

制造加氢反应器用 Cr-Mo 中温抗氢钢

张建晓^{1,2}, 贾小斌², 方 婧², 尉洪阳²

(1.兰州理工大学 材料学院,甘肃 兰州 730050;2.兰州兰石机械设备有限公司,甘肃 兰州 730050)

摘要:介绍了高温、高压加氢反应器用 Cr-Mo 抗氢钢以及在生产过程中焊缝金属典型裂纹产生的原因及防止措施。并讨论了 Cr-Mo 钢焊接材料的选择原则、接热输入和焊后热处理规范对焊接接头性能的影响。

关键词:Cr-Mo 抗氢钢;加氢反应器;焊接及焊后热处理

中图分类号:TG441.8 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-2303(2007)08-0050-06

Application of Cr-Mo anti-hydrogen steels on hydro-reactor

ZHANG Jian-xiao^{1,2}, JIA Xiao-bin², FANG Jing², YU Hong-yang²

(1.Material College, Lanzhou Technology of University, Lanzhou 730050, China; 2.Lanzhou lanshi Machinery Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Cr-Mo anti-hydrogen steels on hydro-reactor and the cracks in welding metal are introduced in the paper, welding materials selection and the effect of heat input and post welding heat treatment on welding joints are also discussed.

Key words: Cr-Mo anti-hydrogen steels; hydro-reactor; welding and post welding heat treatment

0 前言

在炼化装置中,设备承受一定的温度和压力,并在临氢介质中运行,高温高压下,氢进入金属内部与钢中一种成分或元素发生化学反应,导致金属破坏。在低碳钢中加入含量不大于10%的Cr、Mo等元素,以形成加氢反应器稳定碳化物,从而提高钢材的高温持久强度和蠕变极限,同时也提高抗氢能力的钢——中温抗氢钢^[1]。美国石油学会(API)根据多年的实验数据和生产经验,提出“纳尔逊(Nelson)曲线”,作为高温高压临氢设备抗氢材料选用的准则和依据。

高温、高压加氢反应器是加氢裂化和加氢脱硫的核心设备。自20世纪60年代开始,高温高压临氢

环境下的设备用材主要采用2.25Cr-1Mo钢。Cr-Mo钢在450℃以上高温区的设计应力强度或许用应力受蠕变断裂强度控制,在此高温区域里,常规Cr-Mo钢的强度将急剧下降^[2]。为此,以往的设计只能将温度控制在454℃以下。随着加工原油日趋重质或超重质化,在生产工艺上出现了重质油裂化和煤液化等新工艺,操作温度和操作条件更趋苛刻,生产装置和设备更趋大型化,相继开发出了3Cr-1Mo-0.25V钢和2.25Cr-1Mo-0.25V钢,以满足现代加氢技术对高温强度、抗氢侵蚀等能力发展的需要。

总结兰石机械设备有限公司Cr-Mo抗氢钢的制造经验,在焊接方面主要考虑:(1)钢材中含有较多的Cr、Mo,空淬倾向大,且设备厚度大,可能产生各种裂纹;(2)加氢设备用钢有特定的使用条件,应慎重选择焊接材料;(3)Cr-Mo抗氢钢的热敏感性。为减少焊接热输入对焊接接头性能的影响,必须

收稿日期:2007-03-15

作者简介:张建晓(1971—),男,甘肃秦安人,工程师,在读硕士,主要从事焊接工业及设备的研究工作。

正确控制工艺规范;(4)严格控制焊后消除应力热处理规范,对获得综合性能良好的焊接接头十分重要。

1 加氢反应器三种主要类型和反应条件

(1)加氢精制。主要目的是对油品进行改质,以提高产品的安定性及延长发动机等设备使用寿命,减少对环境的污染。该工艺的反应条件一般为:压力 4~8 MPa,温度 320 °C~400 °C,介质为油气、H₂S 和 H₂。

