

时效处理对2205双相不锈钢组织及性能的影响

李剑颖, 王徐皇, 吴文强

印尼青山广青镍业有限公司技术中心 印度尼西亚苏拉维西 94974

摘要: σ 相是一种会导致2205双相不锈钢力学性能恶化的析出相,不同的时效处理制度决定了它的析出量。研究了不同温度、时间的时效处理对2205双相不锈钢中 σ 相的析出行为和性能的影响,分析了 σ 相含量与材料延伸性能及硬度的关系,并对实际生产中的卷曲温度及冷却方法做出了建议。在时效处理过程中, σ 相先于 δ/γ 界面处析出,后不断长大形成珊瑚状亮白色相; σ 相的析出规律符合等温转变曲线(TTT曲线)趋势。随着 σ 相析出量的增加,材料的抗拉强度、硬度增高,但伸长率降低,塑性恶化。建议实际生产中卷曲温度控制在800℃以下并快速冷却。

关键词: 双相不锈钢; σ 相; 时效处理; 力学性能

Effect of aging treatment on microstructure and mechanical properties of 2205 duplex stainless steel

LI Jianying, WANG Xuhuang, WU Wenqiang

Technology Centre of PT Indonesia Guang Ching Nickel and Stainless Steel Industry "GCNS", Sulawesi Tengah 94974, Indonesia

Abstract: Sigma phase (σ) is harmful to the mechanical properties of 2205 duplex stainless steel, and its precipitation amount is mainly determined by aging treatment parameters. This article investigates the effect of aging treatment at different temperatures and different periods on 2205 duplex stainless steel. The precipitation behavior of sigma phase and its influence on mechanical properties were analyzed. The relationship between sigma phase content, material elongation and hardness, and recommendations for coiling temperature and cooling method in actual production were made. The results show that sigma phase precipitated at the δ/γ interface during the initial aging process, followed by continuous growth to form coral-like bright white phases. The sigma precipitation pattern of the phase conforms to the trend of isothermal transformation curve (TTT curve). Along with the increasing amount of sigma phase precipitation, which enhanced the tensile strength and hardness of the material, the elongation decreases and plasticity deteriorates. It is recommended to control the coiling temperature below 800 °C and cool it quickly in actual production.

Keywords: duplex stainless steel; sigma phase; aging treatment; mechanical property

第一作者: 李剑颖, 主要研究方向为不锈钢生产工艺技术, E-mail: Jane_Lee2024@163.com。

通信作者: 王徐皇, 学士, 主要研究方向为不锈钢与普碳钢生产工艺技术, E-mail: wxuh2008@163.com。

1 序言

双相不锈钢由铁素体相和奥氏体相组成，其中较少相占比为30%以上^[1]。特殊的双相组织使其综合了铁素体不锈钢优异的耐点蚀性能和奥氏体不锈钢良好的加工性能，在强度、韧性、焊接性及耐蚀性等方面表现出色，在石油、化工及桥梁等领域得到了广泛的应用^[2-4]。

2205双相不锈钢为标准型双相不锈钢的代表钢种，其合金含量较高，辅以氮元素的引入，具有良好的耐蚀性，可胜任绝大部分的服役环境^[5, 6]。但正由于其Cr、Mo和N等元素含量较高，所以热稳定性较差^[7]，在300~1000℃下，钢中易产生Cr₂N、M₂₃C₆、γ_{II}相、σ相^[8, 9]、x相^[10]等析出相^[11]，对性能产生不利影响。缪乐德等^[12]提到，σ相和x相等金属间相具有高硬度和脆性，在合金中形成时会导致合金脆化，显著降低钢的塑性、韧性以及耐蚀性。吕迎玺^[13]指出，随着σ相的析出，不锈钢表面难以形成稳定的钝化膜，耐蚀性明显下降。x相拥有BCC结构，一般可在750~920℃析出，易在晶界处形成腐蚀敏感区域，造成钢件耐蚀性下降；在450~800℃的敏化温度区间内，氮和铬原子能够扩散并结合形成Cr₂N颗粒，该相的存在会削弱不锈钢的耐蚀性和韧性^[14-16]。

在各析出相中，σ相是危害性最大的一种，经大量学者研究发现^[17-21]，它硬而脆，无磁性，具有四方晶体结构，通常在600~950℃间由铁素体相转

变而来，可显著降低钢材的塑性和韧性^[18-24]。

在实际生产过程中，在钢带卷曲段，双相不锈钢会因析出σ相而发生脆断，影响成卷。因此，研究时效处理制度对双相不锈钢中σ相的析出规律和力学性能的影响至关重要。

已有文献中对2205双相不锈钢在不同温度范围内的时效处理制度及其对材料组织和性能的影响进行了广泛的研究。然而，大多数研究仅限于特定温度区间的影响分析，缺乏对σ相在更广泛温度范围内，尤其是在接近鼻尖温度的条件下，其析出规律及对材料综合性能影响的系统研究。此外，当前的研究较少关注实际生产中的工艺参数优化，尤其是在控制卷曲温度和冷却方法方面的指导性建议不足。

