

# 异种钢熔合区马氏体脆性层的消除<sup>\*</sup>

王爱珍<sup>1</sup>, 张太超<sup>2</sup>, 赵红岩<sup>3</sup>

(1. 郑州轻工业学院 郑州 450002; 2. 中原工学院 郑州 450007; 3. 郑州煤矿机械厂, 郑州 450007)

**摘要:** 利用磁性测定仪、光学显微镜和扫描电子显微镜, 分析了 1Cr18Ni9Ti 与 15CrMo 钢的焊接性能, 研究了其接头在常温和长期高温下出现马氏体脆性层的主要因素, 探讨了不同焊接材料和工艺对异种钢接头成分、组织和性能的影响规律, 以及不同状态下异种钢接头马氏体脆性层宽度变化的规律, 提出了一种在 1Cr18Ni9Ti 与 15CrMo 接头的 15CrMo 一侧的坡口表面上, 预堆敷 8 mm 厚自研制的 NR417 过渡层, 后熔敷 A307 复合合金的有效方法。此方法彻底消除了异种钢熔合区在常温和高温下的马氏体脆性层, 不仅解决了氨合成塔下出口管与配管的异种钢焊接问题, 而且对其它化工压力设备上异种钢接头的焊接具有一定的参考价值。

**关键词:** 奥氏体钢; 珠光体钢; 马氏体组织; 脆性层

中图分类号: TG421 文献标识码: A 文章编号: 0253—360X(2001)04—58—05

王爱珍



## 0 序 言

河南某化肥厂氨合成塔的 1Cr18Ni9Ti 钢出口管与 15CrMo 钢配管的焊接接头, 因在 450~550 °C 的高温和三种气体介质 H<sub>2</sub> (60%)、N<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 为 9.8 MPa 的高压工作环境中, 长期连续运行而造成接头产生马氏体脆性层和脱碳软化层, 致使管接头在材质劣化和热应力等的综合作用下突然脆性断裂, 不仅毁坏设备, 造成了重大经济损失, 还造成了灾难性后果。针对这一问题作者分析研究了 1Cr18Ni9Ti 与 15CrMo 钢的焊接接头寿命, 制作了模拟试样, 测试了不同焊接材料及工艺对异种钢接头组织和性能的影响规律, 希望能研究出一种较为理想的焊接材料和工艺, 以便保证设备长期安全运行, 防范这类破坏于未然。

## 1 异种钢焊接性能分析

对于 1Cr18Ni9Ti 与 15CrMo 钢的焊接, 因其组织状态完全不一样, 化学成分差别很大(见表 1), 在焊接时有可能出现以下几个问题<sup>1</sup>。

(1) 15CrMo 钢是导磁体, 1Cr18Ni9Ti 是非导磁体, 在用直流电源进行焊接时, 将出现严重磁偏吹, 以致影响焊接质量。

(2) 1Cr18Ni9Ti 钢的热膨胀系数比 15CrMo 钢大 1/3 倍, 焊后冷却收缩不一致, 会产生较大的热应力, 从而引起严重的变形或熔合线开裂。

(3) 15CrMo 钢要求焊后 680~730 °C 的高温回火来提高其蠕变抗力, 然而 1Cr18Ni9Ti 钢在此温度区间(450~850 °C)恰是产生晶间腐蚀的敏化温度区间。需短时加热至 850~900 °C 时才能稳定化处理。因此, 两种钢的热处理规范相差太大, 焊后无法进行热处理。

(4) 异种钢焊缝填充金属成分不当时, 低合金母材 15CrMo 钢的熔入, 使焊缝的合金成分被稀释, 导致焊缝中奥氏体形成元素含量不足, 焊缝出现马氏体淬硬组织, 从而使整个焊接接头的性能下降。

(5) 异种钢接头处于高温运行过程中, 靠近熔合线的 15CrMo 钢中的渗碳体发生分解, 所形成的自由碳原子若无障碍时, 将通过熔合线扩散到焊缝中, 并在靠近熔合线的焊缝一侧, 形成热力学上比较稳定的增碳层和母材边缘脱碳软化层。由于二者变形阻力不同, 将引起应力集中, 从而降低接头高温持久强度和塑性, 使接头可能沿熔合区产生破坏<sup>2</sup>。

