



## 热处理工艺对1Cr16Ni2MoN叶片钢断面收缩的影响

张秀丽<sup>1,2</sup>, 龚志华<sup>3</sup>, 刘新权<sup>4</sup>, 孙国洋<sup>1,2</sup>, 马圆圆<sup>3</sup>, 高翔<sup>3</sup>

(1 大冶特殊钢股份有限公司, 黄石 435001; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001; 3 内蒙古科技大学材料科学与工程学院, 包头 014010; 4 无锡透平叶片有限公司, 无锡 214174)

**摘要:**为了解决1Cr16Ni2MoN钢断面收缩率不稳定的问题,采用OIM、SEM、TEM及热力学计算等方法分析了不同回火工艺下燃机叶片用1Cr16Ni2MoN马氏体耐热钢的组织及塑韧性。结果表明,1Cr16Ni2MoN钢在1040℃淬火,550~560℃工艺下,抗拉强度、屈服强度和断面收缩率分别达到1200、1000 MPa、65%以上;主要碳化物析出为M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>类型,组织中因Cr的偏析形成大颗粒碳化物组成的带状组织,并伴生δ-铁素体的形成。碳化物随着回火温度增加,析出数量增加,晶界和板条界的碳化物聚集并发生粗化,导致板条和相界面结合力降低,能够加速裂纹的产生和扩展,从而降低了断面收缩率和冲击韧性。综合考虑δ-铁素体和断面收缩率控制,需要进行成分调整,w[C]控制到0.15%,适当将w[N]提高至0.07%,并增加扩散退火工艺,减少因偏析导致的碳化物富集。

**关键词:**断面收缩率; 马氏体耐热钢; 1Cr16Ni2MoN; M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>; 叶片

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2025-00060 **中图分类号:**TG156.3

## Effect of Heat Treatment Process on the Section Shrinkage of 1Cr16Ni2MoN Blade Steel

Zhang Xiuli<sup>1,2</sup>, Gong Zhihua<sup>3</sup>, Liu Xinquan<sup>4</sup>, Sun Guoyang<sup>1,2</sup>, Ma Yuanyuan<sup>3</sup>, Gao Xiang<sup>3</sup>

(1 Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435100, China; 2 Hubei Provincial key laboratory of high-quality special steel, Huangshi 435001, China; 3 School of Materials Science and Engineering, University of Mongolia and Technology, Baotou 014010, China; 4 Wuxi Turbine Blade Co., Ltd., Wuxi 214174, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of unstable cross-sectional shrinkage of 1Cr16Ni2MoN steel, OIM, SEM, TEM, and thermodynamic calculations and other means were used to study the microstructure and ductility of 1Cr16Ni2MoN martensitic heat-resistant steel for gas turbine blades under different tempering processes. The results show that 1Cr16Ni2MoN steel quenched at 1040 °C and 550 °C-560 °C, with a tensile strength of over 1200 MPa, a yield strength of over 1000 MPa, and a cross-sectional shrinkage rate of over 65%; The main type of carbide precipitation is M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, which forms a banded structure composed of large carbide particles due to Cr segregation in the microstructure, accompanied by the formation of δ-ferrite. With the increase of tempering temperature, the amount of carbide precipitation increases, and the carbide at grain boundary and flat noodles boundary gathers and coarsens, which leads to the decrease of the bonding force between flat noodles and phase interface, which can accelerate the generation and propagation of cracks, thus reducing the reduction of area and impact toughness. Taking into account the control of δ-ferrite and cross-sectional shrinkage rate, it is necessary to adjust the composition, the content of C should be minimized as much as possible, with the carbon content maintained at 0.15%, the content of N should be suitably increased to upper limit of 0.007%, and the diffusion annealing process should be implemented to reduce the enrichment of carbides resulting from segregation.

