

进一步提高超超临界机组蒸汽参数应注意的问题

朱宝田 周荣灿

西安热工研究院有限公司, 西安市兴庆路 136 号, 710032

Problems Paid Attention to Raise the Ultra Supercritical Units Steam Parameters

ZHU Baotian ZHOU Rongcan

Thermal Power Research Institute, 136 XingQing Road, Xi'an, 710032

摘要: 论述了进一步提高超超临界机组蒸汽参数应注意的问题, 尤其是关键部件高温材料的问题。从技术基础、效率及选材考虑, 提出目前高效超超临界一次再热机组选用 28MPa/600℃/620℃ 的参数是合适的; 二次再热机组选用 30MPa/600℃/620℃/620℃ 的参数是合适的。进一步提高超超临界机组蒸汽参数要充分认识蒸汽参数提高后的技术风险, 研究和解决关键技术问题。

关键词: 超超临界; 机组; 蒸汽参数; 材料; 关键技术

Abstract: Problems paid attention to raise the ultra supercritical units steam parameters are described, especially the problems of high-temperature material of key components. Form technical basis, efficiency and choice of material the author put forward that, at present highly effective ultra supercritical one reheat units choosing the parameter of 28MPa/600℃/620℃ is appropriate; Double reheat units choosing the parameter of 30MPa/600℃/620℃/620℃ is appropriate. Further improving the ultra supercritical units steam parameters, it is needed to fully understand technological risks after steam parameters improved, to research and solve key-technology problems.

Key word: ultra supercritical; unit; steam parameters; material; key technology

1 前言

超临界和超超临界发电技术经过几十年的发展, 已是成熟的先进技术。在可靠性、可用率、运行灵活性等方面已经和亚临界机组没有差别, 已经有了较多的商业运行经验。

为进一步降低能耗和减少污染物排放, 改善环境, 在材料工业发展的支持下, 超临界机组正朝着更高参数的技术方向发展。目前超超临界机组效率最高的已达到47%。国外超超临界机组参数发展的近期目标主汽压力为31MPa, 蒸汽温度为620℃, 并正在向更高参数的水平发展。欧洲“Thermie 700计划”的目标是使下一代超超临界机组的蒸汽参数达到37.5MPa/700℃/700℃, 从而效率可达52%—55% (海水冷却方式55%, 内陆地区和冷却塔方式52%), 使温室气体CO₂的排放降低15%, 并降低燃煤电厂投资。该

计划预期在2014年完成。

我国发电制造行业与国外支持方在不同合作方式下设计生产超超临界机组。主要蒸汽参数为: 26.25MPa—27MPa/600℃/600℃, 或25MPa/600℃/600℃。

本报告中, 蒸汽参数是指汽轮机入口的参数。一般地, 锅炉出口的蒸汽参数中, 压力比汽轮机入口高5%, 主蒸汽温度高5℃, 再热蒸汽温度高3℃。

2 蒸汽温度超过 600℃ 的超超临界机组情况

表 1 是国际上已经投运或正在建设中的主蒸汽或再热蒸汽温度超过 600℃ 的机组 (不完全统计)。

表 1 国际上高参数超超临界机组

机组	锅炉供应 商	汽机供应 商	所属公司	投运时间	参数 MPa/°C/°C	容量 MW	材料	
							末级过热 器再热器	主汽/再 热管道
橘湾 1#	石川岛	东芝	J-Power	2001. 7	25/600/610	1050	Super304	P91/P91
橘湾 2#	BHK 日立	三菱	J-Power	2001	25/600/610	1050	Super304	P122 P92
新矶子 1#	石川岛		J-Power	2002. 4	24. 1/600/610	600	Super304	P122/P91
新矶子 2#	石川岛	日立	J-Power	2009. 7	25/600/620	600	待查	待查
Torre Nord 2\3\4 (意大利)	Hitachi; Ansaldo	MHI	ENEL	2009. 3 2009. 9 2010. 1	/600/610	3×660		P92
Porto Tolle (意大利)						3×660		
Datteln 4		Hitachi	E. ON	2011	28. 5/600/620	1100		P92 545x98mm 840x 55mm
RDK 8	ALSTOM		EnBW	2011	27. 5/600/620	912		
Westfalen			RWE		600/620	2x 800		
Ensdorf			RWE		600/620	2x 800		
Walsum 10		Hitachi	Steag	2010	29. 0/600/620	750		
Herne			Steag		600/620	750		
Boxberg R		Hitachi	Vattenfall	2010	31. 5/600/610	670		
GKM 9			Grosskraftwerk Mannheim					
Moorburg A/B			Vattenfall		30. 5/600/610	2×820		
Wilhelmshaven (德)			Electrabel					
Maasvlakte(荷 兰)								
Stade (德)								
Neurath			RWE			2×1000		
VKA (study) (待确定)			VKA	2012	27/605/625	500/900		
RWE (study) (待确定)			RWE		30/640/660	550		
Wilhelmshaven			E. ON	2014	35/700/720	550	740 合金	617 合金

