

# 奥氏体化温度对改良型 T23 铁素体耐热钢 微观组织与力学性能的影响

胡涛麟, 刘静, 刘宏扬, 范泽邦, 葛锐

(武汉科技大学冶金与耐火材料国家重点实验室, 武汉 430080)

**摘要:** 对改良型 T23 铁素体耐热钢试样进行不同奥氏体化温度的热处理试验, 通过金相显微镜、扫描电镜、透射电镜对经不同奥氏体化温度处理试样的微观结构进行表征, 且对其进行常温力学性能进行测试分析; 结合采用 Thermo-Calc 热力学软件计算的 T23 铁素体耐热钢平衡相图, 探讨 C, N, V 等元素在钢中基体和第二相间的分配关系, 揭示奥氏体化温度对改良型 T23 铁素体耐热钢显微组织和力学性能的影响。结果表明: 在 1 080~1 140 °C 奥氏体化温度范围, 随温度的升高, 钢中的晶粒尺寸逐渐增大, 贝氏体板条不断粗化, 碳化物尺寸逐渐减小。当奥氏体化温度为 1 080 °C 时, 细化的贝氏体板条可为碳化物聚集长大提供条件, 钢中碳化物呈现团簇聚集倾向; 当奥氏体化温度升至 1 120 °C 时, 晶粒内部的贝氏体板条明显粗化, 合金元素在基体中的固溶度提高, 碳化物的形核位点减少且弥散化程度大大提升。同时, 随奥氏体化温度的升高, 改良型 T23 铁素体耐热钢的屈服强度和抗拉强度呈现先降低后增加的趋势, 而延伸率呈现先增加后降低的趋势, 这主要是由于晶粒尺寸、碳化物的尺寸与分布、合金的固溶强化随奥氏体化温度变化而产生的耦合作用所致。

**关键词:** 铁素体耐热钢; 热处理; 奥氏体化; 析出相; 力学性能; 微观结构; 平衡相图

**中图分类号:** TG 156; TG 142.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24120



## Effect of Austenitization Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Modified T23 Ferritic Heat-resistant Steel

HU Taolin, LIU Jing, LIU Hongyang, FAN Zebang, GE Rui

(The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430080, China)

**Abstract:** Heat treatment tests were conducted on the modified T23 ferritic heat-resistant steel samples at different austenitization temperatures. The microstructures of the samples treated at various austenitization temperatures were characterized by metallographic microscope, scanning electron microscope and transmission electron microscope. Additionally, room temperature mechanical property tests were performed and analyzed. Combining the equilibrium phase diagram of T23 ferritic heat-resistant steel calculated by Thermo-Calc thermodynamic software, the distribution relationship of elements such as C, N, and V between the matrix and secondary phases in the steel were explored, and the effect of austenitization temperature on the microstructure and mechanical properties of the modified T23 ferritic heat-resistant steel was revealed. The results show that in the austenitizing temperature range of 1 080~1 140 °C, with the increase of temperature, the grain size in the steel gradually enlarges, the bainite laths

收稿日期: 2024-07-02

基金项目: 湖北省 JD 攻关项目 (2023BAA019); 湖北省重点研发计划项目 (2021BAA058)

作者简介: 胡涛麟 (1999—), 男, 湖南怀化人, 博士生, 主要研究方向为新型金属材料的强韧化。

通信作者: 葛锐 (1982—), 男, 湖北襄阳人, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料强韧化技术等。

引文格式: 胡涛麟, 刘静, 刘宏扬, 等. 奥氏体化温度对改良型 T23 铁素体耐热钢微观组织与力学性能的影响 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2024, 41(6):594-602.

continuously coarsen, and the carbide size gradually decreases. When the austenitization temperature is 1 080 °C, the refined bainite laths provide conditions for the aggregation and growth of carbides, leading to a tendency for carbides to cluster together. When the austenitization temperature rises to 1 120 °C, the bainite laths within the grain obviously coarsen, the solid solubility of alloy elements in the matrix increases, the nucleation sites of carbides decrease and the dispersion degree is greatly improves. At the same time, with the increase of austenitization temperature, the yield strength and tensile strength of the modified T23 ferritic heat-resistant steel first decrease and then increase, while the elongation first increases and then decreases. This is mainly due to the coupled effects of changes in grain size, carbide size and distribution, and solid solution strengthening of the alloy with the austenitizing temperature.

**Keywords:** ferritic heat-resistant steel; heat treatment; austenization; precipitated phase; mechanical property; microstructure; equilibrium phase diagram

火力发电在我国电力供应中具有重要地位<sup>[1-2]</sup>。截至 2023 年底,我国现存火力发电机组中高容量、高参数的超(超)临界机组已超半数;亚临界机组仍占 30%。在“碳达峰”、“碳中和”的背景下,亚临界机组煤耗高、能源利用率低,急需实施节能改造,相应地高性能机组材料需求量增大<sup>[3-4]</sup>。奥氏体耐热钢是 1 种重要的高性能机组工程材料,但由于存在线膨胀系数高、导热性差、工艺性不足等缺点,使其不适宜用于制造机组中的厚壁部件<sup>[5-6]</sup>。铁素体耐热钢是 1 种基体为铁素体组织的耐热钢,具有优良的抗氧化性及耐高温气体腐蚀能力、优良的热强加工性及焊接性能,在亚临界、超(超)临界机组的过热器、再热器及水冷壁管道等部件中得到广泛应用<sup>[7-9]</sup>。其中 T23 铁素体耐热钢被广泛用于高温高压的工作环境,如用于制作电站锅炉的高温过热器和再热器部件,其性能的优劣直接关系到部件设备的安全运行和寿命<sup>[10-11]</sup>。奥氏体化温度是热处理过程中的 1 个重要参数,直接影响材料的微观组织和力学性能。因此,研究奥氏体化温度对 T23 铁素体耐热钢微观组织与力学性能的影响,对于优化材料性能、确保电力设备安全运行具有重要意义。

