;焊接部位的损坏一例示于表 1⁽¹⁾。其接缝位置是在炼厂装置的管道上,损坏位置多半在焊缝金属与母材的融合区或热影响区,损坏的主要原因是:(1)不完全的焊接。(2)形成渗碳层和脱碳层,并在脱碳层侧优先氧化。(3)由于母材与熔敷金属部分的热膨胀差所引起的热应力等。在上例中特别是因(2)、(3)的原因而引起的破损。所以说是母材与熔敷金属的金相组织不同而产生的典型破坏。亦即,母材与熔敷金属的铬与碳含量之差,在高温使用时表现为碳的迁移,导致过渡带和脱碳层的形成,使晶粒粗大以及渗碳层的马氏体化。此外,热膨胀系数之差表现为热应力,使强度低的部位应力集中,并产生选择性腐蚀以至发生裂纹。

此外,焊缝金属部分也有因使用了完全奥氏体组织的 25Cr-20Ni 型焊接材料由热裂纹所

引起的损伤例子。根据这些情况,对异种金属的焊接现在已几乎不考虑选择25Cr-20Ni型的焊接材料。

此外,堆焊及复合钢的焊接区也有不少损伤事例的报告^[2]。这些事故也有是来自各种母材组合的冶金学上的必然原因,但设计与施工阶段必须解决的问题也很多。

表1 装置的异种金属焊接部位的破损事例^[1]

序号	破 损 位 置	管道尺寸 mm	材 料	使用温度 ℃	压 力 kg/cm ²	使用时间	备 注 ^①
1	管道(直管部分)	φ250×15	1¼Cr-0.5Mo	480	38	1年	焊接完善
2	管道(加热炉管出口)	φ403×26.2	1¼Cr-0.5Mo	500	38	1年半	焊接有缺陷
3	管道(加热炉管出口)	φ320×21.4	1¼Cr-0.5Mo	500	38	1.8年	焊接有缺陷
4	管道(加热炉管出口)	φ320×21.4	1¼Cr-0.5Mo	500	38	1.6年	焊接有缺陷
5	管道 ^②	φ200×13	1¼Cr-0.5Mo	500	38	10600小时	焊接稍为不良
6	管道(加热炉管出口)	φ200×13	1¼Cr-0.5Mo	500	38	40800小时	焊接完善,热应力 8800磅/吋 ²

注:① 焊接部位破损位置均与熔合线平行。

② 压力差调整装置的取出口。

2. 设计和施工上的考虑

异种金属焊接破坏的性质从上述例子中可知,大致能分为三类。

(1) 热影响区脱碳层的裂纹:由于边界附近显著的硬度梯度和脱碳层的容易变形,使表面生成的氧化膜发生剥离,受到腐蚀。导致腐蚀裂纹的产生,是一种腐蚀疲劳裂纹。在400℃以下不会发生破坏。另外这种裂纹在焊接部位反复出现轴向应力较大的地方较多。

(2) 焊接边界的裂纹:在硬度梯度非常大时发生,厚度大时会出现这种裂纹。

(3) 熔敷金属内过渡带的裂纹:由于晶界脆化、选择性腐蚀和热应力而发生裂纹。

因此为了防止异种金属焊接接头的损坏,若在设计 and 施工时着手解决以上问题,就会获得改善。防止措施可基本上考虑以下几点:

(1) 为减轻热应力发生,采用高镍铬系焊接材料。

(2) 为尽量减少碳的迁移,选择添加有钛、钒等的母材。如不可能,则在与铁素体钢母材同系的焊接材料中添加钛、钒,进行预堆边焊,然后进行异种金属焊接。另外,使用温度应尽量低些。

(3) 为使硬度梯度尽量平缓,可选定使过渡带的宽度加大的焊接工艺。

(4) 为使硬度梯度减少而进行温度控制。但是后热处理延长,会发生由于碳的迁移和热膨胀差而引起的二次弊害。

(5) 在壁厚相差较大处,不适宜作为异种金属焊接的接头。轴向应力较小之处,可作为接头。此外,以振动不大的结构与有振动的相比较,应选振动较小处作为接头。

必须把以上几点作为基本概念来考虑异种金属焊接。下面谈一下施工时材料的组合、焊接材料的选定、热处理条件、焊接裂纹以及组织变化等。

(1) 材料组合:关于异种金属焊接的组合和施工的例子,目前在各种工业装置部门中有很多经验。例如,炼油工业中在单层金属对接焊、复合钢、堆焊、衬里的施工中都可以看到各种材料的异种金属焊接的组合。材料组合的现状可按上述分类叙述。

