

S30432 奥氏体不锈钢弯管热处理工艺与性能

巴发海 鄢国强 余义斌 姚威廉

(上海材料研究所 上海 200437)

卢征然 魏征

(上海电气集团有限公司 上海 200245)

摘要: S30432 奥氏体不锈钢炉管冷弯后, 对弯管的热处理工艺和性能进行了试验研究。结果表明, 弯后 1150℃ 固溶处理工艺会导致奥氏体晶粒粗大以及晶粒度的极端不均匀。1110℃ 和 1060℃ 固溶处理后, 奥氏体晶粒大小均匀, 固溶后直管部分保持了原始管子的晶粒度, 弯管变形最大区域晶粒细化, 晶粒度达 8~9 级; 弯曲变形最大部位的强度性能也高于原始直管, 韧性指标与之基本相当。分析认为, 冷弯后 1060℃~1100℃ 固溶处理工艺较为合适, 能够满足超超临界锅炉管的技术指标要求。

关键词: 奥氏体, 不锈钢, 炉管, 弯管, 热处理, 晶粒度, 力学性能

Effect of Heat Treatment on Properties of Austenite S30432 Stainless Steel
elbow Pipe for Boiler Application

Ba Fa-hai Yan Guo-qiang Yu Yi-bin Yao Wei-lian

(Shanghai research institute of materials shanghai 200437,
China. Correspondent: BA Fa-hai, E-mail: bafahai@163.com)

Lu Zhen-ran Wei Zheng

(Shanghai Electric Group LTD. 200245)

Abstract: A new austenite S30432 stainless steel elbow pipe was prepared, and the effect of heat treatment technology on properties of S30432 elbow pipe was investigated. The results show that the 1150℃ solution strengthening lead to the grain size nonuniform and large austenite grain occurring. Solution process at 1110℃ or 1060℃, the uniform and fine austenite grain was obtained, with a austenite grain size 8~9 grade even if at the largest deformation zone, which still keep the same grain size in comparison with the original direct tube. While, the tensile strength at the zone is higher than that of direct raw tube, and the plastic properties are equivalent to the later. At the results, it is the best suitable solution processing temperature for S30432 elbow pipe at 1060℃ to 1100℃, and the mechanical properties and grain size all meet with the specifications for super- super boiler pipe application.

Keywords: austenite, stainless pipe, boiler pipe, elbow pipe, heat treatment, grain size, mechanical properties

2 引言

Super304H 不锈钢是日本住友和三菱重工共同研究开发的一种超超临界锅炉用高温材料^[1-3], 常用作过热器和再热器部件。Super304H 实际上是在 ASME SA-213 TP304 基础上, 通过降低 Mn 含量上限, 加入约 3%Cu、0.45%Nb 和微量的 N, 使其在高温服役环境下通过含 Nb 化合物强化相的弥散析出强化以及奥氏体内析出富 Cu 相, 从而使其具有较高的高温强度、高温塑性和抗高温氧化的最佳组合。Super304H 在 2000 年被 ASME

收稿日期:

作者简介: 巴发海 (1966-), 男, 河南, 高级工程师, 博士

上海市科委重点项目 (075211017): 重大装备用高性能结构材料及工艺技术研究

CODE CASE2328 予以承认^{[2][3]}。国内一些单位曾对其作了一些前期的工艺评价工作^{[2][5]}，证实 Super304H 管具有较好的弯曲变形能力。Super304H 炉管在国内外的应用已有数十年的历史^{[4][5]}。S30432 奥氏体不锈钢炉管是国内试制的 Super304H 炉管的替代材料，目前国内尚缺少 S30432 材料炉管工艺和性能方面的研究数据。本文对国产 S30432 不锈钢炉管(固溶态)进行了弯后热处理工艺和性能研究，以期确定弯管后合适的热处理工艺，从而为实际的工业生产应用提供测试和分析依据。

3 实验方法

3.1 炉管化学成分和规格

试验用炉管材料化学成分如表 1，规格 $\Phi 51 \times 9.5$ 。

表 1 弯管的化学成分/%

Tab.1 chemical compositions/%

elements	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Nb	N	B	Al
content	0.084	0.28	0.84	0.005	0.013	18.28	8.81	2.94	0.60	0.096	0.004	0.010