热处理作为 1 种重要简便的处理方法,能够有效调控铁素体耐热钢的综合性能<sup>[12-14]</sup>。为提升材料的应用性能,已有学者基于耐热钢中合金元素协同作用的角度,通过热处理工艺优化与合金成分设计相结合的方法,研究铁素体耐热钢微观组织及其与性能之间的关系。Gao 等<sup>[15]</sup>研究了奥氏体化温度对高 Cr 铁素体耐热钢相变特征的影响,发现奥氏体晶粒尺寸和马氏体板条随奥氏体化温度的升高而变大和变粗;王宇<sup>[16]</sup>研究了时效工艺对 T23 钢组织及性能的影响,发现 T23 钢经 600 °C 长期高温时效后,铁素体基体中析出了  $M_{23}C_6$  型、 $M_7C_3$  型及 MC 型碳化物,强化方式逐渐由固溶强化向析出强化转变;

Yan 等<sup>[17]</sup>研究了正火温度对 9Cr 铁素体耐热钢析出相的影响,发现更高的正火温度可使更多的粗大颗粒溶回基体,通过回火弥散析出大量细小的颗粒来产生沉淀强化效果;Zheng 等<sup>[18]</sup>研究发现,较高的奥氏体化温度可使马氏体组织变得粗大,这有利于 Cr-Mo-V 钢从基体中获得更多更小的析出相,一定程度上能够提高材料的强度。可见,奥氏体化温度主要通过影响晶粒尺寸、亚结构、第二相的数量与分布来改变铁素体耐热钢的性能。

T23 钢作为铁素体耐热钢中的典型代表之一,因具有较低的合金含量使其还具备低成本优势<sup>[19]</sup>,但是 T23 铁素体耐热钢焊后易出现再热裂纹问题。为此,周任远等<sup>[20]</sup>对国产 T23 铁素体耐热钢的成分进行优化,通过降低 W 含量来提高材料的焊接性,但同时也降低了材料的韧性;李勇<sup>[21]</sup>通过降低 T23 铁素体耐热钢中的 C 含量且同时增加 B 含量,研制改良型 T23 耐热钢,结果表明改良型 T23 铁素体耐热钢具有较好的高温持久性能。然而,热处理工艺对改良型 T23 铁素体耐热钢微观组织演变及力学性能的影响规律鲜见报道。鉴于此,对改良型 T23 铁素体耐热钢进行不同奥氏体化温度的热处理工艺试验,通过金相显微镜、扫描电镜和透射电镜对材料的微观结构进行表征,分析钢中第二相的变化及元素分配,探讨微观组织变化规律和力学性能的关系,揭示改良型铁素体耐热钢的强化机理,以为低合金耐热材料的工程应用提供技术参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用材料为某钢厂现场取得的改良型 T23 铁素体耐热钢(T23 钢),改良型 T23 钢经冶炼、连铸、热轧工艺,最终生产为厚度 150 mm 的热轧板。其化学成分见表 1,热轧态金相组织如图 1。

表1 改良型 T23 钢的化学成分

w/%

Tab. 1 Chemical composition of modified T23 steel

w/%

C	Si	Mn	P	W	Ni	Cr	V	Nb	Mo	Ti	B	N	Fe
0.045	0.29	0.54	0.013	1.70	0.067	2.60	0.20	0.023	0.19	0.028	0.01	0.01	余量

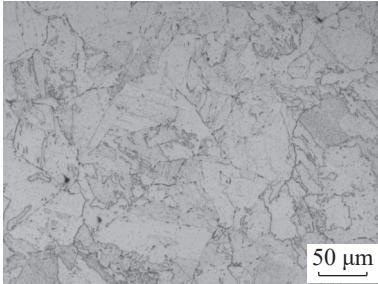


图1 改良型 T23 钢的热轧态金相组织

Fig. 1 Hot-rolled microstructure of modified T23 steel

## 1.2 试验方法

采用 Gleeble-3500 热模拟试验机测定改良型 T23 钢的热膨胀曲线,通过切线法测得改良型 T23 钢完全奥氏体化( $Ac_3$ )温度为 1 020 °C。利用 Thermo-Calc 热力学软件(配备 TCFE 11 数据库)计算改良型 T23 钢的平衡相图。依据平衡相图和测得材料的相变点结果,确定如图 2 所示的热处理方案。

将热轧后改良型 T23 钢加工成尺寸为 40 mm×120 mm×6 mm 的试样,再将其进行奥氏体化、淬火及回火热处理。图中 M 表示马氏体, B 表示贝氏体。

将热处理后的材料加工成标准拉伸试样,在 INSTRON 8801 万能试验机上对其进行拉伸试验,拉伸试样尺寸如图 3,拉伸速率为 0.02 mm/s。同时,采用体积分数为 4% 硝酸酒精溶液对回火后的试样进行腐蚀,在光学显微镜(Zeiss Axiovert25)和 Apreo S HiVac 型场发射电子扫描显微镜(field emission scanning electron microscope, FESEM)下观察热处理前后试样的显微组织。将透射试样打磨至厚度 65 μm,在冲孔器上冲出直径为 3 mm 的小圆片,经电解双喷减薄后,通过 JEM F200 型透射电镜(transmission electron microscope, TEM)观察试样的精细结构,结合能谱分析(energy dispersive spectrometer, EDS)测量析出颗粒的化学成分。