**Key Words:** Section Shrinkage; Martensitic Heat-resistant Steel; 1Cr16Ni2MoN; M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>; Blade

1Cr16Ni2MoN(国外牌号3Π479)钢具有较高的Cr含量,并采用了N进行强化,比传统12%Cr系叶片钢具有更强的耐蚀性和强度,21世纪初在我国已经国产化成功<sup>[1-4]</sup>。该马氏体耐热钢适用于500℃以下工作的零件,以及在-70~300℃工作的渗碳零件。被广泛应用于重型燃气轮机叶片、航空发动机

环、弹簧座类零件<sup>[5-8]</sup>。该钢具有高的Cr、N及C含量,容易形成Cr偏析及C、N的碳化物析出,导致生产过程中容易出现大颗粒碳化物形成的带状组织、δ铁素体不能够稳定控制、强度余量小、断面收缩率低于标准要求等问题。

针对1Cr16Ni2MoN钢的强度、断面收缩率偏标

**基金项目:** 内蒙古高等学校青年科技英才计划资助项目(项目编号: NJYT23115); 内蒙古自然科学基金资助项目(项目编号: 2022MS05039); 内蒙古直属高校基本科研业务费(No.2023QNJS007)

**作者简介:** 张秀丽(1970—),女,硕士,正高级工程师; **E-mail:** fszxy70@163.com; **收稿日期:** 2025-03-07

**通信作者:** 龚志华(1979—),男,博士,教授; **E-mail:** gzh\_2001@163.com

准下限、 $\delta$ -铁素体难控制等问题,本研究制定了系列热处理工艺,并利用热力学计算和TEM分析等方法对断面收缩率的影响原因进行了探讨,希望能为工业生产提供理论支持以及解决方案。

### 1 实验材料与方法

采用1Cr16Ni2MoN钢试验料采用50 kg真空熔炼炉冶炼,锻造温度850~1 150 °C,其化学成分见表1。该钢种标准推荐的两种热处理工艺分别为:1)(1 040±10)°C油淬,550~590 °C回火空冷;2)(1 040±10)°C油淬,640~680 °C回火空冷。

为了更好地了解合金在不同回火工艺下组织和性能的变化,设计回火范围550~680 °C,具体工艺见表2。

对热处理后试样采用国家标准测试方法进行室温力学性能测试<sup>[9]</sup>。拉伸试样采用 $\phi 5$  mm的标准试样,冲击试样采用标准10 mm×10 mm×55 mm的“U”型缺口试样,所有数据均为2个试样的平均值。利用OM、SEM、TEM进行金相组织、碳化物形貌观察。拉伸试验在MTS拉伸机上进行,光学显微组织观察使用SISC-IAS-6.0图像分析仪,扫描组织在蔡司扫描电镜观察,TEM观察采用JEOL-2100F透射电子显微镜。

### 2 实验结果与分析

#### 2.1 不同热处理工艺对1Cr16Ni2MoN性能的影响

1Cr16Ni2MoN钢制定的1 040 °C淬火,550~590 °C回火对强度的断面收缩率都有较高的要求,抗拉强度 $\geq 1 130$  MPa,屈服强度 $\geq 930$  MPa,断面收缩

$\geq 58\%$ 。图1是不同回火温度下的性能。由图1可知,随着回火温度增加,抗拉强度和屈服强度呈降低趋势,且降低幅度较大。回火温度超过570 °C,抗拉和屈服强度都低于标准下限要求。由图1(b)可见,回火温度增加,伸长率基本不变,断面收缩率在550~570 °C有略微降低趋势,但超过570 °C,断面收缩率会大幅降低。图1(c)布氏硬度变化趋势和断面收缩率一致,550~570 °C降幅较小,超过570 °C硬度直径明显降低。合金的冲击吸收功在560~580 °C呈大幅降低趋势。

1 040 °C淬火,640~680 °C回火标准要求抗拉强度 $\geq 930$  MPa,屈服强度 $\geq 735$  MPa,断面收缩率 $\geq 55\%$ 。如图2所示,1Cr16Ni2MoN钢在该温度区间内,抗拉强度和屈服强度随温度变化不明显;随着回火温度提高,断面收缩率略有增加趋势,硬度直径和冲击吸收功呈降低趋势。

从以上分析可看出,按标准工艺(1)的要求,高于570 °C回火,强度和断面收缩率将不满足性能标准要求,560~580 °C进入了回火脆性区;而标准工艺(2)的回火温度区间,强度虽然满足指标要求,但是富余量很低,偏下限;断面收缩率全部不满足要求,冲击吸收功相比590 °C有所回升。

#### 2.2 不同热处理工艺对1Cr16Ni2MoN组织的影响

图3是550~590 °C回火后的金相组织。各回火温度下,组织均为回火马氏体,该温度区域回火,马氏体板条保持较为完整,退化不明显;但从图3中可看出,带状组织还是较为明显,且带状组织区域,间断分布少量条状 $\delta$ 铁素体。

