

● 钢管的现代质量进展

锅炉和电站用无缝钢管

方长生 刘亚励 杨祺鑫*

SEAMLESS STEEL TUBES FOR BOILER & POWER
STATION SERVICES

Fang Changsheng Liu Yiali Yang Qixin

1 概述

锅炉用管分一般锅炉管(中低压)和高压锅炉管。一般锅炉管主要用于工业蒸汽锅炉的制造,工作压力小于10MPa,工作温度在450℃以下,多用碳素钢制造。高压锅炉管主要用于电力锅炉的制造及电站建设,是建造电站的关键材料,工作压力在10~35MPa之间,工作温度在540~650℃之间。高压锅炉用管主要指炉内汽水管道,规格为 $\phi 16 \sim 990 \text{ mm} \times 1.5 \sim 115 \text{ mm}$,它包括省煤气管、水冷壁管、过热器管、再热器管、导

汽管、下降管及各种联箱管等。电站用管主要指锅炉与汽轮机之间的炉外蒸汽管道及锅炉给水管,包括主蒸汽管道、再热主蒸汽管热段、再热主蒸汽管冷段、主给水管及汽轮机用导管等,一般称之为主汽水管道。这种管道用管多为直径大于273mm的大直径厚壁锅炉管。炉外汽水管道与锅炉炉内管道联接组成了由水变成蒸汽的全部流程。锅炉及电站用高压锅炉管的最大规格见表1。此外,电站用管中还包括次要汽水管道(主要是20G低中压锅炉管)、风管、烟管和制粉管。这些要求较低的管道,一般可用焊接钢管

表1 国内火电机组最大钢管规格

机 组 ($\times 10^4 \text{ kW}$)	项 目	最大管径 (mm)	最大壁厚 (mm)	最大规格单重	
				规格 (mm)	单重 (kg)
60	锅炉用管	990 $\times$ 100	914 $\times$ 115	914 $\times$ 115	2265.9
	电站用管	1066.8 $\times$ 20.6	675.2 $\times$ 109	675.2 $\times$ 109	1521.9
30	锅炉用管	914 $\times$ 88.9	736 $\times$ 150	736 $\times$ 150	2169.8
	电站用管	812.3 $\times$ 21	550.1 $\times$ 90.9	550.1 $\times$ 90.9	1039.34
20	锅炉用管	508 $\times$ 26	377 $\times$ 60	426 $\times$ 50	460.03
	电站用管	550 $\times$ 14.2	355.6 $\times$ 55	355.6 $\times$ 55	407.7
12.5	锅炉用管	457 $\times$ 55	457 $\times$ 55	457 $\times$ 55	542.2
	电站用管	406.4 $\times$ 14.2	273 $\times$ 40	273 $\times$ 40	229.8
5	锅炉用管	413 $\times$ 40	413 $\times$ 40	413 $\times$ 40	77.8
	电站用管	237 $\times$ 32 (323.9 $\times$ 36)	273 $\times$ 32 (323.9 $\times$ 36)	273 $\times$ 32 (323.9 $\times$ 36)	190.2 (255.6)

* 本文作者还有吴耀泉同志。

制作。用焊接钢管作低中压锅炉管现仍处在开发阶段。除灰管和送粉管外，那些要求耐磨性高的钢管，有被内壁硬度高的耐磨钢管（如NM300、NM400、NM500等耐磨钢管）及耐磨合金管、合金铸铁管所取代的趋势。

水冷壁管、省煤气管及其联箱管和再热主蒸汽管冷段、主给水管等的工作温度较低，一般低于450℃，因此，此类管多采用碳素钢，如20G、St45.8/Ⅱ、SA106 B级、C级及210 C级等。而过热器管、再热器管及其联箱管和主蒸汽管、再热蒸汽管热段、因工作温度高、工作压力大，故均选用合金钢。过热器、再热器管常用的钢种有：12Cr1MoV、12Cr2MoWVTiB（钢102）、12Cr3MoWSiTiB、10Cr5MoWVTiB（钢106）、T91、TP 304H、TP 347H等。主蒸汽管和再热蒸汽管热段常用的钢种有：12Cr1MoV、10CrMo910、P22、X20CrMoV121、P91等。

2 国内外火电机组和锅炉管的发展及现状

世界发电总量的70%是由火电机组（包括核电）提供的。为提高火电机组的热效率，降低煤耗，国内外火电机组均向大容量、高参数方向发展。据不完全统计，国外超过100×10⁴ kW的火电机组已有15套（美

