

退火温度对 00Cr12TiNb 不锈钢组织和性能的影响

刘洪军, 刘兆彬, 李亚敏

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要:对 60% 锻造形变量的 00Cr12TiNb 铁素体不锈钢进行再结晶退火处理, 采用金相显微镜、扫描电镜和力学性能测试研究了退火温度对 00Cr12TiNb 铁素体不锈钢组织和性能的影响。结果表明: 00Cr12TiNb 铁素体不锈钢在 920 °C 以下退火处理时主要发生组织的回复和小部分晶粒的再结晶, 其屈服强度和硬度随退火温度的上升而下降; 在 920 °C 以上退火处理时发生再结晶, 其屈服强度随退火温度的上升有所增加, 硬度则趋于稳定; 退火过程中, 在晶内和晶界弥散析出了颗粒状 NbTi(C, N); 950 °C 退火时再结晶组织和性能达到最佳。

关键词: 00Cr12TiNb 不锈钢; 退火温度; 组织; 性能

中图分类号: TG156.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2011)14-0160-04

Effect of Anneal Temperature on Microstructure and Properties of 00Cr12TiNb Stainless Steel

LIU Hongjun, LIU Zhaobin, LI Yamin

(State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The influences of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of 00Cr12TiNb ferritic stainless steel with 60% deformation were studied by OM, SEM and mechanical testing equipments. The results show that, under the annealing temperature 920 °C, the dynamic recovery and recrystallization of partial grains primarily occur, the yield strength and hardness decreases with the increase of temperature; above the annealing temperature 920 °C, the recrystallization occurs, and with the increase of temperature, the yield strength increases but the hardness is almost constant. The NbTi (C, N) particles are precipitated in ferrite grains and at boundaries during annealing process. The recrystallized microstructure and mechanical properties are optimal when the annealing temperature is 950 °C.

Key words: 00Cr12TiNb ferritic stainless steel; annealing temperature; microstructure; mechanical properties

00Cr12TiNb 不锈钢是典型的超低碳氮铁素体不锈钢, 被广泛应用于汽车排气系统和厨具等领域^[1-6], 工业应用要求该钢种具有良好的成形性能和耐腐蚀性能。一般认为改善铁素体不锈钢的深冲性能主要是降低间隙元素(C, N)的含量, 改善晶体取向, 发展织构组织^[7-9]。降低间隙元素(C, N)含量可采用 Nb、Ti 双稳定化, 发展织构组织则取决于合适的冷轧和退火工艺, 而退火温度是影响晶粒尺寸分布和不同尺寸晶粒织构特征的最主要因素, 在不同的退火温度下, 晶粒尺寸分布和织构类型区别较大^[9]。因此, 研究退火温度对 00Cr12TiNb 铁素体不锈钢组织和性

能的影响有着重要意义。本文以 00Cr12TiNb 铁素体不锈钢为研究对象, 采用金相显微镜、扫描电镜和力学性能测试来研究退火过程中 00Cr12TiNb 铁素体不锈钢组织和性能的变化, 旨在为实际生产中工艺参数的优化提供参考。

1 实验方法

实验原料为手工电弧炉熔炼的铸锭, 其主要成分(质量分数, %)为: 0.01C, 0.41Si, 0.25Mn, 0.027P, 0.005S, 11.32Cr, 0.50Nb, 0.25Ti, 0.009N, Fe 余量。铸锭在室温条件下锻造开坯, 始锻温度 1050 °C, 终锻温度 890 °C, 锻造变形量 60%。之后将钢板切成 15 mm × 10 mm × 8 mm 的试样, 采用 SX2-2.5-12 箱式电阻炉进行退火处理。为了观察再结晶后晶粒生长过程, 退火工艺为: 不同温度(860、890、920、950 和 980 °C)

收稿日期: 2010-11-23

作者简介: 刘洪军(1974-), 男, 河北景县人, 副教授, 博士, 主要从事材料成型方面的研究; 电话: 0931-2976572;

E-mail: liuhongjung@163.com

保温 3 min, 空冷。

试样退火后, 经不同型号砂纸水磨后机械抛光, 用 $\text{FeCl}_3(\text{FeCl}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=5\text{g}:50\text{mL}:100\text{mL})$ 溶液腐蚀, 腐蚀时间 3~10 s。采用 MeF-3 光学显微镜观察金相组织, 采用 JSM-6700 扫描电镜(SEM) 观察显微组织形貌, 并用能谱仪进行微区成分分析。硬度测试在 HBRVU-187.5 布洛维光学硬度计上进行, 压缩强度采用 WDW-100D 电子万能试验机测试, 试样尺寸 $\phi 5\text{mm}\times 8\text{mm}$, 压缩实验前, 样品表面经 600#