## 2 模拟试验与结果

### 2.1 焊接材料的选择

根据氨合成塔下出口管与配管接头结构要求, 采用手工电弧焊焊接。为克服 15CrMo 钢对焊缝的稀释作用, 减少焊缝中马氏体脆性层的宽度, 选用奥氏体化能力强的镍含量大于 12% 的 25—13 型不锈

钢焊条作为填充材料,以便将焊缝控制为 $\gamma+\delta$ %双相组织,来提高焊缝的抗裂性能。同时选用了既能阻碍碳的扩散,又能减小异种金属热膨胀系数差的R417和自行研制的NR417焊条与A307焊条作复层焊对比试验<sup>[3]</sup>。

试验结果表明,选用NR417和A307焊条复层焊接头效果最好。不仅使焊缝获得了 $\gamma+\delta(5\% \sim 6\%)$ 双相组织复合合金,还使熔合区内的扩散层有不同程度的减小或消除(见表1,母材与焊材的熔合比为0.35/0.65;第一至三组焊缝选用小规范焊接,焊后状态;第四至五组焊缝选用大规范焊接,四组为焊后状态,五组为热处理状态)。而且还改变了接头的应力分布,防止了裂纹。因此可作为氨合成塔异种钢接头的试制焊接材料。

## 2.2 焊接工艺的拟定

模拟产品试验采用150 mm×100 mm×18 mm钢板对接,开单V型坡口,坡口角度不小于60°,先用NR417焊条在15CrMo钢一侧的V型坡口上堆焊一层8 mm厚的过渡层,再用A307焊条正面坡口内焊四层,背面清根后再焊两层,使接头内外全焊透,焊缝成形均称,无缺陷,X射线透视未发现气孔或其它缺陷。共焊成四组试板,每组试板一律横向取样。按照测试要求制成各种规格的试样,并分类

表1 试验材料和焊缝Cr、Ni当量及组织

Table 1 Cr<sub>eq</sub> and Ni<sub>eq</sub> and organization of test material and weld

Join t	Material	Cr <sub>eq</sub> (%)	Ni <sub>eq</sub> (%)	Organiz ation content(%)	Diffuse layer
Base metal	1Cr18Ni9Ti	19.05	14.35	A	—
	15CrMo	1.50	4.50	M	—
Electrode	A307	25.70	16.73	A+F(8%)	—
	R417	4.62	3.55	M	—
Weld	NR417	4.67	3.75	M	—
	A307	23.90	17.39	A+F(3%)	Wide
Weld	A307+R417	26.87	19.78	A+F(7%)	Little wide
	A307+NR417	26.95	19.91	A+F(6%)	Little line
Weld	A307+NR417	27.45	21.31	A+F(5%)	Not
	A307+NR417	27.50	21.31	A+F(5%)	Not

编号,其各种工艺参数见表2( $T_p$ 是预热温度; $E$ 是平均线能量;用表面温度计测定层间温度)。

表2 焊接工艺及规范

Table 2 Welding technologie and parameter

Specimen	Base metal	Electrode	Diameter d/mm	Current I/A	In terpass	E/(kJ·cm <sup>-1</sup> )	Treat tem perature T <sub>p</sub> /℃
			Root Layer	2~7 Layer	temperatu re T/℃		
Fifth-one	15CrMo+	R407	φ4	φ4	≥20	18.4	$T_p=230\text{ }^\circ\text{C}$ As-welded-700 °C flashback
	15CrMo		200	200			
Third-four	15CrMo+	N R417+	φ3.2	φ4	≤80	15.2	$T_p\leqslant 200\text{ }^\circ\text{C}$
	1Cr18Ni9Ti	A307	160	160			
Fourth-second	15CrMo+	N R417+	φ4	φ4	≤150	17.5	$T_p\leqslant 250\text{ }^\circ\text{C}$
	1Cr18Ni9Ti	A307	180	180			