表2 主要工业国火电主力机组锅炉蒸汽参数

国 家	主力机组功率 (×10 ⁴ kW)	锅炉蒸汽参数	
		温度(℃)	压力
日 本	45~60	538/566	超临界
原苏联	30~50	540/540	超临界
美 国	60~80	538/538	亚临界
德 国	30~80	535/535	亚临界
英 国	50~66	568/568	亚临界
法 国	30~60	540/540	亚临界

表3 主要工业国投入运行的最大火电机组的锅炉蒸汽参数

国家	最大机组功率 (×10 ⁴ kW)	锅炉蒸汽 发 量 (t/h)	蒸汽参数		投运时 间(年)
			温度(℃)	压力 (MPa)	
美 国	130	4222	540/540	24.6	1972
原苏联	120	3650	540/540	25.5	1980
日 本	100	3180	538/566	24.6	1972

国10套、日本4套，原苏联1套）。主要工业国的主力发电机组容量为30×10⁴ kW~80×10⁴ kW，蒸汽温度为540~568℃，蒸汽压力为亚临界压力或超临界压力（见表2、表3）。

目前，日本已有40%的火电机组采用超临界压力，热效率低的中、高压机组早已被淘汰。截至1985年，日本火电机组的发展情况见图1。50年代末期，日本已采用亚临界压力发电，主汽温度已达到566℃，由于钢管材质和机组造价的限制，主汽温度没有再

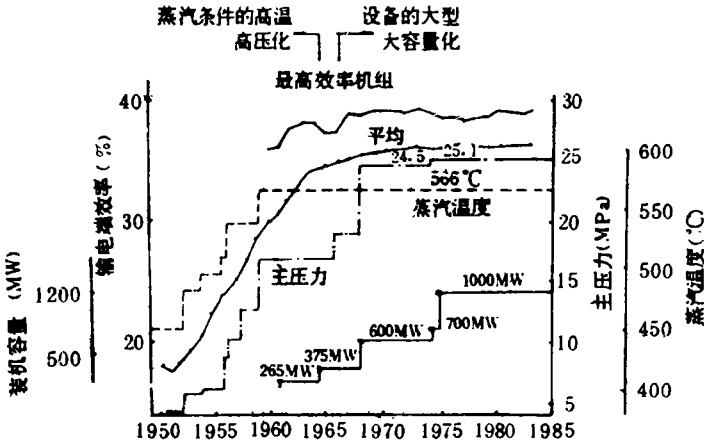


图1 日本火电机组的发展概况

提高,而是注重主压力的提高和单机容量的增大。60年代中后期,主压力为24.1MPa的 $60 \times 10^4 \text{ kW}$ 超临界压力机组投入运行,而到了70年代中期,压力更高(24.6MPa)、功率更大($100 \times 10^4 \text{ kW}$)的超临界压力机组也投入运行。现在已开始研究主汽温度为

595℃、压力为31MPa的超超临界压力的火电机组和主汽温度为650℃、压力为34.5MPa的特超临界压力火电机组。现有的高压锅炉管已难满足要求,开发和使用新的锅炉及电站专用管已是当今的重要研究课题。国外锅炉及电站用管的标准和牌号见表4。

表4 国外锅炉用钢管

钢种	成分(%)	JIS	ASTM	DIN	ГОСТ	BS	用 途	
碳素钢	0.15~0.25C	STB38、52	A106CrA、B	St35.8	45.8	20	3059/320 3601/360	省煤器 水冷壁 集汽箱 管道
	0.25~0.35C	STB42	A106CrC A210CrC	St55	55.4		3602/410	水冷壁 给水管
Mo钢	0.3~0.5Mo	STBA12、13 STPA12	T1、T1a P13	15Mo3 15Mo5			3059/243	水冷壁 过热器 再热器低温段
Cr-Mo钢	1Cr~0.5Mo	STBA22 STPA22	T12 P12	10CrMo44	15XM		3059/620 3604/620	水冷壁 过热器 再热器 集汽箱
	2.25Cr~1Mo	STBA24 STPA24	T22 P22	10CrMo910			3059/622 3604/622	水冷壁 过热器 再热器 集汽箱 管道 主蒸汽管
	9Cr~1Mo	STBA26 STPA26	T9、T91 P9、P91	X12CrMo91			3059/629 3604/629	过热器 再热器 集汽箱
Cr-Mo-V钢	0.5Cr-0.5Mo-V			14MoV63			3604/660	过热器 再热器
	1Cr-0.3Mo-V				12X4MΦ			管道 集汽箱
	1Cr-1Mo-V				15X4M1Φ			集汽箱 管道
马氏体耐热钢	12Cr-1Mo-0.3V			X20Cr MoV121	12X11B 2MΦ	3059/622		过热器 再热器 主蒸汽管
奥氏体耐热钢	13Cr-8Ni	SUS304HTB	TP304H	X12CrNi188		3059/304S18 3605/304S59		过热器 再热器
	13Cr-8Ni-Ti	SUS321HTB	TP321H	12X13H12Ti X10CrNiTi189		3059/321S18 3605/321S59		
	13Cr-8Ni-Nb	SUS347HTB	TP347H			3059/347S18 3605/347S59		
	16Cr-14Ni-2.5Mo	SUS316HTB	TP316H	X5CrNiMo1312		3059/346S18 3605/346S59		