① 对接接头：异种金属焊接的焊缝坡口为V型、X型、Y型、U型，常用于装置的管道等对接接头。化工装置中常用的材料有低碳钢、钼钢、铬钼钢、高强度钢、低温用钢、不锈钢、镍基合金等。这些金属材料之间常用的焊接组合示于表2。

表2 异种钢焊接接头的组合例

母 材	incoloy 800	HK40	SUS316	SUS321	SUS304L	SUS304	9.0Ni 钢	3.5Ni 钢	2.5Ni 钢	铝镇静钢	高强度(50 kg/mm ² 级)	9Cr-1Mo 钢	7Cr-0.5Mo 钢	5Cr-0.5Mo 钢	2¼Cr-1Mo 钢	1¼Cr-0.5Mo 钢	1Cr-0.5Mo 钢	C-0.5Mo 钢
碳素钢										○	○			○	○	○	○	○
C-½Mo 钢														○	○	○	○	○
1Cr-½Mo 钢														○	○	○	○	○
1¼Cr-½Mo 钢														○	○	○	○	○
2¼Cr-1Mo 钢		■	■	■		■						○	○	○	○	○	○	○
5Cr-0.5Mo 钢	■	■										○	○	○	○	○	○	○
7Cr-0.5Mo 钢												○	○	○	○	○	○	○
9Cr-1Mo 钢												○	○	○	○	○	○	○
高强度(50 kg/mm ² 级)										○	○	○	○	○	○	○	○	○
铝镇静钢								○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2.5Ni 钢							●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3.5Ni 钢							●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
9.0Ni 钢						■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SUS304		●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
SUS304L			△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
SUS321	●		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
SUS316	●	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
HK40	●	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
incoloy 800	●	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

表中○者表示同种金属之间焊接的组合，这种场合可以用相当于合金含量较低者化学成分或者处于二者之间化学成分的焊接材料进行焊接。于此两种中，应根据使用条件选用其中一种。

■者为异种金属之间的焊接，需要考虑受到母材稀释的焊缝金属的耐裂纹性、韧性和热疲劳等，然后选定焊接材料进行焊接。这种场合，使用条件也是选定的标准之一，特别是高温使用的场合，必须考虑热膨胀系数、高温韧性以及组织稳定性。

●者是同种金属之间或同种材料之间的焊接，但因考虑接头部位的韧性、强度等因素，在

焊接材料上使用异种金属的例子。

△者是奥氏体不锈钢之间的对接焊，而焊接材料是采用与任一母材成分相近的例子，从广义上解释亦是异种金属焊接。

此外，关于铬钼钢等有淬硬倾向材料的焊接，如施工时不得已必须省去焊后热处理时，可使用奥氏体不锈钢焊条或高镍铬系焊条。关于这方面，此处从略。

上述各种的焊接方法，可采用手工电弧焊、二氧化碳保护焊、MIG 焊等。而使用手工电弧焊时，亦有对与工艺流体接触的底层焊接采用 TIG 焊的。

② 复合钢板：为了保证容器结构材料的耐蚀性，在化工装置上往往采用轧制或爆炸复合使耐蚀金属材料在与腐蚀介质接触的一面复合上去。关于管道方面，也有采用爆炸复合钢管的例子。

复合钢的基层是用碳钢、铬钼钢、高强度钢等，复层材料采用不锈钢、镍、镍基合金、铜、铜合金、钛等各种耐蚀金属材料。

其中，钛复合钢、镍和镍合金复合钢按日本锅炉协会^[3]，不锈钢复合钢按日本高压技术协会和不锈钢协会^[4]提出的制造标准或加工标准作为施工方法的指针。

焊接方法：母材侧用手工电弧焊、埋弧焊、二氧化碳气体保护焊，复层侧当复层为不锈钢、镍、镍基合金时手工电弧焊或氩弧焊(MIG、TIG)，复层为钛时用氩弧焊或等离子弧焊。

焊接接头的形状，对不锈钢、镍和镍基合金复合板一般采用图 1 所示的形状。

板 厚	从母材侧先焊	从复层侧先焊
≤15 mm		
16~22 mm		
23~38 mm		
>38 mm		
复合比特别大或预先加工焊缝坡口困难时		

图 1 复合钢板接头形状 (mm)

