

关于不锈钢堆焊层铁素体测算方法的研究

The Researches of the Gauging & Calculating Methods of Ferrite Content in Stainless Build-up Weld

大连冰山集团金州重型机器厂
郭传江 刘晓书 赵艳春 高静

Based on analysis, compares, tests and researches, this paper introduces the gauging and calculating methods of ferrite content in stainless build-up weld provided by specifications for producing the hydro-processing reactors.

关键词：铁素体 含量 测算

1 前言

随着我国石化行业大型成套装置国产化进程的加快，我厂承接高温高压临氢设备和耐腐蚀设备的品种数量也在增加。以临氢设备为例，我厂制造过的材质有以 1Cr-0.5Mo 钢、1.25Cr-0.5Mo 钢、2.25Cr-1Mo 为基体，其上堆焊双复层不锈钢。设备的设计温度大多在 300~550℃，属热壁加氢反应器。这类设备制造技术条件有多种，我们接触的具有代表性的有如下版本：

(1) 中石化北京设计院的《15CrMo (1Cr-0.5Mo) 钢板制临氢设备制造技术条件》(简称“A”)。

(2) 中石化北京设计院的《×××炼油厂催化重整—柴油加氢联合装置加氢反应器说明书》(简称“B”)。

(3) 中石化洛阳石化工程公司的《×××炼油厂改扩建工程加氢精制反应器技术要求》(简称“C”)。

(4) 雪佛龙技术开发公司 (Chevron Research and Technology Company) 的《Cr—Mo 低合金钢制加氢反应器技术条件》(简称“D”)。

上述版本的技术条件均适用于炼厂中的加氢精制、催化重整等装置中以 Cr—Mo 钢为基材的加氢反应器。都要求有一定厚度 (6~6.5mm) 的双复层堆焊 (309+347 型或 309L+347L) (D 版本还规定，可以双复层，也可单复层只堆焊 347 型)。其耐腐蚀层的厚度均规定为 3mm 或按图样，且耐蚀层的铁素体含量要控制在一定范围 (3%~11%)。

但在铁素体测算方法上，存在明显差异，本文对此做出评论。

2 对堆焊层化学成分及铁素体含量的要求

2.1 铁素体含量的控制

焊缝中有一定量铁素体能降低焊缝金属的热裂倾向，提高耐晶间腐蚀性能。文献 [1] 指出：焊缝中的 δ 相可以打乱单一奥氏体柱状晶的方向性，避免贫铬层贯穿于晶粒之间构成腐蚀介质的集中通道；敏化加热时，富铬碳化物最易于在两相界面 δ 相一侧形核，从而大大减少了沿奥氏体晶界碳化物的析出。

但铁素体含量高，不仅在某些介质中会引起选择性腐蚀^[2]，而且会造成 σ 相脆化。加氢反应器制造过程中往往经过多次 650℃ 以上的热处理，累

计时间可达到 20 多小时,且设备长期在高温下运行,可能使堆焊层的铁素体发生 $\delta \rightarrow \sigma$ 相的转变,造成堆焊层的脆化。因此,对铁素体含量必须予以控制。文献 [3] 指出: δ 相含量应不超过 9%。文献 [2] 则推荐控制在 4% ~ 12%。

上述版本对铁素体含量控制范围以及测算方法不同,其中版本 B 提出了两套要求:对于工艺评定, δ 相按 Schaeffler 图计算, 4% ~ 10% 合格;对于产品焊接,既要求按 Schaeffler 图计算, 3% ~ 10% 合格,又要求用磁性仪测量,此时要求显示数据 $\leq 13\%$ 为合格(超过时允许用 Schaeffler 图验证,不合格必须返修)。各版本对铁素体含量及测算方

法的规定详见表 1。

表 1 对铁素体的要求

版本	含量	测算方法
A	4% ~ 10%	磁性仪, Schaeffler 图作参考
B	4% ~ 10%	Schaeffler 图
C	3% ~ 10%	Delong 图
D	3% ~ 11FN	磁性仪