砂纸机械磨光。

2 实验结果及分析

2.1 退火温度对 00Cr12TiNb 不锈钢显微组织的影响

00Cr12TiNb 铁素体不锈钢锻后显微组织如图 1(a)所示。可看出, 00Cr12TiNb 铁素体不锈钢锻后组织为纤维条带状结构, 晶粒大小不均且含有大量位错及亚结构。图 1(b)~(f)为不同退火温度下的金相组织, 由图可见, 试样分别在 860 °C 和 890 °C 退火

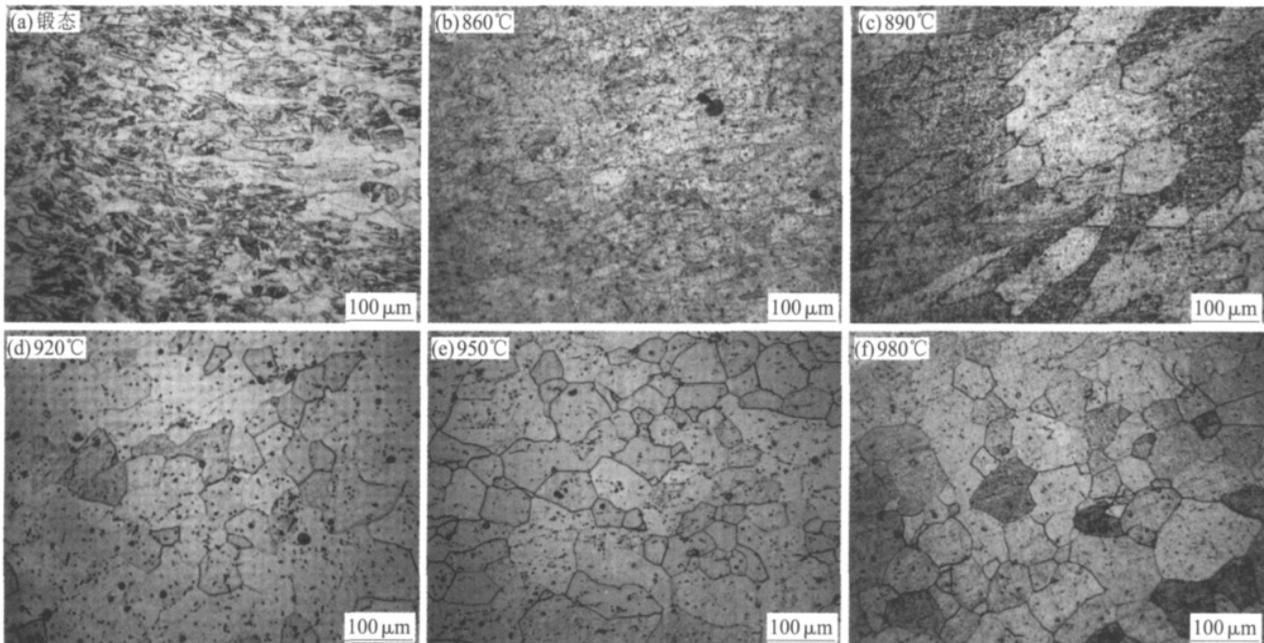


图 1 不同退火温度下 00Cr12TiNb 铁素体不锈钢的显微组织

Fig.1 Microstructure of 00Cr12TiNb ferritic stainless steel annealing at different temperature

后, 出现了少量的等轴晶, 但大部分晶粒仍处于被拉长的变形状态; 当退火温度为 920 °C 时, 出现了部分等轴晶, 说明试样已经部分再结晶; 随退火温度的升高, 试样的再结晶程度也逐渐加强, 当退火温度为 950 °C 时, 试样全部呈现等轴晶, 见图 1(e), 且组织较均匀, 晶粒尺寸相差不大, 说明其已经发生了完全再结晶; 当退火温度达到 980 °C 时, 晶粒明显长大, 平均晶粒大小为 80 μm。再结晶是一个形核长大的过程, 且伴随晶体取向分布发生变化^[8]。此过程最主要的驱动力是以位错和晶界形式保留的形变储能, 再结晶晶核首先形成于具有高形变储能的晶界处, 形变储能越低的晶粒形核能力越弱。从图 1(d)~(f)中可以看到, 在晶界析出的小尺寸晶粒, 实验结果与经典理论相吻合。再结晶结束后, 由于储能释放, 位错等晶体缺陷提供的驱动力消失, 晶界能成为晶粒进一步长大的主要驱动力^[10]。

