

大型商用快堆管道材料的设计选型研究

李雅平, 熊从峰, 张 瑛, 刘 佳

中国原子能科学研究院, 北京
Email: sdtjedna@aliyun.com

收稿日期: 2021年3月22日; 录用日期: 2021年4月11日; 发布日期: 2021年4月25日

摘 要

科学合理的管道设计选材能够保证大型商用快堆的长期安全运行, 同时降低建设成本。本文以大型商用快堆二回路主冷却系统主管道为研究对象, 将燃煤电站常用P22、P91和P92管道材料与奥氏体不锈钢316进行对比分析, 提出应优选P91作为大型商用快堆管道材料, 同时应开展大口径薄壁管的工艺开发和材料验证工作, 从而实现设计水平与制造水平的完美结合。

关键词

管道材料, 大型商用快堆, 选型研究

Study on the Design and Selection of Piping Materials for Large Commercial Fast Reactor

Yaping Li, Congfeng Xiong, Lu Zhang, Jia Liu

China Institute of Atomic Energy, Beijing
Email: sdtjedna@aliyun.com

Received: Mar. 22nd, 2021; accepted: Apr. 11th, 2021; published: Apr. 25th, 2021

Abstract

Scientific and rational piping material selection can ensure the long-term safe operation of large commercial fast reactor and reduce the construction cost. In this paper, the main pipe of the secondary main cooling system of large commercial fast reactor is taken as the research object, and the piping materials of P22, P91 and P92 commonly used in coal-fired power plant are compared with austenitic stainless steel 316. It is proposed that P91 should be selected as the piping materials of large commercial fast reactor, and at the same time the manufacturing development and

material verification of large diameter thin-walled piping material should be carried out. Thus it can be realized the perfect combination of design level and manufacturing level.

Keywords

Piping Materials, Large Commercial Fast Reactor, Selection Research

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国已建成中国实验快堆(CEFR), 预计于 2023 年建成六十万千瓦示范快堆(CFR600)工程。CEFR 和 CFR600 工程项目的实施, 对促进我国快堆技术产业化发展、实现核燃料闭式循环体系具有重要意义。对于未来大型商用快堆的开发, 要注重降低建造成本、提高市场竞争力, 最终实现快堆技术的商业化推广应用。

快堆中各工艺系统管道犹如人体中的血管, 人没有血管不能生存, 各工艺系统中没有管道就无法实现其各项功能, 因此管道是各工艺系统中的重要组成。据统计[1], 一般管道的工程费用约占整个工程总投资的 20%~30%。随着反应堆大型化、一体化的发展趋势, 对商用快堆管道材料的设计选型提出了更为严格的要求, 科学合理的解决管道设计、安装和运行中的各类问题就能够降低大型商用快堆的建设费用, 保证大型商用快堆的长寿命安全运行, 从而创造出良好的经济效益和社会效益。

2. 钠冷快堆管道设计特点

钠冷快堆管道的设计和安装与其它高温系统十分类似, 采用通用核级标准的设计规范, 分析技术, 材料, 部件和其它附件。快堆系统设计温度高, 要求管道系统必须具有足够的柔性以吸收由于热膨胀和端点附加位移产生的变形。同时, 因要满足较高的抗震设计要求, 管系应具有一定的刚度, 以避免在地震干扰作用下发生强烈振动。大型商用快堆管道设计既要满足柔性要求又要满足抗震刚度要求, 而这两者之间又互相矛盾, 将给管道力学计算和布置设计带来很大困难。对于二回路主冷却系统大口径、薄壁主管道来说, 上述问题特别突出。因此, 本文以二回路主冷却系统主管道为研究对象, 进行大型商用快堆管道材料的设计选型研究。

在 CFR600 的设计过程中, 由于采用多模块蒸汽发生器设计, 二回路主冷却系统设计涉及复杂的多专业耦合, 管道、设备、电气、工艺、仪表、建筑结构、暖通、技术经济多专业交叉, 相互关联相互影响, 牵一发而动全身。为缓解二回路钠泄漏的后果, 在反应堆大厅内, 二回路主冷却系统主管道外设有保护套管。特别指出, 大型商用快堆二回路主冷却系统的管道材料在液态金属钠高温环境下长期服役, 具有大尺寸和薄壁的特点, 这与燃煤电站主蒸汽管道用大口径厚壁管的选材方案有显著不同。燃煤电站的历史经验反馈[2], 奥氏体钢在大口径厚壁管服役过程中可能存在问题, 应避免选用。