表1 实验用1Cr16Ni2MoN钢成分(质量分数)  
Table 1 Composition of 1Cr16Ni2MoN steel for the test

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.12~0.18	$\leq 0.60$	$\leq 0.60$	$\leq 0.030$	$\leq 0.020$	15.00~16.50	2.00~2.50	0.90~1.30	0.03~0.10

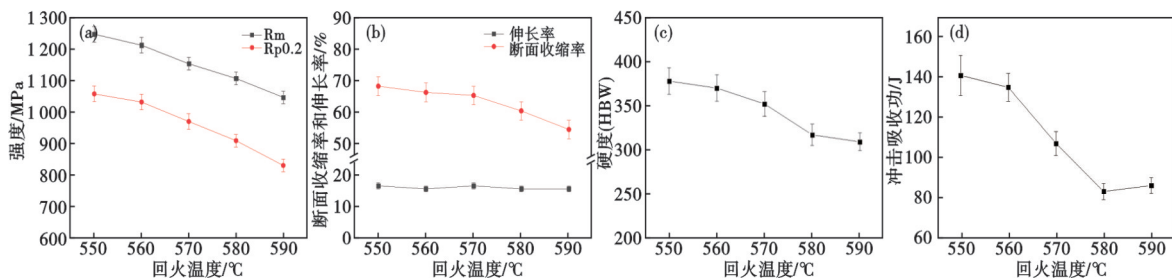


图1 550~590 °C回火温度对1Cr16Ni2MoN钢性能的影响:(a)强度,(b)断面收缩率Z和伸长率A(c)硬度,(d)冲击吸收功  
Fig. 1 The effect of 550 °C~590 °C tempering temperature on properties of 1Cr16Ni2MoN steel : (a) intensity, (b) plasticity, (c) hardness, (d) impact absorption energy

表 2 1Cr16Ni2MoN 钢的热处理工艺  
Table 2 Heat-treatment process of 1Cr16Ni2MoN steel

检验号	热处理制度
执行要求	(1 040±10)°C油淬+550~590 °C回火
1#	1 040 °C×60 min/油+550 °C×120 min/空冷
2#	1 040 °C×60 min/油+560 °C×120 min/空冷
3#	1 040 °C×60 min/油+570 °C×120 min/空冷
4#	1 040 °C×60 min/油+580 °C×120 min/空冷
5#	1 040 °C×60 min/油+590 °C×120 min/空冷
执行要求	(1 040 °C±10)°C油淬+640~680 °C回火
6#	1 040 °C×60 min/油+640 °C×120 min/空冷
7#	1 040 °C×60 min/油+660 °C×120 min/空冷
8#	1 040 °C×60 min/油+680 °C×120 min/空冷

图 4 是 570 °C 回火后的扫描图片。图 4(a) 是带状组织放大图片, 可看到  $\delta$ -铁素体周围密集分布大颗粒的  $M_{23}C_6$  碳化物, 且带状组织均有大颗粒  $M_{23}C_6$

碳化物组成, 如图 4(b) 中红色框所示; 由于 Cr 的偏析导致大颗粒碳化物析出, 同时, Cr 偏析会大幅降低  $\delta$ -铁素体的析出温度, 所以, 通常在高 Cr 耐热钢带状组织中,  $M_{23}C_6$  碳化物和  $\delta$ -铁素体呈伴生关系。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 断面收缩低的原因分析

前文探讨了回火工艺对组织和性能的影响, 所用试验样品均为同一支棒料, 因而在微观组织上差异并不明显, 1# ~ 8# 中的  $\delta$ -铁素体均在 1% 左右, 因而排出  $\delta$ -铁素体和带状组织差异导致断面收缩不合格问题。