我国电力工业发展迅速,1991年发电量居世界第4位,总装机容量为 $1.48 \times 10^8 \text{ kW}$,其中火力发电约占80%。预计到2000年,全国电力需用量将达到 $12000 \times 10^8 \sim 13000 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,装机容量为 $2.4 \times 10^8 \text{ kW}$ 左右,其中火电机组仍占70%以上。为此,每年平均需增 $800 \times 10^4 \text{ kW} \sim 1200 \times 10^4 \text{ kW}$ 的发电能力。目前,我国已形成以 $20 \times 10^4 \text{ kW}$ 、 $30 \times 10^4 \text{ kW}$ 、 $60 \times 10^4 \text{ kW}$ 大容量机组为主体的超高压、亚临界压力火电锅炉系列(见表5),其主蒸汽压力为14~18.6MPa,

表5 我国电站锅炉容量参数

锅炉类别	所配机组容量 ($\times 10^4 \text{ kW}$)	锅炉蒸发量 (t/h)	蒸汽参数	
			温度 (℃)	压力 (MPa)
中压锅炉	0.6, 1.2 2.5	3.5, 6.5 130	450	3.9
高压锅炉	5 10	220 410	540	10
超高压锅炉	12.5 20	420 670	550 540	14
亚临界锅炉	30	1000 1000	570 550	17 17.1
	60	1025.7 2080	540.6 540.6	18.6 18.6
超临界锅炉	未生产	—	570	24

主汽温度为540℃。

“八五”期间约有 80 余套 30×10⁴kW 和60×10⁴kW 机组投入建设和运行。热效率较差的20×10⁴kW 机组及 10×10⁴kW 以下的机组，原则上今后不再新建。1991年底，秦山30×10⁴kW核电站投入运行。1992年1月，上海石洞口第二电厂安装的我国第1台60×10⁴kW超临界压力机组(引进项目)投入运行，这两项填补了国内空白，同时也为锅炉和电站用管提出了新的要求。

3 我国锅炉和电站用管系列的发展及现状

火电锅炉和电站用管的材质选择是由机组的蒸汽温度、压力等参数决定的。为适应

电力的发展，经多年的努力，我国高压锅炉管已形成了以珠光体型为主体的用钢系列。低温段用碳素钢，高温段用珠光体型或贝氏体型钢。由低温到高温使用的代表钢种有：20G→12CrMo→15CrMo→12Cr1MoV→12Cr2MoWVTiB或12Cr3MoVSiTiB→10Cr5MoWVTiB。

12Cr2MoWVTiB、12Cr3MoWSiTiB和10Cr5MoWVTiB钢是我国研制，用于过热器、再热器管的新型贝氏体型热强钢。这类钢具有良好的高温性能和抗氧化性能，已大量使用在各型电站锅炉上。各种钢的使用温度，使用部位见表6。

70年代中期，我国火电锅炉和电站大

表 6 我国锅炉用耐热钢

钢 号	技术标准	最高使用温度(℃)	使 用 部 位		
20G	GB5310-85	500 ^①	水冷壁	集汽箱主给水	主汽管道
12CrMo	GB5310-85	540	过热器	再热器低温段	
15CrMo	GB5310-85	550 ^②	过热器	再热器低温段	集汽箱
12Cr2Mo	GB5310-85	580 ^②	过热器	再热器集汽箱	主汽管道
12Cr1MoV	GB5310-85	580 ^②	过热器	再热器集汽箱	主汽管道
12Cr2MoWVTiB	GB5310-85	610	过热器	再热器	
12Cr3MoVSiTiB	GB5310-85	620	过热器	再热器	
12MoVWBSiXt	GB5310-85	580	过热器	再热器	
1Cr19Ni9	GB5310-85	650	过热器	再热器高温段	
1Cr19Ni11Nb	GB5310-85	650	过热器	再热器高温段	
10Cr5MoWVTiB	未纳入标准	650	过热器	再热器高温段	

