

· 专题讨论 ·

低合金耐硫酸露点腐蚀钢的性能和应用

钱余海 李自刚 杨阿娜
(宝山钢铁股份公司技术中心, 上海 201900)

摘 要 耐硫酸露点腐蚀钢是用于热交换部件的低合金钢。该钢主要分为两类: (1) 以 0.2% ~ 0.5% Cu- > 0.010% S 为基础, 添加少量 P、Sn、As、Sb、Se、Te 等元素; (2) 以 Cu-Cr 或 Cu-Cr-Ni 为基础的钢类, 用于高温 (130 ~ 160 °C)、高浓度硫酸 (80% ~ 90%) 的腐蚀环境。介绍了硫酸露点腐蚀环境的特点并讨论了合金元素对该低合金钢耐硫酸露点腐蚀的作用机制和国内外现有主要低合金耐硫酸露点钢的化学成分、力学性能和耐腐蚀性能。

关键词 低合金 硫酸露点 耐腐蚀钢

Application and Properties of Low Alloying Sulfuric Acid Dew Point Corrosion- Resistant Steels

Qian Yuhai, Li Zigang and Yang A-na
(Technology Center, Baoshan Iron and Steel Co Ltd, Shanghai 201900)

Abstract The sulfuric acid dew corrosion- resistant steels are low alloying steels for heat exchanging component. There are two kinds of sulfuric acid dew corrosion- resistant steel: (1) base alloy elements- 0.2% ~ 0.5% Cu- > 0.010S adding a small quantity P, Sn, As, Sb, Se, or Te; (2) Cu-Cr or Cu-Cr-Ni steels for corrosion environment of concentrated sulfuric acid (80% ~ 90%) at elevated temperature (130 ~ 160 °C). The characteristics of sulfuric acid dew point environment are briefly introduced, and the mechanism of effect of alloy elements on sulfuric acid dew point corrosion-resistance of the low alloy steel are discussed and the chemical compositions, mechanical properties and corrosion resistance of domestic and foreign current main low alloying sulfuric acid dew point corrosion-resistant steels are presented in this paper.

Material Index Low Alloying, Sulfuric Acid Dew Point, Corrosion- Resistant Steel

1 腐蚀机理与腐蚀环境

在燃油或燃煤锅炉的重油或煤中通常含有 2% ~ 3% 的硫, 经燃烧后烟气中就会有约 0.2% 的 SO₂, 其中 1% ~ 2% SO₂ 受灰分和金属氧化物等的催化作用而生成三氧化硫 (SO₃), 它再与燃烧气体中所含的水分 (约 5% ~ 10%) 或空气中所含的水分结合生成硫酸, 在处于露点 (当 SO₃ 的含量为 30 × 10⁻⁶ 时露点约为 130 ~ 150 °C) 以下的金属表面凝结并腐蚀金属, 即所谓硫酸露点腐蚀。这种腐蚀环境甚至能够腐蚀不锈钢, 对工业生产设备造成极大的危害。

凝结的硫酸浓度因产生凝结的金属表面温度不同而异, 图 1a 为按照 Taylor 的气液平衡关系而得出的硫酸露点浓度与温度的对应关系^[1]。最初研究金属在不同浓度硫酸环境中腐蚀时, 按此种对应关系进行了浸泡腐蚀实验, 所得的碳钢的腐蚀行为特点示于图 1b^[1]。图 1b 低温中浓度 II 区

及高温高浓度 IV 区是最为剧烈的腐蚀环境, 因此, 耐硫酸露点腐蚀钢研制起点主要针对 80% 硫酸进行凝缩的 120 ~ 130 °C 的高温区域和主要生成 40% ~ 50% 硫酸的 50 ~ 70 °C 低温区域。

实际服役条件下的硫酸露点腐蚀环境与设备的启停及运转有关, 是一个气液相交替的变温和变浓度的复杂过程。对应于设备的运转状况, 可将腐蚀环境分为 3 个阶段, 各个阶段的特点如下。

第 I 阶段: 锅炉开始运行或刚刚停止运行的情况, 温度 ≤ 80 °C, 硫酸浓度低于 60%, 是处于活性状态下的腐蚀。其腐蚀速率最高, 但由于时间短, 影响基本可以忽略。