(2)加氢处理。一般将重质油品转化为较轻的馏分,以去掉油品中有害的氮、硫等杂质。较轻的馏分再进行二次加工,以获得高质量的轻质油,提高原油的利用率,增加轻质油产率。工艺反应条件一般是:压力 10~18 MPa,温度 360 °C~450 °C,介质为油气和 H₂。

(3)加氢裂化。将蜡油裂解成轻质油品,以获得高质量的石脑油、航空煤油及轻柴油。产品收率高,经济效率极好,工艺反应条件一般是:压力 15~20 MPa,温度 360 °C~450 °C,介质为油气、H₂S 和 H₂。

2 加氢反应器使用中的问题

加氢反应器在高温、高压、临氢及硫和硫化氢介质条件下使用将会出现以下几方面的问题:氢腐蚀、氢脆、高温高压硫化氢腐蚀、硫化物应力腐蚀开裂、Cr-Mo 钢的回火脆性破坏、堆焊层的剥离等。

(1)氢腐蚀。氢在高温、高压状态下扩散到壳体材料内部,与材料中的不稳定碳化物反应生成甲烷(CH₄)或引起钢的脱碳;如果生成的甲烷不能逸出,将聚集在晶界或杂质附近形成高压,产生裂纹、鼓泡或使材料的强度、韧性发生不可逆的明显下降。

(2)氢脆。氢脆是氢残留在钢中所引起的一种材料脆化现象,表现为材料的延伸率和断面收缩率明显下降,氢脆现象与材料本身的强度有关,材料强度越高,只要吸收少量的氢,就可引起严重脆化,另外材料所处温度越低,脆化越明显。

氢脆是一种可逆现象,在一定条件下(如焊后对焊接接头采取的消氢热处理)可使氢彻底地从材料中逸出,材料的性能即可恢复。

奥氏体不锈钢堆焊金属的氢脆是加氢反应器的一个重要问题。在高温、高压条件下,奥氏体不锈钢可吸收大量的氢,而当设备停工时,由于冷却速度很快,使氢残留在内部而造成韧性变差,引起材料脆化。当堆焊金属中有 δ 相铁素体时,则氢脆更加明显。

(3)高温、高压硫化氢腐蚀。热壁加氢反应器内表面堆焊不锈钢层时处于直接接触硫化氢(H₂S),且在高温、高压条件下。硫化氢对不锈钢的腐蚀随温度的

升高而恶化,而且当有氢共同存在时腐蚀更为严重。

(4)硫化物应力开裂腐蚀。应力腐蚀开裂是由拉应力(残余应力或使用中引起的应力)和腐蚀介质共同作用而产生开裂。高温高压下硫化氢腐蚀的腐蚀产物为硫化铁,当硫化铁在设备停车或检修时与水分或空气中的氧发生反应,生成连多硫酸(H₂S_xO₆, X=3~6),如果材料有残余应力,将引起应力腐蚀开裂。

(5)Cr-Mo 钢的回火脆性破坏。当 Cr-Mo 钢长期处于 325 °C~575 °C 内或在这一温度范围缓慢降温,材料将产生韧性下降。这一现象与回火处理有关,因此称为回火脆性。

(6)堆焊层的剥离。热壁加氢反应器在使用一段时间后,检测发现制造时结合良好的堆焊层发生与主体局部的分离现象,这种剥离现象也是一种氢脆现象,属于两种不同材质在晶界面上因残留氢引起的氢脆开裂。宏观下是沿晶界层发展的,呈剥离状态。