注：①用于集汽箱和蒸汽管为450℃；②用于集汽箱和蒸汽管道应降低40℃。

量使用的是从原联邦德国进口的热强钢管。此阶段，由低温到高温采用的钢种系列是：St45.8/Ⅲ→15Mo3→13CrMo44→12Cr1MoV或10CrMo910→12Cr2MoWVTiB或12Cr3MoVSiTiB或HT7(即9Cr1Mo)→X20CrMoV121或X20CrMoWV121。

到80年代初期，引进美国 CE 公司60×10⁴kW、30×10⁴kW 亚临界压力锅炉的设计及制造技术，锅炉及电站用管均选用美国 ASME/ASTM标准的管材，其特点是高温段用贝氏体钢。由低温到高温的用钢系列是：SA106 B级或 C级或 210 C 级→0.5Mo

(T1) 1Cr-1/2Mo (T11、P11 或 T12、P12)→2¹/₂ Mo-1Mo (T22、P22)→12Cr2MoWVTiB→T91 或 TP 304H 或 TP347H。

4 高压锅炉管的主要使用要求

高压锅炉及电站用管均在高温、高压下长时间使用，通常将两者统称为高压锅炉管。其主要使用要求如下。

4.1 高温强度和高温塑性

高压锅炉管要在高温、高压下使用10年，甚至20年以上，因此，除要求其具有常

温、瞬时高温的拉力性能外,更要求高温持久和蠕变强度及一定的塑性。

4.2 抗氧化性能

由于管材长期在高温下使用,其氧化性能影响管材的使用温度范围。一般要求高压锅炉管在相应工作温度下的年氧化速度 $<0.01\text{mm}$ 。

4.3 抗腐蚀性能

在锅炉、电站运行中,高压锅炉管要受到炉水、燃气、蒸汽腐蚀、氢腐蚀、碱腐蚀、垢下腐蚀、硫腐蚀和应力腐蚀等,所以要求管材具有良好的抗多种腐蚀性能。

4.4 良好的加工性能

在锅炉制造和安装过程中,管材要在室温或高温下进行弯管、扩口等,因此要求其有良好的冷热加工性能。

4.5 可焊性

焊接是锅炉制造的主要加工工艺,锅炉管必须有良好的焊接性,因此高压锅炉管含碳量低。

4.6 组织稳定性

高压锅炉管在高温、长时间运行后,钢中的合金元素重新分配,新相形成或析出,碳化物的扩散、聚集、球化等,将使钢的组织 and 性能发生变化。如低碳钢的石墨化, Cr-Mo 钢的珠光体化等,均会使钢的持久强度、蠕变极限、持久塑性和韧性明显降低。因此要求高压锅炉管必须具有足够的组织稳定性。

4.7 较高的尺寸精度及光洁的表面

较高的外径及壁厚精度,不仅是确保锅炉运行安全的要求,也是施工及加工工艺的要求。另外,钢管的表面质量将直接影响高温使用性能,如 $\phi 32\text{mm} \times 4\text{mm}$ 20G 钢管表面有 $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 的直道,在 450°C 时的持久强度要比表面无直道的钢管低10%左右,因此高压锅炉管必须精度高、表面光洁。

5 锅炉及电站用管标准的演变

为适应火电机组向高参数、大容量方向发展,对锅炉及电站用管的质量、品种提出了更高的要求,从而促进了管材标准的提高和完善。我国高压锅炉管标准的演变过程大致经历了三个阶段。

5.1 第一阶段——1965年以前

50年代,我国的火电机组多为容量较小的中压机组($0.5 \times 10^4\text{kW} \sim 1.2 \times 10^4\text{kW}$),其主汽压力为 3.8MPa ,温度不超过 450°C ,使用的材质主要是10和20钢,只在高温过热器上才使用部分低碳 Cr-Mo 钢。在这一时期,所有高压锅炉管都是从原苏联进口的,标准也沿用该国的 ГМТУ2597-54《高压锅炉管及过热蒸汽导管》和 ГМТУ2580-54《锅炉和蒸汽输送管》标准。到了60年代初期,我国的高压火电机组得到较快发展。1958年,我国第1台高压机组诞生,容量为 $5 \times 10^4\text{kW}$ 。随后, $10 \times 10^4\text{kW}$ 的机组也投入运行,其主汽压力为 9.8MPa ,温度 540°C 。锅炉高温段和主汽管道的材质为12Cr1MoV或12CrMo钢,低温段用20钢管。主要管材除进口外,我国各大钢厂也按原苏联标准进行试制。1965年,冶金部参照ГОСТ制订了我国第一个高压锅炉管部颁标准 YB529-65。此标准的化学成分、力学性能、几何尺寸公差、技术要求及热处理制度等与ГОСТ基本相同。