图 2 为 00Cr12TiNb 铁素体不锈钢在 920~980 °C 退火后的晶粒尺寸分布图。可看出, 随退火温度的升高, 晶粒尺寸分布曲线向较大尺寸晶粒方向移动; 950 °C 退火时晶粒尺寸分布比较集中, 小尺寸晶粒出现的频数明显比 920 °C 高, 而在 980 °C 退火时, 大尺寸晶粒出现的频数明显增加。晶粒尺寸分布开始

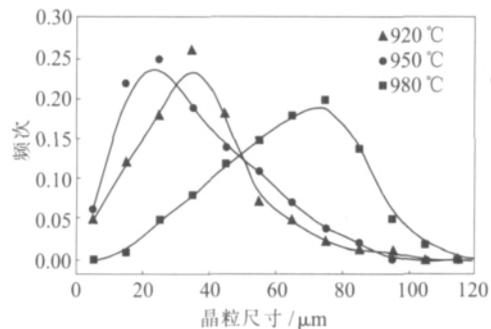


图 2 不同退火温度试样晶粒尺寸分布
Fig.2 Grain size distribution of sample annealing at different temperature

分散,说明此时再结晶晶粒已经开始长大。

图3为00Cr12TiNb铁素体不锈钢析出相的二次电子扫描电镜照片,能谱分析结果如表1所示。从表1可看出,图3(a)中A点所示的四方相为TiN,通过电镜观察发现TiN在晶内和晶界析出,其尺寸为3~5 μm 。由于Ti的溶解度积很小,TiN在高温液相时就已形成,增加凝固时的形核点,另外,高温析出的TiN有利于固定钢中的自由N,可改变材料的应变时效性能。TiN在一般的加热温度下仍处于未溶状态,退火过程中基本保持稳定,并随退火温度的升高而长大,TiN对晶界的钉扎作用有利于抑制退火过程中晶粒的粗化。图3(a)中B点所示的长棒状相为 Fe_2Nb ,电镜观察发现 Fe_2Nb 在晶界析出,其轴向尺寸为1~3 μm 。Fujita等^[4]研究表明,当在含有Ti和Mo的铁素体不锈钢中同时添加Nb时,不但可以阻止对不锈钢的高温强度不利的 $\text{Fe}_3\text{Nb}_3\text{C}$ 的析出,而且有利于 Fe_2Nb 的析出。 Fe_2Nb 相可以有效提高不锈钢的高温强度,在退火过程中对晶界有钉扎作用。图3(b)中C点所示颗粒状相为NbTi(C,N),电镜观察发现,NbTi(C,N)在晶内和晶界弥散析出,其尺寸在1 μm 左右。NbTi(C,N)是在退火过程中析出的,从图1可看出,NbTi(C,N)在860 $^{\circ}\text{C}$ 退火过程中就有少量的析出,随退火温度的升高,NbTi(C,N)的析出量明显增加。当退火温度达到950 $^{\circ}\text{C}$ 时在晶内

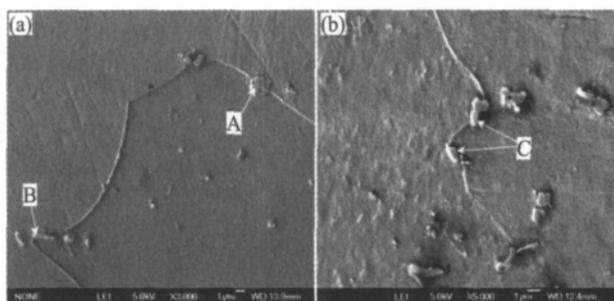


图3 00Cr12TiNb铁素体不锈钢析出相的扫描电镜照片
Fig.3 SEM morphologies of precipitates in 00Cr12TiNb ferritic stainless steel

表1 00Cr12TiNb铁素体不锈钢析出相的能谱分析结果
Tab.1 EDS results of precipitates in 00Cr12TiNb ferritic stainless steel

