

压力容器用 12Cr2Mo1R 钢 150 mm 超厚板热处理对组织和性能的影响

何 贝 徐 光 袁 清

(武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室;湖北省高性能钢铁材料协同创新中心,武汉 430081)

摘 要 试验用 12Cr2Mo1R 钢 (/%: 0.08C, 0.07Si, 0.45Mn, 2.16Cr, 0.95Mo, 0.18Ni, 0.14Cu, 0.015Al, 0.015Sn) 经电弧炉-300 mm × 2 000 mm 电渣重熔扁坯轧制成 150 mm 厚板 (开轧 1 145 °C, 终轧 850 °C)。通过热模拟试验和温度场的有限元仿真得出 12Cr2Mo1R 钢的静态连续冷却转变 (CCT) 曲线和超厚板表面、厚度 1/4 处和 1/2 处 (心部) 的冷却温度曲线。热轧板经 916 °C 226 min 正火, 698 °C 240 min 回火后, 钢板 1/4 厚度处为贝氏体 + 少量铁素体, 1/2 厚度处为贝氏体 + 铁素体, 其力学性能- 屈服强度 464 MPa, 抗拉强度 585 MPa, 伸长率 22%, 符合供货要求。

关键词 压力容器用钢 12Cr2Mo1R 150 mm 超厚板 热处理 组织 力学性能

Effect of Heat Treatment on Structure and Properties of 150 mm Ultra-Heavy Plate of Steel 12Cr2Mo1R for Pressure Vessel

He Bei, Xu Guang and Yuan Qing

(The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy; Hubei Collaborative Innovation Center for Advanced Steels, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract The tested steel 12Cr2Mo1R (/%: 0.08C, 0.07Si, 0.45Mn, 2.16Cr, 0.95Mo, 0.18Ni, 0.14Cu, 0.015Al, 0.015Sn) is melted by EAF then electro-slag remelted to 300 mm × 2 000 mm slab and rolled to 150 mm heavy plate (rolling temperature region 1 145 ~ 850 °C). The static continuous cooling transformation (CCT) curves and the cooling temperature curves of surface, 1/4 thickness and 1/2 thickness (center) of ultra-heavy plate of steel 12Cr2Mo1R are obtained by thermal simulation test and finite element simulation of temperature field. With normalized at 916 °C for 226 min and tempered at 698 °C for 240 min the structure of hot rolled plate at 1/4 thickness is bainite + minor ferrite, and that at 1/2 thickness is bainite + ferrite, its mechanical properties are yield strength 464 MPa, tensile strength 585 MPa and elongation 22% to meet the requirement of user.

Material Index Steel 12Cr2Mo1R for Pressure Vessel, 150 mm Ultra-Heavy Plate, Heat Treatment, Structure, Mechanical Property

12Cr2Mo1R 厚钢板是制造临氢设备所使用的主要钢板,随着市场对高性能大型中温临氢压力容器用钢需求的增加,以及用户对钢材性能要求的提高,各钢企对压力容器钢的研究也越来越多。国内外大量研究表明,12Cr2Mo1R 厚钢板组织以贝氏体组织为主时,具有良好的强韧性匹配^[1-3]。姜洪生^[4]等采用 ABAQUS 软件来模拟 12Cr2Mo1R 厚钢板的冷却过程,研究了空冷条件下钢板芯部得到贝氏体组织的临界厚度。李文钱^[5]等探讨了低温压力容器钢的热处理工艺对力学性能和微观组织结构的影响^[6]。目前,关于 12Cr2Mo1R 厚钢板热处理的研究大部分都针对 120 mm 以下的钢板,很少涉及到 150 mm 的超厚板。

本文结合温度场有限元仿真和热模拟实验结果,对 12Cr2Mo1R 钢 150 mm 超厚板进行实验室热

处理实验,研究和优化压力容器用 12Cr2Mo1R 钢 150 mm 厚板 1/4 处获得贝氏体的热处理工艺^[7],并将实验结果应用到工业生产中。

1 实验方案

实验材料为钢厂生产的压力容器用 12Cr2Mo1R 钢,其化学成分见表 1。

在 Gleeble-3500 热模拟机上对试样钢种进行热模拟实验,取样部位为宽度中间厚度的 1/4 处,测定静态 CCT 曲线。运用 ABAQUS 软件,模拟 12Cr2Mo1R 超厚板热处理过程中温度场的变化。