* 由于资料来源的不同, 有些机组的蒸汽参数尚未明确是否指汽轮机入口的参数

上述机组中主蒸汽温度均为 600℃, 仅将再热蒸汽温度提高到 610℃或 620℃。主蒸汽压力最高为 31MPa, 机组最大容量为 1100MW。

表中大部分机组的关键部件的高温材料选用情况还不清楚。通过各种渠道了解上述机组确切的运行信息以及正在建设中的主蒸汽或再热蒸汽温度超过 600℃的机组的

设计和建造情况, 特别是材料选用情况, 对于新建蒸汽温度超过 600℃的超超临界机组是至关重要的。

德国 E. ON 公司目前正在 Wilhelmshaven 建设主蒸汽温度为 700℃的示范机组, 其材料大量使用了 Ni 基高温合金。

3 蒸汽参数与效率

从理论上讲, 蒸汽参数愈高, 热效率也随之提高。热力学循环分析表明, 在超临界参数范围的条件下, 主蒸汽压力提高1MPa, 机组的热耗率下降0.13%~0.15%; 主蒸汽温度每提高10℃, 机组的热耗率下降0.25%~0.30%; 再热蒸汽温度每提高10℃, 机组的热耗率下降0.15%~0.20%; 即提高蒸汽的温度对提高机组热效率更有益。蒸汽参数与效率见表2。

日本新矶子电厂1号600MW机组的蒸汽参数为25MPa/600℃/610℃, 背压5.07kPa, 于2002年投运。按ASME PTC6的验收热耗率7264kJ/kWh, 运行5个月后的试验热耗率7274kJ/kWh, 运行10个月后的试验热耗率7314kJ/kWh, 运行28个月后的试验热耗率7318kJ/kWh。按此机组的参数和热耗率推算, 蒸汽参数28MPa/600℃/610℃机组的热耗率应当在7231kJ/kWh左右; 蒸汽参数28MPa/600℃/620℃机组的热耗率应当在7218kJ/kWh左右。

表2 蒸汽参数与效率*

蒸汽参数 (MPa/℃/℃)	热耗率 (kJ/kWh)	热耗率下降 (%)	效率 (%)
26.25/600/600	7296	0.00	45.40
27/600/600	7288	0.11	45.45
27/600/610	7275	0.29	45.53
28/600/610	7264	0.43	45.59
28/600/620	7251	0.61	45.68
28/605/620	7241	0.75	45.74
28/610/620	7231	0.89	45.81
28/600/620/620**	7155	1.93	46.29
30/600/620/620**	7135	2.21	46.42
30/605/620/620**	7125	2.35	46.49
30/610/620/620**	7114	2.49	46.56

* 背压5kPa

** 二次再热

4 蒸汽参数与材料

蒸汽压力的提高要求增加承压部件厚度, 影响承压部件的材料消费量。

压力提高使过程线在焓熵图上向左移动, 汽轮机末级湿度增大, 湿汽损失增加, 末级动叶片的水蚀趋于严重。低压缸的排汽湿度与机组的初参数、再热蒸汽参数的选择以及汽轮机背压存在一定的关系。根据工程经验, 排汽湿度一般控制在10%左右, 最大不应超过12%, 否则将造成末级叶片严重的水蚀, 影响安全运行。若蒸汽参数选择28MPa/600℃/600℃, 背压4.9kPa时, 排汽湿度9.5%, 已经达到了较大的排汽湿度。而再热温度越高, 机组排汽湿度越小, 对末级的经济性安全性越有利。