复合板的焊接，原则上在母材焊接之后进行，但这时候对靠近边界部位的母材的焊接应特别注意，必须使之不将复层和熔敷金属熔合一起。

③ 堆焊：化工装置中，与复合钢板同样的目的，也有在与腐蚀介质接触的表面或磨损

显著的表面进行堆焊。母材大多是碳钢、铬钼钢，堆焊材料为各种不锈钢、铜合金（铜镍、铝青铜）、镍、钴铬钨合金等。

焊接方法随焊接部位的形状、面积而不同，一般以不锈钢为主的堆焊采用手工焊、带极堆焊、多极堆焊、MIG 脉冲电弧焊等方法；硬质合金堆焊用手工焊、气焊、气体保护焊、埋弧焊等方法。

堆焊是以没有裂纹、熔合不良等焊接缺陷和使用时不发生腐蚀裂纹等二次损伤为基本条件。因此，对焊接材料和焊接工艺的选定要根据堆焊部位化学成分变化、焊接部位的冷却速度、焊后热处理等各个角度进行慎重的考虑。

④ 衬里：金属衬里通常是把不锈钢连接在设备的壳体、封头和接管上，其中奥氏体不锈钢按不锈钢协会^[4]焊接施工标准制造。

此外，尚有有色金属如铝、钼、钛、镍、蒙乃而合金等的衬里。衬里材料一般以薄板居多。当板厚在 2~3mm 以下时，最好采用 TIG 焊、电阻焊、等离子焊方法；板厚超过 2~3mm 者，也可如不锈钢那样采用手工电弧焊。

衬里材料的连接方法有如图 2 所示的几种^[5]。选择时应根据与耐蚀性有关的焊接部位的稀释和与耐压有关的强度、分离等要求分别考虑。

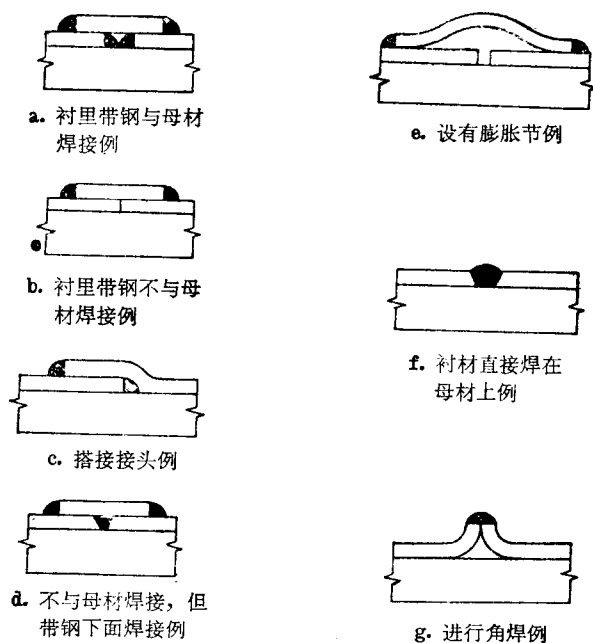


图 2 衬里方法示例^[5]

除了在衬里材料上钻孔，在开孔部分于母材上进行塞焊外，焊接采用对接接头或搭接接头。对接接头用材少、强度足够最为经济，但因有母材熔入使焊接部位耐蚀性恶化，故有必要使用高成分焊条并调整间隙。搭接接头虽然没有与介质接触部分熔敷金属的稀释问题，接头强度也足够，但因带钢的弯曲加工和搭接部分耗材较多，而且焊接顺序上也有问题。

上述接头形式中，为了保证焊接接头的完好，必须使带钢与壳体贴紧。此外，由于衬里材料与母材的热膨胀系数不同，二者适用的热处理制度不一致，衬里施工后的热处理一般很

困难，通常不进行。

(2) 焊接材料的选定：低碳钢、高强度钢、铬钼钢、低温用钢的手工电弧焊焊条可使用 JIS Z3211、JIS Z3212、WES156、AWS·A5.5-69 标准的焊条。上述这些材料相互组合时，原则上是选择相应等级低的焊条，但也有时，为考虑焊后热处理或使用过程中碳的迁移而选用中间组织的焊条。表 3 为 AWS 推荐的对应于各种组合的适用焊接材料^[6]。碳钢和低合金钢的组合就反映了这种观点。

表 3 对应于各种母材组合的适用焊条^[6]

注：A：碳钢(E7016、E7018)
B：C-0.5Mo(E7016-A1、E7018-A1)
C：1¼Cr-0.5Mo(E8016-B2、E8018-B2)
D：2¼Cr-1Mo(E9016-B3、E9018-B3)
E：5Cr-0.5Mo(E502-15)
F：9Cr-1Mo
G：(1) 受循环，而且进行焊后热处理时
(75Ni-16Cr-7Fe)
(2) 不受循环，在 427℃ 以上使用时
(75Ni-16Cr-7Fe、25Cr-20Ni、25Cr-12Ni)
(3) 受循环，在 427℃ 以下使用时
(25Cr-12Ni、25Cr-20Ni、29Cr-9Ni、75Ni-16Cr-7Fe)

