



固溶温度对 Haynes 230 合金热轧棒材显微组织演变和拉伸性能的影响

丁佐军, 郭亮, 徐晓懿, 魏航
(无锡派克新材料科技股份有限公司, 无锡 214161)

摘要: Haynes 230 合金是超高温气冷堆、光热发电和先进超超临界燃煤发电机组高温部件的重要候选材料。为了建立合金显微组织控制准则, 采用热轧成形板材, 通过调整固溶温度, 研究了固溶处理过程中析出相溶解行为和晶粒尺寸变化等显微组织演变规律, 研究结果显示, 热轧态板材具有奥氏体等轴晶组织, 晶粒分布均匀, 平均晶粒尺寸约为 32 μm , 主要析出相为富 W 和 Mo 的 M_6C 碳化物; 在 950~1 150 $^\circ\text{C}$, M_6C 碳化物含量和颗粒尺寸未发生明显变化, 晶粒尺寸变化缓慢; 随着固溶温度增高到 1 180~1 200 $^\circ\text{C}$, M_6C 碳化物含量有所降低, 颗粒尺寸减小, 晶粒发生粗化; 当固溶温度升高到 1 230、1 250 $^\circ\text{C}$ 时, 碳化物含量和尺寸明显减小, 平均晶粒尺寸增至 142、201 μm ; 随着固溶温度增高, 室温和 750 $^\circ\text{C}$ 拉伸强度趋于降低, 900 $^\circ\text{C}$ 抗拉强度升高; 基于试验研究, 提出 Haynes 230 合金热轧板材晶粒尺寸控制在 76~142 μm , 相应的固溶温度选用 1 200~1 230 $^\circ\text{C}$ 。

关键词: Haynes 230 合金; 固溶处理; 晶粒尺寸; 碳化物

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00159 **中图分类号:** TG230. 2

Effect of Solution Temperature on Microstructural Evolution and Tensile Properties of Hot-rolled Haynes 230 Alloy Bar

Ding Zuojun, Guo Liang, Xu Xiaoyi, Wei Hang
(Wuxi Paikexin Materials Technology Co., Ltd., Wuxi 214161, China)

Abstract: Haynes 230 is an important candidate material for high temperature components in ultra-high temperature gas-cooled reactors, concentrating solar power and advanced ultra-supercritical coal-fired generating plants. In order to establish the alloy microstructure control criterion, it adopts the hot-rolled forming plate and adjusts the solid solution temperature, the law of microstructure evolution of the behavior of precipitation phase dissolution and the change of grain size during solution treatment were studied. The results showed that the hot-rolled plates were composed of equiaxed austenitic grains with the average grain size of 32 μm . The main precipitation phase was detected to be M_6C carbide and the metal cluster M was composed of W and Mo. The carbide content and particle size of M_6C varied little and the austenitic grains coarsened little during solution treatments in the temperature range of 950-1 150 $^\circ\text{C}$. With the increasing of solid solution temperature to 1 180-1 200 $^\circ\text{C}$, the carbide content of M_6C decreased, the particle size decreased, and the grain was coarsening; At 1 230 $^\circ\text{C}$ and 1 250 $^\circ\text{C}$, the dissolution of M_6C and the coarsening of grains became obviously with the average grain size to be 142 μm and 201 μm , respectively. Tensile strength at room temperature and 750 $^\circ\text{C}$ decreased slightly with the increasing solution temperature, while tensile strength at 900 $^\circ\text{C}$ increased. The grain size and the related solution temperature was recommended to be controlled in rang of 76-142 μm and 1 200-1 230 $^\circ\text{C}$ based on the present experimental investigation, respectively.

Key Words: Haynes 230 Alloy; Solution Treatment; Grain Size; Carbide

Haynes 230 合金为 Ni-Cr-W-Mo 系高温合金, 具有良好的高温强度和耐蚀性, 是超高温气冷堆 (Very High Temperature Reactor, VHTR)、气冷快堆 (Gas-cooled Fast Reactor, GFR)、先进超超临界燃煤电站 (Advanced Ultra Supercritical fossil power plants, A-USC)、超临界 CO_2 装置和光热发电 (concentrating Solar Power, CSP) 高温结构的重要候选材料^[1-10]。在 VHTR、GFR 和 A-USC 中, Haynes 230 合金