本文以850℃为研究锚点，并结合实际生产线的最低可控卷曲温度和理论计算中σ相的最大析出温度，系统分析不同时效处理制度对2205双相不锈钢组织和性能的影响，特别是相含量与材料延伸性能及硬度之间的关系。本文不仅填补了上述研究中的空白，还对实际生产工艺中的卷曲温度控制和冷却方法优化提供了有针对性的建议，具有重要的理论和实践意义。

2 试验与方法

2.1 试样制备

试验采用4.0mm厚2205双相不锈钢板材，经过1050℃固溶处理，其化学成分见表1。

表1 2205双相不锈钢化学成分（质量分数）

(%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.020	0.50	1.37	0.028	0.001	22.56	5.16	3.07	0.15

参照表1成分绘制热力学平衡图，如图1所示。从图1可以发现，在600~960℃内，有σ相析出，最大析出量达25.0%以上；708~828℃内有x相析出；低温时效时有少量碳化物及氮化物析出。

在相同成分条件下，设定不同的σ析出相质量百分比（0.5%~10.0%），绘制等温转变图（TTT曲线），结果如图2所示。分析发现，各曲线鼻尖温度（σ相析出最快的温度）均处于880℃左右，该温度下时效处理49.28min后即可析出10.0%的σ相。因此，本文以850℃为研究锚点，开展了一系列时效试

验。试样制备方式如下。

在工业板中间部位分别取尺寸为240mm×25mm的片状拉伸试样（试样尺寸见图3）、25mm×25mm的金相试样和30mm×30mm的硬度试样各11件，试样各留一件为空白对照组，对其余试样进行以下两组试验。

一组探究不同时效时间对2205双相不锈钢σ相析出量及力学性能的影响：将试样置于SXL-1216程控箱式电炉中，在850℃下对试样进行时效处理，分别保温10min、30min、60min及120min后水淬冷却至

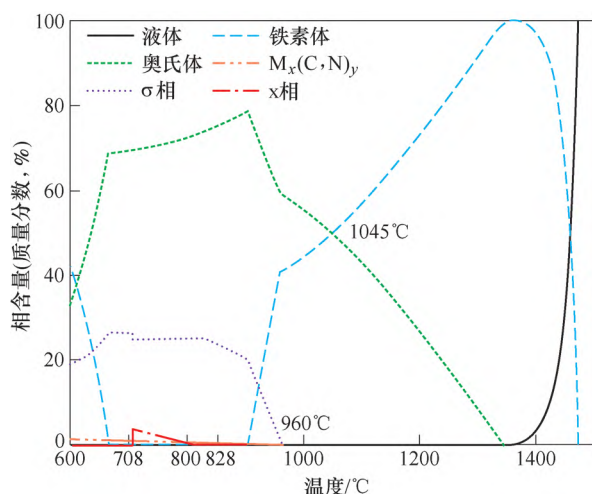


图1 2205双相不锈钢热力学平衡图

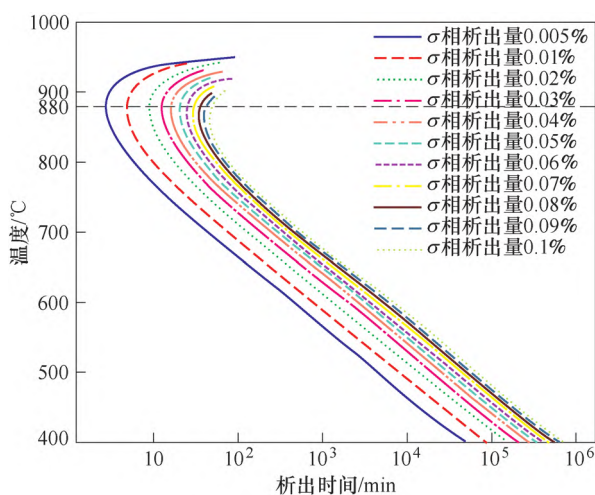


图2 2205不锈钢中 σ 相析出的等温转变曲线

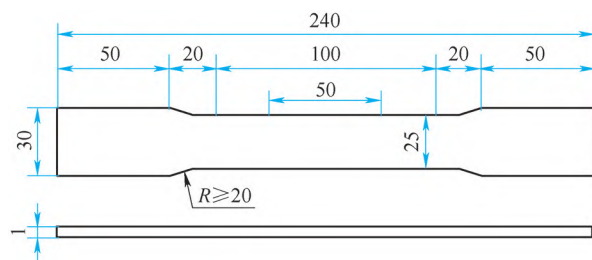


图3 拉伸试样尺寸

室温。

另一组探究不同时效温度对2205双相不锈钢 σ 相析出量及力学性能的影响：分别在650℃、700℃、750℃、800℃、900℃及950℃条件下使用箱式电炉对试样进行时效处理，保温30min后水淬冷却至室温（850℃下保温30min试样前组已做）。

