

石化装置用 16MnR(HIC)钢的焊接

裴红, 张凯, 王迎君

(兰州石油化工机器工程有限责任公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要:评价了新型 16MnR(HIC)钢的焊接性,从钢板的 P_{cm} 、 C_{eq} 以及焊接热影响区最高硬度值法等方面进行了分析;详细介绍了该钢在焊接过程中应注意的焊前准备、焊接规范等事项,同时研究了焊接线能量、退火温度、气割坡口和碳弧气刨以及焊缝返修对焊接接头的影响,并进行了 16MnR(HIC)钢焊接接头的抗硫化物腐蚀开裂试验。

关键词: 16MnR(HIC)钢;氢诱发裂纹;焊接

中图分类号: TG457.11 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-2303(2005)12-0066-04

Welding method of 16MnR(HIC) using in petro-chemical device

PEI Hong, ZHANG Kai, WANG Ying-jun

(CLS Petrochem Machinery Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: This article has evaluated simply the welding performance of 16MnR(HIC) carbon steel from P_{cm} & C_{eq} and the method of Max. hardness value of welding heat effect area. It introduces in details the items needed to pay attention during the welding process, such as welding preparation, welding criterion, etc., in the same time, it researches the effect of welding line-power, anneal temperature, groove carbon arc air gouging and welding joint in same time. The test of anti-corrosion to sulfide for welding joint of 16MnR(HIC) has been carried out.

Key words: 16MnR(HIC) carbon steel; hydrogen-induced crack; welding

近年来,一种特殊现象已经影响到低合金钢在精炼过程中湿 H_2S 环境下的应用。这是因为腐蚀过程中对氢的吸收,降低了石化工业生产的安全性和生产效率。当钢与含 H_2S 的水接触时,将受到腐蚀并产生氢。并且, H_2S 抑制氢原子结合形成氢气,促进它们在钢中的吸收。由于氢原子较小,在钢中很容易扩散,容易在有缺陷的晶格结点处和非金属夹杂处沉积,在该处氢原子形成分子。在这些点上,氢气压力不断增大,可使已经薄弱的晶界遭到破坏,导致微裂纹的产生,经过一段时间,即使没有外界应力,而只在系统的应用条件下,微裂纹也会扩展,直到达到临界值。这即是氢诱发裂纹(HIC)的机理。

这种现象在油、气精炼工业中的重要性已为许多实际应用中的事故所证实。控制钢的硬度不是防止 H_2S 引起裂纹的保证和必要条件,在采用低强度钢时尤其如此。根据事故分析结果和实际经验,需采用具有一定抗 HIC 能力的钢。在石油和天然气

处理工艺中浓缩 H_2S 量的增加,使压力容器的破坏增多,使得对于经 HIC 检验的材料需求剧增。石化行业已经认识到,在新建容器的工程中应使用经 HIC 检验的材料。16MnR(HIC)钢正是在满足这种需求的基础之上开发研制出的国产新型抗氢诱发裂纹钢。

1 16MnR(HIC)钢的性能

a. 16MnR(HIC)钢的化学成分见表 1。

表 1 16MnR(HIC)钢化学成分 %

ω (C)	ω (Si)	ω (Mn)	ω (P)	ω (S)
≤ 0.20	0.20~0.60	1.20~1.36	≤ 0.015	≤ 0.004
ω (Ca)	ω (O ₂)	ω (Ni)	C_{eq}	
0.001 5~0.003 0	≤ 0.004	≤ 0.20	≤ 0.43	

b. 16MnR(HIC)钢的力学性能见表 2。

表 2 16MnR(HIC)钢力学性能

取样方向	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	A_{KV} /J(-30 °C)	冷弯
横向	≥ 285	470~590	20	≥ 27 (平均) ≥ 20 (最低)	$d=3a$ $\alpha=180^\circ$

收稿日期: 2005-10-28

作者简介:裴红(1964—),女,辽宁大连人,工程师,主要从事石油化工机械设计工作。

c. 腐蚀试验。按照 GB4157-84《金属抗硫化物应力腐蚀开裂恒负荷拉伸试验方法》要求,对 16MnR(HIC)钢材料及其焊接接头做抗硫化物应力腐蚀开裂试验,其门槛应力 $\sigma_{th} \geq 247$ MPa 为合格。

2 16MnR(HIC)钢的焊接性

2.1 钢板的 P_{cm} 和 C_{eq}

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/5 + V/10 + 23B$$

上限值 $P_{cm} = 0.29$, 下限值 $P_{cm} = 0.27$;