## 2.3 异种钢接头化学成分的测试

利用化学成分分析仪和电子显微探针,分析上述五组焊缝焊后状态和热处理状态(模拟氨合成塔工作温度等状态)横断面上熔合线附近的分布元素和偏析杂质,比较不同焊接材料和状态下的熔合区Cr、Ni浓度的变化轨迹(见图1),并与“当量分析法”算出的理论Cr、Ni当量值(见表1)进行对比。

测试结果表明,理论上计算出的熔合区Cr、Ni

当量值与实际探测出的Cr、Ni浓度变化轨迹基本一致。在熔合比相同的条件下,无论采用何种焊接工艺,用复合填充金属获得的熔合区Cr、Ni当量都比单一填充金属高,扩散层小;尤其是用NR417复合大规范焊后和大规范热处理后,熔合区Cr、Ni当量相对最高,没有扩散层(见图1),而焊缝中的Cr含量由于氧化性增加,虽有所减少,但仍不低于1Cr18Ni9Ti钢的含量。

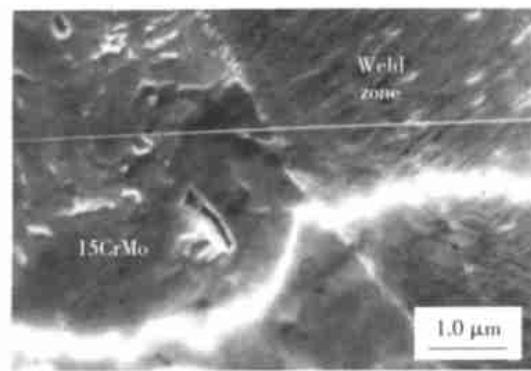


图 1 第四组异种钢接头组织及成分分布

Fig. 1 Organization and ingredient distributed in welded Joint of fourth group

## 2.4 异种钢接头金相组织检验

利用光学和扫描电子显微镜, 对上述五组焊缝焊后和热处理后的横断面显微磨片上, 在 15CrMo 钢一侧的熔合区, 进行断口金相检验。观察分析母材、熔合线和焊缝三者的组织变化, 找出易产生脱碳和增碳的区限及组织状态(见图1), 并用磁性测定

表 3 接头力学性能试验

Table 3 Mechanical performance test on welded Joint

Specimen	Heat Treat State	Tensile-Test					$\alpha_{kd}/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$		
		Room temperature $\sigma_b/\text{MPa}$	High Temperature, $\sigma_s/\text{MPa}$		Stack position	Weld	Fuse-Line	HAZ	
			400 °C	500 °C					
Fifth-one	Standard	450	190	162	15CrMo	176	174	163	
	Welded Joint (700 °C flash-back)	501	280	270	Overheated zone	210	181	168	
	Standard	586	380	350	15CrMo	—	190	154	
Third-Four	Welded Joint (As-Welded)	627	464	452	Overheated zone	—	208	170	
	Standard	575	325	297	1Cr18Ni9Ti	—	136	125	
Fourth-Second	Welded Joint (As-Welded)	578	409	399	Overheated zone	—	150	138	

## 2.5.2 弯曲和硬度试验

在弯曲试验时, 取压头直径  $D$  等于板厚的 3 倍, 不论焊缝正弯或反弯 180°弯曲角, 未产生裂纹, 证明其塑性良好。硬度试验(见图 2a)是在 NMT-3 显微硬度计上进行的, 各种试样有相同的规律, 在过热区有一个硬度峰值, 而在部分正火区都有一个硬度下降的低谷(见图 2b)。其中试样 Third-fourth 的硬度峰值最高为 540HV, 最低为 460HV, 而 Fourth-second 的硬度峰值最高为 520HV, 最低却降至 430HV, Fifth-one 过热区硬度值与 Fourth-second 基本相同。但曲线更平缓, 这是由于 Fifth-one 试样经热处理的结果。