从图 1 中可看到, 570~590 °C 冲击韧性大幅下降, 伴随着断面收缩率也降低, 对该区间热处理条件下的显微组织进行扫描分析。如图 5 所示。

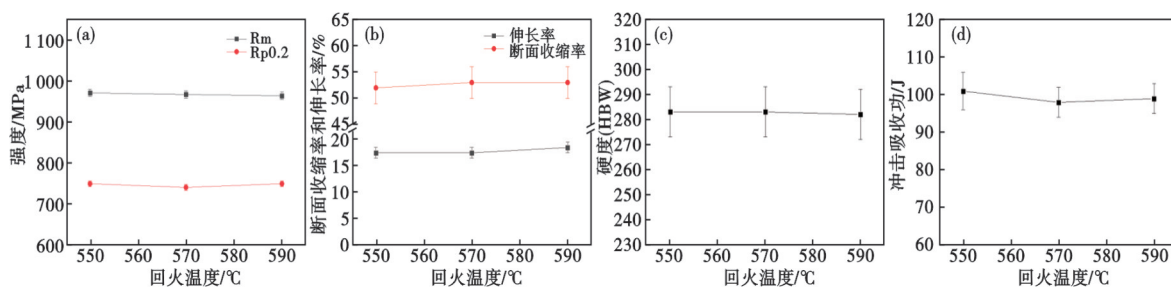


图 2 640~680 °C 回火温度对 1Cr16Ni2MoN 钢性能的影响: (a) 强度, (b) 塑性, (c) 硬度, (d) 冲击吸收功

Fig. 2 The effect of 640 °C~680 °C tempering temperature on properties of 1Cr16Ni2MoN steel: (a) intensity, (b) plasticity, (c) hardness, (d) impact absorption energy

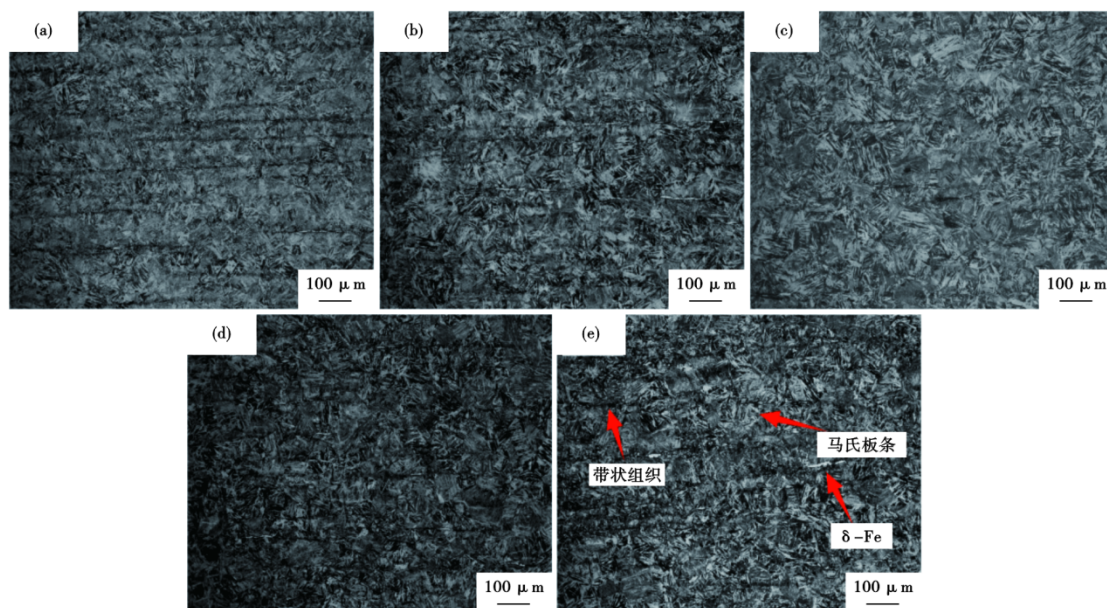


图 3 550~590 °C 回火工艺后 1Cr16Ni2MoN 钢的金相显微组织: (a) 550 °C, (b) 560 °C, (c) 570 °C, (d) 580 °C, (e) 590 °C

Fig. 3 Metallographic microstructure of 1Cr16Ni2MoN steel after tempering process at 550 °C~590 °C : (a) 550 °C, (b) 560 °C, (c) 570 °C, (d) 580 °C, (e) 590 °C