5.2 第二阶段——60年代中期到70年代末期

在此期间,我国第1台 $12.5 \times 10^4\text{kW}$ 超高压火电锅炉制造成功。在这之后, $20 \times 10^4\text{kW}$ 、 $30 \times 10^4\text{kW}$ 超高压火电机组也相继投入运行。此时,我国的小直径高压锅炉管已逐渐形成按冶标批量生产的能力。随着成都无缝钢管厂 $\phi 216\text{mm}$ 、 $\phi 318\text{mm}$ 周期式轧管机组和 $\phi 650\text{mm}$ 热扩管机组的相继投产,高压锅炉管的钢种已有20A、12CrMo、

15CrMo、15MnV、12Cr1MoV、12MoV WBSiXt、12Cr2MoWVTiB、12Cr3Mo-VSiTiB等。于是,1970年冶金部修订并颁布了YB529-70《高压锅炉用无缝钢管管坯》(YB803-70)标准。1978年又颁布了《锅炉用高压无缝钢管的超声波检验法》(YB943-78)标准。

5.3 第三阶段——80年代以后

我国在此期间开始引进美国CE公司亚临界火电机组的设计、制造技术。于是,美国标准和美国火电机组用材也开始进入我国。1985年后,我国在YB529-70标准的基础上,吸收了德国DIN17175-79标准和美国ASMESA213标准的部分内容,制订了GB5310-85《高压锅炉用无缝钢管》和GB5311-85《高压锅炉用无缝钢管管坯》标准,同时又颁布了GB-5777-86《无缝钢管超声波探伤方法》及GB7735-87《钢管涡流探伤方法》。但标准的主体仍未脱离ГОСТ的结构,没有体现出现代冶金及连铸技术的质量进展,也未能完全适应电力工业的发展和体现出对锅炉管的品种、质量的要求,因而,正组织再次修订。

6 锅炉和电站用管的生产工艺及特点

6.1 高压锅炉管生产工艺

高压锅炉管按其生产方式可分为热轧(挤压)管和冷拔(轧)管。小直径,特别是合金高压锅炉管大都采用冷轧、冷拔方式生产,其生产工艺流程为:

热轧管坯→管坯复查之磨修→挤头→退火→酸洗及润滑→冷拔(轧)→切断→热处理→检查→无损探伤(分钢仪检查+涡流+超声波)→修磨或改切→水压→涂漆和标印→光谱检查→入库。