2.2 试验方法

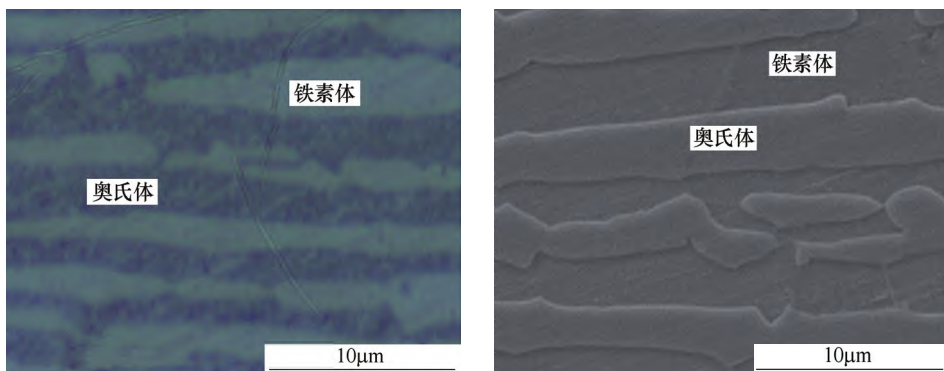
将各试样表面依次用80#、240#、1200#和3000#金相砂纸打磨抛光，常温下使用腐蚀试剂（偏重亚硫酸钠 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 固体1.0g、37%HCl溶液10.0mL及蒸馏水50.0mL）对试样进行10s腐蚀。采用蔡司ZEISS AxioLab.A1光学显微镜观察不同热处理状态下的显微组织， σ 相面积占比采用金相显微镜系统自带的Pro-imaging金相分析软件测定。使用蔡司ZEISS EVO18扫描电子显微镜（SEM）对试样表面进行高分辨观察，区别不同的析出相，并配合能谱仪（EDS）对不同析出相进行化学成分分析，确定各相种类。根据GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》规定，使用WAW-300微机控制电液伺服万能试验机对试样进行室温拉伸试验，拉伸速率为30mm/min。根据GB/T 230.1—2018《金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法》规定，使用耐博THBRV-187.5D数显布洛维硬度计检测各试样的洛氏硬度，压头采用 $\phi 1.588\text{mm}$ 钢球，加载载荷为980N，载荷时间5s。在每个试样上均匀选取10个尺寸为20mm×20mm的正方形区域，使用Fischer公司生产的FERITSCOPE磁性相测量仪测量每个正方形4个角的铁素体含量，将所得的40个检测值取算术平均值，作为该试样的铁素体含量。

3 结果与讨论

3.1 显微组织分析

图4所示为未经过时效处理的2205不锈钢组织形貌。由图4可见，存在亮暗分明的两相组织——铁素体（ δ 相）和奥氏体（ γ 相），晶粒延轧制方向呈竹节状或岛状伸长；两相界面清晰、平滑，无析出相；经定量分析，此时两相比比例约为1:1。

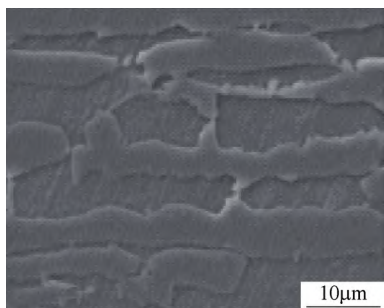
在850℃下分别经过10min、30min、60min及120min时效处理的试样其显微组织如图5所示。由图5可以发现，随着时效处理时间的延长， σ 相（亮白色组织）含量逐渐增加，由处理10min后的1.39%增加到处理120min后的22.46%。由于 δ/γ 界面处Cr、Mo元素偏聚且相界能量较高， σ 相首先于两相界面呈点状不均匀析出，相界变得不平滑；随着时间的推移， σ 相尺寸逐渐变大而形成块状亮白色组织，并缓慢向铁素体内部延伸，同时铁素体内部有点状 σ 相析出；最终在原本的 δ/γ 界面上形成连续的珊瑚状 σ