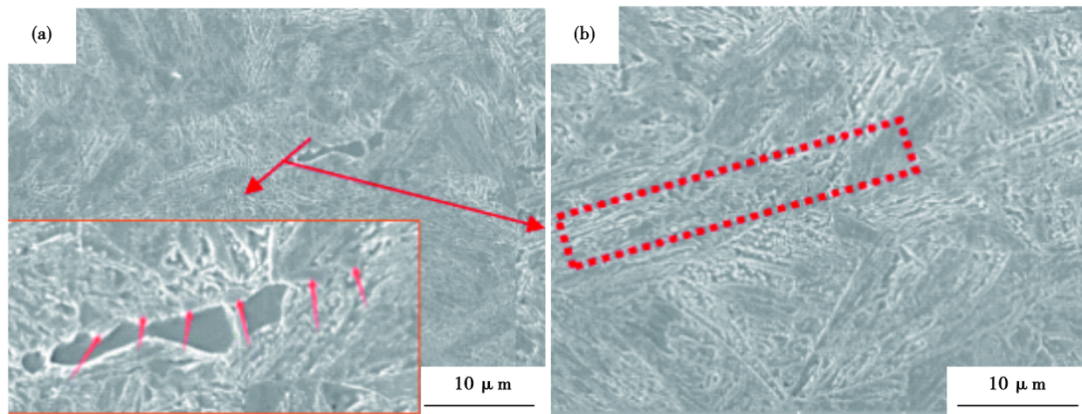


图4 570 °C回火后1Cr16Ni2MoN钢的扫描组织:(a)δ-铁素体区;(b)碳化物带状偏析区

Fig. 4 Scanning microstructure of 1Cr16Ni2MoN steel after tempering at 570 °C : (a) The zone of ferrite ; (b) The zone of carbides banded segregation

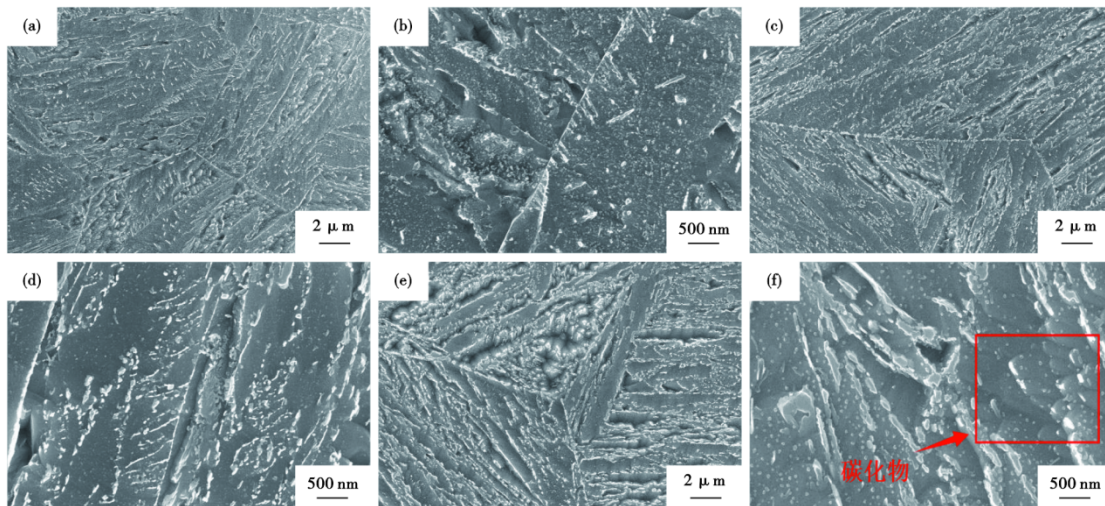


图5 不同回火温度1Cr16Ni2MoN钢的扫描组织:(a)(b)560 °C;(c)(d)590 °C;(e)(f)640 °C

Fig. 5 Scanning microstructure of 1Cr16Ni2MoN steel at different tempering temperatures : (a)(b)560 °C ; (c)(d)590 °C ; (e)(f)640 °C

图5(a)、(b)是560 °C回火的析出图片,晶界上有细小的析出相断续分布,马氏体板条界和板条内部都有纳米级细小碳化物析出,但是尺寸非常细小。图5(c)、(d)是590 °C回火的组织,可看到析出相数量明显增加,晶界断续颗粒碳化物明显粗化,如图5(c)三叉晶界位置;图5(d)中马氏体板条虽然发生了退化,但是板条界处的析出相仍然保留,且尺寸比560 °C的要大。图5(e)、(f)是640 °C回火组织,晶界和板条界碳化物进一步长大,局部区域连续形成,晶内碳化物发生明显球化,尺寸在30~50 nm左右。