第 II 阶段: 处于正常运行状, 温度 80 ~ 160 °C, 硫酸浓度为 85% 左右, 受高温高浓度硫酸的腐蚀, 对于一般钢材而言仍处于活性腐蚀状态。

第 III 阶段 (稳定状态): 温度与浓度等同于第 II 阶段, 但含有大量的具有催化效应的未完全燃烧碳, 生成大量的 Fe³⁺ 离子, 耐露点腐蚀的钢处

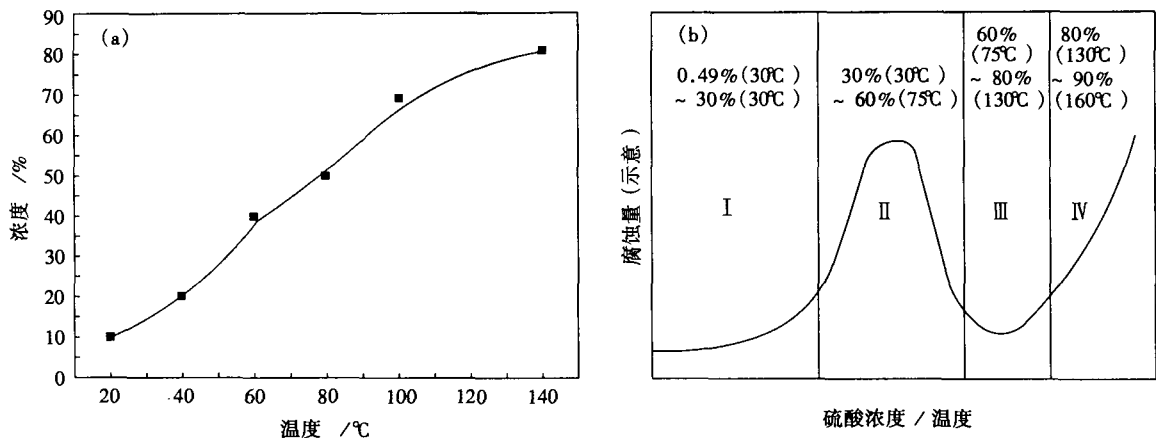


图1 (a)硫酸露点浓度与温度的对应关系;(b)模拟硫酸露点腐蚀环境下碳钢的腐蚀行为特点

Fig.1 (a) Relation between sulfuric acid dew point concentration and temperature; (b) Characteristics of corrosion behavior of carbon steel in simulated sulfuric acid dew point environment

于相应极化曲线的钝化区范围,使含有铬和铜的耐蚀钢出现第1次钝化,腐蚀速率很低,但对碳钢腐蚀率仍然很高。

耐硫酸露点腐蚀钢与普碳钢的腐蚀行为主要区别在于第Ⅲ阶段,在该环境下金属发生钝化是耐硫酸露点腐蚀的根本原因。

2 硫酸露点腐蚀对设备的危害

硫酸露点腐蚀一般出现在锅炉预热器和省煤器设备,空气预热器换热元件以及输送管线和烟道、烟囱上。大量的实例表明:硫酸露点腐蚀对上述行业的装置会造成极大的腐蚀破坏。

中原油田石油化工总厂1996年4月新增加的2台锅炉(4号、5号)空气预热器在运行仅1年左右的时间腐蚀穿孔被迫停炉更换,分析结果认为燃料硫含量高、烟气流速偏低(8%~9%)和存在水蒸气造成硫酸露点腐蚀是空气预热器腐蚀的主要原因^[2]。

山西天脊煤化工集团有限责任公司稀硝车间的2台低压反应水冷凝器为固定管板式换热器,投入运行约5年后发现腐蚀现象严重,对失效的冷凝器管板进行分析认为,其腐蚀原因为硫酸的露点腐蚀^[3,4]。此外,硫酸露点腐蚀也可以造成炼油厂省煤器腐蚀穿孔泄露^[5]。

胜利炼油厂第3硫磺回收装置于1991年12月底建成使用,其二级冷凝冷却器(E-102)自装置建成使用后,一直无法长周期安全运行。自装置建成使用以来,已3次因腐蚀更换设备,管束材质也由最初的碳钢改为不锈钢,但效果并不好,不锈