3 加氢反应器用新型 Cr-Mo 抗氢钢

长期以来,2.25Cr-1Mo 钢被广泛应用于炼油化工行业的临氢设备上,尤其是热壁加氢反应器壳体绝大部分都采用该钢制造。随着冶炼技术的不断发展,这种钢的纯洁性、匀质性、抗氢性能、抗回火性能和综合力学性能也在不断提高和改善,但从抗氢性能、抗蠕变性能和最高使用温度限制方面,仍满足不了某些场合的需求。随着加氢工艺技术,尤其是渣油加氢改质煤加氢液化工艺的发展,加氢反应器的尺寸越来越大,设计条件更加苛刻,若仍采用常规的 2^{1/4}Cr-1Mo 钢来制造,势必造成壁厚太厚,单台反应器质量过大,给制造、安装、运输都会带来极大的困难,大幅度增加综合投资。国外近 20 年来在这方面已做了大量的工作,相继开发出了 3Cr-1Mo-0.25V 钢和 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢(钢板化学成分和力学性能见表 1、表 2),由于它能满足更为苛刻的操作工况需要,并使得设备质量更趋轻量化,开发的新型 Cr-Mo 钢迅速推广,并且广泛应用于反应器的制造。和常规 Cr-Mo 钢相比,新型 Cr-Mo 钢具有以下优点。

3.1 强度及许用应力提高

含 V 钢能显著提高钢的强度,454 °C 时 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢的设计应力强度为 169 MPa,2.25Cr-1Mo 钢的设计应力强度为 150 MPa,两者相比提高 12.6%,因而在相同条件下可减轻设备质量约 8%~10%。在 482 °C 时,2.25Cr-1Mo-0.25V 钢的设计应力强度为 163 MPa(3Cr-1Mo-0.25V 在 468 °C 时应力强度值为 162

表 1 钢板化学成分

材料	规格	ω (C)	ω (Si)	ω (Mn)	ω (P)	ω (S)	ω (Cr)
2.25Cr-1Mo	ASTM A542B C 14	0.11~0.15	≤ 0.50	0.30~0.60	≤ 0.015	≤ 0.015	2.00~2.50
2.25Cr-1Mo-0.25V	ASTM A542D C 14a	0.11~0.15	≤ 0.10	0.30~0.60	≤ 0.015	≤ 0.010	2.00~2.50
3Cr-1Mo-0.25V	ASTM A542C C 14a	0.11~0.15	≤ 0.13	0.30~0.60	≤ 0.025	≤ 0.025	2.75~3.25
ω (Mo)	ω (V)	ω (Nb)	ω (Ni)	ω (Cu)	ω (Ti)	ω (B)	ω (Ca)
0.90~1.10	≤ 0.02	—	≤ 0.25	≤ 0.20	—	—	—
0.90~1.10	0.25~0.35	≤ 0.07	≤ 0.25	≤ 0.20	≤ 0.030	≤ 0.002	≤ 0.015
0.90~1.10	0.20~0.30	≤ 0.07	≤ 0.25	≤ 0.20	≤ 0.030	≤ 0.002	≤ 0.015

表 2 钢板力学性能

材料	室温 拉伸强度 σ_t /MPa	室温 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	室温 延伸率 δ_5 /%	室温断面 收缩率 ψ /%	夏比冲击功 (V 型缺口) /J(-30 °C)	高温 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa(482 °C)	高温 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa(454 °C)
2.25Cr-1Mo	515~690	≥ 310	≥ 18	≥ 45	平均值 ≥ 54 ;	—	≥ 230
2.25Cr-1Mo-0.25V	585~760	≥ 415	≥ 18	≥ 45	允许一个试	≥ 330	≥ 338
3Cr-1Mo-0.25V	585~760	≥ 415	≥ 18	45	样 ≥ 47	≥ 330	≥ 338

MPa), 2.25Cr-1Mo 钢的设计应力强度仅为 117 MPa, 两者相比提高 39.3%。这是因为晶界析出稳定的很微细的 V-Mo 碳化物, 提高了晶界强度。