表 1 12Cr2Mo1R 压力容器钢化学成分/%

Table 1 Analysis of steel 12Cr2Mo1R for pressure vessel /%								
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Sn
0.08	0.07	0.45	2.16	0.95	0.18	0.14	0.015	0.015

通讯作者:徐 光,教授,武汉科技大学材料与冶金学院,武汉 430081

E-mail: xuguang@wust.edu.cn

参考其他研究人员的工作^[8-9],结合热模拟及有限元仿真结果,确定实验室热处理工艺为 910 ℃ 正火 + 680 ℃ 回火,并对热处理后的试样进行金相组织和力学性能检验。同时将实验室研究结果应用到工业生产中,对超厚板进行工业生产试验,工业实验钢种为 12Cr2Mo1R 压力容器钢,电弧炉冶炼成断面尺寸 (mm) 为 150 × 150 小方坯,焊接成假电极,利用电渣重熔进行二次冶炼,电渣坯的断面尺寸 (mm) 为 300 × 2 000 × 4 500,电渣锭重 20 t。轧制工艺为:开轧温度 1 145 ℃,终轧温度 985 ℃,轧制 10 个道次,轧制厚度 150 mm,轧后冷却工艺为水冷。轧制热处理工艺为正火 + 回火,正火温度为 916 ℃,保温 226 min,水雾冷却到室温,回火温度为 698 ℃,保温 240 min,空冷至室温。对工业试验后的试样进行拉伸试验和金相组织检验,并进行 -20 ℃ 和 0 ℃ 冲击试验,观察断口形貌。

2 实验结果及分析

2.1 实验室热模拟及有限元仿真结果

图 1 为 12Cr2Mo1R 钢的静态 CCT 曲线,该曲线表明当冷却速度在 2.0 ~ 5.0 ℃/s 时,转变产物为贝氏体组织。图 2 是模拟 150 mm 厚板水冷过程得到的有限元模拟冷却曲线,该曲线表明 150 mm 厚钢板 1/4 处在较高的温度范围(800 ~ 600 ℃)内,平均冷却速度为 3.58 ℃/s,可以避开高温转变区,在较低温度范围(600 ~ 400 ℃)下,平均冷却速度为 2.08 ℃/s。

2.2 金相组织

在 KSX-4-13 电炉上进行实验室模拟试验,试样尺寸规格 (mm) 为 60 × 10 × 3,实验室确定的热处理

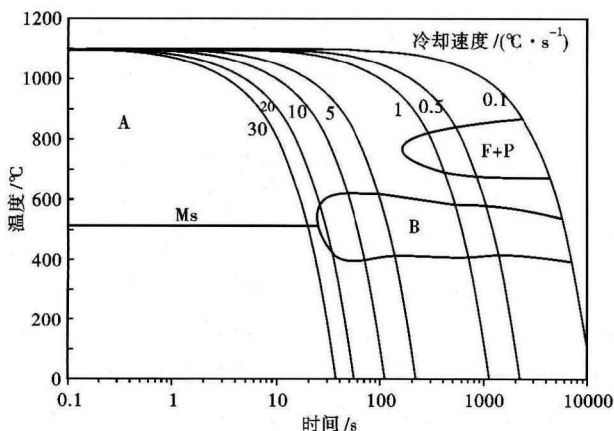


图 1 12Cr2Mo1R 钢静态 CCT 曲线

Fig.1 Static continuous cooling transformation curves of steel 12Cr2Mo1R

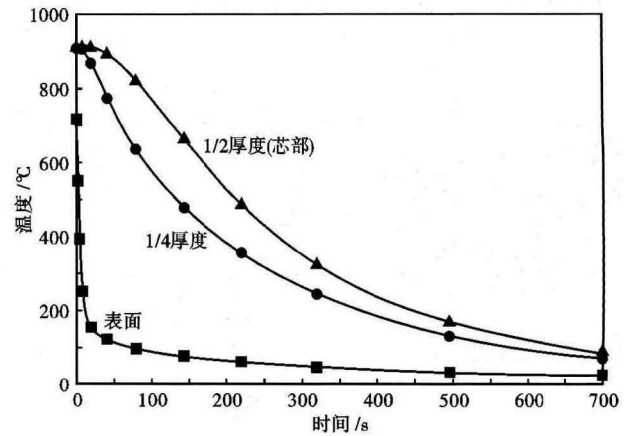


图 2 有限元仿真 12Cr2Mo1R 钢超厚板表面、1/4 厚度和 1/2 厚度处的冷却温度曲线

Fig.2 Cooling temperature curves of steel 12Cr2Mo1R at surface, 1/4 thickness and 1/2 thickness of ultra-heavy plate by finite element simulation