蒸汽温度的提高对材料品重的选择, 及材料的热强性能、抗高温腐蚀性能、抗蒸汽氧化性能、工艺性能都有更高的要求。

国内制造行业已能够设计制造参数27MPa/600℃/600℃的超超临界机组。与国内制造行业合作的国外技术支持方已有600℃/620℃参数超超临界机组的业绩。

因此, 从设计、选材、及效率考虑, 选用蒸汽参数28MPa/600℃/620℃是可行的, 但要密切关注国外蒸汽温度超过600℃超超临界机组的运行、材料选用和建造的情况。

4.1 主蒸汽管道和集箱

适用于蒸汽温度600℃以上的材料有P122、P92、P911(E911)三种新型耐热钢。

P122钢为住友金属与三菱重工共同开发, 该材料的成分特点之一在于其Cr含量较高, 从抗蒸汽氧化角度来说, 12%Cr的P122钢比9%Cr的P92、P911等更有优势, 而且ASME最初给出的P122钢许用应力与P92接近, 在600℃大约比P91高30%。因此, 在日本大部分超超临界机组采用P122作为主蒸汽、再热蒸汽管道和集箱材料。

但2004年日本敦贺电厂出现事故后, 对P122钢的许用应力大幅度调低, 与P92相比没有强度优势(图1)。原有的再热蒸汽管道(纵缝管)被要求逐步更换。该材料较高的Cr含量使得其金相组织的控制困难, 母材和焊缝中易于产生δ-铁素体, 影响材料的冲击韧性和持久强度, 因此该材料面临成分调整; P122钢的唯一生产商住友金属也转而生产P92钢。但目前还不清楚在日本P122钢的改型进展情况, 新建机组是否以P92代替P122。

P92和P911同为9%Cr钢, P92为日本新日铁开发, 但目前国内外多个钢管厂可以生产, P911为欧洲V&M钢管公司开发。两种材料主要的成分区别是W元素的含量, 前者为1.8%, 后者为1.0%, 最初, 在欧洲关于P911和P92孰优孰劣存在较大的争议, 但通过大量实验数据最终证实P92的持久强度与P911相比有较大的优势。因此在欧洲的新建机组中P92应用越来越普遍。

三种材料性能比较接近, 属于同一级别。P92具有明显的强度优势; P122在高温蒸汽氧化性能方面占优势, 但组织控制困难, 强度低于P92, 应用前景不明确; P911的组织稳定性(特别是运行前期)和工艺性能略好, 但强度和抗腐蚀能力均不占优势。

对于三种材料的使用温度上限, 各种资料给出的数据不尽相同, ASME中P92的许用应力给到了650℃, P911为621℃。根据TPRI从各个角度的分析, 正在制订的国家标准《动力管道》中给出的推荐温度为P92: 625℃, P911: 620℃。但最终的使用温度应根据机组的容量、设计压力、管道布置等等各种因素进行综合考虑。

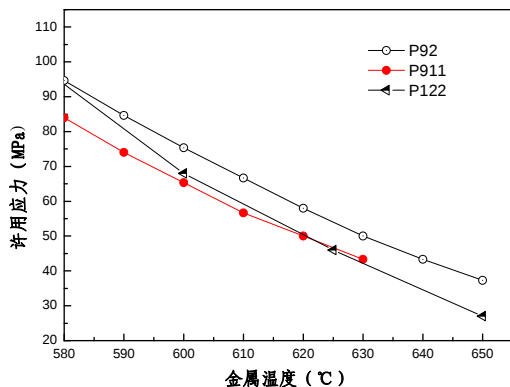


图1 三种主蒸汽管道材料许用应力对比

(1) 强度问题

以国内 W 电厂机组 (主蒸汽压力 27MPa、温度 600℃, 再热蒸汽压力 5.556MPa、再热温度 600℃, 机组容量 1040MW) 作为参照。

1) 主蒸汽温度

在 W 电厂机组主蒸汽管道 (Di362mm, 内径偏差 0-3.175mm, 设计压力 28.35MPa, 设计温度 610℃, 实际订货壁厚 92mm) 基础上进行计算, 计算时不考虑腐蚀余量 (大约 0.5mm) 和壁厚偏差 (大约 0-9mm)。