仪测得铁素体的真实含量, 与借助舍夫勒组织图得出的焊缝组织状态进行对比。

检验结果是第四组异种钢接头的组织符合要求, 质量最佳。不仅消除了熔合区内马氏体脆性层, 而且测得的铁素体真实含量为 5%, 恰与显微镜下看到的铁素体数量相符, 并且与舍夫勒组织图上得出的结果也一样, 符合异种钢接头抗裂性要求。

## 2.5 异种钢接头力学性能测试

采用上述焊接工艺和所选焊接材料制成的异种钢接头试样与 15CrMo 钢同种接头试样, 分别进行各种性能测试比较。

### 2.5.1 拉伸和冲击试验

拉伸采用板形带肩试样, 结果见表 3, 15CrMo 与 1Cr18Ni9Ti 钢对接接头强度和冲击值均超过或接近 15CrMo 钢同种接头强度和冲击值。试验时, 始终断在母材(15CrMo)一侧, 并且采用小规范时冲击值高, 15CrMo 钢自身接头由于经过热处理, 冲击值较高。

表 3 接头力学性能试验

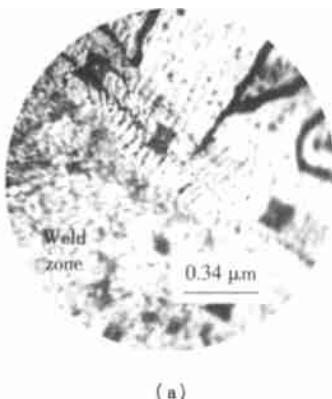
Table 3 Mechanical performance test on welded Joint

## 3 分析与讨论

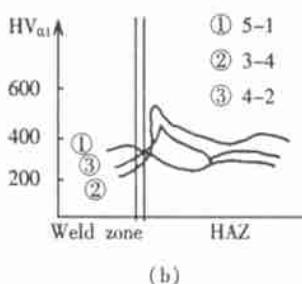
### 3.1 熔敷金属主要成分及含量的影响

#### 3.1.1 碳扩散的影响

试验发现, 在焊接和热处理过程中, 碳从 15CrMo 钢一侧向熔合区强烈扩散是形成马氏体淬硬组织的根本原因。由于碳在  $\alpha$ -Fe 和  $\gamma$ -Fe 中的扩散能力都比其它合金元素高  $10^4 \sim 10^6$  倍, 并且 500 °C 时碳在  $\alpha$ -Fe 中的扩散系数比在  $\gamma$ -Fe 中还要高 835 倍<sup>[2]</sup>。所以 15CrMo 钢熔合区因碳的迁入, Cr、Ni 含量严重偏低, 奥氏体形成数量减少, 碳化



(a)



(b)

图2 焊接接头显微硬度测试及变化趋势

Fig. 2 HV<sub>0.1s</sub> Test on welded joint and its variety tendency

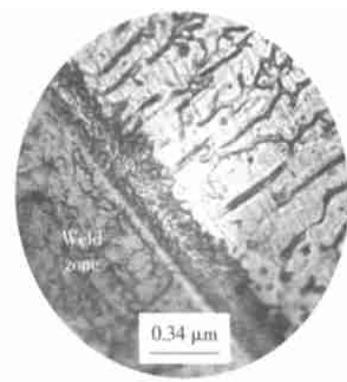
物形成数量增加, 结果在熔合区中形成图3所示的脱碳层和增碳层。因此, 必须采用提高填充材料的奥氏体化能力和阻止碳迁移的方法, 才能较好地抑制碳的扩散。

### 3.1.2 碳化物形成元素含量的影响

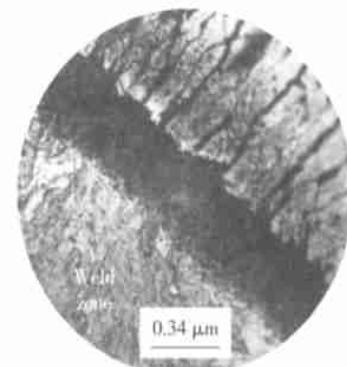
试验证明, 碳化物形成元素 Cr、Mo、V、Nb、Ti 的种类和数量对珠光体钢脱碳层的宽度有不同程度的影响。珠光体钢中弱碳化物形成元素 Cr 含量增加至 6% 时, 能降低和防止扩散层的发展, 减小脱碳层宽度; 强碳化物形成元素 Ti、Nb、V、Mo 的数量足够高时, 可完全把碳固定, 使其存在于稳定碳化物中, 防止碳的迁移, 减小或消除熔合区的脱碳层(见图1)。

