

## 高压锅炉用 12Cr2Mo 高强韧 406 mm × 40.5 mm 钢管的 热处理、组织和性能

张志成<sup>1</sup> 李永灯<sup>1</sup> 阮玲慧<sup>2</sup> 吴开明<sup>2</sup>

(1 湖北新冶钢有限公司产品研究所,黄石 435001; 2 武汉科技大学国际钢铁研究院,武汉 430081)

**摘要** 试验用 12Cr2Mo (/%: 0.09C, 0.30Si, 0.34Mn, 0.007P, 0.006S, 2.10Cr, 0.93Mo, 0.014Al) 406 mm × 40.5 mm 钢管的生产流程为 120 t BOF-LF-RH-410 mm × 530 mm 连铸-锻制 Φ390 mm 管坯-460 mm ASSEL 机组轧制成管。采用 JMatPro 软件计算实验用钢平衡相转变图,得出 12Cr2Mo 钢相变点  $Ac_3$  为 862 °C,  $Ac_1$  为 781 °C,并对 910 °C 正火,700 °C 回火处理的试验钢进行组织和力学性能检验。结果表明,试验 12Cr2Mo 钢正火-回火后的基体组织为贝氏体 + 少量铁素体,同时大量不规则的  $M_{23}C_6$  碳化物在晶界和晶内析出,少量颗粒状的  $M_6C$  碳化物沿晶界析出,大量细小针状的  $Mo_2C$  碳化物在晶内析出,该钢力学性能优良-强度  $R_{eL}$  515 ~ 520 MPa,  $R_m$  640 ~ 650 MPa,塑性  $A$  22% ~ 25%,  $Z$  76% ~ 80%,以及 -60 °C 冲击功  $A_{KV}$  268 ~ 293 J。

**关键词** 高压锅炉用钢 12Cr2Mo 热处理 组织 合金碳化物 力学性能

## Heat Treatment, Structure and Properties of High-Strength-Toughness Steel 12Cr2Mo 406 mm × 40.5 mm Tube for High Pressure Boiler

Zhang Zhicheng<sup>1</sup>, Li Yongdeng<sup>1</sup>, Ruan Linghui<sup>2</sup> and Wu Kaiming<sup>2</sup>

(1 Products R&D Institute, Hubei Xinyegang Steel Co Ltd, Huangshi 435001;

2 International Research Institute for Iron and Steel, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** The production flow sheet for test steel 12Cr2Mo (/%: 0.09C, 0.30Si, 0.34Mn, 0.007P, 0.006S, 2.10Cr, 0.93Mo, 0.014Al) 406 mm × 40.5 mm tube is 120 t BOF-LF-RH-410 mm × 530 mm bloom casting-forging to Φ390 mm tube stock-460 mm ASSEL mill rolling to tube. With using JMatPro software to calculate phase equilibrium diagram of test steel, it is obtained that the steel 12Cr2Mo phase transition point  $Ac_3$  is 862 °C and the  $Ac_1$  is 781 °C, and the examination on structure and mechanical properties of test steel normalizing-heat-treated at 910 °C and tempered at 700 °C has been carried out. Results show that the matrix structure of normalized-tempered test steel 12Cr2Mo is bainite + minor ferrite, and a large amount of irregular  $M_{23}C_6$  precipitate at grain boundary and in intragranular, a small amount granular  $M_6C$  carbides precipitate along grain boundary and a large amount fine pin-like  $Mo_2C$  carbides precipitate in intragranular, and the mechanical properties of steel is excellent- strength  $R_{eL}$  515 ~ 520 MPa and  $R_m$  640 ~ 650 MPa, plasticity  $A$  22% ~ 25% and  $Z$  76% ~ 80%, and impact energy at -60 °C  $A_{KV}$  268 ~ 293 J.