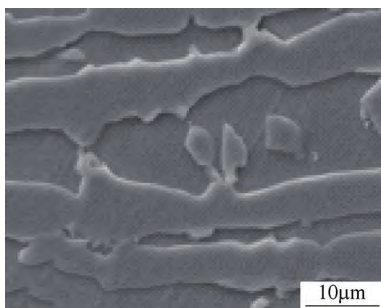
a) 光学金相显微镜下的显微组织

b) 扫描电镜下的显微组织

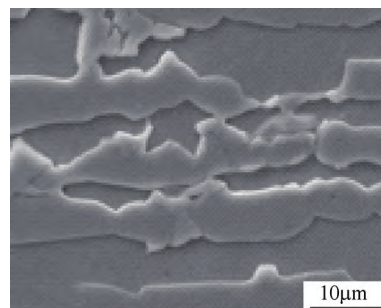
图4 经1050℃固溶处理后的2205双相不锈钢显微组织



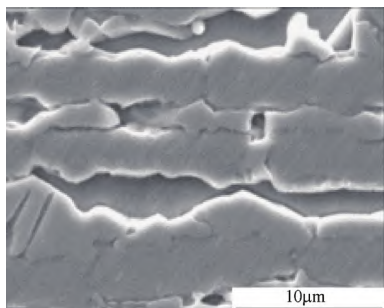
a) 扫描电镜下的显微组织 (10min)



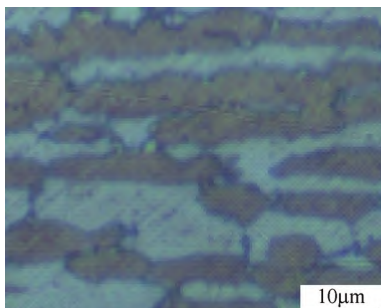
b) 扫描电镜下的显微组织 (30min)



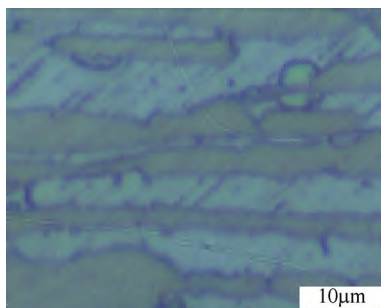
c) 扫描电镜下的显微组织 (60min)



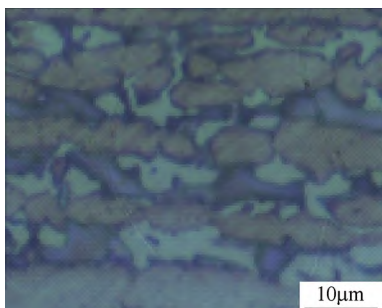
d) 扫描电镜下的显微组织 (120min)



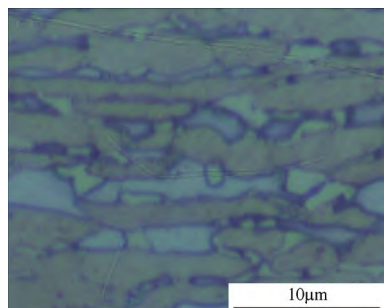
e) 光学金相显微镜下的显微组织 (10min)



f) 光学金相显微镜下的显微组织 (30min)



g) 光学金相显微镜下的显微组织 (60min)



h) 光学金相显微镜下的显微组织 (120min)