母 材	18-8	9Cr-1Mo	7Cr-0.5Mo	5Cr-0.5Mo	2¼Cr-1Mo	1¼Cr-0.5Mo	1Cr-0.5Mo	C-0.5Mo
碳 钢	G	C D	C D	C D	B C	A B	A	A
C-0.5Mo	G	C D	C D	C D	B C	B	B	
1Cr-0.5Mo	G	C D	C D	C D	C	C		
1¼Cr-0.5Mo	G	C D	C D	C D	C			
2¼Cr-1Mo	G	D	D	D				
5Cr-0.5Mo	G	E	E					
7Cr-0.5Mo	G	F						
9Cr-1Mo	G							

由于 7Cr-0.5Mo 钢的焊条(E7Cr-16)以后要标准化，所以 7Cr-0.5Mo 与 9Cr-1Mo 的焊接最好采用这种焊条。另外，该表中虽不明确，但在炼油装置的管道等所用的铬钼钢焊接接头(直管对接，法兰与接管的焊接)中，在不得已必须省去焊后热处理的场合使用了高镍铬系或 309 型 (25Cr-12Ni) 奥氏体不锈钢焊条是现实的。最近基于使用环境，在 400℃ 以上使用时，为防止碳的迁移和热应力出发，已使用了高镍铬系焊条。

其次，以堆焊为代表，将不锈钢焊接在碳钢、低合金钢上时，应以塞弗勒组织图为根据，从其熔深率来研究焊缝金属的组织，选定焊接材料。这种关系示于图 3、图 4^[8]。这是把母材及焊条的化学成分中铁素体生成元素铬、钼、硅、铌换算为当量铬来表示，把奥氏体稳定元素镍、锰、碳换算为当量镍来表示。根据二者的二维座标来推断其金属组织。由此，将二点(母材及焊接材料)用直线连接，确定熔深率，则由杠杆关系在直线上确定点的位置，由此点即可明确焊缝金属部分的组织。表 4 为根据图 3、4 的组织图将奥氏体不锈钢与碳钢或 2¼Cr-1Mo 钢进行焊接时的熔深率与焊缝金属组织的各自界限^[8]。

因此，焊缝金属组织是随熔深率而变化的，所以必须考虑母材对焊条的熔深率来选定焊条。

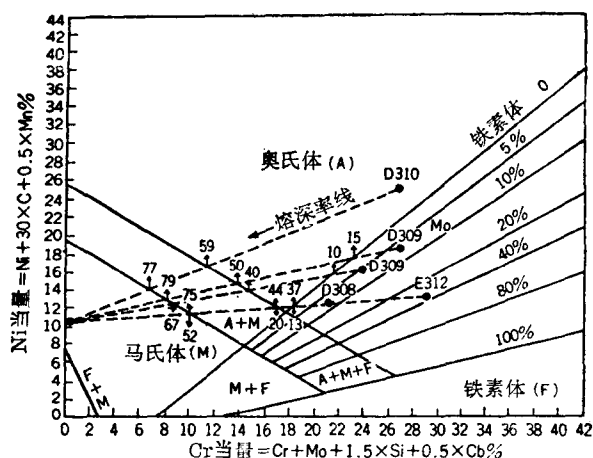


图3 碳钢(A105 I)与各种不锈钢焊条的焊缝金属组织图^[8]

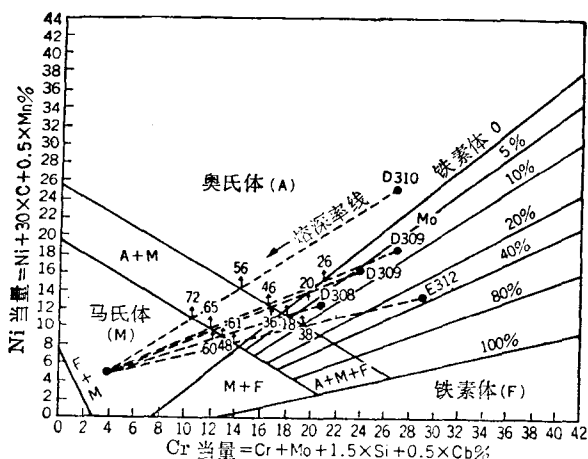


图 4 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 钢与各种不锈钢焊条的焊缝金属组织图^[8]