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15,$$

上限值 $C_{eq} = 0.44$, 下限值 $C_{eq} = 0.41$ 。

钢板的裂纹敏感性组成比较低,碳当量的上限计算结果超出 16MnR(HIC)钢的要求,下限计算结果能满足其要求。

2.2 焊接热影响区最高硬度估算

焊接热影响区最高硬度与钢的碳当量有关,在一定程度上反映该钢的冷裂倾向。根据常用的热影响区最高硬度的经验公式: $HV_{max} = 90 + 1.050C + 47Si + 75Mn + 30Ni + 31Cr$ 。利用公式计算出 16MnR(HIC)钢的焊接热影响区理论最高硬度值(HV10):成分上限为 436.2,下限为 405.4。

2.3 16MnR(HIC)钢焊接性评价

钢的可焊性主要取决于化学成分和焊接热循环下的组织变化。该钢的力学性能和化学成分近似于 16MnR, P_{cm} 和 C_{eq} 不高,但是热影响区的最高硬度值超出 HV350,存在一定的淬硬倾向。因此,该钢的焊接性与 16MnR 相同,当板材厚度超过一定的范围时,必须采取一定的预热(可参考 16MnR 钢的焊接要求)。

3 焊接

实践证明,16MnR(HIC)钢可以采用多种焊接方法,如氩弧焊、焊条电弧焊和埋弧自动焊等,但如果焊接工艺和规范控制不当,焊接质量将变得很差。

3.1 焊接方法

根据设备制造要求,焊接 16MnR(HIC)钢常采用焊条电弧焊和埋弧自动焊两种焊接方法。

3.2 焊接材料

根据容器制造的一般要求,与钢材配套的焊材不仅要有良好的工艺性能,而且在焊后及焊后消除

应力退火状态下,其性能指标要达要求,其中焊缝熔敷金属中 $\omega(S) \leq 0.010\%$, $\omega(P) \leq 0.015\%$ 。目前国内常用于 16MnR(HIC)钢焊接所需的焊接材料主要有:哈尔滨威尔焊接有限公司生产的焊丝、焊剂、焊条,以及北京金威公司生产的焊条。这些焊材具有熔敷金属扩散氢含量低、韧性高等特点。

焊缝的化学成分对焊缝的组织状态起决定作用,而焊缝的组织又影响其韧性。16MnR(HIC)焊接所用焊材的熔敷金属的含碳量较低,对提高韧性有利,同时 $\omega(S)$ 、 $\omega(P)$ 含量的严格控制也有利于韧性的提高。该焊剂为烧结性焊剂,为保证熔敷金属的超低硫、磷含量要求及氢含量的控制,埋弧自动焊焊剂碱度高, S、P 含量低,也有利于改善焊缝韧性,但在实际应用中,焊缝成形难看,脱渣性也差。

焊条熔敷金属的化学成分如表 3 所示。

表 3 焊条熔敷金属化学成分 %

$\omega(C)$	$\omega(Si)$	$\omega(Mn)$	$\omega(P)$	$\omega(S)$
≤ 0.100	≤ 0.600	≤ 1.400	≤ 0.015	≤ 0.010

焊丝、焊剂熔敷金属的化学成分如表 4 所示。

表 4 焊丝、焊剂熔敷金属化学成分 %

$\omega(C)$	$\omega(Si)$	$\omega(Mn)$	$\omega(P)$	$\omega(S)$
≤ 0.010	≤ 0.350	1.000~1.800	≤ 0.012	≤ 0.010

焊材熔敷金属的力学性能如表 5 所示。

表 5 焊材熔敷金属力学性能

σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta_5/\%$	$A_{KV}/J(-40^\circ C)$
≥ 300	470~590	25	≥ 54 (平均)

3.3 焊前准备

由于 16MnR(HIC)钢系低合金钢,冷裂纹为其主要焊接缺陷,而产生冷裂纹的主要原因是扩散氢的作用。扩散氢取决于焊缝中氢的含量,其来源主要为焊剂受潮、坡口两侧因空气温度较低而在坡口两侧形成的水气,因此,焊剂的烘干、坡口的焊前预热、焊后后热都非常重要。另外,焊前对焊丝表面、坡口面以及两侧 20 mm 范围内的油、锈和其他脏物一定要清除干净,焊条、焊剂严格按烘干工艺烘干,随用随取。

3.4 焊前预热、层温控制和后热消氢处理

16MnR(HIC)钢的焊前预热、焊后消氢以及热处理是防止焊接裂纹的重要措施,通过试验确定当 16MnR(HIC)板厚大于 50 mm 时的预热温度大于等于 80 °C。但另一方面,预热温度过高,会导致焊缝