**Material Index** Steel 12Cr2Mo for High Pressure Boiler, Heat Treatment, Structure, Alloy Carbide, Mechanical Properties

近年来,我国石油和天然气、煤炭等能源的开发推动了石油精炼、煤的气化和液化、天然气处理等各种石化工业的迅速发展,提升了大型中温临氢压力容器装置的需求<sup>[1]</sup>。然而国内钢铁企业生产的压力容器用钢,其能力和品质远不能满足石油、天然气储存和运输技术发展的需求,造成大量压力容器钢不得不从国外购进的局面,在一定程度上限制了我国能源工业的快速发展<sup>[2]</sup>。

压力容器用钢常用的热处理工艺有:正火;正火+回火;淬火+回火;固溶或退火。不同热处理工艺会对显微组织产生影响,如国产 T23 (HCM2S) 耐热钢,随着正火温度的提高,奥氏体晶粒长大,成分趋向均匀,减少了奥氏体中浓度起伏;基体中碳化物、氮化物、氧化物及其它可能作为外来晶核的质点进

一步溶解,不利于新相的形核,也增加了奥氏体的稳定性,使得贝氏体、铁素体的形成数量较少。同时晶粒尺寸也随着正火温度的提高而有所长大。此外,固溶强化元素 W、Mo、Cr 及基体中碳氮化物的溶解度也会随着正火温度的提高而有所增大<sup>[3]</sup>。显微组织的变化必将导致性能产生较大差别。因此,高强韧压力容器钢的热处理工艺及其对显微组织影响的研究是研制开发该类钢必不可少的重要内容。

首先采用 JMatPro 软件<sup>[4]</sup> 计算高压锅炉用 12Cr2Mo 高强韧钢管的平衡相转变图,得到该钢的  $Ac_1$ 、 $Ac_3$  相变点,以此作为制定该钢热处理工艺的技术参考。采用光学显微镜、透射电镜及 X 射线能谱仪对不同热处理态的显微组织和合金碳化物进行研究,在此基础上制定高压锅炉用 12Cr2Mo 高强韧

表1 实验用钢12Cr2Mo 化学成分 / %  
Table 1 Analysis of test steel 12Cr2Mo / %

C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	Ni	P	S
0.09	0.30	0.34	2.10	0.93	0.014	0.16	0.007	0.006

钢管合适的热处理工艺。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

实验用钢为试制高压锅炉用高强韧钢管,化学成分见表1。

### 1.2 生产工艺流程

120 t 转炉-130 t LF 精炼/130 t RH 真空处理-连铸 410 mm × 530 mm 矩形坯-锻制 390 mm 圆管坯-460 mm ASSEL 机组成材 406 mm × 40.5 mm。

### 1.3 平衡相转变图计算

采用 JMatPor 软件计算实验用钢的平衡相转变图,分析平衡相变点、1 600 °C 到室温的平衡组织转变、不同温度下的析出相组成和各组成相的质量分数。

### 1.4 热处理工艺

在实验室对钢试样进行热处理,采用硅钙棒电加热的马弗炉,最高加热温度 1 250 °C。实验钢厚度为 40.5 mm。热处理工艺为正火 + 回火。正火温度 910 °C,保温时间 30 ~ 60 min;回火温度 700 °C,保温时间 50 ~ 100 min。

### 1.5 显微组织

将热处理后的钢制备成光学试样,抛光、腐蚀后,在奥林巴斯立式光学显微镜上进行组织观察。制备薄膜试样,双喷减薄后,采用 Tecnail G2. 20 透射电子显微镜和 X 射线能谱仪对碳化物进行分析。

## 2 实验结果

### 2.1 组织转变图及其分析

图1为采用 JMatPro 软件计算的实验用钢平衡相转变图,图1显示,实验用钢的相变点  $A_{c3}$  为 862 °C、 $A_{c1}$  为 781 °C。基体组织为铁素体,析出相有  $M_6C$  及  $M_{23}C_6$  碳化物、AlN 氮化物、 $M_2O_3$  氧化物,还有 MnS 夹杂物。