以上分析可知,在560 °C以上温度回火,碳化物析出加剧且会发生长大,这一现象在590、640 °C回火的组织中非常清晰。因此,连续析出的Cr的碳化

物导致了晶界和板条界相界面增加,当析出相长大到一定尺寸并连续形成的时候,由于相界面结合力降低,在受到冲击的时候,裂纹容易扩展,从而降低了冲击吸收功,因此导致了570~590 °C的回火脆性。叶片钢中Cr含量高,碳化物类型主要是 $M_{23}C_6$ 型,主要有两种析出方式,第一种是在冶炼过程中形成的液析碳化物,这种 $M_{23}C_6$ 相因凝固过程中Cr的聚集而形成大的碳化物颗粒,局部区域富集,通常需要进行高温扩散退火或者淬火前增加正火工艺来改善碳化物尺寸和分布;第二种是在回火过程中析出,此类 $M_{23}C_6$ 相尺寸细小,优先在板条界、晶界等缺陷处形成,随着回火温度升高而长大。

图6是570 °C回火TEM图片。从图6(a)、(b)可看到,在晶内分布很多细小的纳米级碳化物(约

1~10 nm),碳化物尺寸不均匀;图6(c)、(d)的明暗场相是马氏体板条束的边界上分布的细小的颗粒状纳米级碳化物,碳化物沿板条束边界少量、断续析出。

图7是640 °C回火TEM图片。从图7(a)可看到,在晶界附近,许多细小碳化物聚集,同时晶内出现了大颗粒的碳化物(150~200 nm),衍射标定为 $M_{23}C_6$ 相的 $[-1, -1, 0]$ 晶带轴;图7(c)、(d)的明暗场相是马氏体板条束和板条内部的碳化物,相比图6,经过640 °C回火后的碳化物明显粗化,并发生聚集。

通常拉伸过程中,在颈缩位置材料受三向拉应力作用,而金属的塑性变形是晶界、晶内组织的协调变形过程<sup>[10-11]</sup>。微观上都体现在多滑移系位错运动产生的滑移变形,当位错运动在晶界、 $\delta$ 相界面、板条界、析出相等位置受阻,会通过攀移、扭折、孪生变形来释放持续施加的应力<sup>[12]</sup>;此时析出相界面、板条界都将是应力集中难以释放的位置,大的应力集中,叠加三向拉应力,优先在这些地点产生微裂纹,随着位错聚集,应力持续集中,裂纹扩展,扩展区域优先在有碳化物的边界或者板条界,当裂纹达到临界条件,将快速扩展形成断裂。因此回火温度高于590 °C以后,碳化物聚集并粗化,导致了断面收缩率降低。

### 3.2 C、N对析出相及 $\delta$ -铁素体的影响

随着汽轮机、燃气轮机热效率要求越来越高,使用的问题提升,叶片钢也需要增加Cr、Mo、W等元素含量来提高氧化性和持久强度,但这些耐腐蚀和耐高温元素加入会导致成分偏析增加,降低了 $\delta$ -铁素体的形成温度,因而成为各生产企业难以控制的难点问题<sup>[13]</sup>。对于Cr、W、Mo等合金对 $\delta$ -铁素体的影响在以前的研究中已经阐明,不再论述<sup>[14]</sup>,1Cr16Ni2MoN钢主要是Cr偏析会导致 $\delta$ -铁素体析出温度大幅降低,本研究主要分析C、N对 $\delta$ -铁素体的影响。主要是因为上文提到断面收缩问题由碳化物的粗化引起,因此,优化C、N的含量,在控制 $\delta$ -铁素体的同时,尽量减少C、N的碳化物析出尤为关键。

利用Thermal-calc热力学软件对不同C、N含量的1Cr16Ni2MoN钢进行了热力学计算,如图8所示。从计算结果可看出,1Cr16Ni2MoN耐热钢的析出相并不复杂,只有 $M_{23}C_6$ 在回火过程中能够形成;从图8(a)实际成分计算结果中可以看到 $\delta$ -铁素体析出温度只有1100 °C,这表明该钢在锻造前的加热(1150 °C附近)或者均匀化退火( $\geq 1200$  °C)过程中均可能产生铁素体,而这些铁素体在后续锻造中不