可用作中间热交换器管、传热管和过热器管, 合金制备而成的构件形式包括管材、板材和薄带^[1-2, 4]。应用于超临界 CO_2 装置和 CSP 的构件形式包括板材和管材。目前, Haynes 230 合金研究集中在热变形行为^[11-16]、拉伸性能^[17]、蠕变性能^[18-19]、疲劳性能^[20-22]、氧化与腐蚀行为^[23-25]、组织稳定性^[26]、焊接^[19, 23, 27-29]和增材制造^[30]。鉴于合金在核电、火电和新型能源系统中以变形状态使用, 如何控制晶粒尺

寸和析出相是高温用构件制造的基础科学。彭聪辉等^[31]研究显示,经 1 100~1 150 °C 退火处理后冷轧合金获得均匀、细小的等轴晶,平均晶粒尺寸在 10~25 μm 变化;退火温度升高至 1 200 °C,合金晶粒尺寸增加到 40 μm。苏晓帆等^[32]指出,热成形板材在固溶处理过程中的晶粒长大行为可以分为三个阶段,在 1 100~1 200 °C 时晶粒长大缓慢,在 1 200~1 250 °C 晶粒粗化显著,而在 1 250~1 310 °C 下受到碳化物钉扎使得晶粒的粗化放缓。杜星霖、周岚等^[33-34]认为固溶后 Haynes230 合金中析出相为富 W 的 M₆C 和少量 M₂₃C₆,在 800~1 100 °C 长期时效后合金中形成沿晶界分布的 M₂₃C₆。Gao 等^[35]研究显示,800 °C 时效过程中合金中析出四种形态的 M₂₃C₆,沿晶界形成层状碳化物,晶内形成纳米尺寸的颗粒状碳化物,非共格孪晶界或端头形成条状碳化物,以及由 M₆C 退化分解形成的颗粒状碳化物。Veverkova 等^[26]研究了 Haynes230 合金薄带的组织稳定性,初始态析出相为 M₆C,在 650~700 °C 时效 6 000~18 160 h 后合金中的 M₆C 发生分解反应而形成富 Cr 碳化物,但在 900~1 000 °C 时效过程中 M₆C 分解为大片状的富 Ni 和富 Cr 相,其结构和化学组成与低温时效不同。

在工作温度超过 800 °C 的 VHTR 和超临界 CO₂ 装置中, Haynes230 合金还是堆内构件的重要候选材料,其中,棒材是其主要构件形式。考虑到棒材制造工艺与管材、板材和薄带差异明显,使得其在热处理过程中的组织演变行为与文献报道的研究结果^[26, 31-34]可能存在一定的差异,需要开展固溶处理过程中晶粒尺寸变化的研究工作,以期对棒材热处理制度的选用提供试验依据。此外,合金中的 M₆C 碳化物富集了 W 和 Mo,其大量析出降低了 W 在基体中的固溶度,使得 W 和 Mo 对奥氏体基体的强化效果下降。在 800~1 000 °C 的服役过程中, M₆C 碳化物发生分解,促进 M₂₃C₆、富 Ni 或富 Cr 相析出。通过更高温度的固溶处理,促进 M₆C 碳化物回溶到基体中,不仅有助于提高元素的强化效果,而且能有效防止 M₆C 碳化物分解反应而改善组织稳定性。

Tang 等^[36]指出合金中 M₆C 碳化物的溶解温度高于 1 270 °C,然而过高温固溶使得合金晶粒尺寸显著增大^[31-32],对合金拉伸性能具有不利影响^[17]。因此,如何平衡 M₆C 碳化物溶解和晶粒尺寸是 Haynes230 合金热成形棒材制造的重要研究课题。

本文选用 Haynes230 合金热轧棒材,通过分析固溶温度对 M₆C 碳化物溶解和晶粒尺寸演变行为的影响,建立了固溶温度和组织演变对合金室温和高温拉伸性能的影响规律,确定出热轧棒材晶粒尺寸控制范围,为堆内构件工程化制备过程中固溶制度的选用提供参考依据。

1 试验材料及方法

采用真空感应冶炼 100 kg 母合金,浇注成直径为 90 mm 的电极棒。电极棒经真空自耗制备成直径为 160 mm、高度为 490 mm 的合金锭,化学成分见表 1。顶部和底部分别切除 30 mm 和 25 mm 后,合金锭在 1 200 °C 均匀化处理 20 h,经锻造成直径为 50 mm 的棒材。锻造棒材在 1 180 °C 均匀化处理 2 h,经热轧成直径为 30 mm 的棒材。