3.2 抗氢性能更好

(1) 提高了抗氢腐蚀性能。

2.25Cr-1Mo-0.25V 钢中的稳定碳化物元素 (Ti、V、B、Nb 等), 可以降低碳的活性, 从而有效改善钢的抗氢蚀能力。另外, 微细碳化物在晶内和晶界的弥散分布, 使晶界没有形成枯竭带, 强化并提高了晶界强度, 改善了抗氢蚀性能。2.25Cr-1Mo 钢允许使用的极限温度为 850 °F(454 °C), 含 V 钢允许使用的极限温度为 950 °F(510 °C), 抗氢蚀性能提高了 56 °C。

(2) 抗氢脆性能明显改善。

含 V 钢应力强度因子门槛值比 2.25Cr-1Mo 钢高得多, 这是由于 VC 型微细碳化物呈弥散分布, 增大了碳化物界面, 降低了氢的扩散速度。

(3) 抗氢致剥离性能优良。

含 V 钢的氢扩散系数小, 氢溶解度大, 当设备从高温高压氢环境中冷却时, 由母材向堆焊层界面扩散的氢浓度减少, 堆焊层过渡区侧氢聚集现象显著改善, 堆焊层氢致剥离倾向降低。

3.3 抗回火脆化倾向能力强

含 V 钢“步冷”前后的转变温度增量($\Delta VTrs$)均很小, 无明显脆化现象。

2006 年由中石化工程建设公司设计、兰州兰石机械设备有限公司承制的中国石油分公司的 30 万 t/年润滑油高压加氢装置中的两台核心设备——加氢处理保护反应器和加氢处理反应器, 选用 2.25Cr-1Mo-

0.25V 制造, 其设计压力 19.53 MPa; 设计温度 454 °C; 操作介质为油气、氢气、硫化氢; 设备规格: 内径 φ 200 mm; 壁厚 140+7.5 mm; 总高 26 050 mm(加氢处理保护反应器), 35 775 mm(加氢处理反应器)^[4]。这是国内目前壁厚最厚的板焊式加氢反应器。壁厚 140 mm 的 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢的金相组织照片如图 1 所示。

4 Cr-Mo 抗氢钢焊接材料的选择

为了保证设备在高温下抗氢腐蚀的要求, 焊缝金属的 Cr、Mo 等元素的含量必须达到与母材相当的水平。不同类型的 Cr-Mo 钢, 有不同的机械性能, 即使化学成分相同, 由于不同的热处理制度其强度性能也有较大差异。因此焊缝成分的设计还必须适应母材的热处理制度, 保证焊缝和母材有相等的强度。长期在高温条件下工作, 焊缝金属会产生回火脆性, 这种回火脆性是由于微量元素 Sb、P、Sn、As 等沿原奥氏体晶间富集偏析而引起 Mn 和 Si 等元素汇促成微量元素形成偏析。就焊缝金属而言, 从防止裂纹的观点出发, 要求焊接材料的 ω (C) 要比母材低。为了不降低强度, 往往要提高焊缝金属的 ω (Mn), 此时 ω (Si) 就必须降低。因此, Cr-Mo 抗氢钢焊接材料选择原则是:

(1) 保证焊缝金属常温和高温性能不低于母材下限。

(2) 为了满足高温抗氢腐蚀的要求, 焊接材料必须保证所有焊缝中的 ω (Cr)、 ω (Mo), 特别是 ω (Cr) 不低于母材相应成分的下限。

(3) 为了改善焊接性能, 要尽量降低焊缝中 C、S、P 的含量。

(4) 为了减少焊缝回火脆性, 要控制焊接材料的

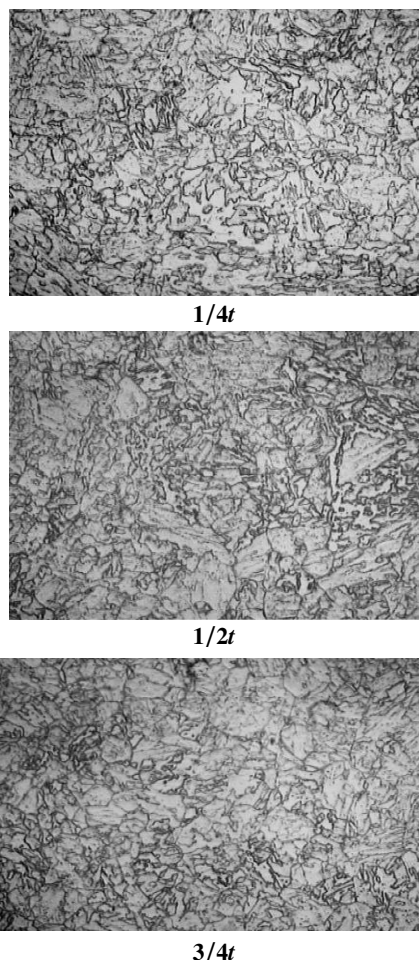


图 1 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢的金相组织照片(400×)

$\omega(\text{Si})$, 并限制微量元素 Sn、Sb、As 等的含量。目前,加氢装置要求 Cr-Mo 钢的 X 系数、 J 系数分别为:

$$X=(10P+5Sb+4Sn+As)\times 10^{-2}\leq 15\text{ mg/L}$$

$$J=(\text{Si}+\text{Mn})(P+\text{Sn})\times 10^4\leq 120$$

(5)尽可能使焊缝的化学成分与母材相接近,以获得均匀一致的化学性质,便于选择同一热处理规范。

国内应用较多的 Cr-Mo 钢焊接材料见表 3。

5 Cr-Mo 抗氢钢焊接时易产生的缺陷及防止

Cr-Mo 抗氢钢在焊接时因钢材中含有较多的 Cr、Mo,空淬倾向大,且设备厚度大,易产生各种裂纹。

5.1 焊接接头的冷裂纹

(1)焊条电弧焊打底焊的缝边裂纹及其防止。

大厚度容器的自动焊接,在采用焊条电弧焊打底焊时焊缝边易产生裂纹。这种裂纹在打底焊时并没有立即出现,而是在停放一段时间后发生。裂纹一般沿熔合线扩展。如果有咬边或焊缝堆高大,则该

表 3 应用较多的 Cr-Mo 钢焊接材料

材料名称	公司名称	2.25Cr-1Mo	2.25Cr-1Mo-0.25V	3Cr-1Mo-0.25V
焊条	日本神钢	CMA-106N	CMA-106H	CM-3H
焊丝		US-521S	US-521H	US-531H
焊剂		PF-200	PF-500	PF-500
焊条	法国沙福	E225	E225V	E300V
焊丝		S225	S225V	S300V
焊剂		F-537	F-537	F-537
焊条	德国蒂森	Chromo 2KS	Chromo 2V	Chromo 3V
焊丝		Union S1 CrMo2	Union S1 CrMo2V	Union S1 CrMo3V
焊剂		UV420TTR-W	UV430TTR-W	UV420TTR-W

处往往造成裂纹的起源。裂纹深度一般在 2~10 mm 之间。其特征为穿晶型,当过热区出现淬硬程度较小的混合组织时,裂纹也有沿晶间发展的。

氢是冷裂纹产生的原因之一,缝边裂纹的出现与氢的诱发有直接关系^[5]。焊缝及热影响区在焊接热循环作用下,有不同的组织转变过程。由于氢在不同的组织中,扩散速度不同,在热影响区靠近熔合线处,往往形成一个氢富集带,当氢达到一定浓度时,就会诱发裂纹。缝边裂纹的产生与过热区组织也有很大关系。当形成组织的硬度越高时,裂纹越容易产生。反之,当淬火程度小、硬度低时,即使含氢量较高,也不会出现裂纹。

要消除缝边裂纹,首先要减少焊缝中的扩散氢。焊缝中氢的来源主要有焊条药皮的潜在氢、钢板表面的水分、油污以及环境的湿度等。Cr-Mo 钢的焊接均采用低氢碱性焊条,通常含潜在氢较低,但这种焊条易于吸潮,使用之前必须严格烘干。为了防止吸潮,要随取随用。