图5 在850℃下分别进行不同时效处理的2205双相不锈钢显微组织

相，其间可见少量二次奥氏体相，在铁素体心部析出块状 σ 相。在此过程中，可以发现铁素体被逐渐消

耗，铁素体含量与 σ 相比比例变化趋势如图6所示，可知 σ 相由铁素体分解得到，并伴有二次奥氏体析出。

使用SEM对850℃下时效处理120min的试样进行高分辨观察,电子显微组织如图7所示。使用EDS对各相成分进行分析,结果见表2。

分析发现,铁素体(谱图5)中Cr含量较高、Ni含量较低。同时,由于 σ 相的析出会稀释铁素体中的Mo含量,所以铁素体Mo含量较低;奥氏体(谱

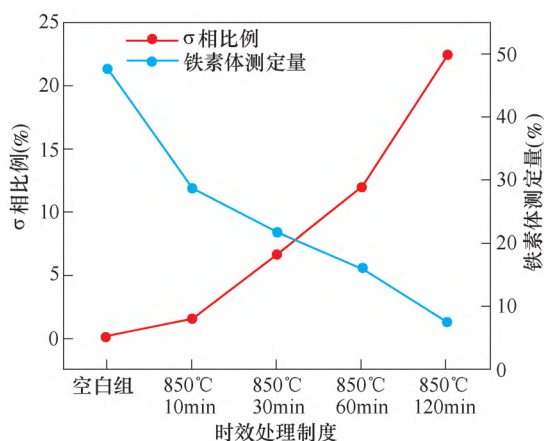


图6 850℃时效处理后2205双相不锈钢中 σ 相与铁素体含量比例变化趋势

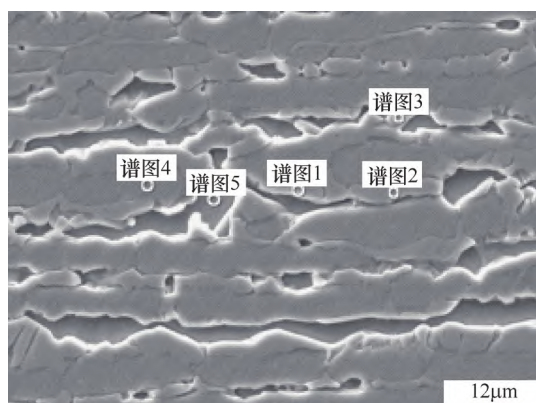


图7 850℃时效处理120min后的2205双相不锈钢电子显微组织

表2 850℃时效处理120min后试样各相化学成分分析
(质量分数) (%)

检测试样	谱图1	谱图2	谱图3	谱图4	谱图5
O	—	—	—	1.19	—
Si	0.92	0.86	0.89	0.56	0.61
Cr	29.62	30.12	29.94	21.08	24.03
Mn	1.48	1.39	1.53	1.57	1.1
Fe	57.36	57.92	59.18	66.54	70.27
Ni	3.03	2.86	2.51	6.28	2.3
Mo	7.58	6.84	5.96	2.77	1.69
总量	100	100	100	100	100

图4) Ni含量较高, Mo含量较低;而 σ 相(谱图1、谱图2和谱图3)的Cr、Mo含量都远高于铁素体和奥氏体,分别达到了29.5%及5.5%以上。

分别在650℃、700℃、750℃、800℃、850℃、900℃及950℃下进行30min时效处理的试样显微组织如图8所示。从图8可发现,当时效处理温度<750℃时,试样显微组织整体较未经时效处理的试样没有明显变化,但 δ/γ 相界颜色变深,相界更加清晰,推测此时已有极少量的 σ 相析出,但由于图像分析软件精度问题未检出,故记 σ 相含量为0。随着温度逐渐升高, σ 相快速析出,先于相界处形核,后迅速长大,850℃时效处理30min的试样中可见原始两相组织间有诸多团状、块状亮白色组织析出,此时 σ 相含量达6.57%。随着时效处理温度的继续升高, σ 相的含量逐渐减少,该规律符合奥氏体等温转变图(TTT曲线)趋势;与此同时,由于高温下元素扩散动力足,晶体形核-长大效率高,所以 σ 相的晶粒较低温下大。

3.2 σ 相含量对力学性能的影响

图9~图11所示为经不同时效制度处理后试样的硬度及拉伸性能与 σ 相比例的关系。由图9~图11可见,随着 σ 相比例的升高,试样的抗拉强度和硬度明显提高,但伸长率显著降低。在850℃下时效处理120min的试样抗拉强度为904MPa,较处理10min的试样强度(806MPa)提高了近100MPa,说明 σ 相的析出急剧促进了材料的强化。在时效处理过程中,随着硬而脆的 σ 相析出,其在材料拉伸过程中在晶界处产生了“塞积”,阻碍了位错运动,使材料变形抗力与硬度明显提高,同时伸长率(即塑性)明显降低。与此同时,硬而脆的 σ 相使得试样伸长率由处理10min后的27.5%急剧降低至1.94%,性能恶化明显。低温时效处理后的试样数据有一些波动,推测原因是时效处理过程中有其他会影响材料力学性能的相析出,具体机制有待研究。

试样在850℃下进行时效处理时,经过30min,材料的伸长率即恶化到15.0%以下;经过120min,伸长率更是降低到1.94%。在实际生产过程中,卷曲段要求不锈钢钢材的伸长率 $\geq 10.0\%$ 。根据试验结果,建议卷曲温度控制在800℃以下,同时提高降温速率,使时效处理时间尽量短,以避免因 σ 相析出造成钢材脆断而影响成卷。