钢管束使用6个月后又出现泄漏,失效分析认为硫化氢引起的硫酸露点腐蚀和硫酸引起的应力腐蚀开裂是造成硫磺回收装置冷凝冷却器腐蚀失效的主要原因^[6]。

岳阳石油化工总厂烯烃厂的ARGG装置投产仅4个月发现该装置能量回收系统四旋至临界流速喷嘴间烟气管道多处被点蚀穿孔,并有少量烟气和催化剂细粉漏出,腐蚀失效机理分析表明硝酸、硫酸露点腐蚀和诸多应力的存在使烟气管道产生了应力腐蚀开裂^[7]。

江汉油田盐化工厂的硫酸换热器,其管程为90% H_2SO_4 ,壳程为含水氯气,原使用20#钢管,不到2个月就腐蚀报废,原因为浓硫酸腐蚀。

解决钢的硫酸露点腐蚀的有效方法可通过减少燃烧中的硫分来抑制烟气中 SO_2 的量和硫酸的生成。另外,降低过剩空气量抑制 SO_3 的生成及提高排烟温度,但受原料供应状况、操作可行性及热效率等因素的制约,效果不显著。

采用硼硅玻璃管、搪瓷或非金属材料可以在一定程度上避免传热构件的硫酸露点腐蚀,但施工难度大,同时影响换热效率,因此,低合金耐硫酸露点腐蚀钢的研究引起重视。

3 耐硫酸露点腐蚀钢合金成分设计

继1933年诞生于美国的耐候钢之后,对硫酸露点凝结现象的研究,发现含有一定Cu、P、Cr、Ni等合金元素的CORTEN钢具有一定的耐蚀性,以此为开端将这种低合金钢首次开始应用于锅炉的空气预热器。

最初发现钢中添加 0.2% ~ 0.5% 的铜可以极大地提高钢对各种浓度硫酸的耐蚀性,铜已成为耐硫酸露点腐蚀钢的基本成分之一。日本学者对 40% ~ 50% 以下低浓度硫酸(区域 II)耐蚀性研究发现,为了提高钢在硫酸中的耐蚀性,在添加 0.15% 以上铜的同时,还需要有 0.015% 以上的硫共存(见图 2)^[8]。

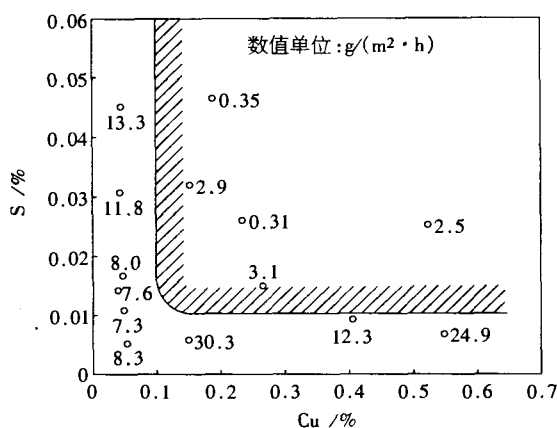


图 2 铜和硫含量对碳素钢耐硫酸腐蚀的影响
Fig.2 Effect of copper and sulfur content on corrosion-resistant behavior of carbon steel

耐硫酸露点用钢是一种既耐硫酸露点腐蚀又耐大气腐蚀钢种。钢中主要含 Mn、Cu、Cr、Sb 等抗硫酸露点腐蚀的合金元素,而 Cu、Cr 又是两个最主要的抗大气腐蚀元素。Cu 在钢的大气腐蚀过程中起着活性阴极的作用,一定条件下可以促进钢产生阳极钝化,从而降低钢的腐蚀速度,Cu 在锈层中的富集能够极大地改善锈层的保护性能。Cr 元素和钢中的 Cu、Si 等元素匹配,能显著提高钢的耐腐蚀性能。这是因为适当的 S 含量下,Cu 与 S 作用可生成 Cu_2S 保护膜,可以同时阻止阴极反应及阳极反应,对前述硫酸露点环境 3 个阶段的腐蚀行为均起着缓解腐蚀的作用。