在主汽压力 27MPa、容量为 1040MW 时, 主蒸汽管道最小计算壁厚与主汽温度的关系见图 2。主汽温度提高到 610℃, 最小计算壁厚为 106.2mm, 实际的管道壁厚将超过 110mm (考虑壁厚偏差), 锅炉范围内的集箱和管道可能超过 120mm (考虑开孔补强等因素)。主汽温度为 620℃ 时, 最小计算壁厚已经超过 126mm。

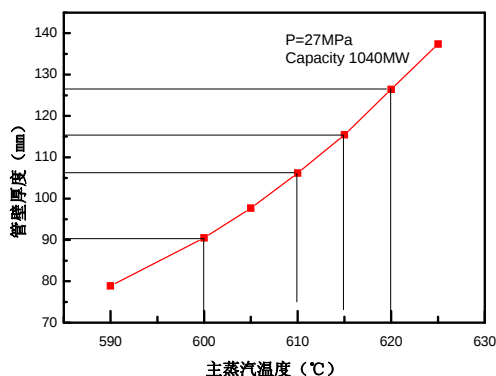


图2

主蒸汽温度对主蒸汽管道最小计算壁厚的影响

2) 主蒸汽压力

图 3 是三种主蒸汽温度条件下主汽压力对管道最小计算壁厚的影响, 基本呈线性关系。在主蒸汽温度维持在 600℃ 时, 压力在一定范围内提高是可行的, 但蒸汽温度提高到 610℃, 壁厚已经很大, 蒸汽压力提高的空间有限。

计算中未考虑压力提高后蒸汽比容的降低, 因此实际需要的管道壁厚应稍小一些。

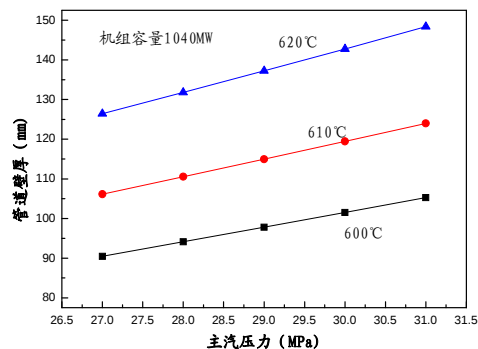


图3

主蒸汽压力对主蒸汽管道最小计算壁厚的影响

3) 再热蒸汽温度

图 4 是再热蒸汽管道热段最小计算壁厚与再热蒸汽温度的关系, 计算时采用的管道内径为 667mm, 内径偏差为 0-3.962mm。可见尽管壁厚同样受到蒸汽温度影响, 但由于压力低, 在 620℃ 时最小计算壁厚为 54mm。

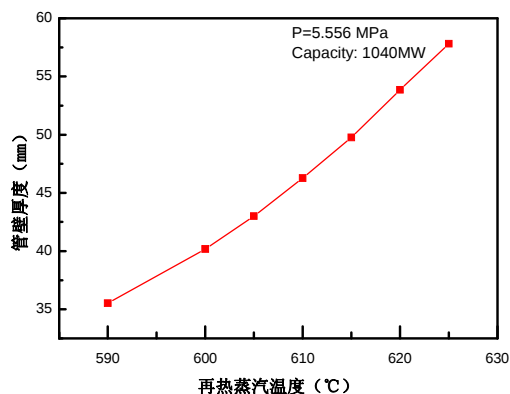


图4

4 再热蒸汽温度对再热热段管道最小计算壁厚的影响

4) 机组容量

图 5 是机组容量对主蒸汽管道最小计算壁厚的影响。当主汽温度为 600℃、压力为 27MPa 时, 维持主汽管道内蒸汽流速不变, 容量为 1200MW 时, 最小计算壁厚 (未考虑壁厚偏差和腐蚀余量) 为 97mm, 容量为 1300MW 时, 最小计算壁厚为 101mm, 容量为 1400MW 时最小计算壁厚为 105mm。