从合金热轧棒材切取样品开展固溶处理,固溶温度分别选用 1 050、1 100、1 130、1 150、1 180、1 200、1 230、1 250 °C,保温时间为 1 h,水冷至室温。固溶后,合金试样加工成图 1 拉伸试样,在室温、750 °C 和 900 °C 进行拉伸测试,获得屈服强度 (R_{P0.2})、抗拉强度 (R_m) 和伸长率 (A)。

从热轧棒材和固溶处理后的棒材上切取试样,经磨制、抛光后,在王水(溶液配比为 HNO₃:HCl=3:

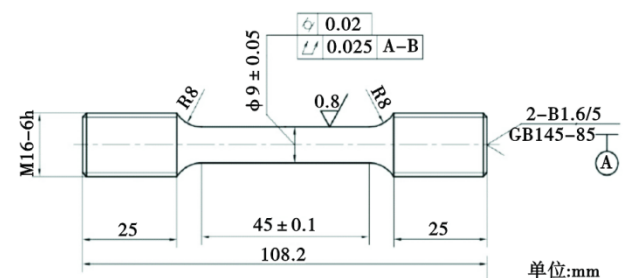


图 1 Haynes230 合金室温和高温拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of tensile test specimens of Haynes 230 alloy at room temperature and high temperature

表 1 Haynes230 合金锭化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of Haynes 230 alloy ingot

						%	
C	Si	Mn	P	S	Cr	W	
0.10	0.35	0.46	0.005	<0.0005	21.80	13.90	
Mo	Al	Ti	Co	La	B	Ni	
1.32	0.41	0.02	1.34	0.023	0.005	Bal.	

1)中浸泡20~25 s显示合金晶界和析出相,用于光学金相显微镜(Optical metallographic Microscope, OM)和扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)分析。采用线切割从热轧棒材上切取400 μm 厚试片,经机械抛磨后厚度减薄至60 μm ,冲制成直径为3 mm的试样,用配比为95%酒精和5%高氯酸的溶液在-20 $^{\circ}\text{C}$ 、15V条件下制备用于透射电镜(Transmission Electron Microscope, TEM)分析的试样。采用OM分析热轧态和固溶处理后的棒材显微组织,统计5张放大倍数为100倍的金相照片,获得平均晶粒尺寸。采用SEM和TEM分析热轧态和固溶处理后的棒材析出相结构和统计颗粒尺寸。

2 试验结果与分析

2.1 热轧棒材显微组织

图2给出了热轧棒材的显微组织,图2(a)显示Haynes230合金棒材具有细小的等轴晶组织,奥氏体晶粒内和晶界上弥散分布着数量众多的颗粒状析出相,统计结果显示奥氏体晶粒尺寸约为32 μm 。图2(b)的SEM分析结果给出了颗粒状析出相形貌,按照颗粒形态和尺寸划分,呈短棒状和块状的析出相主要分布在晶界附近,呈颗粒状的析出相主要分布在晶粒内。TEM分析显示,析出相有两种,一种为富W和Mo的 M_6C 碳化物,晶界处的颗粒尺寸平均值为1.65 μm ,晶粒内细小的碳化物尺寸为0.2~0.7 μm ,如图2(c-e)所示。晶界上存在少量的 M_{23}C_6 碳化物,颗粒尺寸约

为0.08 μm ,如图2(c)所示。 M_6C 和 M_{23}C_6 碳化物均为FCC结构,晶格常数(a)分别为1.138 nm和1.087~1.097 nm^[35, 37]。两种碳化物中的金属原子团M化学构成差异明显,图2(d-e)的EDS分析结果显示, M_6C 碳化物中M富含W和Mo,而 M_{23}C_6 碳化物中的M主要由Cr组成。