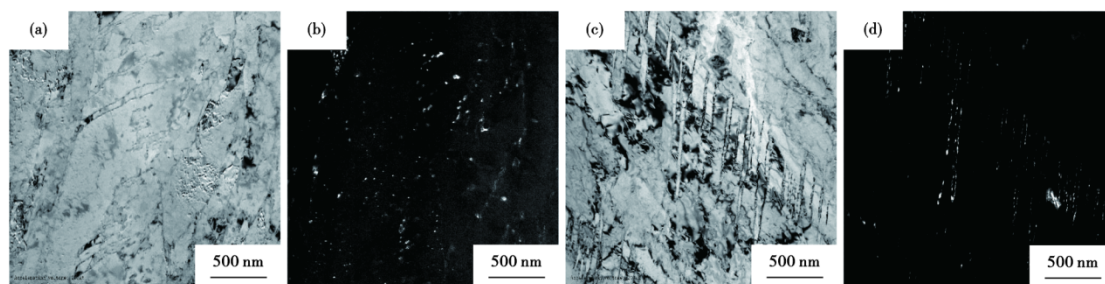


图6 570 °C回火后1Cr16Ni2MoN钢的透射图片:(a)、(b)碳化物的明场和暗场;(c)、(d)马氏体板条的明场和暗场  
Fig. 6 Transmission images of 1Cr16Ni2MoN steel tempered at 570 °C : (a)、(b) The bright field and dark field of carbides ; (c)、(d) The bright field and dark field of martensite lath

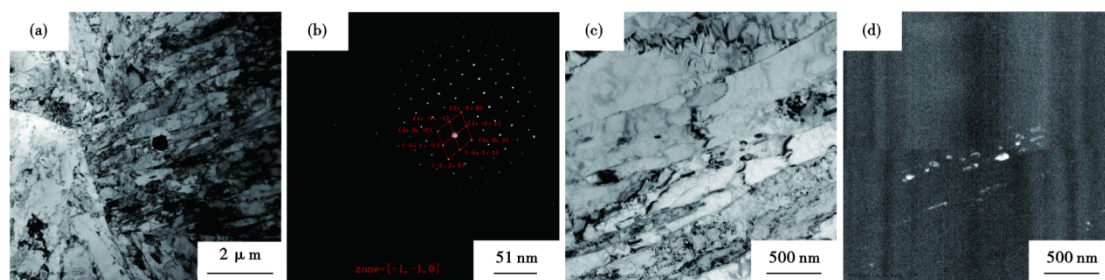


图7 640 °C回火后1Cr16Ni2MoN钢的透射图片:(a)、(b)大颗粒碳化物及其衍射斑;(c)、(d)碳化物的明场和暗场  
Fig. 7 Transmission images of 1Cr16Ni2MoN steel after tempering at 640 °C : (a)、(b) Large carbides and their diffraction spots ; (c)、(d) The bright field and dark field of carbides

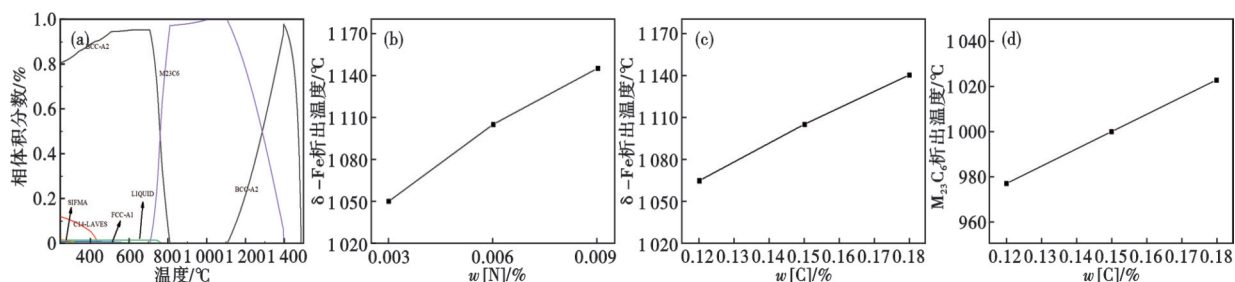


图 8  $w[\text{C}]/\%$ ,  $w[\text{N}]/\%$  对  $\delta$ -铁素体和碳化物析出的影响: (a) 热力学计算相图; (b)  $w[\text{N}]$  对  $\delta$ -铁素体析出温度的影响; (c)  $w[\text{C}]$  对  $\delta$ -铁素体析出温度的影响; (d)  $w[\text{C}]$  对  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  析出温度的影响