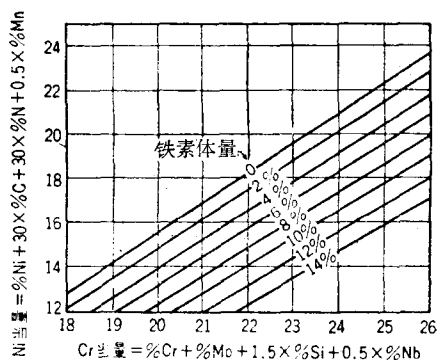


图 5 Delong 组织图^[9]

另外，奥氏体不锈钢的焊接材料，一般为防止热裂纹，使之含有5~10%铁素体是适宜的。这是因为铁素体量少时不能防止焊接裂纹，而多时又会象后面所讲的那样，由于热处理条件而导致脆化，所以为了决定铁素体量，材料的设计是极为重要的。这种铁素体量，在上述塞弗勒组织图和氮含量多的熔敷金属的情况下有时用图5所示的DeLong组织图来决定熔敷金属的化学组织，亦可用磁力法来求出。

因此, 铬钼钢与奥氏体不锈钢进行焊接时, 可根据使用条件, 采用 AWS 推荐的焊条 (见表 3), 在焊接接头时可适当选择高镍铬系或 309 (25Cr-12Ni) 型焊条。在堆焊时, 还可使用 309Nb 型、347 型奥氏体不锈钢。铬系不锈钢焊接材料主要用于堆焊, 过去 13Cr、18Cr 系不锈钢的焊接缺少适当的焊接材料, 现在日本已研制了含有少量 Nb 的 13Cr、18Cr 焊接材料, 具有微细的铁素体组织和焊接性能良好的特性。表 5 即为 13Cr-Nb 及 18Cr-Nb 焊条的化学组成例^[10]。现在, 13Cr 系的第一层堆焊一般都使用 18Cr-Nb 焊接材料。但是, 即使是 18Cr-Nb 焊条, 根据母材的种类 (如为高碳钢) 和稀释的程度也会出现显著的硬化, 发生如后所述的延迟裂纹。所以使用时应十分注意。

表 4 异种焊接金属的组织与熔深率(%)的关系^[1]

接头种类与焊条 焊缝金属的组织	炭 钢 与 不 锈 钢 焊 条				2¼Cr-1Mo 钢 与 不 锈 钢 焊 条				
	D308	D309	D309Mo	D310	D308	D309	D309Mo	D310	D312
奥氏体-铁素体	<13	<10	<15	—	<18	<20	<26	—	<38
纯奥氏体	13	10	15	<59	—	20	26	<56	—
部分马氏体	20	40	50	59	18	36	46	56	38
完全马氏体	>52	>67	>79	>77	>48	>60	>65	>72	>61

表 5 Cr13Nb、Cr18Nb 焊条的化学成分^[10]

钢 种	焊 缝 金 属 化 学 成 分				
	C	Si	Mn	Cr	Nb
13Cr-Nb (CR40Cb)	0.09	0.38	0.48	13.5	0.83
18Cr-Nb (CR43Cb)	0.09	0.40	0.48	17.8	0.80

也有从对海水的耐蚀性角度考虑采用铜、铜镍合金、铝青铜进行堆焊。铜合金的焊接材料,手工电弧焊有 JIS Z3231、AWS·A5.6-69,焊丝有 AWS·A5.7-69 标准。虽然几种合金有所差异,一般铜与铜合金导热性好,导致焊接热量急速逸散,故焊缝金属

的熔合性差,致使焊接操作比较困难,容易产生熔合不良等焊接缺陷,这些情况应予注意。

镍、蒙乃而、因科镍合金及海氏合金的焊条在 JIS 中尚无标准,在 AWS 中对手工焊条有所规定(AWS·A5.14-69)。表 6 为异种金属焊接用镍与镍基合金焊接材料的示例^[11]。其中高镍铬系,如前所述,除堆焊外,在低合金钢的焊接,不锈钢与铬钼钢的焊接中经常使用。这里必须注意,镍、蒙乃而、因科镍合金除主成分外,从强度、焊接性能的角度考虑已添加了少量的铝、钛。使用这类焊条时,应注意到来自母材(碳钢、低合金钢)的铁的稀释将使机械性能、耐蚀性恶化,同时容易产生焊接裂纹。

表 6 异种金属焊接用镍基合金焊接材料^[11]