除了控制氢源外,加速氢从焊缝中逸出也是减少焊缝氢含量的重要措施。在工艺上应采取焊前预热、控制层间温度、焊后后热消氢等。焊前预热,一方面可以控制焊接最高温度到 100℃的冷却时间,使焊缝中扩散氢更容易逸出;另一方面可以控制 800℃~500℃的冷却时间,减小热影响区的淬硬程度,达到消除缝边裂纹的目的。由于环缝的焊条电弧焊打底焊均在筒体内部进行,为了改善工作条件,一般预热温度取规定的下限,但焊后要迅速将温度提高到上限保温,否则,当由于其他原因不能进行坡口另一侧的自动焊时,焊缝会迅速冷却下来,导致裂纹产生。此外,在焊接时要注意克服因电流过大或电弧偏吹而造成焊缝咬边,以消除应力集中源。通过试验结果和生产实践,制定的 Cr-Mo 抗氢钢的预热温度、层间温度和焊后后热消氢温度如表 4 所示。

表 4 Cr-Mo 抗氢钢的预热温度、层间温度和后热温度

温度	2.25Cr-1Mo	2.25Cr-1Mo -0.25V	3Cr-1Mo -0.25V
预热温度 $t/^\circ\text{C}$	≥ 160	≥ 180	≥ 180
层间温度 $t/^\circ\text{C}$	160~250	180~250	180~250
后热温度 $t/^\circ\text{C}$	250~350	300~350	300~350

(2)多层自动焊缝中的横向裂纹及其防止。

在 Cr-Mo 抗氢钢厚板多层埋弧焊缝中,曾出现距离焊缝表面下 10~20 mm 处有长度为 4~10 mm 的微裂纹,当裂纹向上或向下扩展后,就会贯穿整个厚度。裂纹垂直于焊缝轴线,发生在最后一层焊缝的影响区即次层焊道上。这种裂纹一旦产生,整条焊缝可能就有多处。这种厚板多层焊的横向裂纹与氢浓度随焊缝层数的增加而增大,在表面下约 10 mm 处,焊缝中氢的浓度最大。钢板越厚,这个值就越大,同时焊缝中的残余应力在距表面 10~20 mm 的位置也有最大值。由于该处扩散氢的浓度最高,且残余应力也最大,因此就为冷裂纹的产生创造了条件,当氢聚集于焊缝非金属夹杂物或空穴密度高的柱状晶的晶间时,开始形成晶间破断,并在残余应力作用下扩展。

要克服多层埋弧焊的横向裂纹,首先必须要降低焊缝中的氢的浓度,使氢含量小于产生裂纹的临界氢含量。具体到焊接工艺上,就要严格控制氢的来源。焊丝要清除油污,焊剂要严格烘干,一般应在 350 °C~400 °C 保温 2 h 去除水气,随着焊缝厚度的增加,预热温度与层间温度相应提高,同时焊后要及时进行中间退火处理,以消除应力和氢。

5.2 埋弧焊道的中心热裂纹

Cr-Mo 抗氢钢的埋弧自动焊,沿焊道中心易出现纵向断续裂纹,这种裂纹多发生在下凹的焊道中,呈开放型。在对接坡口内焊接第一道焊道时,特别容易产生这种裂纹。通过金相检查,裂纹处于焊缝中心柱状晶的对生面上,长 10~15 mm,深 2~5 mm,焊接过程中,在较高的温度下去掉覆盖的渣壳,可立即看到裂纹,而且有的熔渣还留在裂纹中。由于裂纹呈开放型,解剖裂纹断口呈氧化颜色。根据这些特征,说明裂纹是在高温下形成的。焊道中心热裂纹的形成原因,可以解释为在结晶过程中,随着温度的下降,焊缝柱状晶产生,同时焊接应力也逐渐增大。一些低熔共晶成分被柱状晶推向焊缝中心,并在晶界上形成强度低的液体层,在焊接应力作用下,导致开裂^⑥。因此低熔共晶的存在,是裂纹产生的主要因素。