Cr 只有在 Cu 的配合下才有明显的效果,尤其是第 III 阶段,其最优含量在 1% 左右,原因是铬的电极电位较低,具有钝化倾向的作用,从而提高耐蚀性能,而其它元素如 Si、P、V、Ti 等主要在第二阶段起耐蚀作用。

钢中 Cu、Sb 各元素能抑制阳极反应,同时在钢表面形成 Cu_2Sb 被膜也可抑制阴极度反应,对区域 II 环境下耐硫酸露点腐蚀很有效果。

Sn 和 Sb 的加入也对阻止稀 H_2SO_4 的腐蚀起明显作用,目前在国内和国外正在使用的耐硫酸露点腐蚀用钢中,一般都是以 Cr-Cu-Sb(Sn)系的成分配方的,如美国和日本在锅炉预热器中使用的主要牌号有 COR TEN、NAC-2B、NAC-2C 等,中国江阴澄特钢的 ND 钢,即 09CrCuSb,都是 Cr-Cu-Sb(Sn)的合金思路。上述成分设计中,虽然充分考虑了耐腐蚀元素成分的合金配比,但由于钢材中 Sb 和 Sn 是以杂质形态出现的,使钢材的再加工性能受到不同程度的影响。

Cu-W-Mo 结合对耐浓 H_2SO_4 的腐蚀也起明显作用,W 和 Mo 以复合的形式加入,还能提高钢的热强性;稀土(RE)主要起控制钢中 Sn 和 Sb 的夹杂物形态,以提高钢的冲击韧性和耐腐蚀性能。稀土不仅对钢中的低熔点金属和非金属成分有极大的亲和作用,而且有极强的脱硫和脱氧的能力,并能明显改善钢材的焊接性能。稀土在钢材中残留物与硫的比值关系为:RE/S = 1 ~ 6,其最佳的比值关系应控制在 2 ~ 4 之间。

合理配比的合金元素加入能够使钢在腐蚀过程中生成富含 Cu、Cr、Sb、Ti 等添加元素的致密腐蚀产物并且使腐蚀电位向钝化区移动同时保持相对较低的维持钝化的电流,这是耐硫酸露点腐蚀钢耐蚀的根本前提条件^[9]。另外,合金成分中的元素偏析将严重影响耐硫酸露点腐蚀钢的耐蚀性能,甚至会发生局部腐蚀^[10]。

4 国内外现有耐硫酸露点腐蚀钢产品及性能

美国于 20 世纪 60 年代初期开发的添加 Cu 的耐大气腐蚀钢,对耐硫酸露点有一定效果。

日本开发的耐硫酸露点腐蚀钢按照使用环境主要划分为两类:(1)以 0.2% ~ 0.5% Cu > 0.010% S 为基体,添加少量 VB 族及 VIB 族的 P、Sn、As、Sb、Se、Te 等,其化合物成为对氢发生反应的抑制剂;(2)对于高温、高浓度硫酸的第 IV 腐蚀环境,把和 Corten 钢同系统的 Cu-Cr 或者 Cu-Cr-Ni 作为基础开发的。日本各公司生产的耐硫酸露点腐蚀钢及主要化学成分见表 1^[11]。

由于耐硫酸露点腐蚀钢一般应用于非结构件,屈服强度 345 MPa 基本满足使用要求。现有钢的显微组织状态一般是铁素体(F) + 珠光体(P),珠光体主含量控制在 15% 左右。