3.2 弯管热处理工艺

弯管在模具中 180° 冷弯成形(见图 1)，弯曲半径 $R=2.5D$ (D 为弯曲直径)。弯后分别采用 1150°C、1110°C、1060°C 进行固溶热处理，具体热处理工艺见表 2。

表 2 弯管热处理工艺

Tab.2 the elbow pipe processing

Specification/ forming parameter	Heat treatment
$\Phi 51/R121 \times 180^\circ$	1150°C, 5min, air cooling
	1110°C, 5min, air cooling
	1060°C, 5min, air cooling



图 1 弯管实物照片

Fig.1 the elbow pipe photo

3.3 样品的制备

拉伸、硬度和晶粒度测试试样分别在变形最大的 90° 位置(图 1 中上部)以及未变形的直管位置取样。受管壁厚度和变形的影响，拉伸取 $\phi 3$ 小规格试样。

3.4 测试设备

硬度测试在洛氏硬度计上进行。拉伸性能测试在万能试验机上进行。根据 GB/T 6394/ASTM 评级图在 Leica DIM5000M 金相显微镜上对金相试样进行奥氏体晶粒度评级。

2 试验结果

2.1 拉伸试验

拉伸试验结果示于图 2 和图 3。

2.1 硬度测试

弯后不同位置的硬度测试结果示于图 4。

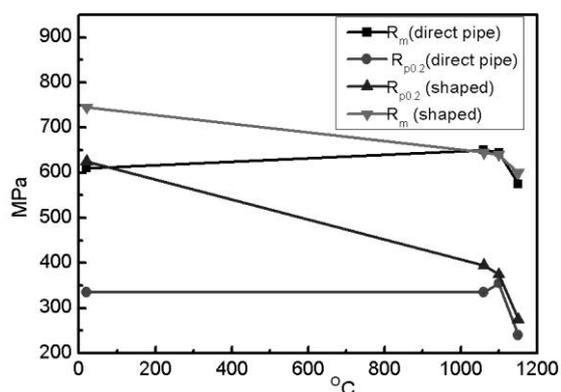


图 2 热处理前后拉伸强度测试结果

Fig.2 tensile strength changes

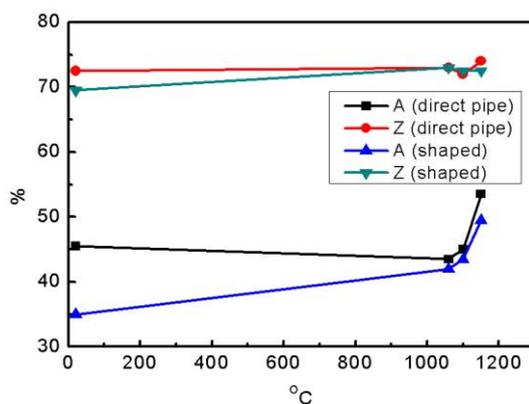


图 3 热处理前后塑性指标变化

Fig.3 plastic properties changes

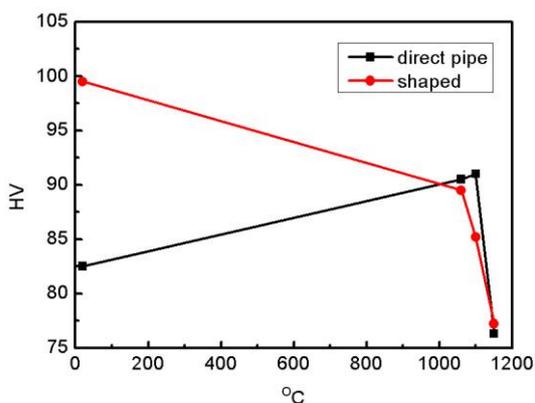


图 4 弯后直管段和 90° 变形位置硬度变化

Fig.4 hardness curves at 90° site

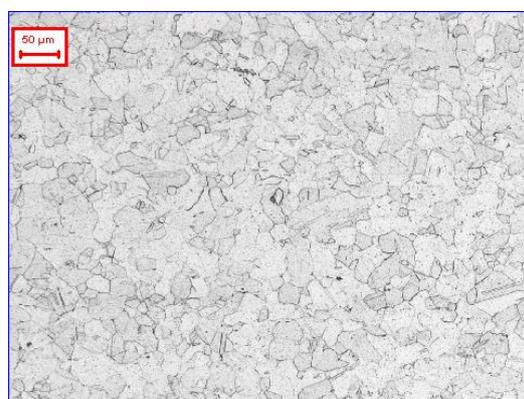


图 5 原始管晶粒度 (100×)