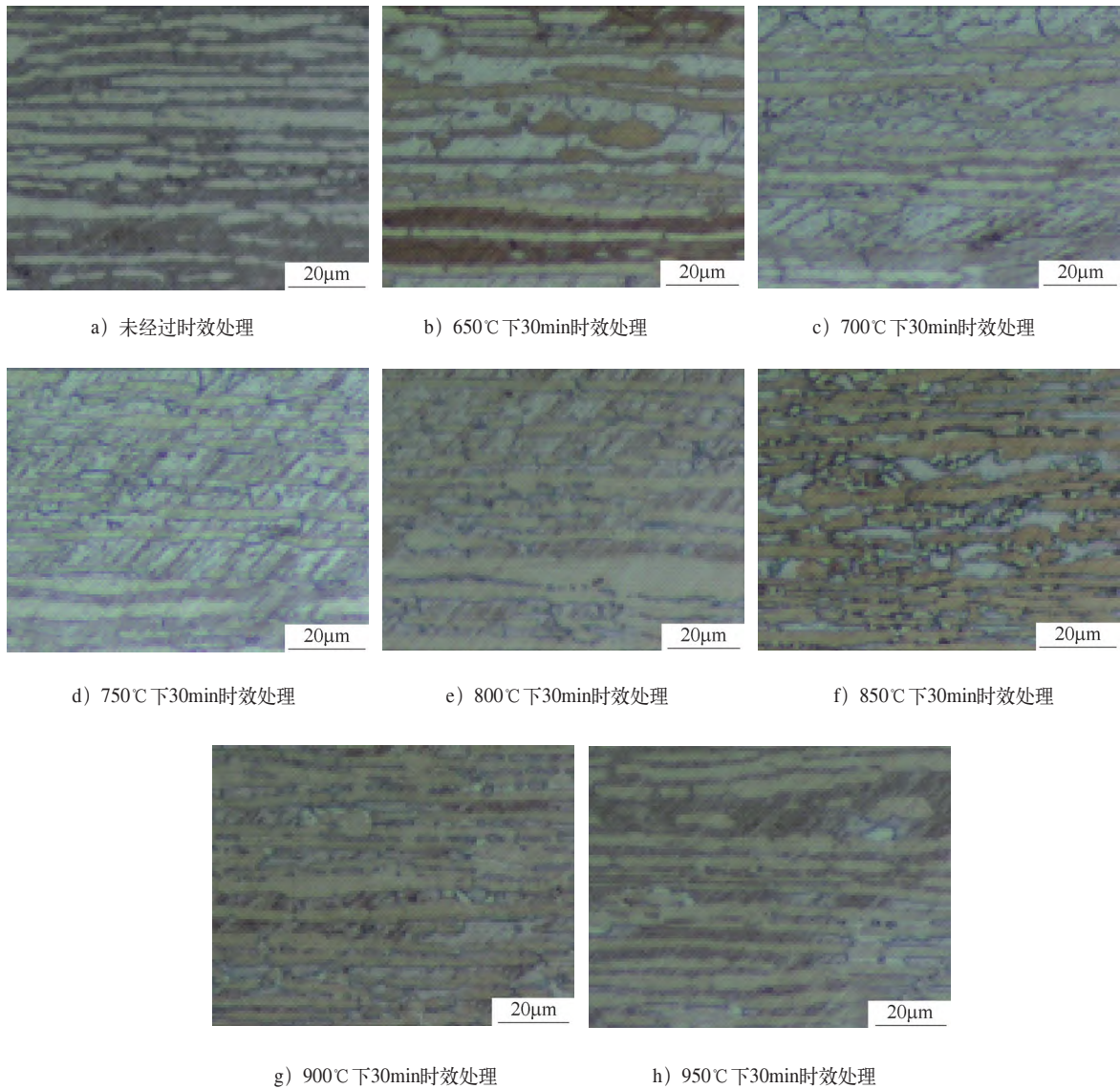


图8 2205双相不锈钢显微组织

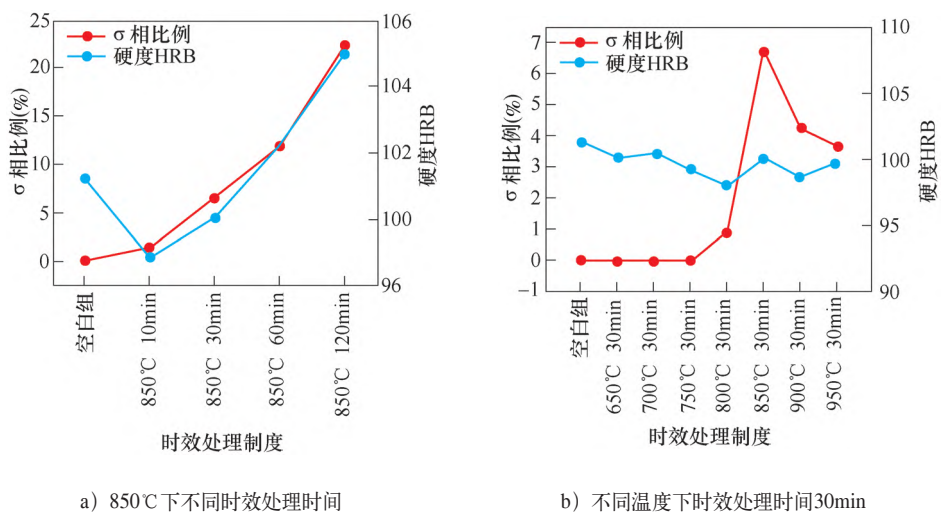


图9 不同时效处理制度下σ相比例与硬度的关系

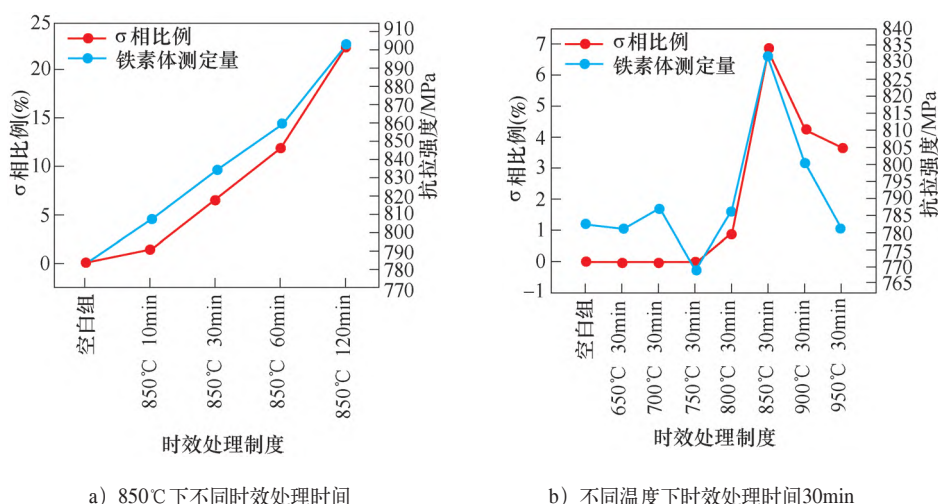


图10 不同时效处理制度下 σ 相比例与材料抗拉强度的关系

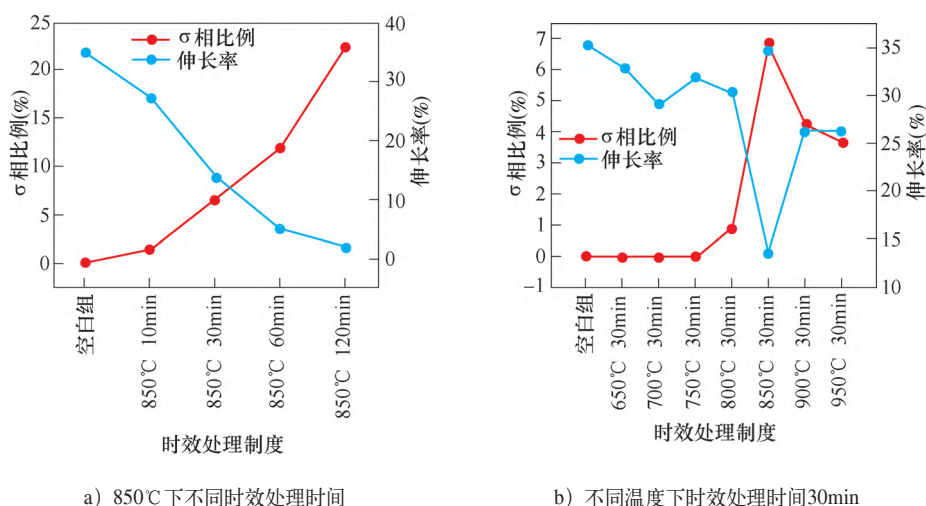


图11 不同时效处理制度下 σ 相比例与伸长率的关系

4 结束语

1) 在时效处理过程中, σ 相先于 δ/γ 界面呈点状不均匀析出, 后逐渐长大成块状, 与此同时, 铁素体心部有点状 σ 相析出。随着时间的推移, σ 相缓慢长大、相连, 形成珊瑚状亮白色相。在此过程中, 铁素体相被析出的 σ 相和二次奥氏体相不断吞噬。

2) 在850°C下接受时效处理的试样中, 随着时效时间的延长, σ 相含量由处理10min后的1.39%逐步增加至处理120min后的22.56%, 析出效率较快。而在不同温度下进行30min时效处理的试样中, σ 相的析出量随着温度的升高先增加后减少, 在850°C时达到最大值。 σ 相析出量规律与奥氏体等温转变图预测趋势相符。