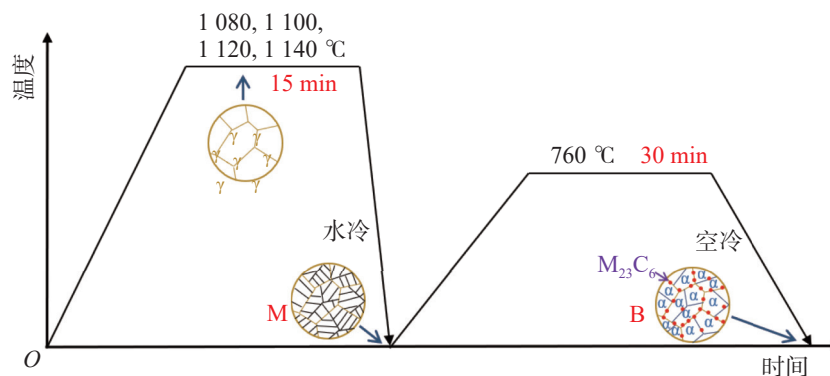


图2 改良型 T23 钢的热处理方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heat treatment process of modified T23 steel

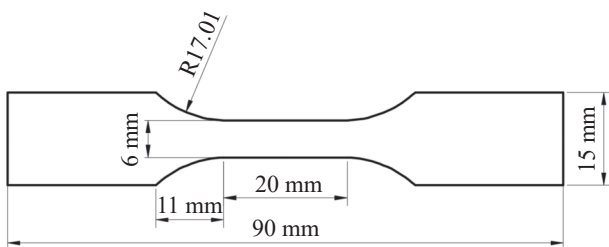


图3 拉伸试样尺寸示意图

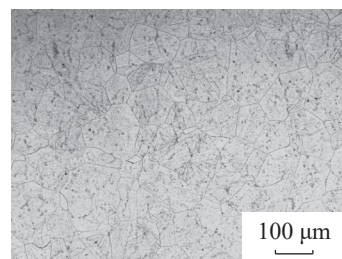
Fig. 3 Schematic diagram of tensile specimen size

## 2 试验结果

### 2.1 微观组织形貌

不同温度奥氏体化、淬火及回火处理后改良型

T23 钢试样的显微组织如图 4。由图 4 可看出:回火后,试样中的贝氏体组织呈板条和粒状,且贝氏体中的铁素体为准多边形;随奥氏体化温度的升高,钢中晶粒迅速长大。



(a) 1 080 °C

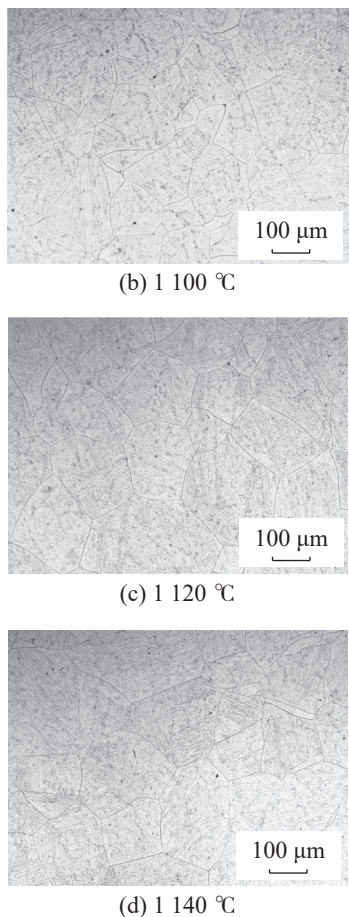


图4 不同温度奥氏体化、淬火并回火后试样的显微组织  
Fig. 4 Microstructure of the specimen after austenitization, quenching and tempering at different temperatures

回火后试样的平均晶粒尺寸如图 5, 通过软件统计选用的视场不小于 5 个。由图 5 可看出: 试样在 1 080~1 100 °C 范围进行奥氏体化时, 钢中晶粒尺寸比较细小; 奥氏体化温度升至 1 120 °C 时, 晶粒明显长大, 达到 168 μm。

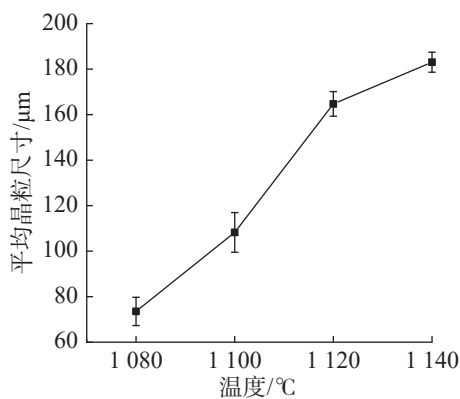


图5 试样平均晶粒尺寸

Fig. 5 Average grain size of the specimen

图 6 为热轧态及奥氏体化、淬火处理后改良型

T23 钢试样的微观组织。由图 6 可看出: 热轧后试样的贝氏体组织呈粒状, 组织中粗大的第二相沿晶界析出; 经奥氏体化淬火热处理后, 上述析出相重新固溶回基体中, 粒状贝氏体转变为贝氏体和板条马氏体混合组织。