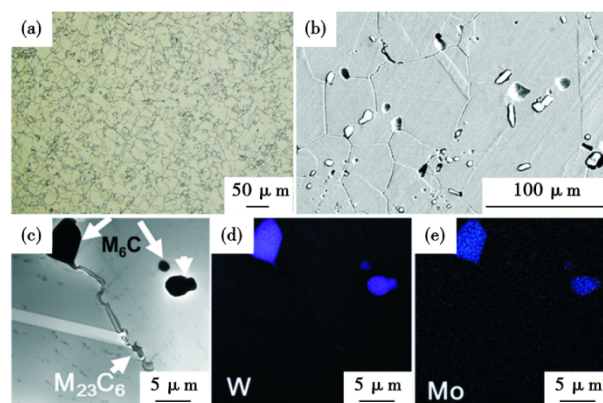


图2 Haynes230合金热轧棒材显微组织:(a)OM组织,(b)SEM组织,(c)TEM组织,(d-e)析出相元素面分布
Fig. 2 Microstructure of hot-rolled bars of Haynes 230 alloy : (a) OM microstructure, (b) SEM microstructure, (c) TEM microstructure, (d-e) element distribution pattern of precipitates

2.2 固溶态显微组织

图3给出了不同温度固溶后的棒材显微组织,与图2(a)相比,图3(a)和(b)的1 100 $^{\circ}\text{C}$ 和1 150 $^{\circ}\text{C}$ 固溶组织相近,这表明Haynes230合金棒材在1 150 $^{\circ}\text{C}$ 以下固溶处理过程中晶粒粗化倾向较小。随着温度升

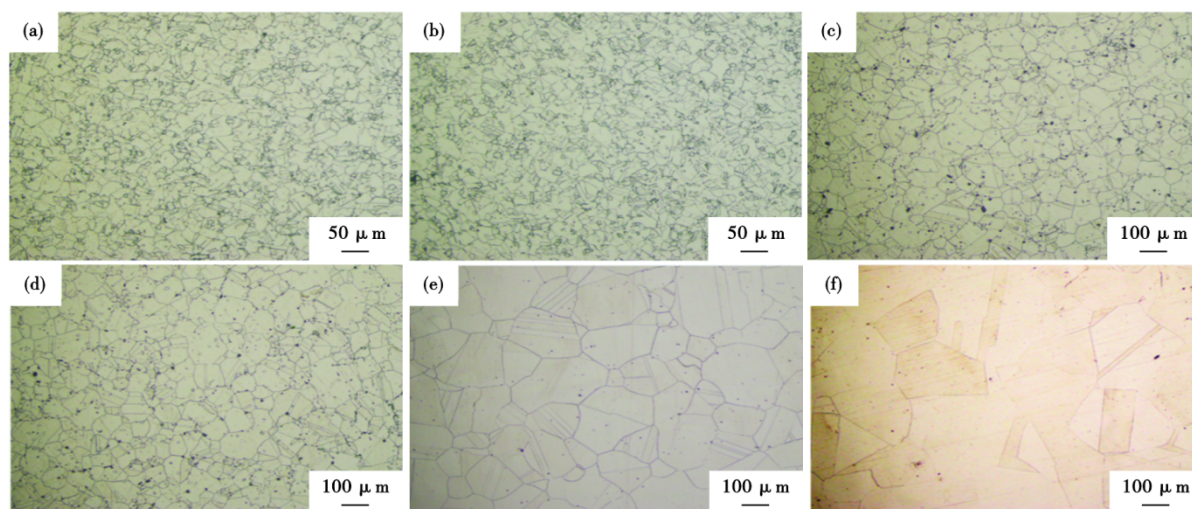


图3 不同温度固溶处理后Haynes230合金棒材显微组织:(a) 1 100 $^{\circ}\text{C}$, (b) 1 150 $^{\circ}\text{C}$, (c) 1 180 $^{\circ}\text{C}$, (d) 1 200 $^{\circ}\text{C}$, (e) 1 230 $^{\circ}\text{C}$, (f) 1 250 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 3 Microstructure of Haynes 230 alloy bars solution treated at different temperatures : (a) 1 100 $^{\circ}\text{C}$, (b) 1 150 $^{\circ}\text{C}$, (c) 1 180 $^{\circ}\text{C}$, (d) 1 200 $^{\circ}\text{C}$, (e) 1 230 $^{\circ}\text{C}$, and (f) 1 250 $^{\circ}\text{C}$