国内对于耐硫酸露点腐蚀钢的研制和开发起

表 1 日本耐硫酸露点腐蚀钢的化学成分/%
Table 1 Chemical compositions of sulfuric acid dew point corrosion-resistant steels in Japan /%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	其它
S-TEN1	≤0.14	≤0.55	≤0.70	≤0.025	≤0.025	0.25~0.50	-	-	Sb≤0.15
S-TEN2	≤0.14	0.14~0.55	≤0.90	≤0.035	≤0.035	0.25~0.50	-	0.50~1.00	Ti≤0.15
S-TEN3	≤0.14	0.14~0.55	≤0.90	≤0.030	≤0.035	0.25~0.50	-	0.80~1.30	Sb≤0.15
NAC-2A	≤0.15	≤0.40	≤0.90	≤0.030	≤0.030	0.20~0.50	≤0.25	-	Sb:0.05~0.20 Sn:0.02~0.10
NAC-2B	≤0.15	≤0.40	≤0.90	≤0.030	≤0.030	0.20~0.50	≤0.25	0.50~0.90	Mo≤0.10
NAC-2C	≤0.15	≤0.40	≤0.90	≤0.030	≤0.030	0.20~0.50	≤0.25	0.50~0.90	Mo≤0.10 Sb:0.05~0.20 Sn:0.02~0.10
RIVER TEN-41S	≤0.15	≤0.40	0.20~0.80	0.020~0.060	≤0.004	0.25~0.50	≤0.50	0.20~0.60	Cb≤0.04
CR1	≤0.13	0.20~0.80	≤1.40	≤0.025	0.015~0.030	0.25~0.50	≤0.50	1.00~1.50	
CR1A	≤0.13	0.20~0.80	≤1.40	≤0.025	0.015~0.030	0.25~0.35	-	1.00~1.50	
TAICOR-S	≤0.15	≤0.50	≤1.00	≤0.040	0.015~0.040	0.15~0.50	-	0.90~1.50	Al:0.03~0.15

步较晚,成分体系及使用标准一般借鉴日本的钢种,其中典型的有宝钢股份公司的B485NL、江阴特钢的ND钢,此外,鞍钢(10Cr1Cu)、济钢(12Mn-CuCr)及宝钢一钢公司(NS1)也有耐硫酸露点腐蚀

钢产品。这些典型产品及日本 S-TEN1 钢的基本化学成分、力学性能、耐硫酸露点腐蚀性能及基本使用状况见表 2~表 5。

ND钢耐蚀性能与碳钢、日本进口同类钢、不

表 2 国内耐硫酸露点腐蚀钢的基本化学成分/%
Table 2 Chemical compositions of domestic sulfuric acid dew point corrosion-resistant steels /%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	其它
B485NL	≤0.12	0.25~0.75	≤0.60	≤0.03	0.07~0.15	0.25~0.55	-	-	适量的 Ni, Cr, Al
09CrCuSb ^[9,10,12,13] (ND)	≤0.10	0.25~0.35	0.35~0.65	≤0.035	≤0.035	0.25~0.40	<0.15	0.07~1.20	Mo≤0.10, Bi<0.10, Sb≤0.15
NS1-1 ^[14]	≤0.14	≤0.90	≤0.55	≤0.035	≤0.035	≤0.15	-	≤0.015	Ti≤0.15
NS1-2 ^[14]	≤0.14	≤0.90	≤0.55	≤0.035	≤0.035	≤0.15	-	≤0.015	Ti≤0.15, Sb≤0.15
NS1-3 ^[14]	≤0.14	≤0.70	≤0.55	≤0.035	≤0.035	≤0.15	-	-	Sb≤0.15
S-TEN1 ^[15]	0.096 (≤0.14)	0.19 (≤0.55)	0.35 (≤0.70)	0.009 (≤0.025)	0.006 (≤0.025)	0.26 (0.25~0.50)	0.18 (≤0.50)	-	Sb:0.096 (≤0.15)
12MnCuCr ^[16,17]	0.08~ 0.15	0.260~ 0.365	0.48~ 0.98	0.014~ 0.034	0.009~ 0.027	0.20~ 0.60	-	0.44~ 0.64	V:0.03~0.07
10Cr1Cu ^[18]	≤0.13	0.20~0.50	0.30~0.60	≤0.035	≤0.035	0.25~0.45	-	0.90~1.30	-

表 3 国内耐硫酸露点腐蚀钢的力学性能^[9,10,12-18]/%
Table 3 Mechanical properties of domestic sulfuric acid dew point corrosion-resistant steels^[9,10,12-18] /%