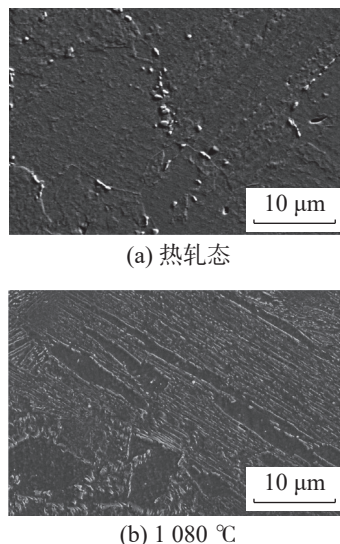
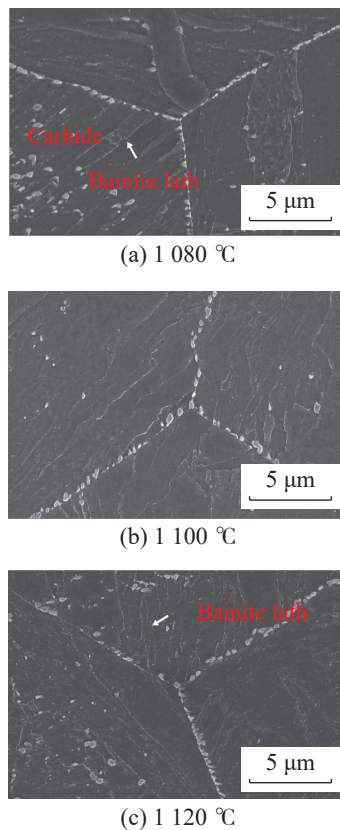
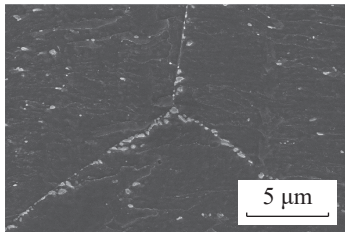


图6 热轧及淬火处理后试样的微观组织

Fig. 6 Microstructure of the specimen after hot rolling and quenching treatment

图 7 为不同温度淬火、回火处理后改良型 T23 钢试样的微观组织。





(d) 1140 °C

图7 不同温度淬火、回火后试样的微观组织

Fig. 7 Microstructure of the specimen after quenching and tempering at different temperatures

由图7可看出:回火后,试样淬火形成的板条马氏体分解为粒状和板条贝氏体,同位向的贝氏体由板条组成板条束,大量细小的碳化物在原奥氏体晶界和贝氏体板条界面析出;随奥氏体化温度的升高,贝氏体板条进一步粗化,贝氏体板条束的宽度

也从 1.5 μm 粗化至 3.6 μm,细小的第二相颗粒占比增大。

### 2.2 析出相性质

改良型 T23 钢回火后的精细结构及第二相成分见如图8,表2。根据图8和表2可知,经回火处理后钢中主要出现  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_3C$  和 MX 型碳化物。 $M_{23}C_6$  型碳化物主要富 Fe 和 Cr 元素,在第二相中尺寸最大,尺寸分布在 200~400 nm 区间;尺寸略小的  $M_7C_3$  型碳化物主要富含 Cr 元素,且 Cr 元素含量较  $M_{23}C_6$  更高;椭圆形的  $M_3C$  型碳化物富含 Fe 元素,尺寸分布在 25~100 nm 区间;MX 相<sup>[22]</sup>尺寸分布在 5~15 nm 区间,随奥氏体化温度的升高,尺寸变化不大,但数量逐渐增多。

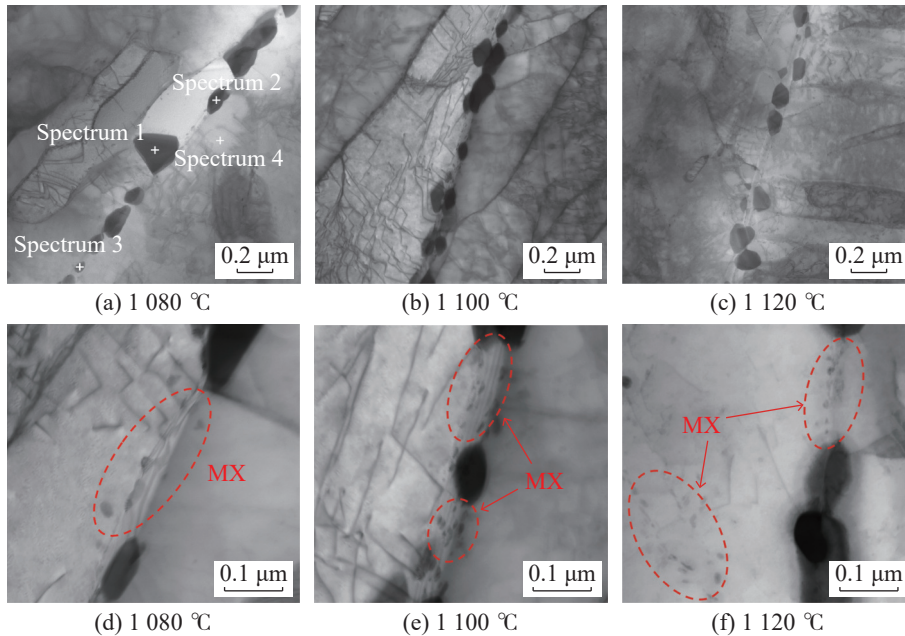


图8 不同温度淬火与回火处理后钢中析出相的 TEM 照片

Fig. 8 TEM images of precipitated phases of the steel after quenching and tempering at different temperatures