析出物		C	N	Nb	Ti	Fe	Mn	Cr	Si
A点	wt,%	2.62	24.35	1.88	71.15	-	-	-	-
	at,%	6.30	50.22	0.59	42.90	-	-	-	-
B点	wt,%	5.66	0.71	8.23	6.77	60.01	9.10	9.28	0.25
	at,%	21.61	2.33	4.06	6.48	49.31	7.60	8.19	0.41
C点	wt,%	8.81	4.75	20.13	18.90	31.28	10.75	5.35	0.04
	at,%	28.83	13.33	8.52	15.51	22.02	7.69	4.04	0.05

和晶界均匀弥散分布。NbTi(C,N)的析出消耗了部分形变储能,推迟了再结晶的发生,同时NbTi(C,N)对晶界的钉扎和拖曳作用有利于抑制退火过程中晶粒的粗化。另外,NbTi(C,N)的析出对提高00Cr12TiNb铁素体不锈钢的强度、韧性和耐晶间腐蚀性能是非常有利的^[11]。

2.2 退火温度对00Cr12TiNb不锈钢力学性能的影响

图4为不同退火温度下试样的屈服强度和硬度曲线。可看出,当退火温度为860 $^{\circ}\text{C}$ 时,00Cr12TiNb不锈钢表现出很高的强度和较高的硬度;随退火温度的升高,试样的强度和硬度均有所降低,当温度升高到920 $^{\circ}\text{C}$ 时,强度降低到最小值,硬度也有所下降,但降低的幅度不如屈服强度大;退火温度继续升高,试样的屈服强度又逐渐升高,而硬度渐渐趋于稳定。试样退火后的屈服强度和硬度曲线反映了基体内部组织的变化,在再结晶温度以下退火,纤维状晶粒的变化不大,主要发生组织的回复、亚结构的改变及小部分晶粒的再结晶,使硬度略有降低;在再结晶开始温度以上退火,试样基体内出现再结晶新晶粒,由于再结晶消除了变形组织,减少了金属内部的加工应力,使试样硬度继续降低,但降低的趋势并不明显,这与再结晶后基体组织变的比较均匀和基体内大量弥散析出的NbTi(C,N)第二相粒子有关,析出相对基体产生了析出强化作用^[3-4,12]。在本试验条件下,综合考虑组织和性能,00Cr12TiNb不锈钢的再结晶温度为950 $^{\circ}\text{C}$ 。

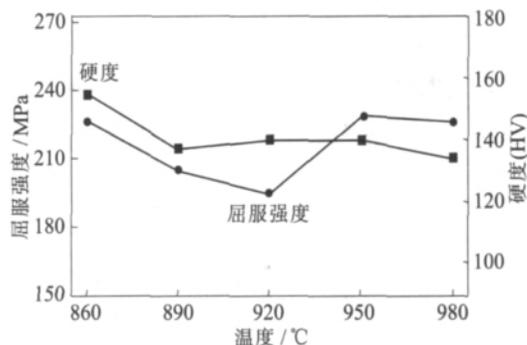


图4 不同退火温度下试样的力学性能
Fig.4 Mechanical properties of specimens annealing at different temperature

3 结论

(1) 00Cr12TiNb不锈钢在920 $^{\circ}\text{C}$ 以下退火时,主要发生组织的回复和小部分晶粒的再结晶;920 $^{\circ}\text{C}$ 开始再结晶,950 $^{\circ}\text{C}$ 时再结晶组织达到最佳,980 $^{\circ}\text{C}$ 时再结晶晶粒明显粗化。

(2) 在退火过程中,00Cr12TiNb 铁素体不锈钢在晶内和晶界弥散析出了 NbTi(C,N),随退火温度的升高,NbTi(C,N)的析出量明显增加,当退火温度达到 950 °C 时析出量最多。NbTi(C,N)的析出可以提高 00Cr12TiNb 铁素体不锈钢的强度和韧性。

(3) 在再结晶温度以下退火,试样屈服强度下降较明显,硬度略有降低;在再结晶开始温度以上退火,试样屈服强度有所增加,硬度则趋于稳定。

参考文献:

[1] Wang Lixin, Song Changjiang, Sun Fengmei, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 12wt%Cr ferritic stainless steel with Ti and Nb dual stabilization[J]. *Materials and Design*,2009,30:49-56.
 [2] Heon Y H, Chan J P, Hyuk S K. Effects of non-metallic inclusions on the initiation of pitting corrosion in 11%Cr ferritic stainless steel examined by micro-droplet cell [J]. *Corrosion Science*,2007,49:1266-1275.
 [3] Sim G M, Ahn J C, Hong S C, *et al.* Effect of Nb precipitate coarsening on the high temperature strength in Nb containing ferritic stainless steels [J]. *Materials Science and Engineering*, 2005,A396:159-165.