图2为析出相析出过程及相组成图。图2表明, $M_{23}C_6$  在  $\gamma/\alpha$  两相区快速析出,当温度降到  $A_{c1}$  时, $M_{23}C_6$  的质量分数达到 1.7% 左右,之后减少,到 400 °C 时为 1.3%。随着温度继续下降, $M_{23}C_6$  的质量分数开始回升,到 280 °C 左右,又达到 1.7% 左右,此后这个分数值一直维持到室温。 $M_6C$  在  $A_{c1}$  时

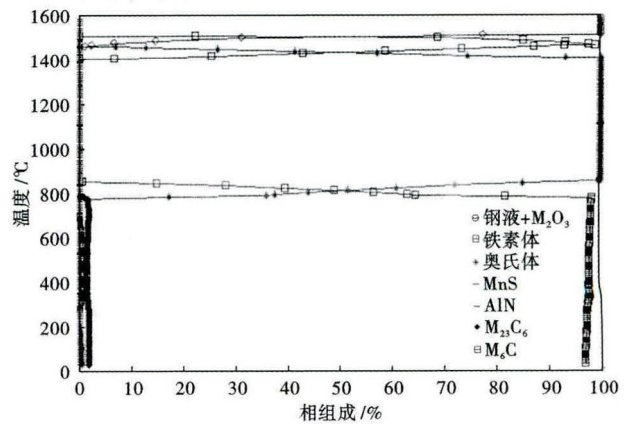


图1 实验用钢12Cr2Mo 的平衡转变及相组成图

Fig. 1 Diagram of equilibrium phase transformation and phase composition of test steel 12Cr2Mo

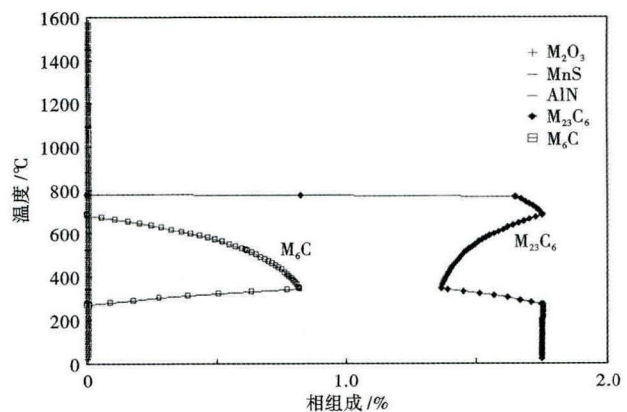


图2 实验用钢12Cr2Mo 碳化物、氮化物平衡析出及相组成图  
Fig. 2 Diagram of equilibrium carbide, nitride precipitation and composition of phases in test steel 12Cr2Mo

开始析出,到 400 °C 时质量分数达到最大为 0.8%,之后随着温度的降低而减少,到 280 °C 时变为 0。

### 2.2 显微组织

图3是实验钢(厚度 40.5 mm)热处理态的光学显微组织照片,图3(a)为距实验钢表面 1/2 处,图3(b)是距表面 1/4 处。从图3中可以看出,高强韧压力容器用钢经热处理后,组织为粒状贝氏体,在晶界和晶界内有大量析出物。

### 2.3 碳化物形貌

图4为实验钢热处理后的析出相形貌,所取位置为距表面 1/4 处。从图4中可以看出,实验钢经热处理后有 3 种不同类型的碳化物<sup>[5]</sup>。第1种是首先沿晶界析出的不规则的析出物  $M_{23}C_6$  (图4a 中晶界处所示),部分碳化物已经在晶界上粗化并形成链状结构和连续薄片状分布,随着等温时间延长,这种粗化和聚集现象加剧。这种析出物主要成分是合金碳化物,包括铬的碳化物,钼的碳化物以及少量锰的