Fig.5 original grain shapes

2.2 晶粒度

原始管材（直管）晶粒度评定为 7~8 级；弯后最大处理变形（90°）部位晶粒有拉长变形的痕迹，但晶粒度仍保持在 7~8 级。经 1150°C 固溶处理后最大处理变形（90°）部位晶粒粗化，晶粒度大多为 1~5 级（约占 70%），少数区域晶粒度保持 7~8 级；经 1110°C 和 1060°C 固溶处理后晶粒度细于原始管材为 8~9 级。

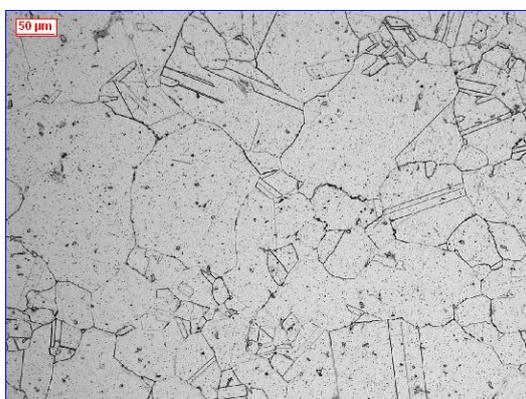


图 6 1150°C 固溶 (100×)

Fig.6 grain shapes (1150°C 100×)

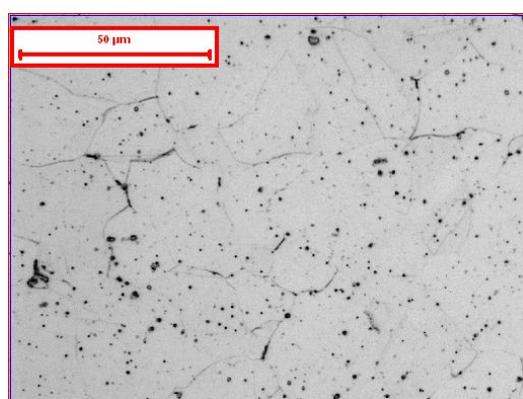


图 7 1110°C 固溶 (500×)

Fig.7 grain shapes (1110°C 500×)

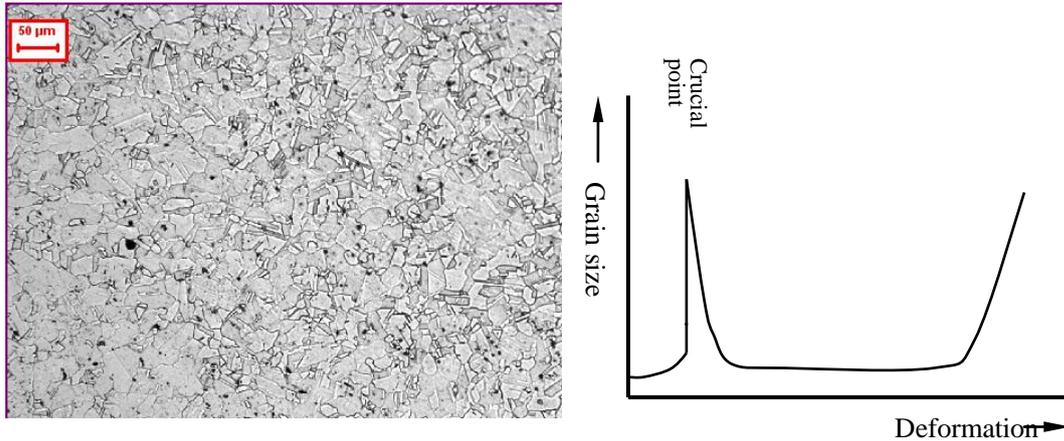


图 8 1060°C固溶 (100×) 图 9 晶粒尺寸和临界变形度关系示意图

Fig.8 grain shapes(1060°C 100×) Fig.9 relation sketch between grain size and crucial deformation

3 分析与讨论

4.1 力学性能

从图 2~图 3 曲线可以看出,直管经弯管变形后强度有较大幅度的升高,尤其是屈服强度上升较多,塑性指标中伸长率下降较多,断面收缩率变化不大。相应地硬度也有较大幅度的升高。显然,这些变化是形变强化的结果。