材 料 组 合		手 工 焊 焊 条		填 充 丝
蒙乃而合金	钢	ENiCu-1	ERNiCrFe-2	—
	不 锈 钢	ERNiCrFe-2	ENi-1	—
	70-30 铜镍合金	ENiCu-4	70-30Cu-Ni	ERNiCu-7、70-30Cu-Ni
	海氏合金 B	ENiCu-4	ENiCu-1	—
镍	钢	ENi-1	ENiCrFe-2	ERNiCrFe-5、ERNi-3
	不 锈 钢	ERNiCrFe-2	ENi-1	ERNiCrFe-5、ERNi-3
	蒙 乃 而	ENiCu-4	ENi-1	ERNiCu-7、ERNi-3
	70-30 铜镍合金	ENiCu-4	70-30Cu-Ni	ERNi-3、ERNiCu-7、70-30Cu-Ni
	海氏合金 B	ERNiCrFe-2	ENi-1	—
因科镍合金或 耐热镍铬铁 合金(incoloy)	钢	ERNiFe-2	ENi-1	ERNiCrFe-5
	不 锈 钢	ERNiFe-2	ENi-1	ERNiCrFe-5
	蒙乃而合金	ERNiFe-2	ENi-1	—
	镍	ERNiFe-2	ENi-1	ERNiCrFe-5、ERNi-3
	70-30 铜镍合金	ERNiFe-2	80-20Ni-Cr	—
	海氏合金 B	ERNiFe-2	ENiMo-1	—

(3) 热处理条件:在不锈钢与低合金钢的焊接时,为消除残余应力或改善组织,有时要进行焊后热处理,但在这种温度条件下进行处理时常适得其反。另外,如前所述,奥氏体与

铁素体组合时,经长时间的热处理会引起碳的迁移和发生热应力。因此确定异种金属焊接的热处理条件极为重要。以下谈一下异种金属焊接时预热和焊后热处理的问题。

炼油装置从耐腐蚀性和高温强度的角度考虑,在铬钼钢之间的异种钢焊接时必须进行预热和焊后热处理。根据 AWS 的推荐,预热与焊后热处理温度都是采用与等级较高的材料相适应的温度,其中焊后热处理温度也有认为最好采用选定的焊接材料或与等级低的材料相适应的温度,尚无定论。应当充分考虑使用条件后慎重地决定。为供参考,将通常采用的预热温度示于表 7,将各种标准规定的焊后热处理温度示于表 8^{[12],[13]}。由于各标准的热处理温度有些不同,因此选择时,必须经过考虑。

表 7 预热温度

材料简称	预热温度(℃)
C-0.5Mo 钢	50~200
1Cr-0.5Mo 钢 1¼Cr-0.5Mo 钢	150~300
2¼Cr-1Mo 钢 5Cr-0.5Mo 钢 7Cr-0.5Mo 钢 9Cr-1Mo 钢	200~350

表 8 各种标准规定的焊后热处理温度^{[12],[13]}

P 序号	钢 种	ISO-TC11	ASMEⅧ-1	ASMEⅧ-2	JIS Z370①	发电 68 年	原子能71年	HPI 25R②	
								A	B
P1	碳钢	550~600	≥593	≥593	625±25	≥595	≥595	550~600	
P1	调质钢	小于回火温度			小于回火温度			—	
P3	C-0.3Mo	580~620	≥593	≥593	625±25	≥595	≥595	—	
P3	C-0.5Mo	580~620	≥593	≥593	625±25	≥595	≥595	≥590	
P3	0.5Cr-0.5Mo	620~660	≥593	≥593	700±25	≥595	≥595	≥590	
P4	1Cr-0.5Mo	620~660	≥593	≥593	700±25	≥595	≥595	≥590	≥620
P4	1¼Cr-0.5Mo	620~660	≥593	≥593	700±25	≥595	≥595	≥590	≥620
P5	2¼Cr-1Mo	625~750②	≥677	≥677	700±25	≥680	≥680	≥650	≥675
P5	5Cr-0.5Mo	670~740②	≥677	≥677	700±25	≥680	≥680	≥675	≥700
P5	7Cr-0.5Mo		≥677	≥677	700±25	≥680	≥680	—	
P5	9Cr-1Mo		≥677	≥677	700±25	≥680	≥680	≥675	≥700

注: ① 根据重新估计,准备修正。

② 在各种情况下,均为±20℃。

③ A: 为发挥适用钢材的高温强度、耐腐蚀性的特点而使用的场合。

B: 对强度要求低,耐腐蚀性亦无需特别考虑的场所。

铬钼钢与奥氏体不锈钢的异种钢焊接如前所述是用高镍铬系(如因科镍合金)或 309 型奥氏体不锈钢。根据 AWS 的推荐,对 ½Cr-½Mo 钢以上的铬钼钢,预热温度为 93~263℃。