2.2 化学成分的控制

焊缝金属的耐蚀性和铁素体含量,很大程度上取决于化学成分。上述版本对 C, Cr, Ni, Nb 四种元素均有规定,对其他元素的要求有差异,详见表 2。

表 2 对化学成分的要求^①, %

版本	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Nb	Mo
A	0.04	\sqrt{D}	\sqrt{D}	18.0 ~ 20.0	8.0 ~ 13.0	\sqrt{D}	/	/	$\geq 10C$	/
B	0.05	0.90	1.0 ~ 2.5	18.0 ~ 21.0	9.0 ~ 11.0	0.03	0.04	0.20	8C ~ 1.0 ^②	0.5
C	0.05	0.90	1.0 ~ 2.5	18.0 ~ 21.0	9.0 ~ 11.0	0.03	0.04	0.5	8C ~ 1.0 ^②	0.5
D	0.08	0.30	0.5 ~ 2.5	18.0 ~ 21.0	9.0 ~ 11.0	0.03	0.04	0.75	8C ~ 1.0 ^②	0.75

注: ①除表中规定元素外,还应分析出 Si、S、Mn 的含量提供给用户, ②其中包含 Ta 元素。③版本 A, B, C 要求耐蚀层有效厚度 3mm,并规定在表面以下某个位置取样;版本 D 规定按图纸要求取样。

3 铁素体的测算方法

3.1 Schaeffler 图 (见图 1)

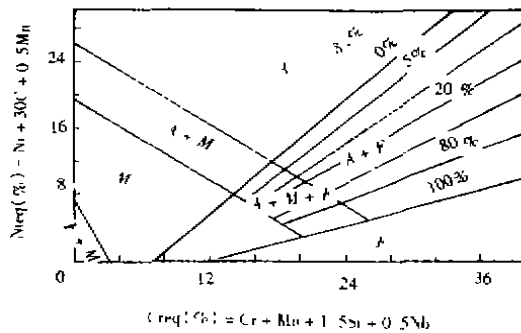


图 1 Schaeffler 图^[2]

Schaeffler 图,是利用铁素体形成元素和奥氏体形成元素的比例,通过铬当量 (Cr_{eq}) 和镍当量 (Ni_{eq}) 的计算来确定堆焊层中铁素体的含量。由于它比较简便,人们很早就将其用于工程实践,并被纳入 ASME 规范 (95 版以前)。

3.2 Delong 图 (见图 2)。

Delong 图是 Schaeffler 图的改进型,主要是考虑了氮元素的强烈影响,同时引入美国焊接科学研究委员会 (WRC) 的铁素体数 (FN) 的计量方法(即该图中同时有百分数和铁素体数两种计量方法),它被认为是对 Schaeffler 图最有价值的改

进^[4]。因此,1995 版的 ASME 第 II 卷 C 篇中它已经取代了 Schaeffler 图。

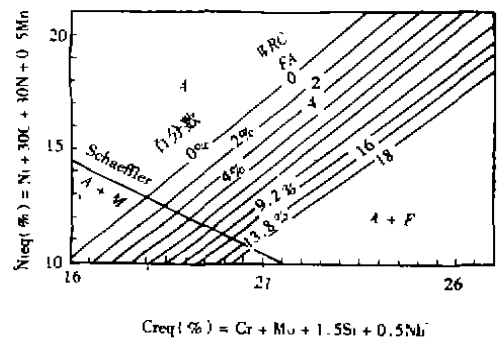


图 2 Delong 图^[4]

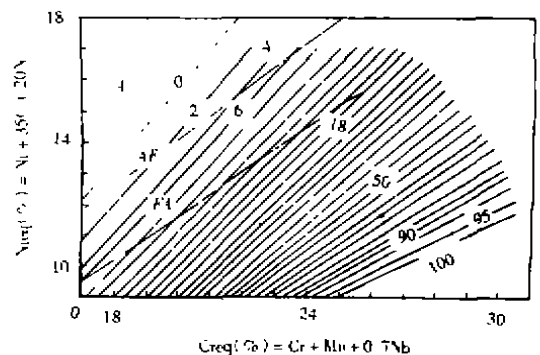


图 3 WRC-1998 图^[4]

3.3 WRC-1998 图 (见图 3)

用于测算以铁素体数 (FN) 为单位的铁素体

含量(取消了百分数计量方法)。WRC 焊接委员会和国际焊接学会(IIW)第 II 委员会的研究工作表明:

采用这张图比 Delong 图,铁素体的测定值与计算值之间有更好的对应关系。因此,1998 年版以后的 ASME 第 II 卷 C 篇中 Delong 图又被 WRC 图取代。