3. 大型商用快堆管道的设计选材

国际上已建成的钠冷快堆二回路主冷却系统管道大多选用奥氏体不锈钢制成(见表 1)。奥氏体不锈钢的特点是高温力学性能良好, 与冷却剂液态金属钠具有良好相容性, 并具有良好的工艺性能, 通常采用

的材料牌号为 316 或 304。例如, CFR600 二回路主冷却系统主管道采用 316 不锈钢制造($\Phi 813 \times 15$), 设计温度 550℃。

对于大型商用快堆管道材料来说, 其发展趋势是要求管道材料应具有良好的高温性能, 同时还应具备良好的导热性能及较低的热膨胀系数。日本常阳(JOYO)堆上使用 2.25Cr-1Mo 钢作为二回路管道材料。日本计划建造的 JSFR-1500 堆采用改进型 9Cr 钢作为核岛二回路管道用材[3]。因此, 将燃煤电站高温主蒸汽管道常用低热胀管道材料 P22、P91 和 P92 纳入大型商用快堆二回路主管道候选材料。对设计者而言, 在设计限值内, 应尽量选用有成功运行经验反馈的传统材料, 因此将三种候选低热胀管道材料(化学成分见表 2)与奥氏体不锈钢 316 进行比对分析。

Table 1. Secondary-circuit piping materials of fast react or at home and abroad

表 1. 国内外快堆二回路管道使用的材料

反应堆	国家	二回路管道材料热段(冷段)
Rapsodie	法国	316 (316)
Phenix	法国	321 (304)
Super-Phenix	法国	316 (316)
PFR	英国	321 (321)
CEFR	中国	304 (304)
CFR600	中国	316 (316)
JOYO	日本	2.25Cr-1Mo (2.25Cr-1Mo)
MONJU	日本	304 (304)
JSFR-1500	日本	9Cr-Steel (9Cr-Steel)
BOR-60	俄罗斯	304 (304)
BOR-600	俄罗斯	304 (304)
BOR-800	俄罗斯	316 (316)
FFTF	美国	316 (304)

Table 2. Chemical composition of different piping materials

表 2. 不同管道材料的化学成分

材料牌号	标准号	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
316	SA-312	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	16.0~18.0	2.00~3.00
P22	SA-335	0.05~0.15	0.30~0.60	0.025	0.025	0.50	1.90~2.60	0.87~1.13
P91	SA-335	0.07~0.13	0.30~0.50	0.020	0.005	0.20~0.40	8.00~9.50	0.80~1.05
P92	SA-335	0.07~0.13	0.30~0.60	0.020	0.010	0.50	8.50~9.50	0.30~0.60

4. 低热胀管道材料在燃煤电站中的应用情况

低热胀管道材料的热膨胀系数小且导热率较大, 因此能够有效地降低管道内的热应力水平, 在燃煤电站四大管道中广泛使用, 其中高温段主蒸汽管道用材料、规格见表 3 [4]。燃煤电站主蒸汽管道的材料选择主要依据设计温度[5], 温度由低到高依次选用 P22、P91 和 P92 (628℃以下)。

P22 钢是一种非常成熟的低合金耐热钢。具有良好的冷热加工性能和焊接性能。当 P22 长期在 540℃ 以上运行, 碳化物会从铁素体基体中析出并聚集长大, 降低钢的蠕变强度和持久强度, 一般适用于燃煤电站中壁温小于 580℃ 的过热器管、再热器管, 或者壁温小于 570℃ 的蒸汽管道、联箱。

P91 钢为马氏体型耐热钢。P91 的铬含量高从而大幅提高了钢的抗氧化、抗腐蚀性，铬、钼、锰元素的添加可以保证钢的基体强度，少量的氮可以与钒、铌形成氮化物或复合碳/氮化物 Nb (C、N) 从而产生沉淀强化。含碳量较低增强了钢的组织稳定性，钼元素可以提高再结晶温度，有效延缓高温运行时马氏体的分解。P91 具有良好的高温强度和抗氧化、抗蒸汽腐蚀性能。焊接时应采用低的线能量，严格执行焊接工艺。自 1996 年，我国亚临界机组和超临界机组开始选用 P91 钢作为主蒸汽管道。