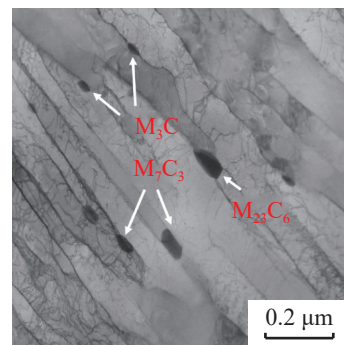
表2 析出相及基体 EDS 元素分析 w/%

Tab. 2 EDS element analysis of the precipitates and matrix w/%

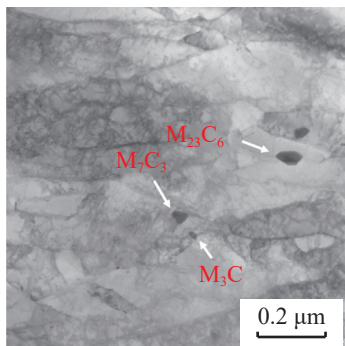
位置	Fe	Cr	W	C	V	析出相
Spectrum 1	69.5	19.4	4.8	4.8	1.5	$M_{23}C_6$
Spectrum 2	63.6	21.9	6.2	6.2	1.7	$M_7C_3$
Spectrum 3	72.2	12.7	2.8	10.1	0.9	$M_3C$
Spectrum 4	91.9	—	—	8.1	—	基体

图9为经不同温度奥氏体化、淬火与回火处理后改良型 T23 钢晶粒内部的微观形貌。图9表明:回火后贝氏体铁素体基体中仍存在大量位错,奥氏体化温度为 1080 °C 时,钢中碳化物主要在贝氏体

板条间大量析出;温度升高至 1120 °C 时,钢中贝氏体板条粗化,同时板条附近的大尺寸碳化物析出数量减少。



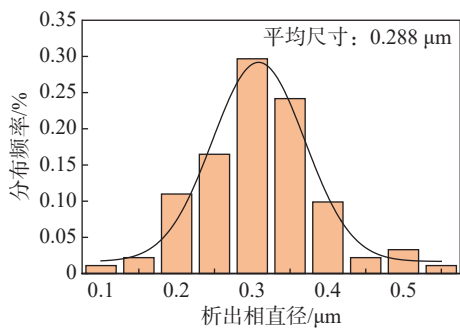
(a) 1080 °C



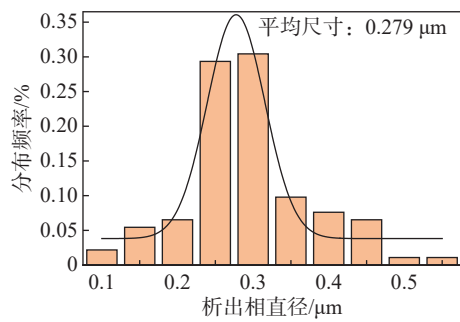
(b) 1 120 °C

图9 不同温度奥氏体化、淬火与回火处理后试样的 TEM 照片  
Fig. 9 TEM images of the specimen after austenitizing, quenching and tempering at different temperatures

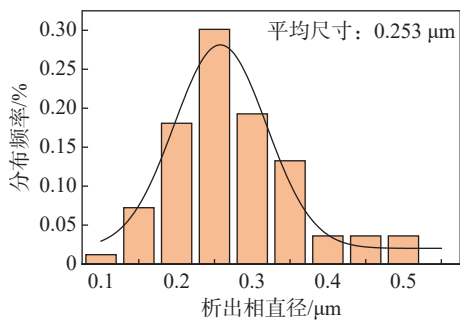
图 10 为改良型 T23 钢经不同温度奥氏体化、淬火并回火后析出碳化物的尺寸变化。由图 10 可看出: 钢中的碳化物尺寸满足 Gauss 分布; 同时, 随奥氏体化温度的升高, 钢中碳化物平均尺寸逐渐减小。



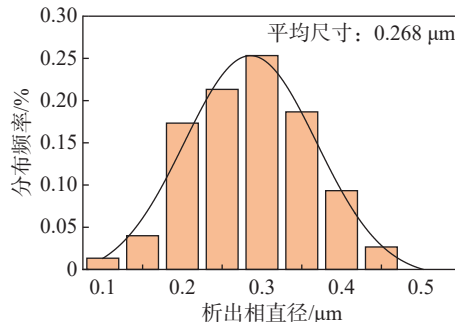
(a) 1 080 °C



(b) 1 100 °C



(c) 1 120 °C



(d) 1 140 °C

图10 不同温度奥氏体化、淬火和回火处理后钢中碳化物尺寸分布

Fig. 10 Size distribution of carbides in the steel after austenitizing, quenching and tempering at different temperatures

综上所述: 改良型 T23 钢经不同温度奥氏体化并回火后, 钢中的析出相主要为  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_3C$  型碳化物和细小弥散的 MX 相; 析出相中, 碳化物尺寸较大, 主要沿晶界及贝氏体板条间分布, 尺寸分布在 50~400 nm 之内; MX 相尺寸小, 弥散度高, 在相界面和位错位置分布较为密集。

### 2.3 力学性能

图 11 为改良型 T23 钢经不同温度奥氏体化、淬火及回火处理后的力学性能。由图 11 可看出: 随奥氏体化温度的升高, 试样的屈服强度与抗拉强度呈现先降低后增加的趋势, 而延伸率呈现先增加后降低的趋势。当奥氏体化温度由 1 080 °C 升至 1 100 °C 时, 试样的抗拉强度由 689 MPa 降至 674 MPa, 屈服强度由 613 MPa 降至 603 MPa, 延伸率增至 20.6%; 当奥氏体化温度超过 1 100 °C, 试样的屈服强度与抗拉强度逐渐增加, 延伸率逐渐降低。