3) 随着 σ 相析出量的增加, 材料的抗拉强度急

剧升高, 硬度增强, 但伸长率急剧降低, 塑性发生明显恶化。实际生产中, 为了保证钢材顺利卷曲, 需将卷曲温度控制在800°C以下并加快冷却速度。

参考文献:

- [1] 晁代义, 徐仁根, 孙有政, 等. 850°C时效处理对2205双相不锈钢组织与力学性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33 (Z1): 369-372.
- [2] 吴玖, 等. 双相不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [3] 高娃, 罗建民, 杨建君. 双相不锈钢的研究进展及其应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2005 (3): 61-64.
- [4] 孙祺, 王剑, 何燕, 等. 时效时间对2205双相不锈钢中第二相析出行为的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41 (2): 63-67.

- [5] CAI R, WANG W J, ZHAO N, et al. Corrosion resistance of Cr_2O_3 coating formed by in-situ oxidation on 2205 duplex stainless steel in different pH solutions[J]. Rare Metals, 2023, 42 (7) : 2189-2196.
- [6] LEI X, YANG T Y, CHEN W Q, et al. Corrosion behavior of stainless steel structural parts for nuclear power plant pool cladding in boric acid solution containing SO_4^{2-} and Cl^- [J]. Materials For Mechanical Engineering, 47 (7) : 31-36.
- [7] 刘复兴. S32205双相不锈钢中 σ 相的析出及其对力学性能的影响[J]. 钢铁, 2010 (7) : 62-65, 93.
- [8] POHL M, STORZ O, GLOGOWSKI T. Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel[J]. Materials Characterization, 2007, 58 (1) : 65-71.
- [9] FAN K, LIU F, MA Y Z, et al. Modeling of σ -phase precipitation in a 2205 duplex stainless steel using an analytical soft impingement treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527 (18-19) : 4550-4553.
- [10] DUBIEL S M, CIEŚLAK J. Sigma-phase in Fe-Cr and Fe-V alloy systems and its physical properties[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2011, 36 (4) : 191-208.
- [11] DEVENDRANATH R K, SINGH A, RAGHUVANSHI S, et al. Metallurgical and mechanical characterization of dissimilar welds of austenitic stainless steel and super-duplex stainless steel – A comparative study[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 19: 212-232.
- [12] 缪乐德, 张毅, 邬君飞. 不同热处理状态下2205双相不锈钢中析出相变化的讨论[J]. 冶金分析, 2011 (4) : 1-8.
- [13] 吕迎玺. σ 相对2205双相不锈钢选择性腐蚀影响的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017 (6) : 609-614.
- [14] 陈嘉砚, 杨卓越, 杨武, 等. 双相不锈钢中 σ 相的形成特点及其对性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2006 (8) : 1-4.
- [15] HAN Y, CHI R, CHEN Q, et al. Microstructural evolution and coarsening behavior of the precipitates in 2205 duplex stainless steel aged at 850℃ [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 2560-2574.
- [16] ASSUMPÇÃO R, CAMPIDELI V, MONTEIRO J, et al. Influence of aging time at 850℃ on microstructure and corrosion resistance of a cold rolled 2205 duplex stainless steel[J]. Materials Science, Engineering, 2023, 68: 681-688.
- [17] 刘燕, 高仁强, 陈兴润, 等. 2205双相不锈钢中 σ 相析出的影响因素分析[J]. 金属热处理, 2021, 46 (3) : 180-183.
- [18] 高晓丹, 任学平, 李晶琨, 等. 时效工艺对2205双相不锈钢 σ 相析出行为的影响[J]. 金属热处理, 2020, 46 (10) : 1-5.
- [19] 石树坤, 赵晨光, 陶宏伟, 等. 时效时间对2205钢显微组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (4) : 242-244.
- [20] 赵锦, 颜海涛, 杨春龙, 等. 短时效处理对2205双相不锈钢显微组织和耐腐蚀性能的影响[J]. 机械工程材料, 44 (7) : 84-87.
- [21] 袁傲明, 李晶琨, 高晓丹, 等. 冷轧与时效工艺对2205双相不锈钢 σ 相析出的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46 (10) : 26-30.
- [22] 吴天海, 刘春明, 姜周华, 等. 时效处理对2205DSS组织及力学性能的影响[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2016, 37 (9) : 1317.
- [23] 安朋亮, 宋菲, 梁平, 等. 时效时间对2205双相不锈钢抗氢氟酸腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017 (4) : 421-425.
- [24] 黄澳, 陈吉, 宋见, 等. 时效时间对2205双相不锈钢组织与疲劳裂纹扩展规律的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41 (10) : 167-171.

MW 20241115