碳化物,即  $(Fe, Cr, Mo)_{23}C_6$ 。第 2 种析出物是在铁素体晶界处和晶内少量的球状颗粒状碳化析出物  $M_6C$ (图 4b 中所示),其尺寸大约为 20 nm,主要为含铬、钼、铁的碳化物,为  $(Fe, Cr, Mo)_6C$ 。第 3 种析出物为在基体上有一定取向和排列规则的针状析出物  $Mo_2C$ (图 4c 箭头所指)。宽度为 10 nm,长度为 200 nm,这种碳化物在基体中大量弥散分布。

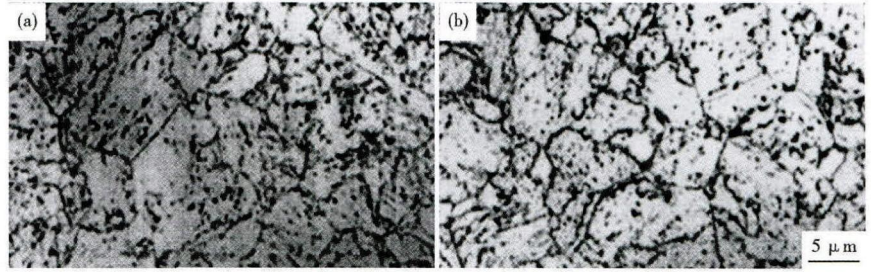


图 3 实验用钢 12Cr2Mo 910 °C 正火 700 °C 回火后组织形貌:钢管壁厚 (a) 1/2 处和 (b) 1/4 处

Fig.3 Morphology of structure of 910 °C normalized and 700 °C tempered test steel 12Cr2Mo at (a) 1/2 and 1/4 (b) wall thickness of tube

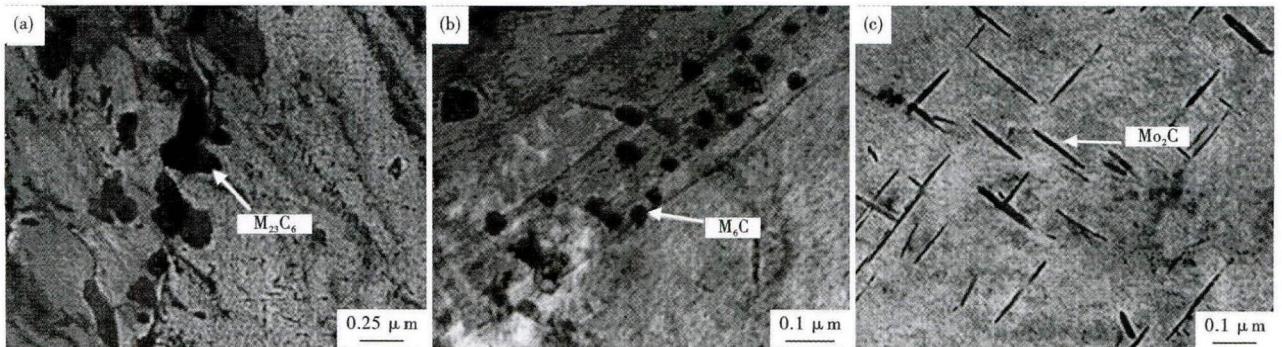


图 4 910 °C 正火 700 °C 回火的实验用钢 12Cr2Mo 中碳化物  $M_{23}C_6$  (a),  $M_6C$  (b) 和  $Mo_2C$  (c) 的形貌

Fig.4 Morphology of carbide  $M_{23}C_6$  (a),  $M_6C$  (b) and  $Mo_2C$  (c) in 910 °C normalized and 700 °C tempered test steel 12Cr2Mo

选取 40.5 mm 壁厚钢管纵横向  $\Phi 15$  mm 拉伸试样,按 GB/T228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》规定进行拉伸试验,试验结果见表 2。选取 40.5 mm 壁厚钢管在壁厚 1/4 位置取样,加工为冲击试样,按 GB/T229-1994《金属夏比缺口冲击试验方法》规定进行系列温度冲击试验,试验结果见表 3。由表 2 和表 3 可以看出,实验钢在上述热处理工艺下