高到 1 180~1 200 °C,棒材晶粒尺寸增大,见图 3(e-d)。进一步升高固溶温度,晶粒显著粗化,1 250 °C 的最为粗大,如图 3(e-f)所示。采用定量金相统计分析晶粒尺寸,其与固溶温度关系如图 4 和图 5 所示,当固溶温度低于 1 150 °C 时,固溶后的晶粒尺寸由热轧态的 32 μm 缓慢增大到 49.4 μm;随着固溶温度升高到 1 180、1 200、1 230 °C,晶粒尺寸分别为 60、75.1、134 μm;固溶温度进一步提升至 1 250 °C,晶粒尺寸粗化到 212.4 μm。显而易见,棒材晶粒尺寸在 1 200~1 250 °C 发生明显增大。图 6 给出的碳化物分布结果显示,热轧棒材存在的 M₂₃C₆ 碳化物在 1 180~1 250 °C 均固溶于基体,但 M₆C 碳化物仅在 1 230~1 250 °C 发生较为明显的溶解。考虑到固溶处理过程中晶粒粗化的主要机制在于晶界迁移合并^[38],而 M₆C 碳化物中较高的 W 和 Mo 含量使其溶解温度显著提高,使得该类碳化物颗粒钉扎晶界迁移的作用保持到了更高温度,这是图 3 和图 4 晶粒尺寸演变规律的主要成因。

2.3 固溶态拉伸性能

固溶态 Haynes230 合金室温、750、900 °C 拉伸性能见表 2。随着固溶温度升高,合金棒材室温和

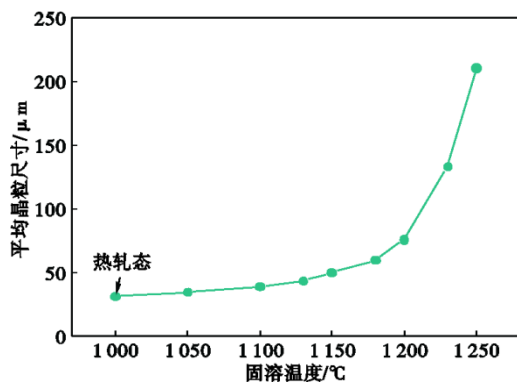


图 4 Haynes 230 棒材固溶温度与晶粒尺寸关系
Fig. 4 Relationship between solution temperature and grain size of Haynes 230 bar

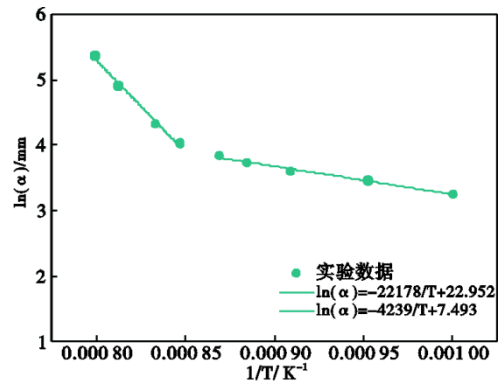


图 5 Haynes 230 棒材晶粒尺寸与固溶温度关系拟合曲线
Fig. 5 Fitting curves between solution temperature and grain size of Haynes 230 bar

750 °C 抗拉强度趋于下降,室温屈服强度在 324~341 MPa 间小幅变化,750 °C 屈服强度略有下降,两种温度下的伸长率均在 1 100~1 230 °C 固溶后保持稳定,而在 1 250 °C 固溶后减小。与上述两个测试温度不同的是,合金 900 °C 抗拉强度随着固溶温度升高而趋于增大,而屈服强度的变化不明显。同样,高温固溶使得合金 900 °C 拉伸塑性降低。

Haynes 230 合金为固溶强化型镍基合金^[39],强化机制包括固溶强化、细晶强化和析出强化。其中,固溶强化主要来自于 W 和 Mo,其次是 Cr 和 C;细晶强化与晶粒尺寸密切相关,图 2 和图 6 碳化物颗粒提供析出强化作用。随着固溶温度升高, M₆C 碳化物溶解量增加,产生的析出强化效果逐渐减小,由此推断, M₆C 碳化物对棒材拉伸性能的影响相对较小。

通常认为,金属材料屈服强度与晶粒尺寸的关系满足霍尔佩奇关系^[40],如式(1)。

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \tag{1}$$

式中, σ_y 为屈服强度,MPa; σ_0 为本征强度,MPa; K 为霍尔佩奇系数,MPa· $\mu\text{m}^{1/2}$; d 为晶粒尺寸, μm 。从表 2 数据可以看出, Haynes230 合金室温和 750 °C 屈服