Cr-Mo 抗氢钢的埋弧自动焊,由于使用了不正确的焊接规范,同样会在焊缝中引起热裂纹。当形成

窄而深的梨型焊道时,低熔共晶会聚集于焊道中心,从而导致焊道中心裂纹。

对这种裂纹的消除,主要采取了以下措施:

(1)尽量减少焊接材料的 $\omega(\text{S})$ 。焊丝中的 $\omega(\text{S})$ 控制在 0.025% 以下,焊剂的 $\omega(\text{S})$ 也应严格控制,一般小于 0.05%。此外,在满足强度要求的前提下,要尽量降低焊丝的 $\omega(\text{C})$ 。

(2)增加焊剂的碱度,改善焊缝的高温力学性能。焊剂直接参加焊缝的冶金反应,对焊缝的化学成分与结晶过程有一定影响。碱性焊剂可以降低夹杂物的数量,而且细化晶粒,提高高温力学性能,因此对焊缝金属的抗热裂纹是有利的。

(3)选用合适的焊接规范改善焊缝的结晶状况。焊接规范影响焊缝成形系数,影响焊缝的结晶形式和低熔共晶的聚集特征。当焊缝成形系数小时,焊缝窄而深,特别是在深坡口中,焊道有时呈下凹形,焊道截面近似梨形,这种焊道的成形系数如果小于 1.2~1.3 时,就会出现中心热裂纹。此外,焊缝的坡口形式和焊道的排列也会影响焊缝金属成分和成形特征。当坡口的间隙较大时,第一道焊缝往往形成窄而深的截面,有利于热裂纹产生。在深坡口中焊接,当咬边量大,母材熔化多,也容易出现裂纹。

6 Cr-Mo 抗氢钢焊接接头性能的控制

焊接材料确定后,焊接接头的机械性能主要决定于焊接热输入和焊后热处理。因此控制焊接输入热,制定合理的焊后热处理规范十分重要。

6.1 Cr-Mo 抗氢钢在焊接热循环下的组织和性能的变化

由于焊接热循环的作用,Cr-Mo 抗氢钢焊接接头热影响区的组织较为复杂,可以分为过热粗晶区、细晶区、局部重结晶区和高温回火区等。其中粗晶区塑韧性低,是最薄弱的部分。焊接接头的组织与焊接热处理过程有密切的关系。在低输入热焊接时,热影响区变窄,但是冷速太快容易得到淬硬的马氏体组织。在较高的输入热情况下,可得贝氏体组织。如果输入热很大,甚至可得到粗大铁素体+珠光体组织。对 Cr-Mo 钢处于高温回火区的部位,由于饱和固溶体的分解还会形成软化区,从而使接头强度降低。为了防止母材热影响区晶粒粗大,降低缺口韧性,限制焊接热输入是很重要的。Cr-Mo 钢的软化行为受焊接热输入影响也较明显,因此焊接规范的选择就更为严格。Cr-Mo 钢淬硬倾向大,为了防止冷裂,焊接区

的冷却速度可以通过预热的办法来降低。因此焊接规范主要考虑减小热影响区,降低软化区,采用较小的焊接线能量。

除焊接热输入量外,控制多层焊的层间温度也是影响热影响区组织性能的重要因素。很高的层间温度使焊缝和热影响区的冲击韧性都有所降低。因此在控制焊接规范的同时,对层间温度也要加以限制。