热轧中小直径高压锅炉管一般采用长芯棒轧制工艺,其工艺流程见图2。

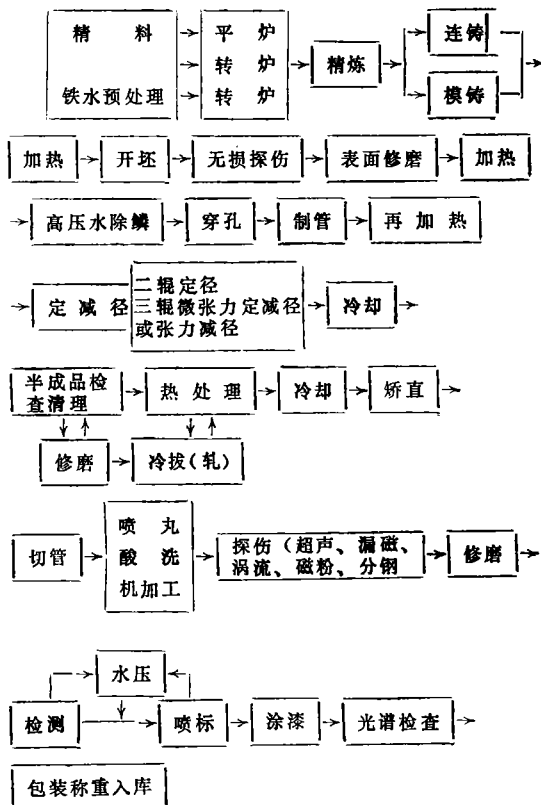


图2 中小直径高压锅炉管热轧生产工艺流程

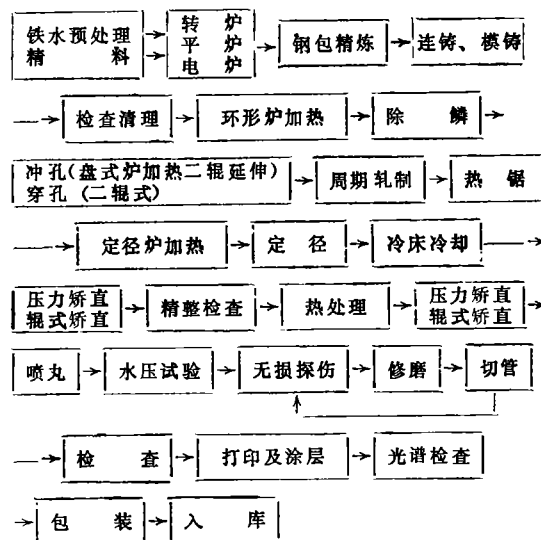


图3 周期式轧管机组生产工艺流程

电站用主汽水管道多为大直径厚壁管,外径219~1066.8mm,壁厚25~109mm。这类钢管主要用大型周期式轧管机组及大型

顶管机组生产,有极少部分用多向模锻挤压机(主挤)方式生产。

大型周期式轧管机组和大型顶管机组的生产工艺流程分别见图3和图4。

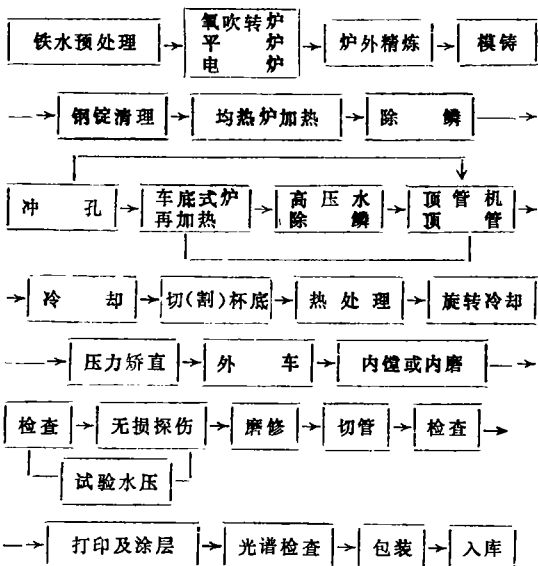


图4 大顶管机组生产工艺流程

6.2 高压锅炉管的质量控制

为了达到高压锅炉管的要求,必须对从原料到成品实行全过程质量控制。

6.2.1 冶金质量的控制

6.2.1.1 化学成分的控制

化学成分差异大将会造成产品的常温和高温性能差异增大,影响钢管的使用寿命。因此,不仅要求同一炉号锭、坯的化学成分波动小,不同炉号锭、坯的化学成分波动也要小。现在国外已将C的波动控制在 ≤ 0.04 。

6.2.1.2 严格控制有害元素,提高钢质纯净度

钢中的S与Fe形成低熔点化合物,使钢产生热脆;P则使钢产生冷脆和回火脆性。S和P都会降低可焊性,促使焊接裂纹产生。所以,锅炉和电站用管对S、P含量的限制很严格。如ASME标准中规定SA106B管用

钢的 $S \leq 0.025\%$, $P \leq 0.025\%$; T91钢的 $S \leq 0.010\%$, $P \leq 0.020\%$ 。因此,国外已将高压锅炉用钢控制在 $S \leq 0.010\%$; $P \leq 0.020\%$ 。

Sn、Sb、Sb、Sn、Pb等有害元素聚集在晶界降低了晶界表面能,削弱了晶界强度,导致晶界裂纹的产生和钢的脆性发展。而且又会降低钢的韧塑性,恶化冷热加工性能,降低持久强度、持久塑性和可焊性等。故要求钢中的 $As \leq 250\text{ppm}$, $Sb \leq 70\text{ppm}$, $Sn \leq 90\text{ppm}$ 。要提高钢的纯净度,有害元素控制必须从钢的冶炼开始。

为降低碳钢和低碳钢的石墨化,要限制钢中的Al含量,钢中的酸溶铝应不大于100ppm,所以锅炉及电站用钢的冶炼宜用Ca-Si脱氧,终脱氧的用铝量应少于1kg/t钢。