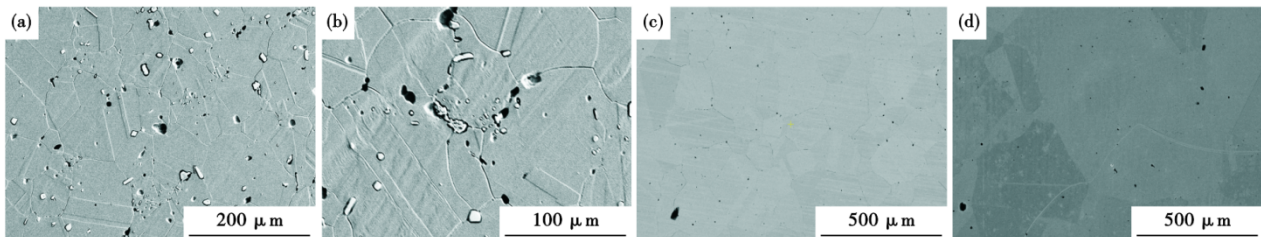


图 6 不同温度固溶处理后棒材中碳化物分布特征:(a) 1 180 °C, (b) 1 200 °C, (c) 1 230 °C, (d) 1 250 °C
Fig. 6 Distribution of carbide particles in bars solution treated at different temperatures : (a) 1 180 °C, (b) 1 200 °C, (c) 1 230 °C, (d) 1 250 °C

表 2 Haynes230 合金拉伸性能

Table 2 Tensile properties of solution-treated Haynes 230 alloy

拉伸温度/ $^{\circ}\text{C}$	固溶温度/ $^{\circ}\text{C}$	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$
室温	1 100	332	819	51.5
	1 150	333	813	52.5
	1 180	341	824	55.5
	1 200	333	813	56.0
	1 230	337	805	54.5
	1 250	324	756	47.0
750	1 100	228	510	95.5
	1 150	221	513	96.5
	1 180	237	518	81.5
	1 200	216	520	81.0
	1 230	229	525	80.5
	1 250	210	506	50.0
900	1 100	157	246	137.5
	1 150	161	250	118.5
	1 180	160	251	109.5
	1 200	157	259	96.5
	1 230	160	263	89.5
	1 250	161	270	84.5

强度随固溶温度增高而降低,尤其对于 1 250 $^{\circ}\text{C}$ 固溶后的试样表现较为明显,这与固溶处理过程中晶粒粗化而引起的晶粒尺寸明显增大相关。

表 2 中 900 $^{\circ}\text{C}$ 屈服强度随着固溶温度升高和晶粒尺寸增加而变化不明显,而抗拉强度则呈单调增加的趋于,这种变化规律与图 4 的晶界尺寸变化相反。由此推断,晶粒尺寸变化不是合金 900 $^{\circ}\text{C}$ 强度变化的主要因素。

高温固溶过程中, $M_6\text{C}$ 碳化物向基体溶解,使得奥氏体中固溶的 W 和 Mo 含量增加,而引起固溶强化效果增大,强化增量可以表示为式(2)^[41]。

参考文献

- [1] Katcher M, Klarstrom D L. A review of Haynes[®] 230 and Haynes 617 alloys for high temperature gas cooled reactors [C]. Proceedings of ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference, 2009: 425-430.
- [2] Čížek J, Kalivodová J, Janeček M, et al. Advanced structural materials for gas-cooled fast reactors—a review[J]. Metals, 2021, 11 (1): 76.
- [3] Bhiogade D S. Ultra supercritical thermal power plant material advancements: A review[J]. Journal of Alloys and Metallurgical Systems, 2023, 3: 100024.
- [4] Abe F. Stress to produce a minimum creep rate of 10-5%/h and stress to cause rupture at 105 h for ferritic and austenitic steels and superalloys[J]. International Journal of Pressure Vessels and Pip-

$$\Delta\tau = Gb\varepsilon^{3/2}\sqrt{c} \quad (2)$$

式中, $\Delta\tau$ 为强化增量,MPa; ε 为晶格畸变量; c 为元素浓度,at.%。由于合金中 $M_6\text{C}$ 碳化物高温溶解,W 和 Mo 引起的固溶强化作用,是高温抗拉强度增大的主要因素。

综合考虑从晶粒尺寸控制、室温和高温强度、拉伸塑性,推荐选用的 Haynes 230 合金热轧棒材固溶温度选用 1 200~1 230 $^{\circ}\text{C}$,在此温度范围内晶粒度介于 2.5~4 级。