表现出优异的力学性能。

### 3 讨论

#### 3.1 热处理工艺的选择及热处理后的显微组织

压力容器用钢,如 2.25Cr-1Mo 钢,通常设计热处理工艺为正火 + 回火<sup>[6]</sup>。对于低合金耐热钢,正火的目的是使钢中合金元素充分溶解到铁素体基体中,发挥合金元素在钢中的作用,及改变晶粒度等组织因素,以获得强韧性的最佳匹配<sup>[6-7]</sup>。回火的目的是使基体中析出大量细小而弥散的碳化物、碳氮化物,并使这些析出相在要求使用的温度及服役期内保持相对的稳定。因此,本实验用钢采用正火 + 回火热处理工艺。

正火及回火温度依据相变点而定,本实验用钢的  $Ac_3$  为 862 °C、 $Ac_1$  为 781 °C。因此,正火温度选定为 910 °C,高于  $Ac_3$  点 50 °C 左右,使该钢完全奥氏体化,且晶粒不会长大。回火温度为 700 °C,保证  $M_{23}C_6$  完全析出,  $M_6C$  部分析出。本实验用钢经热处理后,其显微组织为贝氏体和少量铁素体组织,以及大量细小的析出相(合金碳化物)。

#### 3.2 耐热钢中碳化物的析出及其作用

表 2 实验用钢 12Cr2Mo 拉伸力学性能  
Table 2 Tensile properties of test steel 12Cr2Mo

管壁厚/ mm	取样 位置	取样 方向	强度/MPa		伸长率 (A)/%	断面收缩 率(Z)/%
			屈服( $R_{d1}$ )	抗拉( $R_m$ )		
40.5	t/4	纵向	520	640~645	24~25	78~80
40.5	t/4	横向	515~520	640~650	22	76~77

表 3 实验用钢 12Cr2Mo 低温冲击性能  
Table 3 Low temperature impact property of test steel 12Cr2Mo

温度/°C	冲击吸收功( $A_{KU}$ )/J		
-20	278	265	277
-30	294	284	282
-40	283	310	284
-60	268	270	293
-78	15	279	277

耐热钢中碳化物起到了析出强化的作用,是低合金耐热钢高温强化的一个主要方式。从位错观点考虑,这种强化方法比固溶强化更为有效。一般认为,溶质原子在位错周围形成的气团,只能阻止位错的滑移,不能阻止位错的攀移;而第二相沉淀于位错上能阻止位错的攀移,从而更有效地提高热强性<sup>[8]</sup>。碳化物相对钢热强性的影响主要取决于<sup>[9]</sup>:碳化物类型、尺寸大小和弥散程度、碳化物析出数量、碳化物形状和分布及其在长期高温应力作用下的稳定性。

在 Cr-Mo 抗氢蚀钢中,回火后析出的合金碳化物越稳定,其抗氢蚀性能越好<sup>[9]</sup>。本实验钢中,在晶界处和晶内都有大量细小的不规则的  $M_{23}C_6$ , 由于  $M_{23}C_6$  在钢中能长时间处于稳定状态,有利于钢的中温使用性能。钢中有大量针状的碳化物在晶粒内析出,陈春焕等<sup>[10]</sup>对耐热钢焊接接头中碳化物变化进行了分析,认为这些针状碳化物为  $Mo_2C$ 。在由铁素体和贝氏体组成组织中,由于贝氏体中位错密度较高,碳化物形核机会相对较多,因此  $Mo_2C$  在铁素体

中的数量比在贝氏体中少,但尺寸较大。蠕变变形的微观本质是位错的移动和晶界的滑移,故材料在蠕变过程中发生的软化现象必然与位错移动的难易程度有关<sup>[11]</sup>,而位错绕过针状碳化物比绕过球状和片状碳化物要困难得多,因此,  $Mo_2C$  的形成对材料蠕变抗力的提高非常有利。