Fig. 8 The influence of  $w[\text{C}]/\%$  and  $w[\text{N}]/\%$  on the precipitation of  $\delta$ -ferrite and carbides: (a) Thermodynamic calculation phase diagram; (b) The influence of N content on the precipitation temperature of  $\delta$ -ferrite; (c) The influence of C content on the precipitation temperature of  $\delta$ -ferrite; (d) The influence of C content on the precipitation temperature of  $\text{M}_{23}\text{C}_6$

能够完全消除,从图 3 的金相图也可以看到,组织中有条状白色的  $\delta$ -铁素体。

图 8(b, c) 是 N 和 C 对  $\delta$ -铁素体析出温度的影响。C、N 含量增加,都会提高  $\delta$ -铁素体的析出温度; C 含量增加,  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  的析出温度提高、析出数量会明显增加如图 8(d) 所示, N 反而对  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  碳化物的析出影响不明显; 结合铁素体和碳化物的最优化控制, C 偏下限, N 可以按中上限。

## 4 结论

1) 1Cr16Ni2MoN 钢在 1 040 °C 淬火, 550~560 °C, 能够满足性能指标要求, 抗拉强度达到

1 200 MPa 以上, 屈服强度达到 1 000 MPa 以上, 断面收缩率达到 65% 以上; 640~680 °C 回火, 强度偏低, 断面收缩率不能满足要求, 需要进行成分优化, 或进行充分扩散退火, 降低元素偏析。

2) 1Cr16Ni2MoN 钢的断面收缩率低主要是在回火过程中,  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  相随着回火温度增加, 析出数量增加, 聚集并发生粗化, 在晶界和板条界析出导致了应力集中后裂纹的产生和迅速扩展。

3) C 对断面收缩影响较为显著, 成分优化后  $w[\text{C}]$  控制到 0.15%, 减少碳化物析出, 为了平衡  $\delta$ -铁素体的含量,  $w[\text{N}]$  控制到 0.007%。

## 参考文献

- [1] 任路浩, 王立民, 郭 菁. 15Cr16Ni2MoN 新型马氏体热强钢热变形行为研究[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(12): 146—153.
- [2] 苏 宁, 刘凤军, 李月超. 高强管道用 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的热处理与组织性能研究[J]. 锻压技术, 2024, 49(6): 215—220+254.
- [3] 王中琳, 李 权, 龚志华, 等. 丝杠用 1Cr15Ni4Mo2CuN 不锈钢热处理温度场的有限元数值模拟[J]. 金属热处理, 2023, 48(4): 245—252.
- [4] 吴伟建, 刘城森, 李 权. 焊接工艺对 1Cr16Ni4Mo2Cu2 W1VN 钢和 Co6B 合金堆焊层相容性的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(7): 326—330.
- [5] 杨树林, 赵吉庆, 闫 磊, 等.  $\text{Ni866}$  合金锻件径向条纹形成原因与消除工艺[J]. 金属热处理, 2023, 48(9): 279—283.
- [6] 何 潇, 李 俊, 李绍宏, 等. 深冷处理后回火温度对 15Cr 超级马氏体不锈钢组织及耐点蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(11): 62—68.
- [7] 王庆田, 罗 英, 杜 华, 等. 堆内构件材料 14Cr17Ni2 马氏体不锈钢锻件特性研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(6): 161—166.
- [8] 朱晓光. 1Cr16Ni2MoN 钢组织和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [10] 丁 维. 1Cr16Ni2MoN 不锈钢叶片模锻工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [11] 曹 鑫, 李 权, 杨银辉. 热处理工艺对 30Cr16Mo1VN 钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(12): 40—46.
- [12] Wang Z L, Gong Z H, Li Q, et al. Effect of Mo and cold forging deformation on strength and ductility of cobalt-based alloy L605 [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(7): 1811—1823.
- [13] 杜丽萍, 龚志华, 杨 钢, 等. 9Cr3 W3Co 叶片钢的热变形行为研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 90—96.
- [14] 龚志华, 杨 钢, 定 巍, 等. 热处理工艺对 1Cr11Co3 W3Ni-MoVnNb 钢析出相及性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(4): 315—321.