### 3.1.3 镍含量的影响

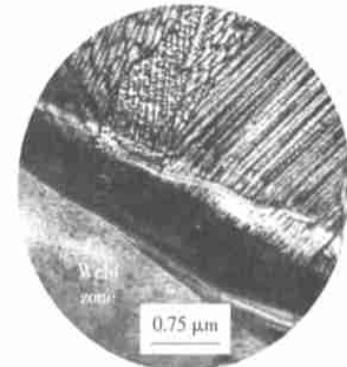
由于镍是决定焊缝奥氏体化最主要的元素, 焊缝中镍的含量对马氏体脆性层有重大影响。当用 18—8 型填充金属时, 由于熔合区镍含量低于 6%~8%, 脆性层宽度比较大<sup>[1]</sup>, 而当使用奥氏体化能力较强的 25—13 和 25—20 型填充金属时, 脆性层宽度将显著缩小。当使用 25—13 型配合强稳定铬钼钢焊条复合填充金属时, 脆性层完全消失。并且, 将大焊接规范下焊成的复合填充金属试样, 重新加热、保温后, 仍未再呈现脆性层, 因此试验证明, 提高焊缝中石墨化元素镍的含量, 在适量强碳化物元素的配合下, 可以降低弱碳化物的稳定性, 削弱其对碳的结合能力, 从而消除扩散层。还可以将稳定碳化物固定在长期高温状态下不分解、不迁移。



(a) 450 °C×36 h



(b) 650 °C×36 h



(c) 750 °C×36 h

图3 不同焊接状态下的异种钢接头马氏体脆性层

Fig. 3 Martensitic shortness layer of dissimilar steel joint in different state

### 3.2 焊接工艺及规范的影响

试验证明, 尽管在化学成分方面作了不少努力, 但当焊接工艺及规范不合适时, 也同样会产生马氏体淬硬组织, 因此必须在焊接工艺上给以足够的重视。焊接工艺和规范对焊缝铁素体数量、熔合区马氏体脆性层及接头力学性能等都有很大影响。

#### 3.2.1 对焊缝铁素体数量的影响

试验表明, 在焊接材料选定后, 焊接规范对焊缝铁素体含量影响最大, 当拉长电弧, 熔入焊缝金属的氧增多, 铁素体形成元素 Cr、Si 剧烈烧损, 从而减少铁素体含量, 增大热裂倾向; 当增大电流密度或预热

温度, 增加焊件的热输入量, 会使焊缝熔合比增大, 稀释程度增加, 铁素体含量减少。因此, 选择焊接规范时, 为使焊缝获得 4%~5% 铁素体, 必须尽量增大坡口角度和焊缝层数, 背面清根再焊; 为防止合金元素烧损, 保证铁素体数量, 必须尽量缩短电弧, 运条不做摆动而以直线前进为宜。

### 3.2.2 对扩散层形成的影响

试验证明, 焊后状态的 A307 单一填充金属异种钢接头, 无论采用何种焊接规范, 扩散层都存在且比较弱, 但若将试样重新加热到 450 °C, 并保温一定时间后, 扩散层就开始明显发展起来(见图 3a), 若再加热到 600~800 °C, 保温一定时间时, 扩散层最为强烈(见图 3b), 随着加热温度的升高、时间的延长, 扩散层逐渐加宽, 脱碳区铁素体组织显著粗大而软化, 增碳区中的碳化物更加长大和坚硬, 形成了较宽的深黑色马氏体脆性带(见图 3c)。然而, 第四组焊缝则不同, 由于 NR417 中足量的 Ti、V、Nb 等强碳化物形成元素, 完全将 15CrMo 中的碳固定在稳定碳化物中, 无论在任何状态下, 彻底抑制了碳的扩散, 消除了熔合区中马氏体脆性层。