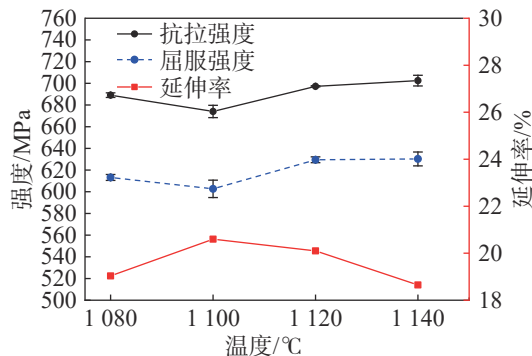


图11 不同温度奥氏体化、淬火与回火处理后试样的拉伸性能

Fig. 11 Tensile properties of the specimen after austenitizing, quenching and tempering at different temperatures

### 3 分析与讨论

#### 3.1 奥氏体化温度对改良型 T23 钢显微组织及析出相的影响

奥氏体化温度低于 1 100 °C 时,改良型 T23 钢试样的晶粒尺寸较为细小 (<110 μm); 温度升至 1 120 °C 及以上,试样晶粒尺寸明显增大 (>165 μm),同时贝氏体板条粗化,这是由于 MX 相固溶度增大,对位错和界面的钉扎效果减弱所致。根据霍尔-佩奇公式<sup>[23]</sup>,细小的贝氏体板条及板条内的亚晶界能够起到细晶强化作用,致使细晶强化效果逐渐减弱。

对于改良型 T23 钢,经奥氏体化并高温回火后,钢中热轧产生的不均匀组织形态得到改善(见图 6); 回火后产生了粒状贝氏体和板条贝氏体的混合组织,其中板条贝氏体基体中含有高密度位错(见图 9),有利于强度的提高。

由上述结论可知奥氏体化温度越高,钢中析出的细小颗粒占比越大, MX 相增多。根据相变一般规律,合金碳化物在回火过程中易在晶界和板条界面形核<sup>[24-25]</sup>长大; 随奥氏体化温度的升高,贝氏体铁素体板条的宽度增加,致使在较大过冷度下(正火后水淬),C 原子很难从铁素体中析出(见图 6(b))。此时,铁素体中的 C 原子是过饱和的,这就为碳化物的析出提供了驱动力。在后续高温短时回火(760 °C, 30 min)时,  $M_{23}C_6$ ,  $M_3C$ ,  $M_3C$  等碳化物具有较高的 C 含量(见表 2), 而铁素体内部难以获得碳化物形核所需的浓度起伏、结构起伏和能量起伏。在 C 元素长程扩散的过程中,持续供应界面形核的碳化物长大,当长程扩散供应困难时,碳化物长大到一定尺寸就会停止。图 9 正好解释了为什么随奥氏体化温度升高,材料回火后析出的大尺寸碳化物数量减少的现象。在较低的奥氏体化温度时(见图 9(a)),更细的贝氏体铁素体板条提供了大量的高能界面,便于 C 元素沿相界面(碳化物/贝氏体铁素体板条)供应,促使碳化物长大,同时也解释了图 7(a)中碳化物团簇现象的产生。当奥氏体化温度升高时,贝氏体铁素体板条宽度增加,碳化物的长大受到 C 原子长程扩散的限制,其生长的尺寸有限; 而纳米级的 MX 相尺寸变化不大。因此,粗化的贝氏体板条一定程度上抑制了回火过程中碳化物的长大。

改良型 T23 钢的平衡相图如图 12。图 12 表明: 温度高于 832 °C 时,钢中仅存在 MX 相; 随温度的升高, MX 相的体积分数逐渐减小。

改良型 T23 钢中的元素分配量变化规律如图 13。基于 Thermo-Calc 软件计算各相中的合金元素分配量<sup>[26]</sup>及其在不同相和基体中的含量,发现钢中 MX 相主要元素为 Nb, V, 这与文献[27]中的结果吻合; C 元素主要分配在  $M_6C$ ,  $M_{23}C_6$  和 MX 相中,随温度的升高,  $M_{23}C_6$  在 820 °C 时急速溶解使基体中的 C 含量急速升高,元素分配关系变成基体和 MX 相,基体中 C 含量的增加趋势变缓, N, V 元素逐渐从 MX 相中分配至基体; MX 相中的 V 元素主要以 VN 的形式存在,减少的 V, C, N 元素溶解在基体中起到显著的固溶强化效果。