图 6 是容量对再热蒸汽管道热段最小壁厚的影响。在蒸汽温度为 620℃ 时, 容量为 1000MW 时壁厚为 53mm, 1200MW 时为 58mm, 1300MW 时为 60mm。

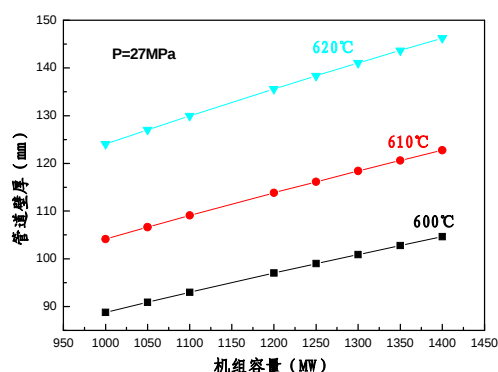


图 5

机组容量对主蒸汽管道最小计算壁厚的影响

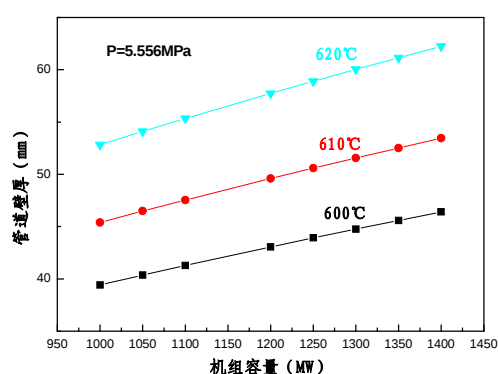


图 6

机组容量对再热蒸汽管道热段最小计算壁厚的影响

综上所述，提高蒸汽温度、压力和机组容量都会导致管道厚度增加。壁厚增加的上限取决于：

- 焊接难度增加；
- 管系对设备推力增加，布置困难；
- 影响启停速率；
- 壁厚过大，材料无法通过正常热处理获得理想的组织；
- 钢管、管件厂的生产能力，弯管厂的弯管能力。

(2) 蒸汽氧化问题

在通常情况下，主蒸汽管道、再热蒸汽不需要考虑在蒸汽环境下的氧化问题，但当一种材料使用在其温度极限附近时，氧化问题就应在选材和设计中加以考虑。

材料的抗蒸汽氧化能力主要取决于 Cr 的含量，在 600℃ 以上，9%Cr 钢应当慎重考虑高温蒸汽氧化可能带来的影响。

由于 W 的添加，在相同 Cr 含量下 P92 的抗氧化能力不如 P91。按照 ASME 规范规定，P92 钢的化学成分允许范围（表 3）非常大，特别是 Cr 的含量可以从 8.50—9.50%，Cr 含量高，抗氧化能力强，但组织中容易出现铁素体组织，材料的强度和韧性受到影响。

因此，当蒸汽温度提高后，需要对 P92 钢提出更严格

的订货技术要求，包括成分控制和组织控制，寻求在高温蒸汽氧化和材料强度两者间的平衡。

表 3 ASME SA335 P92 的化学成分要求

Element	Composition Limits, %
Carbon	0.07–0.13
Manganese	0.30–0.60
Phosphorous, max.	0.020
Sulfur, max.	0.010
Silicon, max.	0.50
Chromium	8.50–9.50
Molybdenum	0.30–0.60
Tungsten	1.50–2.00
Nickel, max.	0.40
Vanadium	0.15–0.25
Columbium	0.04–0.09
Nitrogen	0.030–0.070
Aluminum, max.	0.02
Boron	0.001–0.006
Titanium, max.	0.01
Zirconium, max.	0.01

(3) 组织稳定性

温度超过 600℃，P92 的组织稳定性开始显著降低，包括 Laves 相和 Z 相的析出，导致韧性和强度的降低。根据 TPRI 的实验数据，P92 在 650℃ 经过 10000h，室温冲击功由 136J 降低到 37J。有资料报导，625℃ 下时效 1000h，P92 焊缝冲击功由 70J 降低到 20J，3000h 后降低到 12J。对于母材而言，冲击功的降低还不是问题，但对焊缝的运行安全可能带来极大的风险。因此，要提高蒸汽温度，应当首先对目前的 P92 焊接工艺和焊后热处理进行进一步的优化。