### 3.2.3 对马氏体淬硬组织转变的影响

试验中发现, 当采用大规范焊接时, 由于底层焊道的焊接线能量增加, 电流密度增大, 使接头的预热温度升高, 冷却速度减慢, 相应增加了液态金属在高温的停留时间, 加强了熔池内填充金属和母材搅拌作用及熔池边缘金属的流动性, 促使熔合线处 Cr、Ni 含量高于母材, 从而改善了结晶条件, 使熔合区脆性层消失( $M$  和下  $B$  转变为上  $B$ ), 晶内沉淀物尺寸变小, 分布均匀, 避免了裂纹倾向。试验证明, 采取底层焊道预热温度大于 250 °C, 后几层焊道的层间温度控制在 150 °C 左右, 既可以有效地减少热应

力、防止焊根裂纹, 还可以避免熔合区出现脆性层。

当采用小规范焊接时冲击值较高, 但在其熔合线上出现了脆硬的马氏体组织。鉴于合成塔处于高温工作, 要求蠕变性能, 冲击值对接头影响不大, 而接头受影响的是马氏体脆性层, 故采用第四组大规范焊接模拟产品, 经试验效果良好。

## 4 结 论

1Cr18Ni9Ti 与 15CrMo 钢焊接, 采用 NR417 和 A307 焊条焊接时, 不仅接头化学成分和力学性能均能满足使用要求, 而且由于焊材中 Cr 含量的提高, 可促使焊缝金属对总腐蚀和晶间腐蚀具有很高的稳定性; Mo 含量的增加可促进焊缝金属的耐蚀性和抗裂能力。用此研究制成的氨合成塔在长期连续使用过程中, 经省压力容器质检中心按照国家规定检修时间数次停产检测, 其焊接接头的金相组织基本无变化, 均未发现任何微小裂纹。

## 参考文献:

- [1] 王爱珍. 1Cr18Ni9Ti 与 10CrMo910 钢的焊接试验[J]. 郑州轻工业学院学报, 1994, (2): 39~47.
- [2] 周振丰. 金属熔焊原理及工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981. 214~224.
- [3] 王爱珍. 异种钢焊接接头马氏体淬硬层的消除研究[J]. 河北冶金, 1996, (4): 42~46.

**作者简介:** 王爱珍, 女, 1952 年出生, 副教授。主要从事金属材料及制造工艺, 以及防腐与表面处理研究, 曾获河南省科技进步奖 3 项。发表论文 30 余篇。

(编辑: 闫秀荣)

### 网站简介

## 中国技术与投资网 (www.techcn.com)

由科技部科技日报社、科技部高技术发展研究中心、美国宏桥信托投资集团、美国 NOVANIS 公司、北京同创伟业科技有限公司等多家单位共同创办。

该网站建设的目的是为寻找技术、项目、资金、人才、管理的客户, 提供一种新型、有效的信息发布、交流、洽谈、咨询的网上工具, 并采用网下信息咨询与顾问业务相结合的手段, 促进技术与资本对接。网站致力于进行国内外高新技术项目的交易服务, 开展投资银行业务并参与风险投资; 网站充分利用国际互联网的交互功能, 采用信息咨询、投资顾问业务与直接投资相结合的经营手段, 为促进技术、资本、人才和管理的有效结合服务。

公司宗旨: 本着“专业、快捷、实效”的服务信念, 联合社会各种资源和力量, 采用信息咨询与顾问业务相结合的, 促进技术资本对接, 从而加速中国企业引进国际先进技术与管理模式的进程, 推动中国企业的技术进步与产业结构的调整升级, 为实现中国经济增长模式的转变和国际间经济技术的交流服务。

公司目标(1)成为中国最大的技术交易与投资的门户网站。(2)成为国际上知名的在线技术交易和投资发展的网站。(3)成为国际上知名的技术交易、投资发展的顾问管理公司。

(摘自《中国科技信息》)