P92 钢为马氏体型耐热钢，在 T/P91 钢的基础上，添加 2% 钨，降低钼含量，同时添加钒、钼可有效提高钢的持久强度，微量添加硼可以使钢的晶界强度增加。P91 钢具有良好的高温强度和抗氧化、抗蒸汽腐蚀性能。与 P91 相同，焊接时应注意采用低的线能量，按照焊接工艺严格执行，焊后尽快进行热处理。

目前国内企业已实现 P22、P91 和 P92 大口径厚壁管的工程化生产，例如某企业已实现 P91 厚壁钢管供货(外径 914 毫米，壁厚 41 毫米)。但是，对于一体化大口径薄壁管的生产工艺还有待进一步开发验证。

Table 3. Application of low thermal expansion piping materials

表 3. 低热胀管道材料的应用情况

机组功率	温度(°C)	压力(MPa)	材料牌号	尺寸规格(mm × mm)
300 MW	546	18.3	P22	ID368.3×83.2
		17.5		
	546	18.3	P91	ID368.3 × 41
		17.5		ID368.3 × 38
350 MW	576	25.4	P91	ID318 × 57
				ID305 × 57
600 MW	546	18.3	P22	ID457 × 103
		17.5	P91	ID457 × 47
	576	25.4	P91	ID419 × 70
		610	27.46	P92
660 MW	610	27.46	P92	ID419 × 103
				ID425 × 103
1000 MW	610	27.46	P92	ID368 × 92
		28.84		ID356 × 94

5. 候选管道材料的性能

大型商用快堆管道材料的设计选型应综合考虑材料的使用性能、工艺性能和经济性。本文中仅对不同候选材料的使用性能进行比较。材料的使用性能应根据管道的运行工况确定，主要包括力学性能、物理性能和钠相容性。

5.1. 力学性能

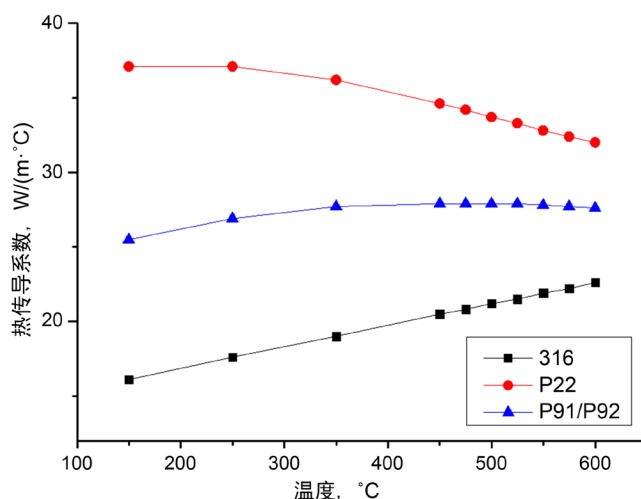
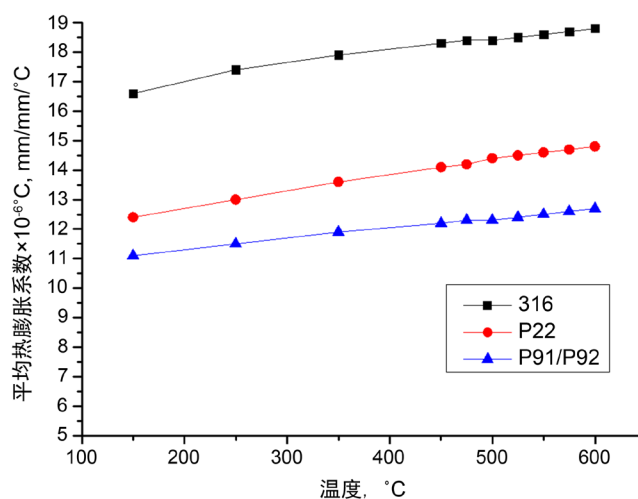
示范快堆二回路主冷却系统管道属于核安全二级设备，要求满足较高的抗震设计要求，管道材料应具有良好的强度。不同管道材料的室温力学性能详见表 4。奥氏体不锈钢 316 的屈服强度与 P22 相当，低于 P91、P92 室温屈服强度的 50%，但延伸率比三种铁素体管道材料提高至少 2 倍。