另外，温度提高后 P92 焊接接头出现 IV 开裂的风险大幅度增加，为了避免出现焊接接头出现过大的轴向应力和弯曲载荷，需要重视管系的设计和支吊架运行中的检修调整。

4.2 过热器与再热器

按照目前国内超超临界锅炉选材的实践，过热器、再热器管根据金属温度从低到高，依次可选用 T91、TP347H、Super304H、HR3C。

过热器与再热器的蒸汽氧化问题是超超临界锅炉中应重点考虑的一个问题。蒸汽温度提高后，可以在高温区域多采用 25%Cr 的 HR3C，如果蒸汽温度不超过 625℃，其抗氧化能力应该没有问题。

但 HR3C 的强度比 Super304H 等材料都低。按照 W 电厂机组现有锅炉设计，末级过热器 HR3C 管的规格为 48.3 × 10.2mm，如果蒸汽温度和压力进一步提高，需要锅炉厂根据计算结果确认采用 HR3C 的过热器壁厚是否过大。如果 HR3C 强度不够，可能需要采用 NF709R、TempalloyAA-1 等其它 25%Cr 不锈钢。

W 电厂机组现有末级再热器 HR3C 管的规格为 60.3 ×

4.66mm, 因此提高再热蒸汽温度对末级再热器选材的影响是有限的。

4.3 水冷壁

提高机组压力可能使水冷壁出口金属温度上升, 即使采用哈锅的锅炉设计, 15CrMo、13CrMo44 等材料的强度将不够, 需要采用 T23 等强度更高的材料。表 4 是不同主汽压力下、材料牌号和规格的水冷壁管的最高允许壁温 (仅考虑强度)。

如果按照国内 S 锅炉厂的设计, 目前的机组就必须采用 T23 作为水冷壁材料。

但是尽管 T23 材料强度高, 焊接冷裂纹敏感性低, 但是在制造水冷壁、集箱等部件时再热裂纹敏感性较高, 在国内 W 电厂机组和 N 电厂机组均已出现严重的水冷壁泄漏。

表 4 不同主汽压力、材料牌号和规格的水冷壁管的最高允许壁温 (°C)

主蒸汽温度		25MPa	27.2MPa	31MPa
12	Φ			
	28.6×5.9	532	523	516
	Φ38×6.3	516	500	467
22	Φ			
	28.6×5.9	540	536	528
	Φ38×6.3	518	510	469
23	Φ			
	28.6×5.9	605	600	590
	Φ38×6.3	578	569	556
24	Φ			
	28.6×5.9	589	585	579
	Φ38×6.3	573	567	561

另一选择是欧洲 V&M 开发的 T24, 据称其再热裂纹敏感性较低, 可以取代 T23, 但该材料国内目前还没研究和经验, 需要通过试验进一步落实。

因此, 如果提高主汽压力, 当采用 S 锅炉厂的设计时, 需要对 T23 的焊接技术进行攻关, 解决焊接再热裂纹的问题; 或者采用 T24, 但需对其进行前期的试验研究。

主蒸汽、再热蒸汽温度提高对水冷壁选材的影响不大。

4.4 汽轮机部件

汽轮机高中压缸内的蒸汽流通部件材料是 12%Cr 钢系列, 名义 Cr 含量通常在 10.5% 左右。因此, 只要蒸汽温度不超过 620°C, 这些部件的蒸汽氧化问题不会太突出。

当蒸汽压力、温度等级提高, 机组容量扩大后, 相应的汽缸、转子、叶片等部件尺寸和壁厚增加, 需要汽轮机厂计算后确定能否生产, 并计算壁厚增加对机组启停速率的影响。