工艺为正火温度 910 ℃,保温 10 min,根据有限元温度场仿真结果,保温后试样分别随炉冷却、空冷和水冷到室温,分别模拟 150 mm 厚板宽度中间的芯部、1/4 处和表面的冷却条件。然后进行回火处理,回火温度 680 ℃,保温 60 min,空冷至室温。图 3 可以看出,热处理后 150 mm 超厚板表面组织为索氏体 + 回火马氏体,1/4 处组织为贝氏体 + 少量铁素体,1/2 处(芯部)组织为贝氏体 + 铁素体。

工业实验热处理工艺正火温度为 916 ℃,保温 226 min,水雾冷却到室温。回火温度为 698 ℃,保温 240 min,空冷至室温。图 4 为 150 mm 厚板实际工业实验热处理后的金相组织,可以看出,热处理后的超厚板宽度中间的表面组织为索氏体 + 回火马氏体,1/4 处组织为贝氏体 + 少量铁素体,芯部组织为贝氏体 + 铁素体,与实验室模拟结果基本一致。

2.3 力学性能

表 2 为实验室模拟 150 mm 厚板进行 910 ℃ 正火 + 680 ℃ 回火热处理后的宽度中间部位 1/4 处和 1/2 处(芯部)的力学性能。可以看出,力学性能均达到厂家标准(屈服强度 ≥ 310 MPa,抗拉强度 520 ~ 680 MPa,伸长率 ≥ 19%)。

表 3 是 150 mm 厚板实际工业实验热处理后各项力学性能。可以看出,其各项力学性能与实验室结果相一致,并符合供货要求。

2.4 断口分析

对工业试验热处理后的 150 mm 厚度 1/4 处试样进行 -20 ℃ 和 0 ℃ 断口冲击试验,观察断口形貌,结果见图 5。结果表明,断口形貌为等轴韧窝状,深而大的韧窝分布比较均匀,数量较多,解理花样断面很

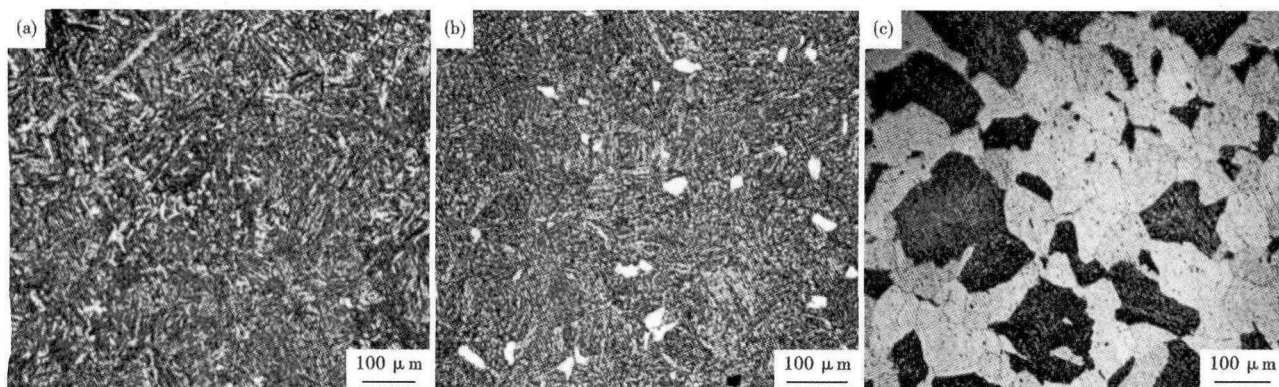


图3 实验室模拟热处理后 150 mm 厚板(a)表面;(b)1/4处;(c)1/2处组织形貌

Fig.3 Morphology of structure at surface, 1/4 thickness and 1/2 thickness of 150 mm heavy plate simulated heat-treated in laboratory