6.2.1.3 N、H、O气体含量

钢中的氮与铁化合生成脆而硬的针状 Fe_4N ,导致钢发生塑性降低、热脆、回火脆性及时效脆性。因此要求碳钢中的N含量不大于80ppm,合金钢N含量不大于150ppm(含碳钢除外)。

钢中氢含量过高易产生白点、发纹等缺陷,使钢韧性恶化,焊缝发生冷裂纹,故要求H含量不大于3ppm。

氧能使钢的塑性降低,产生气泡和疏松。特别是氧化物夹杂会使钢的疲劳极限降低,冷热加工性能变坏。标准中规定:氧化物夹杂不超过2.5级。一般O含量不超过10ppm。

6.2.2 管坯的质量控制

高压锅炉管通常采用轧制坯或连铸坯生产,大直径钢管则用钢锭或电渣锭直接轧制。用轧制坯生产锅炉管时,管坯表面要进行清理。清理的方法有火焰清理、砂轮磨修等。火焰清理深度一般为0.3~4.2mm,清理后不仅改善了管坯的表面质量,而且使

后道精整能力提高2~3倍,降低清理费用55%。平均金属消耗为2%~3%。

合金含量超过2%的钢种,一般都进行剥皮。

用钢锭作管坯须进行冷清理,而电渣锭由于质量好可不清理直接轧管。

6.2.3 钢管尺寸公差的控制

钢管的外径、壁厚、椭圆度、弯曲度偏差大,都会使锅炉管特别是电站用大直径钢管的焊接质量降低,增大安装和制作的难度。

近几年来,由于对锅炉用管尺寸精度要求的提高,国外普遍采用长芯棒轧制,以轧出高精度的钢管。MPM机组的成品壁厚偏差在 $\pm 6\% \sim 8\%$;Accu Roll机组生产的产品精度较高,壁厚偏差可达 $\pm 5\%$;周期式轧管机组近年来由于采用了专用孔型车床及改进了喂料器,轧制的大中直径中厚壁管的壁厚偏差可以达到 $\pm 8\%$;大顶管机成品管因采用热加工(内膛外扒),所以尺寸精度更高,完全可以达到用户要求。

另外,采用二辊定径AGC控制和三辊张力或微张力定(减)径,钢管外径精度极高。

电站用主要汽水管由于外径很大,管壁很厚,因此对钢管尺寸精度的要求亦高。如 $30 \times 10^4 \text{ kW}$ 和 $60 \times 10^4 \text{ kW}$ 机组主蒸汽管道所用的 $\phi 534.5 \text{ mm} \times 83.1 \text{ mm}$ 和 $\phi 663 \text{ mm} \times 103 \text{ mm}$ 钢管,其外径公差分别为 $+0.20 \text{ mm}$ 和 $+0.362 \text{ mm}$,壁厚公差均为 $+0.80 \text{ mm}$ 。

6.2.4 钢管表面质量的控制

钢管表面缺陷对使用性能影响颇大。常见的表面缺陷有外折、内折、离层、直道、发纹、结疤、划伤等。通过试验证明,钢管表面缺陷使钢管持久强度明显降低,如有深度 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 直道缺陷的 $20 \text{ G} \phi 32 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 钢管,在 450°C 下的持久强度比光滑钢管的持久强度低10%左右。因此,国内外

都十分重视高压锅炉管的表面质量,并对生产工艺的主要工序实施控制。

(1) 提高锭、坯表面及内在质量,精确控制化学成分。

(2) 采用先进的轧制设备和制管工艺。在制管工艺中采用长芯棒轧制,尤其是限动芯棒轧管工艺,再配置有效的工艺润滑及去除铁皮措施,能够轧出内外表面优良的钢管。此外,推广应用菌式穿孔机及大导盘穿孔机改善了管坯中心的应力状态;改滑动摩擦为滚动摩擦,提高了钢管的表面质量。

(3) 提高工模具的质量。

(4) 采用有效的探伤手段。由于对锅炉及电站用管的可靠性、安全性要求很高,为保证运行安全、经常采用多重探伤,以防缺陷漏检。探伤法有涡流探伤、超声波探伤、磁粉探伤、漏磁探伤、荧光磁粉探伤和荧光浸透探伤等。国内外的高压锅炉管标准多数规定用涡流探伤。经探伤合格的钢管,特别是大直径钢管可不再作水压试验。用探伤代替水压试验必须增设端部探伤防止因盲区而导致漏检。