机组容量增加后, 需要更大的排汽面积。需要增加排汽口数, 或采用更长的末级叶片, 还可能采用比合金钢叶片更长的钛合金末级叶片。

5 提高蒸汽参数的关键问题

从材料的角度, 目前建议主蒸汽温度 600°C, 再热蒸汽温度可提高到 620°C, 主汽压力和机组的容量可适当提高, 但应结合制造厂的生产能力, 针对具体的压力、温度、容量组合进行综合分析确定。

温度提高后, 为减小运行中出现过大的技术风险, 需要针对可能出现的材料技术问题进行研究, 如:

- T23 的焊接技术, 解决水冷壁再热裂纹开裂问题;
- T24 的试验研究, 包括性能评定和焊接工艺评定;
- P92 焊接和热处理技术优化, 提高焊缝的综合性能;
- P92 的订货技术条件制订, 确保温度提高后材料的抗氧化能力;
- 对一些关键材料在较高蒸汽温度条件下的运行特性进行研究;
- 在建造中需要加强质量控制, 运行过程中加强金属监督。

6 关于蒸汽参数的建议

方案1: 蒸汽参数 28MPa/600°C/620°C。其温度参数与国外正在建造的高参数机组相同。从设计、选材考虑是可行的, 技术风险较小。

方案2: 蒸汽参数 28MPa/605°C/620°C。其主蒸汽温度比国外正在建造的高参数机组提高了 5°C。与主蒸汽有关部件在采用适当增加壁厚等措施后, 主蒸汽温度用到 605°C 在原则上是可行的, 但需要确认过热器等部件的壁厚是否过大, 如采用 HR3C 的强度不够, 可能需要采用 NF709R、Tempalloy AA-1 等其它 25%Cr 不锈钢, 还要进行进一步的论证。

方案3: 二次再热, 蒸汽参数 30MPa/600°C/620°C/620°C。采用二次再热可进一步提高效率, 并降低汽轮机末级的湿度。但二次再热使机组的结构更加复杂, 造价也要上升。

7 需进行研究的专题

(1) 高温材料应用情况、应用业绩和性能的研究

对国外蒸汽温度超过 600°C 超超临界机组的运行、材料选用和建造的情况进行调研和实时跟踪。

研究高温材料在 620°C 的性能: 热强性能、工艺性能、抗高温腐蚀性能、抗蒸汽氧化性能等, 为电厂的设计、建设、运行提供技术支撑。

(2) 提高超超临界机组蒸汽参数的可行性, 及其技术方

案、实施方案的研究。

8 结论和建议

方案1: 蒸汽参数28MPa/600℃/620℃。其温度参数与国外正在建造的两台机组相同。从设计、选材考虑是可行的, 技术风险较小。

方案2: 蒸汽参数28MPa/605℃/620℃。其主蒸汽温度比国外正在建造的两台机组提高了5℃, 原则上是可行的, 但需要确认过热器等部件的壁厚是否过大, 还要进行进一步的论证。

方案3: 二次再热, 蒸汽参数30MPa/600℃/620℃/620℃。采用二次再热可进一步提高效率, 并降低汽轮机末级的湿度。但二次再热使机组的结构更加复杂, 造价也要上升。

从技术基础、效率及选材考虑, 高效超超临界一次再热机组选用 28MPa/600℃/620℃的参数是合适的, 其热耗率低于 7251kJ/kWh, 效率高于 45.68%; 二次再热机组选用 30MPa/600℃/620℃/620℃的参数是合适的, 其热耗率低于 7235kJ/kWh, 效率高于 46.42%。要充分认识蒸汽参数提高后的技术风险, 研究和解决关键技术问题。

参 考 文 献

- [1] 朱宝田, 苗迺金, 雷兆团, 李续军等, 我国超超临界机组技术参数与结构选型的研究, 《热力发电》, 34 (7), 2005
- [2] 朱宝田, 超超临界汽轮机钢材的选用及分析, 清洁高效燃煤发电技术协作网2008年年会, 2008年10月, 南京
- [3] 周荣灿, 范长信, 李耀君, 电站用材的现状与发展趋势《钢管》, 2006年第35卷第1期

朱宝田, 1948 年出生, 男, 江苏省人, 工学博士, 西安热工研究院首席研究员, 享受国务院政府特殊津贴的专家, 从事发电厂设备和系统的研究。