经固溶处理后,变形最大部位和直管的力学性能基本趋于一致,显然弯管的形变强化效应得到较大程度的消除。随固溶处理温度升高,强度下降,塑性上升。在 1060°C 和 1100°C 固溶管子具有较高的强度和相对较好的塑性。1150°C 固溶后强度发生大幅度下降,其原因可以从下述的晶粒度变化解释。

4.2 晶粒度

弯管前晶粒度均为 7-8 级(图 5),直管部分经 1150°C 固溶处理后,晶粒度为 5~6 级,有一定程度的长大。尽管直管段不存在变形效应,而且在弯后的固溶热处理过程中也没有重结晶相变,但实验表明固溶温度过高奥氏体晶粒也会逐渐长大。

弯后最大变形部位经 1150° 再固溶,晶粒度大多在 1~5 级,局部保留 7~8 级,均匀性变差(图 6)。说明 1150° 固溶处理温度偏高,晶粒长大倾向严重。长大效应使得炉管的力学性能大幅降低。

弯后经 1100°C 和 1060°C 固溶处理后,变形部位的晶粒度均明显细化(图 7 和图 8)。说明低温固溶可以抑制变形部位的晶粒长大。从晶粒度的变化分析,在实际变形度条件下其再结晶温度低于 1060°C。据文献的介绍^{(2) (5) (6)},对一般 SUPER304 钢管供货状态的固溶处理温度 $\geq 1100^{\circ}\text{C}$,最佳热处理固溶温度为 1150°C。上述分析表明,1150°C 固溶温度可能仅仅适合于轧管(直管)的终态热处理,可以控制较细晶粒度。但对于固溶态直管产品,弯后由于局部重新产生较大幅度的变形,再经过 1150°C 高温固溶处理后其晶粒度严重长大,不符合火电使用 7 级更细的规定^[5]。显然,弯后 1150°C 固溶温度偏高。而 1110°C 和 1060°C 的固溶处理可以保持再结晶后晶粒度细于 8 级,其固溶处理温度是合适的。

金属材料的性能和晶粒大小密切相关。控制再结晶后的晶粒尺寸是所有金属材料生产中的一个重要问题。大量试验证明⁽⁷⁾,再结晶晶粒大小与预先冷变形程度之间有图 9 所示的关

系。在临界变形度，金属的晶粒尺寸会迅速长大，形成粗大晶粒。对一般金属而言，临界变形度通常在 2~10% 范围内。当超过临界变形度后，随变形的增加晶粒又变细。试验弯管经测试变形度在 7~9%，因此，变形后在较高的固溶温度下，晶粒度会迅速长大。温度高、变形程度大、储能增加会促进再结晶过程的形核率和生长率，使得再结晶孕育期和整个再结晶过程缩短。严格控制固溶加热温度和保温时间以及加热速度可防止形成粗大的晶粒。上述实验证明，1110℃ 和 1060℃ 固溶处理的晶粒度是满足超超临界锅炉的技术要求的。理论上固溶温度选择在 1110℃ 和 1060℃ 之间也是完全可行的。

4 结论

S30432 弯管后合适的固溶处理温度为 1060~1110℃。既可以保证管子的力学性能高于原始管材，也可以控制最大变形部位的晶粒度满足火电技术规定的细于 7 级要求。

参考文献：

- (1) . 杨冬, 徐鸿. 浅议超超临界锅炉用耐热钢[J]. 锅炉制造. 2006 (2): 6~8.
- (2) . 孙玉梅, 邹小平. Super304H 不锈钢锅炉管评述 [J]. 锅炉技术, 2007, 38(1): 52~55
- (3) . 张显. 超临界/超超临界锅炉选材用材[J]. 锅炉制造. 2004, 18(5): 307~312
- (4) . 韩建伟. 日本锅炉用新型不锈钢管的开发[J]. 焊接, 2002(6): 16~17
- (5) . 繆玲, 王展鹏. 超(超)临界锅炉用钢管 Super304H 与 XA704 性能特点评价[J]. Dongfang Electric Review. 2006, 20(3): 31~36
- (6) . The ASME Boiler and Pressure Vessel Standards Committee. Case of ASME ASME Boiler and Pressure Vessel Code 2328.
- (7) . 郑子樵. 材料科学基础[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005, 374~376