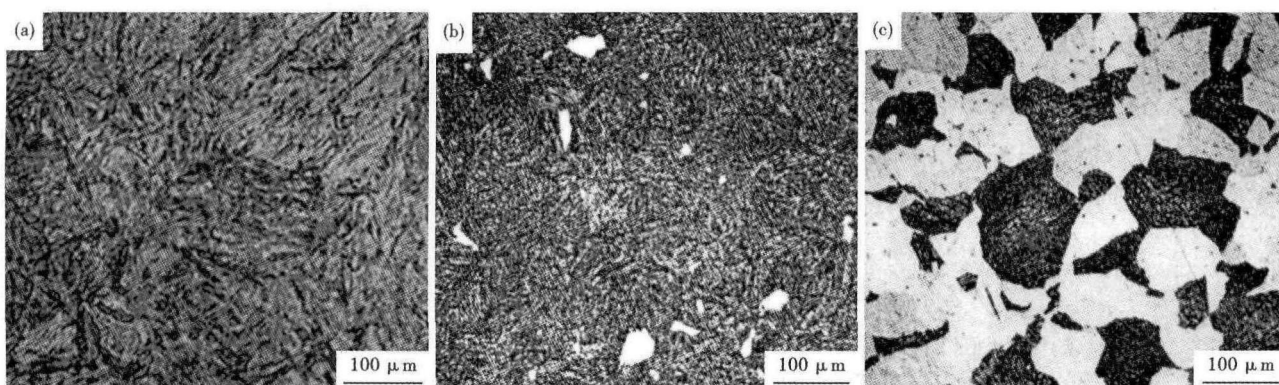


图4 工业实验热处理后 150 mm 厚板(a)表面;(b)1/4处;(c)1/2处的组织形貌

Fig.4 Morphology of structure at surface, 1/4 thickness and 1/2 thickness of pilot commercial heat-treated 150 mm heavy plate at steelworks

表2 实验室模拟热处理 150 mm 12Cr2Mo1R 钢厚板力学性能

Table 2 Mechanical properties of 150 mm heavy plate of steel 12Cr2Mo1R simulated-heat-treated in lab

取样部位	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
厚度 1/4	446	561	25
厚度 1/2(芯部)	405	504	28

表3 实际生产 150 mm 12Cr2Mo1R 钢厚板力学性能

Table 3 Mechanical properties of 150 mm heavy plate of steel 12Cr2Mo1R commercial produced at steelworks

取样部位	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
厚度 1/4	464	585	22
厚度 1/2(芯部)	420	561	21

少,说明材料在 0 °C 和 -20 °C 下韧性良好。

2.5 结果分析

压力容器用 12Cr2Mo1R 钢组织应为贝氏体组织,由该钢种静态 CCT 曲线可以看出,CCT 曲线存在 3 个组织转变区:铁素体区、贝氏体区、马氏体区,正火温度 910 °C 下,水冷能较快地进入贝氏体相变

区。随着正火温度的提高,合金元素在奥氏体中的固溶量增加,提高了奥氏体的稳定性,使珠光体和铁素体的转变曲线右移,因此,正火温度较高时更容易形成贝氏体组织。当冷却速度为 0.1 °C/s 时,转变产物为铁素体和珠光体;冷却速度为 5 °C/s 时,转变产物为贝氏体;当 150 mm 厚板表面冷却速度增大到 20 °C/s,转变产物为马氏体和少量的贝氏体。故冷却速度在 2.0 ~ 5.0 °C/s,该钢种的转变曲线可以同时避开高温转变区和低温转变区,得到较多的贝氏体组织。

有限元模拟结果表明,150 mm 厚 12Cr2Mo1R 钢板板厚 1/4 处在较高温度范围内(800 ~ 600 °C)平均冷却速度为 3.58 °C/s,在较高温度范围内较高的冷却速度起到延迟奥氏体的分解、抑制铁素体形成的作用^[10],在较低温度范围(600 ~ 400 °C)下平均冷却速度为 2.08 °C/s,该冷却速度处于 2.0 ~ 5.0 °C/s,因此实验室研究及工业实验 150 mm 厚钢板 1/4 处金相组织均为贝氏体组织。