钢种	规格/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	冷弯 180°	硬度(HRB)
B485NL		≥320	≥485	≥25		
09CrCuSb(ND)	Φ25×2.5	≥260~300	400~450	32~38	良好	
	Φ40×2.5	≥260~380	400~450	32~38	良好	
	Φ42×3.3	≥260~320	400~450	32~38	良好	
NS1-1		≥320	≥440	≥22	d = a	
NS1-2		≥315	≥440	≥22	d = a	
NS1-3		≥240	≥340	≥24	d = 1.5a	
S-TEN1	STB340 标准	≥215	≥340	≥35		≤77
	STB410 标准	≥245	≥410	≥35		≤79
	S-TEN1 标准	≥230	≥380	≥35		-
	实际性能	≤281	415	52		70
12MnCuCr		316.9~469.5	463.0~600.4	20.0~31.0	d = 2a 不裂	
10Cr1Cu	热轧 2.5~6.0	345(305~395)	470(440~505)	38(30~45)	D = 0, 1/2a, a 完好	
CR1A41(日本住友)	<16	≥245	400~510	≥22	完好	
10Cr1Cu	冷轧 0.75~2.5	320(270~390)	450(420~490)	≥22	完好	
CR1A41(日本住友)	0.6~2.3	≥225	400~510	≥27	完好	

表 4 国内耐硫酸露点腐蚀钢耐蚀性^[9,10,12,13,16-18]Table 4 Corrosion resistance of domestic sulfuric acid dew point corrosion-steels^[9,10,12,13,16-18]

实验条件	腐蚀速率	产品腐蚀速率比较
70 °C 50% H ₂ SO ₄	mg/cm ² ·h	ND 钢:7.30; CRIR(日本): 13.40; AISI321:21.70; Cast(日本):63.00; 20G:103.50; Sten:27.4
20% 硫酸, 30 °C, 6 h	g/m ² ·h	A3:65.60; 12MnCuCr:25.45
50% 硫酸, 70 °C, 6 h	g/m ² ·h	A3:1098.37; 12MnCuCr:288.90
50% 硫酸, 70 °C, 130 h	g/m ² ·h	A3:555.20; 12MnCuCr:175.02
耐硫酸露点腐蚀 (山东辛店电厂)	腐蚀失重 /g	12MnCuCr:4.5; A3:4.5
耐大气腐蚀挂片 (成都 521 所)	mm/a	12MnCuCr:0.018; A3:0.0683
110 °C 50% 硫酸	mm/a	10Cr1Cu:139.74; 碳钢:136.86; CRIA41:128.91
110 °C 70% 硫酸	mm/a	10Cr1Cu:6.18; 碳钢:6.18; CRIA41:1.54
110 °C 80% 硫酸	mm/a	10Cr1Cu:2.86; 碳钢:4.98; CRIA41:3.57
110 °C 85% 硫酸	mm/a	10Cr1Cu:8.48; 碳钢:20.86; CRIA41:5.72

锈钢耐腐蚀速率比较,是日本 CRIR 钢的 1.8 倍;是 1Cr18Ni9 钢的 2.8 倍;是 Corten 钢的 8.6 倍;是 20G 钢的 14 倍。NS1 钢耐蚀性能是普碳钢的 6 倍以上, S-TEN1 钢管及普通钢管 STB-EG 在钢管型空气预热器再加热器的最前列一年后的腐蚀结果表明:前者年腐蚀量为 0.04 ~ 0.22 mm, 与普通碳钢管腐蚀量 0.46 ~ 1.13 mm 相比较,均为其 1/5。12MnCuCr 钢耐硫酸露点腐蚀性能是 A3 钢