金属晶粒粗大,因此,层间温度应控制在 80~250℃,焊后立即进行(250~300)℃×2 h 的消氢处理。

延迟裂纹一般要在焊后几分钟或几小时之后才会产生,因此,在产生裂纹以前及时进行加热处理(即所谓的紧急后热),有利于防止冷裂纹。试验证明,焊后及时后热可使扩散氢充分逸出,在一定程度上有效降低残余应力作用;也可适当改善焊缝和热影响区的组织,使之韧化,降低淬硬性。选用合适的后热处理,还可以适当降低预热温度或代替某些重大焊接结构件所需的中间热处理,并且后热不像局部预热那样会产生附加的拉伸应力。所以,采用后热可弥补预热温度不够或因局部预热而产生的附加拉伸应力。

3.5 焊接规范

a. 埋弧自动焊规范。

焊材 H09MnSH+SJ204SH,φ 4.0;焊接电流 450~530 A;焊接电压 32~34 V;焊接速度大于等于 18 m/h;焊前预热大于等于 100℃;层温 100~250℃;焊后后热(250~300)℃×2 h。

b. 焊条电弧焊规范。

焊材 J507SH。当焊条为 φ 4.0 时:焊接电流 160~190 A,焊接电压 22~25 V,焊接速度大于等于 120 mm/min;当焊条为 φ 5.0 时:焊接电流 180~210 A,焊接电压 22~26 V,焊接速度大于等于 130 mm/min,焊前预热大于等于 100℃,层温 100~250℃;焊后后热(250~300)℃×2 h。

优质焊缝金属的获得既取决于焊接材料的冶金性能,又取决于在一定焊接条件下的焊接材料的工艺性。采用多层焊,后焊的焊道对前面焊道有再热作用,因此有粗细晶粒层状结构,受正火作用部分的晶粒比较细。

3.6 焊接线能量对焊条电弧焊和埋弧自动焊焊接接头韧性的影响

为了研究焊接工艺对接头韧性的影响,从生产实际出发,选择不同的线能量来分析其对焊接接头韧性的影响。试验结果表明,线能量是影响焊接接头韧性的重要因素。随着线能量的增加,焊缝与热影响区的韧性均明显下降,线能量在 11~20 kJ/cm 之间焊缝的韧性保持在较高的水平,当超过 34 kJ/cm 时就不能满足要求了。

先焊坡口面的测定结果较后焊面高,究其原因显然与焊接工艺有很大关系。先焊面的坡口大,焊的层数多,多层多道焊在大坡口中焊道薄,道与道和

层与层之间能起到较好的热处理作用,从而改善了这部分金属的性能。因为多层焊时粗晶区是断续的。随着每层厚度的减薄,其粗晶区的范围就愈小,改善性能的热作用也愈明显。焊缝背面是经碳弧气刨后焊满的,焊道窄、焊层厚,因此冲击值较低。

焊缝及过热区组织的金相分析表明,线能量的改变对焊缝组织无实质性影响,仅在柱状晶尺寸上有所改变,其典型组织为沿柱状晶析出的大块铁素体和内部的针状铁素体,这与焊缝的含碳量低有关。

根据试验结果,焊条电弧焊的焊接线能量在 12~22 kJ/cm 范围内,埋弧自动焊的焊接线能量在 25~30 kJ/cm,均能保证焊接接头有较高的低温韧性。

3.7 退火温度对焊接接头性能的影响

为了保证用 16MnR(HIC)板容器的使用安全性,在其制造过程中,通常需进行焊后消除应力热处理。不同的热处理规范对焊接接头的强度、韧性会带来不同的影响。退火温度在 580~670℃变化,随着热处理温度的提高,强度略有所下降,但能满足指标要求,退火后焊接接头的韧性有所提高。

焊后退火热处理温度的确定,不仅需考虑残余应力消除的情况和焊接接头的性能,而且尚需顾及母材的性能。16MnR(HIC)的退火前后焊接残余应力测定表明:在 600℃以上退火,可消除残余应力的 80%。因此综合母材的试验结果,焊接接头退火温度确定在 620℃左右比较合适。

3.8 气割坡口和碳弧气刨对焊接接头的影响

采用火焰切割焊接坡口是最经济的方法。在此选用半自动气割制作厚 32 mm 的 16MnR(HIC)板材坡口,取割口试样进行显微组织和硬度测定,气割热影响区组织为贝氏体,未见其他缺陷,垂直于割口面测定硬度为 HV206~HV277。用小的线能量并控制层间温度对气割坡口进行焊接,620℃退火后,检测焊接接头性能,均满足图样要求。表明气割对接头性能无明显影响。

在厚 32 mm 的板上刨出深 16~18 mm、宽 14~16 mm 和宽 20~24 mm 两种尺寸的刨槽,取样测定刨口的渗碳层以及热影响区的组织和硬度。检验结果表明,渗碳层为 0.2 mm,热影响区最高硬度 HV296,组织为贝氏体。用小的线能量并控制层间温度对刨槽进行焊接,620℃退火后,检测焊接接头的性能,均满足图样要求。表明碳弧气刨对接头性能无明显影响。