6.2 焊后热处理对焊接接头性能的影响

Cr-Mo 抗氢钢制容器,自淬倾向大,焊后热影响区组织一般为贝氏体,硬度高、韧性低。为了改善组织和性能,同时消除焊接应力,焊后必须进行热处理。由于 Cr-Mo 抗氢钢具有好的高温强度,因此规范都推荐采用比较高的热处理温度。焊接接头的性能在很大程度上取决于焊后热处理规范。当回火温度较低或保温时间不足时,焊缝及近缝区金属具有较高的强度,而塑性、韧性偏低。反之,提高回火温度时,焊缝及近缝区强度有所下降,而塑、韧性则随之提高。

“回火参数”为一定回火热处理温度和回火热处理保温时间的函数值,用[P]表示。[P]值的计算公式

如下

$$[P]=T(20+\log t)\times 10^{-3}$$

式中 T 为回火热处理的加热温度(单位为开氏度:°K);t 为回火热处理的保温时间(单位:h)。


此外,容器每条环缝焊完后,为了消除应力和氢,还要进行中间退火处理。Cr-Mo 抗氢钢焊后热处理及最佳[P]值见表 5。

表 5 Cr-Mo 抗氢钢焊后热处理温度

材料	中间热处理 t/°C	最终热处理 t/°C	[P]值
2.25Cr-1Mo	620	690	20.0~20.6
2.25Cr-1Mo-0.25V	620	705	20.5~21.2
3Cr-1Mo-0.25V	620	705	20.5~21.2

参考文献:

- [1] 李平瑾,徐道荣.锅炉压力容器焊接技术及焊工问答[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [5] 中国机械工程学会焊接学会.焊接手册(2 版)[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [6] 周振丰,张文钺.焊接冶金学[M].北京:机械工业出版社(2 版),1988.

Page 22  $[T_2]^{-1}[T_1^0]^{-1}T_6^0=T_3^2T_4^3T_5^4T_6^5\Rightarrow\theta_{2,}$

$$[T_5^4]^{-1}[T_4^3]^{-1}[T_3^2]^{-1}[T_2]^{-1}[T_1^0]^{-1}T_6^0=T_6^5\Rightarrow\theta_{5,}\theta_{6,}$$

以上矩阵运算,在此采用 MatLab 软件编写算法完成。

4 机器人可视化仿真软件的建立

利用 MatLab 的 GUI(图形用户界面)功能,可编写简洁高效的软件界面,仿真软件程序的界面具有易用性的特点,在程序中有多个对话条以及对话框来完成不同的需求。软件主界面主要以菜单的形式出现,包括打开、编辑、查看、模型库、系统设置、设备连接、轨迹获取、路径规划、仿真、帮助。打开相应的菜单中的每一命令,便打开相应的对话框,可以在对话框中输入控制机器人运动的参数,设置好相关参数后,点击确定,便可进行机器人焊接的运动仿真演示,软件的主界面如图 5 所示。

5 结论

(1)虚拟现实的建模与 MatLab 的编程是分开进行的,只要相互间的可操作参数接口定义明确,其开发过程可完全独立进行,从而缩短了软件的开发周期。而且,VRML 模型(不包括接口部分)的修改不需要对整个应用程序进行重新编译,软件维护和升级方便。



图 5 系统仿真软件主界面

Fig.5 Main interface of the simulation software

(2)Pro/engineer 设计产生的三维造型可以很方便地转化为 VRML 模型,不需要进行模型的重建,所以,已有三维模型资源的重用率高。

(3)该仿真系统可运行于 Win98/2000/XP。经过实际应用证明,它是一种操作简单,成本低,具有实用价值的机器人运动仿真平台。

参考文献:

- [1] 李国进,王国荣.水下焊缝自动跟踪路径的识别[J].焊接学报,2005,26(3):58-62.
- [2] 张 铁,谢存禧.机器人学[M].广东:华南理工大学出版社,2002.
- [3] 高秀华.机械三维动态设计仿真技术—Pro/ENGINEER 和 Pro/MECHANICA 应用[M].重庆:化学工业出版社,2003.