#### 4 结论

(1) 压力容器实验 12Cr2Mo 钢合理的热处理工艺为:910 °C 正火 + 700 °C 回火。在上述条件下,实验钢的力学性能优异。

(2) 经热处理后,高强韧压力容器用 12Cr2Mo 钢的基体组织为贝氏体 + 少量铁素体,大量不规则的  $M_{23}C_6$  碳化物在晶界和晶内析出,沿晶界有少量的颗粒状  $M_6C$  碳化物析出,晶内有大量细小针状的  $Mo_2C$  碳化物析出。该显微组织保证 12Cr2Mo 钢具有较好的热强性。

湖北省重点新产品新工艺研究开发项目资助  
(2012BAA14005)

#### 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] 王世森, 陈晓. 微合金非调质压力容器钢的研究进展[J]. 钢铁研究, 2006, 34(5): 60-62.
- [3] 胡向平, 朱丽慧, 邹凤鸣, 等. 热处理工艺对国产 T23 (HCM2S) 耐热钢组织的影响[J]. 锅炉技术, 2004, 35(1): 44-47.
- [4] Saunders N, Schillé J P, Miodownik. Material Properties for Simulation[C]. The Fifth International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing, Materials Science and Engineering, 2009, 499(1-2): 7-13.
- [5] 李具中. 12Cr2Mo1R 钢冶炼工艺及回火脆性研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2009: 50-51.
- [6] 孙晓龙, 葛树涛. 压力容器材料供货状态及设备制造过程的热处理[J]. 金属热处理, 2008, 33(7): 101-104.
- [7] 周顺深. 低合金耐热钢[M]. 上海: 上海人民出版社, 1976: 223-233.
- [8] 刘荣藻. 低合金耐热钢的强韧化机理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981: 94-103.
- [9] Van Der Burg M W D, Van Giessen E, Brouwer R C. Investigation of Hydrogen Attack in 2.25Cr-1Mo Steels with a High-triaxiality Void Growth Model[J]. Acta Materialia, 1996, 44(2): 505-518.
- [10] 陈春焕, 丁成刚, 赵秀娟, 等. Cr-Mo 耐热钢焊接接头蠕变过程中  $Mo_2C$  变化规律的研究[J]. 理化检验-物理分册, 2000, 36(5): 200-202.
- [11] 杨德新, 陈春焕, 赵秀娟. 碳化物对焊接接头蠕变过程中应力软化的影响[M]. 中国机械工程学会焊接学会第八次全国焊接会议论文集(第三册). 北京: 机械工业出版社, 1997: 962-968.

张志成(1970-), 男, 高级工程师, 1992 年武汉科技大学(本科)毕业, 特殊钢新品种新材料研发、技术质量研究及管理。  
E-mail: injector@126.com

收稿日期: 2014-08-11

## 下 期 要 目

- 100 t 复吹转炉-RH-70 mm 板坯连铸流程 0.88% Si 无取向硅钢的夹杂物行为 ..... 乔 智等  
420 mm × 1 100 mm 板坯连铸结晶器吹氩对流场和温度场影响的数值模拟 ..... 孙 健  
100 t 底吹氩钢包插入浸渍管对钢液流场影响的数值模拟 ..... 吴 超等  
210 t BOF-RH-板坯 CC 流程钢包顶渣改质处理对超低碳钢夹杂物的影响 ..... 周业连等  
130 t BOF-LF-150 mm × 150 mm CC 流程控制高碳钢 SWRH82B 氧含量的工艺实践 ..... 邢梅峦等  
冷却速度对 0.45C 钢铸坯夹杂物与组织的影响 ..... 张庆军等  
热变形参数对 Cr14-Co13-Mo0.5-Ni2 齿轮钢晶粒的影响 ..... 葛 栋等