3.9 焊接返修

在产品制造中返修焊缝总是难免的。而返修往往会造成焊缝和热影响区某些部位的重复加热,引起性能的变化。试验结果表明,二次返修对接头性能影响不大,但返修造成的残余应力对低温材料不利,因此应尽量减少返修次数。

3.10 焊接接头的力学性能

考虑上述因素和焊接规范,进行了焊条电弧焊和埋弧自动焊焊接工艺评定,所用板厚为 40 mm。评定结果如表 6、表 7 所示。

表 6 焊接工艺评定参数

焊接方法	板厚 δ /mm	全断面 σ_b /MPa	纯焊肉 σ_s /MPa	侧弯 $d=4a$ $\alpha=180^\circ$
焊条电弧焊	40	528、529	断于母材	440 4 件 合格
埋弧焊	40	490、495	断于焊缝	350 4 件 合格

焊接方法	取样位置	$A_{KV}/J(-30^\circ C)$			硬度 HV10		
焊条电弧焊	焊缝	69	149	96	170	187	183
	热影响区	128	216	200	170	187	187
	母材	159	95	123	149	149	156
埋弧焊	焊缝	140	148	123	178	181	189
	热影响区	291	271	291	182	183	188
	母材	140	204	128	168	169	169

表 7 化学成分(板厚 40 mm) %

焊接方法	$\omega(C)$	$\omega(S)$	$\omega(P)$	$\omega(Si)$	$\omega(Mn)$
焊条电弧焊	0.075	0.006	0.015	0.320	1.580
埋弧焊	0.080	0.006	0.012	0.230	1.300

3.11 埋弧自动焊焊接接头的抗硫化物应力腐蚀开裂试验

a. 材质为 16MnR(HIC); 锻件; 厚度 95 mm; 焊后热处理; 试板尺寸按照 GB4157-84 取样。

b. 实验条件。实验温度 $(24 \pm 3)^\circ C$; 实验时间

720 h; 实验溶液为 5%氯化钠+0.5%冰醋酸+蒸馏水 (pH=3.5); 环境压力 840 kPa。

c. 实验结果。

焊接试板经探伤检验后没有发现影响试样性能的缺陷, 试板焊缝的化学成分、焊接接头的力学性能完全符合要求。实验数据及结果见表 8。

表 8 实验数据与结果

标号	截面积 S/mm^2	加载		断裂时间 t/h	断裂部位
		受力 F/N	应力 P/MPa		
A	18.52	5.20×10^3	275.16	720 h 未断裂	—
B	18.34	5.15×10^3	275.19	720 h 未断裂	—
C	16.92	4.75×10^3	275.12	720 h 未断裂	—

说明: 因砣码规格限制, 加载应力无法准确达到 275 MPa。

实验后溶液 pH=3.8。

对实验后的试件进行金相检验, 所有试件的三区组织基本相同, 以试件 B 为例: 金相检验结果显示, B 试件焊缝组织为沿晶界析出的先共析铁素体; 晶内为侧板铁素体+少量贝氏体+珠光体; 重结晶区组织为细铁素体+珠光体; 母材组织为铁素体+珠光体, 呈带状分布。

对所送试样按照 GB4157-84《金属抗硫化物应力腐蚀开裂恒负荷拉伸试验方法》进行实验, 所用试件编号为 A、B、C; 试件经 720 h 实验周期后, 没有发生断裂, 实验结果合格。

4 结论

a. 16MnR(HIC)钢具有一定的淬硬倾向, 焊接 16MnR(HIC)钢预热至 $80^\circ C$ 以上, 可防止产生焊接冷裂纹。

b. 16MnR(HIC)钢焊接时, 应严格控制焊接规范, 做好焊后去氢、消应热处理, 可提高焊接接头韧性, 也是高质量进行 16MnR(HIC)钢焊接的根本保证。

c. 利用单片机提供的看门狗定时器, 可以使“跑飞”并进入死循环的程序跳出死循环, 从而提高了系统的可靠性。

参考文献:

- [1] 王幸之, 钟爱琴, 王雷, 等. AT89 系列单片机原理与接口技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [2] 李广弟. 单片机基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994.
- [3] 林伸茂. 8051 单片机彻底研究(经验篇)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.

Page 14 3 结论

a. 设计的以单片机为控制核心的脉冲 TIG 焊机具有快速、灵活、高效的特点, 实现了不同区间焊接参数的预先设置和存储, 并在单片机的控制下完成不同参数之间的平稳切换, 为采用自动化设备焊接管道的环缝提供了一种新型的焊接电源。

b. AT89S8252 单片机支持 ISP 功能, 用一条专用数据下载线就可方便地实现程序下载和焊接控制软件的更新。此外, 其内部集成有 2 kB 的 EEPROM, 利用该项资源, 较好地实现了参数存储和调用功能。