表 3 是否计入氮元素对计算结果的影响

计算时	Ni 当量 %	δ 相含量 %	备注
不计入氮	11.7	~7.1	与 Schaeffler 图相同
计入氮	13.5	~3.0	

注:Cr 当量相同。

引用 Delong 图或 WRC 图,是否考虑氮元素的影响,对铁素体含量计算结果影响很大。目前洛阳院标准虽然引用 Delong 图,但对 N 含量未做限制,制造厂往往忽略了其计算,从而造成失误。比如 PQR No. 2Y54,按 Delong 图计算,是否计入氮,结果见表 3,可见差异是明显的。

表 4 焊接工艺评定试验条件

PQR 编号	钢带规格 mm	焊接材料		焊接电流 A	电压 V	焊速 cm/min
		过渡层	耐蚀层			
2Y33	25 × 0.4	USB—309L/PFB—1	USB—347LD/PFB—1FK	300 ~ 320	26	14
2Y54	50 × 0.4			600 ~ 650		12 ~ 14
2Y55	75 × 0.4			1000 ~ 1100		14

表 5 堆焊层的化学成分及厚度

PQR 编号	化学成分, %										堆焊层厚度 mm
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Mo	Nb	N ^①	
2Y33	0.032	0.52	1.37	19.10	10.16	0.007	0.022	0.15	0.395	0.006	7.38 ~ 8.28
2Y54	0.035	0.50	1.38	18.40	10.0	0.005	0.026	0.13	0.28	0.006	8.2 ~ 8.5
2Y55	0.032	0.625	1.52	19.15	10.61	0.005	0.020	0.14	0.52	0.006	8 ~ 9

注①:按标准 Delong 图的说明, N 元素虽未分析,以 0.006% 计入。

表 6 堆焊层的铁素体含量

PQR 编号	Schaeffler 图法			DeLong 图法			WRC 图法			磁性仪 δ , %
	Cr _{eq} , %	Ni _{eq} , %	δ , %	Cr _{eq} , %	Ni _{eq} , %	δ , %	Cr _{eq} , %	Ni _{eq} , %	δ , FN	
2Y33	20.2	11.8	~7.5	20.2	13.6	~5.7	19.5	12.5	~5.1	4.2 ~ 5.0
2Y54	19.4	11.7	~7.1	19.4	13.5	~3.0	18.7	12.4	~3.0	4.0 ~ 4.5
2Y55	20.5	12.3	~7.0	20.5	14.1	~6.0	19.7	12.9	~4.5	4.0 ~ 5.0

(1) 焊接规范的影响

本次试验的化学成分分析结果差异不大,焊道厚度大致相当,证明三项试验焊道稀释率比较稳定,从而排除了稀释率影响 δ 相含量的可能性。我们曾进行过大量的实验,研究电流密度、电压、焊接速度与焊道稀释率、焊道厚度、焊道宽度之间的关系^[5],结果表明:前三者对后三者有明显的影

3.4 铁素体磁性仪

Chevron 标准中使用的是铁素体磁性仪,使用前要按 AWSA4.2《测定奥氏体和奥氏体—铁素体双相不锈钢焊缝金属中 δ 相铁素体含量的方法和磁性测定仪的标定标准方法》进行校准。目前,ASME、JIS、BS、ISO 等许多标准都采用这种方法。

4 试验研究

多年来我厂制造的加氢设备中,上述方法都用过,也获得了大量的数据。本文着重介绍采用埋弧带极堆焊(钢带接正极)的三项试验。

4.1 试验条件和结果

试验的焊接材料均采用日本神钢(KOBE)钢带/焊剂,这是我厂经过多年实践选定的堆焊材料,性能比较稳定,且能够满足加氢反应器的要求。焊接时采用相同的电流密度、电压和焊接速度。

试验条件见表 4,试验结果见表 5 和表 6。

4.2 试验结果分析

影响,基本上呈线性关系。

(2) 铁素体测算方法的影响

1) Delong 图、WRC 图以及磁性仪的测量结果比较接近,误差大约在 0.3% ~ 1.3% 之间,且 WRC 图与磁性仪的测量结果更吻合。

2) 同样的试验数据,比如 PQR No. 2Y54,按 Schaeffler 图计算, δ 相含量 7.1%,是合格的;而

按 Delong 图计算, δ 相含量 3.0%, 是不合格的, 尽管用磁性仪的测量结果 (δ 相含量 4.0% ~ 4.5%) 证实是合格的。

3) 根据我们多年的实践, 体会到图示法存在如下欠缺:

a. 工程技术条件给出很多个位置, 要求分析。制造厂磨钻表面堆焊层取样化验。我们的许多试验证明, 被取样破坏的表面不仅有效耐蚀厚度减少, 而且耐蚀性有不同程度的降低。

b. 反复化验, 反应用人工对比图验证, 测量误差加上图本身的误差, 往往不能反映实际产品的 δ 相含量。而磁性仪测定不会破坏金属表面, 其仪器的精度已经能够满足工程需要, 这方面哈焊所作了许多有益的工作, 他们制造的 F-1 型磁性仪精度已经达到满量程的 $\pm 5\%$ [6]。

5 建议

由于不锈钢堆焊层中铁素体含量对设备的安全运行至关重要, 因此成为设计和制造质量控制的重要指标。目前国内的设计院各自引用测算方法, 对制造厂来说, 同样的工作 (比如焊接工艺评定), 需要重复进行。即使同样的数据, 由于测算方法不同, 造成铁素体含量差异很大, 往往还成为设备是

否判废的焦点。因此我们建议:

(1) 以磁性仪的测量为基础, 辅以图示法作对照。各制造厂可进一步积累数据, 以校核磁性法与图示法之间的关联。

(2) 如果坚持用图示法, 建议采用先进的 WRC 图, 并采用铁素体数 (FN) 计量单位取代百分数 (FG) 计量单位, 以便与国际先进标准接轨。

参考文献

1. 冈毅民主编. 中国不锈钢腐蚀手册. 冶金工业出版社, 1992
 2. 张文钺 周振丰主编. 焊接冶金与金属焊接性. 机械工业出版社
 3. 中石化总公司规划设备处编. 热壁加氢反应器技术文集, 1987. 10; 50
 4. ASME Sec. II Div. C, 1998. ed
 5. 表面带极堆焊. 金重科技, 1998. 6
 6. 焊接. 2000; (1); 25
- 致谢! 本文经过《压力容器》编委李平瑾高工的多次审批, 在此致以深深的谢意!

作者简介: 郭传江, 男, 1970 年生, 毕业于天津大学焊接专业, 工程师, 通讯地址: 大连冰山集团金州重型机器厂化工机械研究所。

(上接第 28 页)

种模式计算的曲线比较接近, 如果比较两倍弹性斜率法和双切线法去确定极限载荷, 则这种差别会更小。因此, 我们认为在用有限元法确定构件的极限载荷时, 用材料非线性列式进行计算就能得到满意的结果。

另一方面, 用材料非线性列式计算其结果具有更好的收敛性, 因为小变形理论的本构方程比较简单, 迭代容易。也是因为这个原因, 用材料非线性列式计算所花的时间少, 具有更好的经济性。

参考文献

1. PVRC Task Group on Laterals of the Subcommittee on ROEL. Comparison of Three - Dimensional Finite Element and Photoelastic Results for Lateral Connection, WC - 12B2, Number 251, Welding Research Council Bulletin, 1979; 8
2. Hay and Associates. Study of 45° Laterals, Final Report Submitted to the TG on Laterals, PVRC s/c on Reinforced Openings and External Loadings, London, U. K. 1976; 4

3. Nielson, W. E. and Junker, A. T.. Finite Element Analysis of the Limit Load of A Nozzle in a Cylindrical Vessel Due to Internal Pressure Including Large Deflection Results, SEAC - TR - 249, Revision 2, 1982; 1
4. K. J. 贝斯著. 赵兴华等译. ADINA/ADINAT 使用手册——自动动态增量非线性分析有限元程序, 机械工业出版社, 1996; 8
5. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III and VIII - 2, 1986 Version
6. Save, M.. Experimental Verification of Plastic Limit Analysis of Torispherical and Toriconical Heads, Pressure Vessel and Piping Design and Analysis, I, ASME, 1972; 382 ~ 416.

作者简介: 林杨杰, 男, 1973 年生, 硕士, 1998 年毕业于南京化工大学, 主要从事化工设备设计及结构强度的有限元分析。通讯地址: 上海市南京西路 1856 号上海医药设计院设备一组, 邮编: 200040。桑芝富, 男, 教授, 南京化工大学机械工程系, 主要从事化工工程设备的结构与强度研究。通讯地址: 南京化工大学机械工程系, 邮编: 210009