[4] Fujita N, Ohmura K, Yamamoto A. Changes of microstructures and high temperature properties during high temperature service of Niobium added ferritic stainless steels[J]. *Materials Science and Engineering*,2003,A351:272-281.
 [5] 王伟明,毛惠刚. 汽车排气系统用 409 型铁素体不锈钢的开发研究[J]. *宝钢技术*,2005,(4):56-60.
 [6] 张海,江海涛,殷安民,等. 00Cr12Ti 铁素体不锈钢耐点蚀性能研究[J]. *热加工工艺*,2009,38(2):31-34.
 [7] Rickert T J, Chu gouyi. Texture Development During Annealing of Ti and Ti+Nb Stabilized 11%Cr Ferritic Stainless Steels [A]. *International Conference on Textures of Materials* [C]. Xi'an,1996.
 [8] 张海兵,王均安,杨光,等. Cr11 铁素体不锈钢退火过程中织构变化[J]. *上海金属*,2007,29(4):17-21.
 [9] 陈炜晔,佟伟平,张辉,等. IF 钢退火过程中不同尺寸晶粒的生长和织构演变[J]. *金属学报*,2010,46(9):1055-1060.
 [10] 毛卫民,赵新兵. 金属的再结晶与晶粒长大[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.
 [11] 孟繁茂,付俊岩. 现代含铌不锈钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.
 [12] Kuzucu V, Aksoy M, Korkut M H, *et al.* The effect of Niobium on the microstructure of ferritic stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering*,1997,A230:75-80. 

(上接第 159 页)焊缝组织为下贝氏体+弥散碳化物+少量残余奥氏体,硬度较高,韧性较差;不同温度的焊后正火处理的组织均为铁素体+碳化物,硬度较低,韧性较好。

(2) 经 930 及 1030 °C 正火处理后,焊缝组织晶粒尺寸没有明显变化,碳化物析出明显增多,TiC 的细晶强化作用明显;经 1190 °C 正火处理后,焊缝区碳化物 TiC 大量固溶,细晶强化作用减弱,晶粒有所长大。

(3) 经不同温度正火处理后焊缝金属的冲击韧度均明显增加,最佳正火处理温度为 930 °C。

参考文献:

[1] 陈国良,林均品. 有序金属间化合物结构材料[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.
 [2] 江东亮. 碳化硅基复合材料[J]. *无机材料学报*,1995,10(2):151-163.
 [3] 丛光伟. 铁基金属陶瓷装甲材料的设计与制备[D]. 北京:北京科技大学,2003.

[4] Beladi H, Hodgson P D. The recrystallization behaviour of Nb microalloyed steels [J]. *Scripta Materialia*,2007,561-565; 25-28.
 [5] Thridandapani R R, Misra R D K, Mannering T, *et al.* The application of stereological analysis in understanding differences in toughness of V-and-Nb-microalloyed steels of similar yield strength [J]. *Mater. Sci. Eng.*,2006,A422:285.
 [6] 洪永昌,尹桂全. Ti/Nb 对结构钢焊接热影响区组织和韧性的影响[J]. *电焊机*,2002,23(4):21-23.
 [7] 荆天辅,张静武,傅万堂,等. 微量钛对控轧微合金钢焊接 HAZ 的组织和韧性的影响[J]. *钢铁*,1997,32(3):55-60.
 [8] 刁天辉,陈晓,袁泽喜. 大线能量焊接用钢热影响区组织和性能的研究进展[J]. *特殊钢*,2003,24(5):1-5.
 [9] 王敏. 焊接热循环对 Ti-Nb 微合金钢中第二相粒子的影响 [J]. *热加工工艺*,2009,38(11):22-28.
 [10] 毕宗岳. 形变热处理对低碳微合金钢焊接接头组织与性能的影响[J]. *热加工工艺*,2008,37(10):101-104.
 [11] 石勤,朱兴元,邹洋. 低碳钢晶粒超细化方法初探[J]. *钢铁研究*,2005,(5):55-58.
 [12] 尹桂全,张纯明,刘开升. 微 Ti 钢焊后冷却过程中的第二相粒子[J]. *钢铁*,2002,37(4):53-56. 