3 结论

通过研究 Haynes 230 合金热轧棒材固溶处理过程中显微组织变化及其对拉伸性能的影响,获得的主要结论为:

(1) 热轧棒材具有细小等轴晶奥氏体晶粒,晶界和晶粒内分布着数量较多的 $M_6\text{C}$ 碳化物颗粒,晶界上还存在少量的 $M_{23}\text{C}_6$ 碳化物。

(2) 1 100~1 180 $^{\circ}\text{C}$ 固溶时,晶粒尺寸变化缓慢, $M_6\text{C}$ 碳化物未发生明显溶解,而 $M_{23}\text{C}_6$ 碳化物全部溶解在基体中。随着固溶温度升高到 1 200~1 250 $^{\circ}\text{C}$,晶粒明显粗化,且 $M_6\text{C}$ 碳化物数量趋于减少。

(3) 随着固溶温度增高,合金棒材室温和 750 $^{\circ}\text{C}$ 抗拉强度(R_m)和屈服强度($R_{p0.2}$)小幅降低,而 900 $^{\circ}\text{C}$ 抗拉强度(R_m)升高。室温和 750 $^{\circ}\text{C}$ 拉伸强度变化主要归结于固溶处理过程中晶粒粗化,使得晶界强化效果减小。高温拉伸变形过程中强度的变化,与 $M_6\text{C}$ 碳化物溶解引起的固溶强化效果增加相关。

(4) 综合显微组织和力学性能变化,提出 Haynes 230 合金热轧棒材固溶温度选用 1 200~1 230 $^{\circ}\text{C}$,相应的晶粒尺寸分布为 76~142 μm 。

ing, 2008, 85(1-2): 99-107.

- [5] Luo R, Liu Q T, Gao P, et al. Effect of microstructural evolution and mechanical properties of Haynes 230 superalloy during long-term aging at 700 $^{\circ}\text{C}$ [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 947: 169495.
- [6] Mahaffey J, Adam D, Brittan A, et al. Corrosion of alloy Haynes 230 in high temperature supercritical carbon dioxide with oxygen impurity additions [J]. Oxidation of Metals, 2016, 86 (5) : 567-580.
- [7] Firouzidor V, Sridharan K, Cao G, et al. Corrosion of a stainless steel and nickel-based alloys in high temperature supercritical carbon dioxide environment [J]. Corrosion Science, 2013, 69: 281-291.