表 9 使用奥氏体不锈钢焊条时的预热温度

材 料	预热温度(℃)
C-0.5Mo	20~100
1Cr-0.5Mo 1¼Cr-0.5Mo	50~150
2¼Cr-1Mo 5Cr-0.5Mo 7Cr-0.5Mo 9Cr-1Mo	100~200

焊后热处理为对 5Cr-½Mo 钢以上时,且施焊厚度在 ½ 吋(12.7mm)以上时进行。由于使用奥氏体不锈钢焊接材料主要可减轻对焊接部位延迟裂纹的担心,并从防止焊缝金属的热裂纹角度出发,Cr-Mo 钢的预热温度无需达到象铬钼钢之间焊接时那样高的温度。表 9 所示为通常采用的预热温度范围。

进行焊后热处理时,如以铬钼钢侧为对象进行,对于奥氏体不锈钢有进入析出碳化物或发生σ相脆性温度范围的危险,为此应考虑省去焊后热处理或只进行低温下消除应力的退火,或使用低碳型或稳定化型奥氏体不锈钢。

13Cr 系堆焊的第一层一般使用 18Cr-Nb 焊条,并要求进行适于母材的预热和焊后热处理。但 18Cr-Nb 因有 475℃ 脆性的危险,故必须对冷却条件等充分加以考虑。

不锈钢衬里材料的焊接原则上不进行预热和焊后热处理。

(4) 焊接裂纹:

① 延迟裂纹: 铬钼钢或高强度钢当进行了不适当的焊接时,主要由于溶解于钢中的扩散性氢而发生裂纹。此外据报导,用 13Cr-Nb 焊条在低碳钢上堆焊时会发生延迟裂纹^[14]。这种裂纹与低碳钢或高强度钢的焊接裂纹相比,在焊接后要经过比较长的时间后才有扩展。

延迟裂纹的原因是焊缝金属的骤冷而引起的淬火组织,焊接部位的拘束应力和焊缝金属中的扩散性氢。这种裂纹比其它裂纹延迟的一个原因是高铬钢中氢的扩散速度较慢所致。

防止延迟裂纹的措施是焊接材料的充分干燥、母材的适当预热和拘束度的减轻等。

② 热裂纹: 焊接奥氏体不锈钢时,一般使其含有百分之几的铁素体,以防止焊接时的热裂纹。使用按适当铁素体含量设计出来的焊接材料、如焊接施工方法错误也会使铁素体量减少,发生裂纹。例如手工焊时若各焊道的搭接量少,则熔深率就会增加;另外电弧较长时,又会带入过剩的氮使铁素体量减少等,这些施工技术上的问题需要仔细地考虑。当然,硫、磷、硅等杂质对热裂纹也有很大影响。

镍和形成固溶体的铜、铬、钴等元素对镍和高镍合金的热裂纹几乎没有影响。但硫、磷、硅等元素因其不与镍固溶,故作为低熔点的杂质浓缩于晶界,成为热裂纹的起因。另外,铝、钛、硅、碳等对镍、蒙乃而合金、因科镍合金的热裂纹也有较大影响。为了改善熔敷金属的机械性能应添加适量的铝、钛。但据认为,手工焊时由于焊药中的 SiO_2 被铝、钛还原,因此随着熔敷金属硅量的增大就会损害铝、钛的功能。而且有时由于氧的影响,使镍氧化物在晶界析出。

(5) 组织变化: 组织变化与热处理条件或使用条件有关,但由于焊接边界碳的扩散而生成脱碳层、渗碳层,同时引起脆化以及由于熔敷金属中的碳化物析出、 σ 相生成等而引起脆化。

① 脱碳层、渗碳层: 用不锈钢焊条焊接碳钢或低合金钢的母材时,在焊缝边界两边会产生铬浓度梯度。另外,众所周知在母材中的碳与熔敷部分的铬之间有亲和力,因而高温加热时会相邻地生成碳化物和脱碳层^[15]。焊接材料使用 310 型、309 型、347 型等奥氏体不锈钢时尤为显著。这种脱碳层的硬度有时达到威氏硬度 400 以上。

另一方面,应当注意在较多使用的高镍铬系焊条的场合,虽然由于铬量少而且镍含量高不易发生碳的迁移。但在高温下热处理时会生成脱碳层、渗碳层。

② 475℃ 脆性、碳化物析出、 σ 相脆化: 这些脆化主要是根据母材的要求进行热处理后,焊缝金属产生的脆化。

表 10 为 18Cr-Nb 熔敷金属发生 475℃ 脆性的情况^[10]。所以对焊后热处理应充分考虑。

表 10 13Cr-Nb、18Cr-Nb 焊缝金属经 475℃ 长期加热后的冲击值^[10] (2 mm U 形缺口 kg-m/cm²)