同时,热处理超厚板断口形貌为等轴韧窝状,深

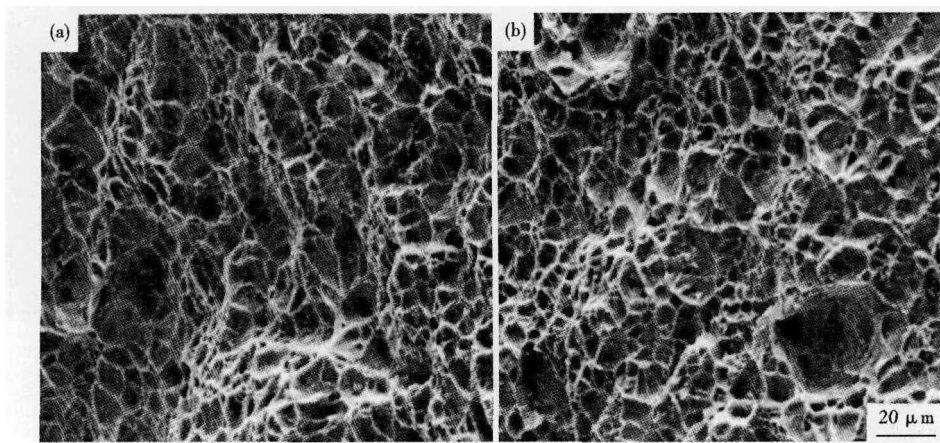


图 5 回火 12Cr2Mo1R 150 mm 厚钢板 1/4 处 0 °C (a) 和 -20 °C (b) 断口形貌
 Fig.5 Morphology of fracture at 1/4 thickness of tempered steel 12Cr2Mo1R 150 mm heavy plate: (a) 0 °C; (b) -20 °C

而大的韧窝分布比较均匀并且数量也较多,解理花样断口很少,说明材料在 0 °C 和 -20 °C 下韧性良好。工业试验的结果与实验室热处理结果一致。

3 结论

根据热模拟实验及温度场有限元仿真结果,对 12Cr2Mo1R 150 mm 超厚板进行实验室热处理和工业实验,对热处理后的试样进行金相组织检验、力学性能测试和断口冲击试验,得到以下结论:

(1)热模拟实验和温度场有限元仿真结果表

参考文献

[1] 马飞良. 国外大型石油化工压力容器锻件用 2.25Cr-1Mo(3Cr-1Mo) 钢的研究[J]. 大型铸锻件,1996,74(4):36-44.
 [2] 张英杰,杨海林. 压力容器用 10CrMo910 钢板的研制与开发[J]. 宽厚板,1999,5(1):5-11.
 [3] 王顺花,薛 巍. 国产 2.25Cr-1Mo 钢板热处理工艺研究[J]. 化工机械,2001,28(3):135-137,165.
 [4] 姜洪生,王国栋. 临氢设备用 12Cr2Mo1R 厚钢板临界厚度研究[J]. 材料热处理学报,2009,30(2):192-194.
 [5] 李文钱,马光亭,麻 衡,等. 热处理对 16MnDR 低温压力容器钢板组织和性能的影响[J]. 山东冶金,2011,33(5):102-103.
 [6] 张 勇. 低温压力容器用钢的现状与发展概况[J]. 压力容器,2006,23(4):31-34.
 [7] 程巨强,刘志学. 新型贝氏体铸钢回火热处理组织和性能的研究[J]. 铸造技术,2005,26(6):462-464.
 [8] 杨宇峰,郭晓岚,刘金纯. Cr-Mo 钢高温反应器的回火脆性及控

明,在正火温度为 910 °C 时,水冷能快速进入贝氏体转变区,冷却速度在 2.0 ~ 5.0 °C/s,可以避开高温区的铁素体 + 珠光体转变和低温区的马氏体转变,得到以贝氏体为主的组织。

(2)经 910 °C 正火、680 °C 回火实验室热处理实验,12Cr2Mo1R 150 mm 超厚板表面组织为索氏体 + 回火马氏体,1/4 处为贝氏体 + 少量铁素体,1/2 处为贝氏体 + 铁素体。其中 1/4 厚度处屈服强度 446 MPa,抗拉强度 521 MPa,伸长率 25%,强度和韧性均符合供货要求。

(3)经 916 °C 正火,保温时间为 226 min,698 °C 回火,回火时间 240 min 的工业热处理后,12Cr2Mo1R 150 mm 超厚板表面组织为索氏体 + 回火马氏体,1/4 处为贝氏体 + 少量铁素体,1/2 处为贝氏体 + 铁素体,结果与实验室热处理结果基本一致。其中 1/4 厚度处屈服强度 464 MPa,抗拉强度 585 MPa,伸长率 22%,强度和韧性均符合供货要求。

制[J]. 当代化工,2005,34(1):64-66.
 [9] 周顺深. 低合金耐热钢[M]. 上海:上海人民出版社,1976:223-233.
 [10] 陈炳张,张朋彦,陈永利,等. 正火对 16MnDR 钢板组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理,2009,34(9):64-66.
 何 贝(1992-),女,硕士研究生(武汉大学),2014 年武汉大学(本科)毕业,金属材料组织和性能研究。
 E-mail:918353241@qq.com

收稿日期:2015-06-05

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
 行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
 和技术、产品研发宣传广告**