- [8] 邢娜, 黄宝, 何立波. 超临界超超临界锅炉管品种的开发现状[J]. 特殊钢, 2016, 37(1): 17-21.
- [9] Gui Y, Liang Z Y, Zhao Q X. Corrosion and carburization behavior of heat-resistant steels in a high-temperature supercritical carbon dioxide environment[J]. Oxidation of Metals, 2019, 92(1): 123-136.
- [10] Yu W H, Singh D, France D M. Investigation of corrosion of 304 stainless, inconel 625, and Haynes 230 in a chloride-salt-based thermal storage medium[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(12): 7379-7389.
- [11] Adam B M, Tucker J D, Tewksbury G. Comparative study of the hot processing behavior in advanced Ni-based superalloys for use in A-USC applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 818: 152907.
- [12] 张冬旭, 温志勋, 岳珠峰. GH3230 高温合金热变形行为及本构模型研究[J]. 稀有金属, 2014, 38(6): 986-992.
- [13] 欧新哲, 马天军. GH3230 合金高温热变形行为及微观组织变化[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(4): 93-100.
- [14] 曹玉如, 史占奎, 操贻高. GH3230 高温合金环件的锻造工艺与热处理工艺研究[J]. 锻造与冲压, 2023(11): 48-52.
- [15] 刘毅, 许昆, 罗锡明, 等. Haynes 230 合金热变形组织演化规律研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(9): 1820-1825.
- [16] 高佩. Haynes 230 镍基合金的变形行为及组织性能变化规律研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [17] 金丹, 龙浩跃, 韩高枫, 等. Haynes230 镍基合金的高温拉伸变形行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(8): 3013-3017.
- [18] Pataky G J, Sehitoglu H, Maier H J. Creep deformation and mechanisms in Haynes 230 at 800 °C and 900 °C[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 443(1-3): 484-490.
- [19] Rozman K A, Carl M A, Kapoor M, et al. Creep performance of transient liquid phase bonded Haynes 230 alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 768: 138477.
- [20] Ahmed R, Barrett P R, Hassan T. Unified viscoplasticity modeling for isothermal low-cycle fatigue and fatigue-creep stress-strain responses of Haynes 230[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 88-89: 131-145.
- [21] Ewest D, Almroth P, Sjödin B, et al. Isothermal and thermomechanical fatigue crack propagation in both virgin and thermally aged Haynes 230[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 120: 96-106.
- [22] Barrett P R, Ahmed R, Menon M, et al. Isothermal low-cycle fatigue and fatigue-creep of Haynes 230[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 88-89: 146-164.
- [23] D'Souza B, Zhuo W Q, Yang Q F, et al. Impurity driven corrosion behavior of HAYNES® 230® alloy in molten chloride salt[J]. Corrosion Science, 2021, 187: 109483.
- [24] Jang C, Kim D, Kim D, et al. Oxidation behaviors of wrought nickel-based superalloys in various high temperature environments[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(7): 1524-1531.
- [25] 林玄侃, 叶宗洸, 王美雅. 高熵合金与核能结构材料在超临界水环境下的腐蚀行为研究[J]. 防蚀工程, 2017, 31(2): 1-9.
- [26] Veverkova J, Strang A, Marchant G R, et al. High temperature microstructural degradation of Haynes alloy 230[C]. Superalloys 2008 (Eleventh International Symposium). 2008: 479-488.
- [27] 张冬旭, 刘大顺, 朱西平, 等. GH3230 高温合金氩弧焊接接头的组织与高温性能[J]. 机械工程材料, 2013, 37(12): 35-37+41.
- [28] 张勇路, 鞠泉, 胡曼, 等. GH3230 合金的焊后热处理[J]. 金属热处理, 2021, 46(6): 116-119.
- [29] 张志强, 滕俊飞, 杨文静, 等. GH3230 合金 TLP 扩散焊工艺试验[J]. 焊接, 2022(6): 42-48+64.
- [30] Wu Z H, Yarasi S R, Seo J, et al. Study of the printability, microstructures, and mechanical performances of laser powder bed fusion built Haynes 230[J]. Metals, 2022, 12(8): 1380.
- [31] 彭聪辉, 常辉, 胡锐, 等. Haynes230 高温合金的静态再结晶动力学[J]. 航空材料学报, 2011, 31(2): 8-12.
- [32] 苏晓帆, 李金山, 胡锐, 等. 固溶处理对热变形 Haynes230 奥氏体晶粒长大的影响[J]. 铸造技术, 2011, 32(2): 193-195.
- [33] 杜星霖, 鞠泉, 马惠萍, 等. GH3230 合金 $M_{23}C_6$ 型碳化物的析出行为[J]. 金属热处理, 2021, 46(2): 50-54.
- [34] 周岚, 高佩, 陈婷, 等. Haynes 230 镍基合金无缝管的组织及性能[J]. 金属热处理, 2019, 44(2): 54-58.
- [35] Gao S, He X K, Tang Z X, et al. Precipitation behavior and mechanical property evolution in a solid solution strengthened Ni-Cr-W superalloy during short-term aging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 981: 173678.
- [36] Tang Z W, Li J S, Hu R, et al. Effects of solution heat treatment on carbide of Ni-Cr-W superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(7): 1157-1161.
- [37] Lee H J, Kim H, Kim D, et al. Microstructure evolution of a Ni-Cr-W superalloy during long-term aging at high temperatures[J]. Materials Characterization, 2015, 106: 283-291.
- [38] Charpagne M A, Franchet J M, Bozzolo N. Overgrown grains appearing during sub-solvus heat treatment in a polycrystalline γ - γ' Nickel-based superalloy[J]. Materials & Design, 2018, 144: 353-360.
- [39] 张志伟, 牛永吉, 田建军, 等. Haynes230 高温合金研究现状[J]. 金属材料研究, 2019, 45(2): 1-3.
- [40] 李晴. 固溶温度对 GH4163 合金显微组织及拉伸性能的影响[J]. 特殊钢, DOI: 10.20057/j.1003-8620.2023-00213.
- [41] 潘金生, 仝健民, 田民波. 材料科学基础[M]. 修订版. 北京: 清华大学出版社, 2011.