焊接材料	热 处 理	试验温度 ℃	475℃ 加 热 时 间 (小时)					
			0	10	50	200	1000	2000
13Cr-Nb (CR40Cb)	850℃ 2 小时缓冷 至 600℃ 随后空冷	20	18.9	17.7	20.8	21.2	22.3	23.3
			21.9	21.6	21.2	20.1	21.6	25.2
18Cr-Nb (CR43Cb)	770℃ 4 小时缓冷 至 600℃ 随后空冷	60	14.0	12.1	8.3	0.8	—	—
			13.6	14.4	9.1	0.5	—	—

表 11 为 347 型奥氏体不锈钢堆焊时, 不同含铬量与铁素体量在热处理后的脆化情况^[16]。经过 690℃ 或 720℃ 的热处理后在铁素体量 10% 以上, 含铬量 20% 以上时显著脆化。其原因是 σ 相的析出、脱碳层、渗碳层等; 进行堆焊时, 对使用焊接材料的选择和热处理方法 (尽可能在低温和短时间下施工) 应充分加以研究。

表 11 含 Cr 量、铁素体量不同的 347 焊接接头®热处理后侧弯试验结果^[16]

焊接材料含 Cr 量 (%)	焊接材料的铁素体量 (%) ^①	热 处 理 条 件					
		690℃ 30 小时			720℃ 30 小时		
18.53	5	○ ^②	○	○	○	○	○
18.95	7	○	○	○	○	○	○
19.56	8	○	○	○	○	○	○
20.24	11	○	○	70° 裂	○	180° 裂	180° 裂
21.46	14	180° 裂	90° 裂	60° 裂	60° 裂	50° 裂	70° 裂

注: ① 根据塞弗勒组织图的铁素体量。

② ○表示无缺陷。

③ 采用 19-9-Cb 带钢和试制烧结型焊剂, 含 Cr 量不同的焊缝金属。用带极堆焊法在 2¼Cr1Mo 钢母材上堆焊一层者 (C 0.047~0.049, Mn 1.42~1.47, Si 0.46~0.49, Ni 9.45~9.85, Nb 0.59~0.63)。

镍或蒙乃而合金在碳钢或低合金钢上堆焊后有时进行高温消除应力退火 (600~650℃)。这些焊接材料中, 虽主要为了改善机械性能添加了铝、钛, 但要注意由于析出硬化而导致机械性能降低^[17]。

3. 小结

本文是以炼油装置为主体, 对异种金属焊接部位的损伤例子以及设计和施工上的考虑简单地作了介绍。本文述及的化工装置中的异种金属焊接, 除对接接头外包括堆焊和复合钢板的焊接均已大量使用。但这些异种金属焊接从技术上来看, 还不能完全满足, 特别是对接接头的异种金属焊接, 由于边界附近的显微组织变化、热膨胀系数之差、边界部位的脆化以及腐蚀等问题产生了各种损伤。另一方面, 异种金属焊接对化工设备是不可避免的, 为此解决目前存在的问题乃是必要的。

参 考 文 献

- [1] 石油学会志 8 (1965) 6, p 458。
- [2] JAERI-memo 2716, 日本原子能研究所 昭和 42 年 6 月 20 日。
- [3] ボイラ研究 126 号。
- [4] JSSA/SC №2 ステンレス鋼溶接施工基準, ステンレス協会 昭和 47 年。
- [5] 溶接学会志, 40 (1971) 2, p 121。
- [6] A. W. S. Welding of Chromium-Molybdenum Steel Piping, A Committee Report, A. W. S. D10, 8-61。
- [7] Metal Progress, 56 (1949) 680, 680B。
- [8] 溶接技术, 21 (1973) 6, p 33。
- [9] Welding Journal 35 (1956), p 521. S。
- [10] 溶接学会志 40 (1971) 2, p 98。
- [11] 溶接ハンドブック。
- [12] 压力技术, 10 (1972), 5, p 18。
- [13] 第 554 回工経連講座, “应力除去焼鈍に関するシンポジウム”資料, 昭和 47 年。
- [14] 三菱重工技報, 3 (1966) 2, p 155。
- [15] 溶接学会志, 32 (1963), 205。
- [16] 溶接技术, 17 (1969) 9, p 49。
- [17] 溶接協会, 第 41 回溶接冶金研究委員会資料, 1970 年。