(5) 准确控制热处理制度。热处理工艺对钢热强性能的影响大于对常温力学性能的影响,而持久强度又是锅炉设计的主要依据。实验数据证明:12CrMoV和12CrMo钢管,回火温度正常较不正常的使用寿命分别高1.5~2.5倍。若在12Cr1MoV显微组织中出现黄块马氏体,580℃、10万小时的持久强度将降低1/3。因此,只有用正确稳定热处理工艺获得优良的组织才能保证持久强度。高压锅炉管的热处理,广泛采用保护气体加热,防止脱碳和恶化表面,推广微机自动控制加热过程,准确执行加热制度。根据不同钢种,不同规格(特别是大直径厚壁管)来选择合适的冷却(空冷、风冷、油冷、水冷等)速度,以获得最佳组织,确保常温、高温性能。

(6) 重视钢管的精整、包装和涂层质量。外径大于219mm的电站用主要蒸汽管道和大直径联箱管,外表面几乎都要经过车削或磨削加工,内表面也要经过镗削和磨削加工以消除内外表面缺陷。所有高压锅炉管均涂有防锈蚀的硬脂脂保护膜,小直径锅炉用管的两端均有塑料端盖。大直径钢管每支上打有标准号、钢号、炉批号、规格、生产厂代号及出厂年月等。喷印的标志要清晰,包装和捆扎要坚固、规范。

7 锅炉及电站用管展望

“八五”期间,我国发电能力将以每年 $1000 \times 10^4 \text{ kW}$ 的速度递增。到1995年,预测需锅炉及电站用管26万t。这个需要量与我国现有生产能力差距甚大,特别是品种、质量的差距更大。大直径电站用管仍基本依靠进口。我国现有的生产设备大部分仍属五六十年代的工艺及装备水平,产品质量差。高参数的锅炉管材尚待开发。因此,必须加速采用国外的先进工艺及装备,改造或新建锅炉及电站用管生产线,迅速提高产品实物质量,扩大产品品种,满足电力工业发展的需要。重点有以下几方面。

7.1 提高冶金质量

推广铁水预脱硫工艺,采用具有喷粉、喂丝、调温、合金化及真空处理等多功能的精炼装置生产锅炉及电站用钢。

7.2 推广连铸坯轧管工艺

当今,日本、德国、意大利、法国等工业发达国家,连铸比均在90%以上。近代设计的现代化无缝钢管轧机,几乎全是采用连铸坯轧管(除合金钢外)工艺。因此,我国在新建或改造无缝钢轧机时,应考虑选用连铸坯,为锅炉及电站用管提供优质、价廉的管坯。

7.3 锅炉及电站用管国产化

“七五”期间,我国火电机组新增容量 $4000 \times 10^4 \text{ kW}$,共耗用高压锅炉管48.5万t。按此发展速度,1995年和2000年,对高压锅炉管的需求量将分别达到26.2万t和38.9万t。为满足上述需要,国家已安排成都无缝钢管厂、上海钢管厂、长城特殊钢公司、齐齐哈尔钢厂等进行技术改造,建高压锅炉管生产线,增加高压锅炉管的产量。在“八五”期间全部建成投产后将形成15万t的生产能力。此外还将建设 $\phi 1066 \text{ mm}$ 大顶管机组。今后还必须在此基础上不断改造现有轧管机组,新建大中直径无缝钢管机组,逐步实现锅炉及电站用管的国产化。

7.3.1 完善亚临界机组用材

加速新材料(如SA106B、SA106C、SA210C、P12、P22、TP304H、TP347H;10CrMo910、13CrMo44、15Mo3等)的研制与推广应用,同时增加钢102和钢106管材的生产。此外,还要积极开发超临界火电机组($60 \times 10^4 \text{ kW}$)用T91、P91、F12、WB36钢及奥氏体不锈钢管等高持久强度热强管的开发。

7.3.2 发展特殊形状管材

为了满足锅炉行业发展的需要,要努力发展内螺管、欧美加管、驼峰管等。

7.3.3 完善和新建高压锅炉管热处理及精整生产线

为确保产品质量,各钢管生产厂应设置专门的热处理和精整生产线。热处理生产线包括计算机控制的先进设备,如氮-氢保护气体炉等,而精整线应有完整的矫直、切断、水压、喷丸、修磨或表面加工机床及喷印、标志、打捆设备。

(收稿日期:1992-09-26)