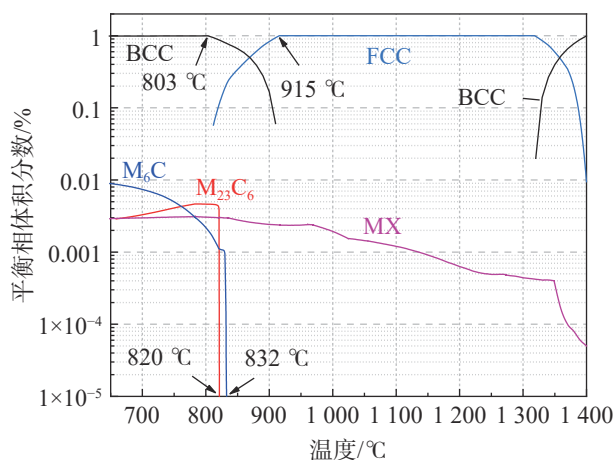


图 12 改良型 T23 钢的平衡相图

Fig. 12 Equilibrium phase diagram of modified T23 steel

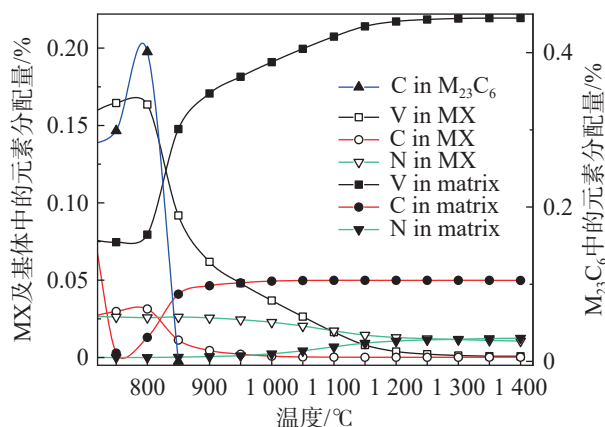


图 13 C, N, V 在  $M_{23}C_6$ , MX 和基体中的分配量变化曲线  
Fig. 13 Variation curves of of C, N, and V partitioning in  $M_{23}C_6$ , MX and matrix

结合上述结果可知:改良型 T23 钢经奥氏体化、淬火及回火后,随奥氏体化温度的升高,钢中合金元素充分固溶,固溶强化效果逐渐增大;同时,在晶界和贝氏体板条位置析出的碳化物尺寸更加弥散,在界面析出的碳化物相对减少,在钢中起到良好的沉淀强化效果。

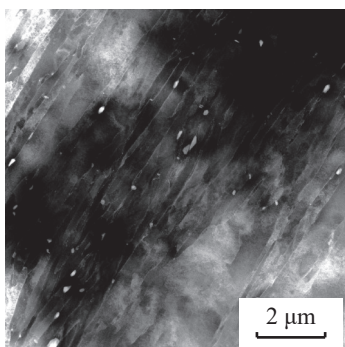
### 3.2 奥氏体化温度对改良型 T23 钢力学性能的影响

改良型 T23 钢的强度随奥氏体化温度升高,呈现先降低后升高的趋势(见图 11)。在高于 1 080 °C 奥氏体化温度时,材料仅存在 MX 相,随奥氏体化温度的升高,金属化合物溶解,钢中的固溶强化效果增强;由于 MX 相含量较少,固溶强化效果有限,当奥氏体化温度由 1 080 °C 升至 1 100 °C 时,材料的抗拉强度从 689 MPa 降低到 674 MPa,平均晶粒尺寸增加了 35  $\mu\text{m}$ ,碳化物尺寸及分布变化不大。奥氏体温度升高引起的晶粒长大、板条粗化、位错密度降低抵消固溶强化的效果,导致材料强度有所下降。

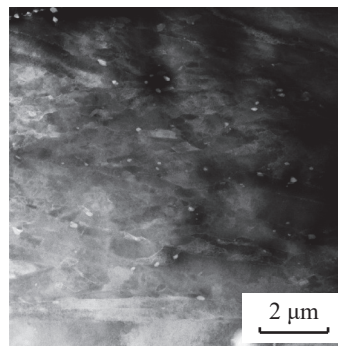
当奥氏体化温度继续升至 1 120 °C 时,材料的抗拉强度呈现增长趋势。此时钢中晶粒尺寸进一步增大,板条束宽度增加(见图 7, 9);钢中碳化物的平均尺寸从 0.279  $\mu\text{m}$  减小到 0.253  $\mu\text{m}$ 。根据 Hall-Petch 关系<sup>[28-29]</sup>,晶粒尺寸增大及板条粗化会使材料抵抗变形能力下降,强度降低。

然而,随着奥氏体化温度的升高,钢中的贝氏体板条粗化,碳化物平均尺寸减小(见图 10),结合 Orowan 机制<sup>[30-31]</sup>可知,弥散分布的小尺寸第二相粒子将显著增强材料抵抗位错滑移的能力,从而提高材料的强度。同时,钢中 V, N, C 元素含量随奥氏体化温度的升高而逐渐增加(见图 13),其固溶强化效果逐渐增强,有利于材料强度的提升,但由于元素含量较低,固溶强化效果提升有限。

图 14 为回火后改良型 T23 钢晶粒内的高角环形暗场 (high-angle annular dark-field imaging, HAADF) 照片。由图 14 可看出:奥氏体化温度从 1 100 °C 升高到 1 120 °C 时,第二相平均尺寸减小,数密度从 0.357  $\mu\text{m}^{-2}$  增至 0.631  $\mu\text{m}^{-2}$ ;奥氏体化温度进一步升高至 1 140 °C 时,材料强度随奥氏体化温度的升高再次呈现出增长趋势。如图 3, 6 所示,随奥氏体化温度的升高,钢中晶粒尺寸明显增大,贝氏体板条粗化,析出强化效果占主导作用。



(a) 1 100 °C



(b) 1 120 °C

图 14 不同温度奥氏体化、淬火与回火处理后试样的高角环形暗场照片

Fig. 14 HAADF images of the specimen after quenching and tempering at different temperatures

## 4 结论

1) 在 1 080~1 140 °C 范围,随奥氏体化温度的升高,改良型 T23 钢的晶粒尺寸明显增大,贝氏体板条束宽度增加,碳化物平均尺寸减小。适当增加奥氏体化温度能够使贝氏体板条粗化,有利于抑制大尺寸碳化物析出,致使细小析出颗粒占比增大。