参考文献

- 1 松岛岩. 低合金耐蚀钢-开发、发展及研究. 靳裕谷译. 北京: 冶金工业出版社, 2004, 138
- 2 刘云峰, 司艳霞, 李峰, 等. 空气预热器腐蚀原因分析及预防. 石油化工腐蚀与防护, 2000, 17(4): 41
- 3 林萍, 俞强, 岳斌, 等. 冷凝器管板失效分析. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(4): 247
- 4 王利民, 桑计瑛, 高益民. 低压反应水冷凝器管板腐蚀原因分析. 山西化工, 1999, 19(2): 58
- 5 郑文龙, 魏云, 张清廉, 等. 省煤器腐蚀穿孔泄漏原因分析. 石油化工腐蚀与防护, 2000, 17(1): 10
- 6 葛小平, 述旺, 李健. 硫磺回收装置冷凝冷却器(E-102)的腐蚀问题. 石油化工腐蚀与防护, 2000, 17(4): 7
- 7 杨锦明. ARGG 装置烟气管道开裂原因. 石油化工腐蚀与防护, 2002, 19(1): 35
- 8 松岛岩. 低合金耐蚀钢-开发、发展及研究. 靳裕谷译. 北京: 冶金工业出版社, 2004, 139
- 9 郑文龙, 王荣光, 闵国全, 等. 耐硫酸露点腐蚀用 ND 钢性能及使用情况. 石油化工腐蚀与防护, 1997, 14(2): 19
- 10 郑文龙, 王荣光, 闵国全, 等. 耐硫酸露点用 ND 钢及其应用. 压力容器, 1998, 15(1): 36
- 11 松岛岩. 低合金耐蚀钢-开发、发展及研究. 靳裕谷译. 北京:

表 5 国内耐硫酸露点腐蚀钢产品的基本应用状况

Table 5 Basic application status of domestic sulfuric acid dew point corrosion-resistant steels

钢种	基本状况
B485NL	冷轧态薄板产品(主要规格在 1.2 mm 以下), 山东威海某工程有限公司用作空气预热器换热元件, 每月均有相当的固定供货量
ND (09CrCuSb)	ND 钢无缝钢管广泛用于制造在高含硫烟气中服役的省煤器, 空气预热器, 热交换器和蒸发器等装置设备
NS1 钢	热轧中板(mm): 7 ~ 16 × 1 800 × 6 000 ~ 8 000 及热轧卷板(mm): 2.5 ~ 6.5 × 900 ~ 1 000, 已用于扬州第二电厂烟囱构件
S-TEN1	作烟囱用的 S-TEN1 钢管实际多使用大口径螺旋焊钢管, 发电锅炉和清扫设施及各种加热炉空气预热器则广泛使用小口径电阻焊接(ERW)钢管
10Cr1Cu	已用于辛店发电厂管式空气预热器, 应用状态为冷轧板经加工焊成 Φ40 mm × 1.5 mm 焊管

的 3 ~ 4 倍。10Cr1Cu 钢板具有优良的耐硫酸露点腐蚀性能, 使用寿命是碳钢的 4 倍以上, 基本达到日本耐硫酸露点腐蚀用钢 CRIA41 水平。

5 结语

低合金耐硫酸露点腐蚀钢的耐蚀性由其钝化特性决定, 而严格控制合金化学成分、合理配比添加合金元素及保证化学成分的均匀性是根本前提条件。随着对环境腐蚀特性认识的不断深入, 低合金耐硫酸露点腐蚀钢, 特别是热轧供货状态的产品必将迎来新一轮的发展契机, 具有良好的市场前景。

冶金工业出版社, 2004, 142

- 12 郑文龙, 王荣光, 闵国全. 耐硫酸露点腐蚀 ND 钢在推广应用中的问题. 石油化工腐蚀与防护, 1998, 15(1): 42
- 13 郑文龙, 王荣光, 闵国全. 耐硫酸露点用 ND 钢应用性的研究. 腐蚀与防护, 1997, 18(2): 24
- 14 徐军, 张慰生. 耐硫酸露点腐蚀用 NS1 钢的开发和应用. 特殊钢, 1998, 19(6): 40
- 15 张朝生. 日本耐硫酸露点腐蚀 S-TEN1 电焊钢管. 焊管, 2003, 26(6): 58
- 16 孙传水. 12MnCuCr 钢耐硫酸露点腐蚀性能的研究. 材料保护, 1998, 31(10): 10
- 17 孙传水. 热轧耐硫酸露点腐蚀的 12MnCuCr 钢板的性能. 钢铁, 1998, 33(5): 45
- 18 吴瑞银, 王殿秀. 10Cr1Cu 耐硫酸露点腐蚀钢的性能研究. 石油化工腐蚀与防护, 1997, 14(4): 46

钱余海(1973-), 男, 工程师, 2002 年中国科学院金属研究所毕业, 从事耐候钢的产品开发。

收稿日期: 2005-02-28