Table 4. Mechanical properties of different piping materials (room temperature)**表 4.** 不同管道材料的力学性能(室温)

材料牌号	屈服强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	延伸率(%)
316	205	515	45
P22	205	415	22
P91	415	585	20
P92	440	620	20

5.2. 物理性能

不同管道材料的热传导系数和热膨胀系数见图 1 和图 2。不同温度下, 四种候选材料中 P22 的热传导系数最高, 是一种十分优良的换热材料, CEFR 和 CFR600 建造过程中均选用 T22 材料制造蒸汽发生器换热管。室温下, P91/P92 材料的热传导系数比 316 增加 58%, 热膨胀系数降低 31%。

**Figure 1.** Thermal conductivity coefficient of different piping materials**图 1.** 不同管道材料的热传导系数**Figure 2.** Thermal expansion coefficient of different piping materials**图 2.** 不同管道材料的热膨胀系数

5.3. 钠相容性

大型商用快堆管道应考虑材料与液态金属钠的相容性。管道中的合金元素在钠中会选择性溶解,造成壁厚减薄。腐蚀速率的大小依赖于很多因素,例如温度、氧浓度、钠流速和腐蚀时间等。快堆蒸汽发生器换热管用国产 2.25Cr-1Mo 钢的腐蚀速率很低(低于 500℃) [6], 2000 小时后腐蚀速率达到平衡。随着温度的升高, 2.25Cr-1Mo 钢的腐蚀速率明显加大。另有报道[7], T91 在流动液态金属钠中的抗腐蚀能力明显优于 T22。

6. 结论

本文以大型商用快堆二回路主冷却系统主管道为研究对象, 结合核级钠管道的设计选材要求, 将燃煤电站主蒸汽管道常用 P22、P91 和 P92 材料与奥氏体不锈钢 316 进行对比分析, 得出以下结论:

- 1) 在热物理性能方面, P22、P91、P92 明显优于奥氏体不锈钢 316。
- 2) 在力学性能方面, P91 和 P92 的强度高于奥氏体不锈钢 316, 但塑形稍低。
- 3) 根据现有 T22、T91 的钠相容性实验数据推测, P91 的钠相容性优于 P22。

4) 综合燃煤电站设计选材的经验反馈, 结合大型快堆服役工况, 三种低热胀候选材料中应优选 P91 作为大型商用快堆二回路主冷却系统主管道材料, 可以有效解决高温大口径薄壁管的设计难题; 同时, 应尽快启动国内一体化大口径薄壁管的生产工艺开发和材料验证工作, 保证工程化规模生产的材料质量可以满足设计要求, 从而实现设计水平与制造水平的完美结合。

参考文献

- [1] 张德姜, 赵勇. 石油化工工艺管道设计与安装(第三版) [M]. 北京: 中国石化出版社, 2013.
- [2] Henry, J., Zhou, G. and Ward, T. (2007) Lessons from the Past: Materials-Related Issues in an Ultra-Supercritical Boiler at Eddystone Plant. *Materials at High Temperatures*, **24**, 249-258. <https://doi.org/10.3184/096034007X277924>
- [3] Uematsu, M.M., Prele, G., et al. (2014) Comparison of JSFR Design with EDF Requirements for Future SFR. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **52**, 434-447. <https://doi.org/10.1080/00223131.2014.953015>
- [4] 国家能源局. DL/T 695 电站钢制对焊管件[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [5] 刘正东, 陈正宗, 何西扣, 等. 630~700℃超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展[J]. 金属学报, 2020(4): 539-548.
- [6] 许咏丽. 国产快堆材料与高温钠的相容性研究概况[J]. 核科学与工程, 2008, 28(2): 125-128.
- [7] 付晓刚, 龙斌, 张金权, 等. 改进型 9Cr-1Mo 钢在快堆蒸汽发生器上的应用[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2009(1): 29-32.