2) 当奥氏体化温度升至 1 100 °C 时,晶粒尺寸增大,碳化物尺寸及数量变化不大,导致材料强度降低;当奥氏体化温度进一步升至 1 120 °C 时,贝氏体板条粗化,碳化物数量增多,平均尺寸减小,材料强度得以提升。

3) 随奥氏体化温度的升高,改良型 T23 钢的力学性能变化显著。改良型 T23 钢的强度主要受沉淀强化的影响,晶粒尺寸的影响次之。适当提高奥氏体化温度能够使合金元素在沉淀相和基体中合理分配,在不明显降低改良型 T23 钢塑性的前提下提升其强度,这对改良型 T23 钢的工程应用有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 舒印彪,张丽英,张运洲,等.我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):1-14.
- [2] 何晓梅,罗昌福,刘漫博.超超临界火电机组的选材及国产化进程[J].热加工工艺,2012,41(22):116-119.
- [3] 唐飞,董斌,赵敏.超超临界机组在我国的发展及应用[J].电力建设,2010,31(1):80-82.
- [4] 朱法华,王玉山,徐振,等.中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究[J].电力科技与环保,2021,37(3):9-16.
- [5] 范长信,张红军,周荣灿,等.超超临界机组锅炉用新型耐热钢的焊接[J].电力设备,2006(4):11-14.

- [6] 林富生,王治政,王宝忠,等. 中国电站用耐热钢及合金的研制、应用与发展[J]. 动力工程学报, 2010, 30(4): 235-244.
- [7] 宁保群,刘永长,殷红旗,等. 超高临界压发电厂锅炉管用铁素体耐热钢的发展现状与研究前景[J]. 材料导报, 2006(12):83-86.
- [8] 张昌,李生志,张捷,等. 高参数燃煤机组用铁素体耐热钢中析出相演变规律及其强化机理研究进展[J]. 热加工工艺, 2023, 52(6):1-6.
- [9] 周峰. 超快冷工艺生产高钢级管线钢的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- [10] LI X, JIANG Y, WU K, et al. Effects of pre-tempering on the microstructure, hardness and impact toughness of the 2.25Cr-1Mo-0.25V heat-resistant steel weld metal[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 193(8/10):104455.
- [11] 鲁金涛,黄锦阳,杨珍,等. 火电机组通流部件抗蒸汽氧化涂层技术发展展望[J]. 热力发电, 2023, 52(10):13-24.
- [12] LIU Z, XU G, ZHANG Y, et al. Influence of multiple short-time normalizations on mechanical properties and microstructure of 9Cr-2.3W-3.0 Co heat-resistant steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 879:145282.
- [13] 刘越,马煜林,郭浩,等. Co, B对新型铁素体耐热钢组织和性能的影响[J]. 材料导报, 2015, 29(13):18-23,28.
- [14] CAO H, WEI C. Effect of austenitizing temperature on microstructure and mechanical properties evaluation of microalloyed low-carbon RAFM steel[J]. Fusion Engineering and Design, 2023, 190:113645.
- [15] GAO Q, LIU Y, DI X, et al. Influence of austenitization temperature on phase transformation features of modified high Cr ferritic heat-resistant steel[J]. Nuclear Engineering & Design, 2013, 256:148-152.
- [16] 王宇. T23钢组织与性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [17] YAN P, LIU Z, BAO H, et al. Effect of normalizing temperature on the strength of 9Cr-3W-3Co martensitic heat resistant steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 597(12):148-156.
- [18] ZHENG Y, WANG F, LI C, et al. Effect of microstructure and precipitates on mechanical properties of Cr-Mo-V alloy steel with different austenitizing temperatures[J]. ISIJ International, 2018, 58(6):1126-1135.
- [19] 张鄂婴,王向斌,陶生智,等. T23钢在大型常规电站锅炉上的应用[J]. 热力发电, 2005(3):68-73,77.
- [20] 周任远,朱丽慧,李世贤,等. T23钢再热裂纹敏感性的改善及其组织[J]. 钢铁, 2020, 55(3):80-86.
- [21] 李勇. 新型低合金耐热钢 T23 再热裂纹产生机理及成分改良的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- [22] ZIELIŃSKI A, GOLANSKI G. Microstructure and mechanical properties of the T23 steel after long-term ageing at elevated temperature[J]. Materials at High Temperatures, 2016, 33(2):154-163.
- [23] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [24] 郭建亭,周兰章,秦学智. 铁基和镍基高温合金的相变规律与机理[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(3):476-486.
- [25] 刘宗昌,王海燕,王玉峰,等. 贝氏体碳化物的形貌及形成机制[J]. 材料热处理学报, 2008(1):32-37,46.
- [26] 蒯春光,彭志方. T/P91钢在 450-1 200 °C 区间各相元素的分配特征及相稳定性[J]. 金属学报, 2008, 44(8): 897-900.
- [27] ZHOU R, ZHU L. Influence of martensite-austenite constituents and precipitates on reheat cracking susceptibility of coarse-grained heat-affected zone in T23 and modified T23 steels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(1):427-441.
- [28] 葛锐,杨睿,王贞,刘静. 钒微合金化对中锰热成形钢性能影响及其强化机制研究[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(2):166-172.
- [29] 何利军,周龙,汤淳坡,等. 长时服役后 T92 钢管的微观组织及力学性能变化[J]. 金属热处理, 2021, 46(7): 31-36.
- [30] 胡正飞,杨振国. 高铬耐热钢的发展及其应用[J]. 钢铁研究学报, 2003(3):60-65.
- [31] 束国刚. T/P91 钢国产化工艺组织和性能改进的研究与应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.

责任编辑:何莉