

冷轧压下率对含氮马氏体不锈钢 420U6 组织和性能的影响

李 筱^{1,2} 卫英慧^{1,3} 王 斌⁴ 卫争艳²

(1 太原理工大学材料与工程学院,太原 030024;2 太原钢铁(集团)有限公司先进不锈钢材料国家重点实验室,太原 030003;3 太原科技大学,太原 030024;4 山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

摘 要 采用四辊可逆冷轧机组对热轧退火态含氮马氏体不锈钢 420U6(∕% :0.16C,13.63Cr,0.083N)进行了压下率 10%~90% 的冷轧,研究了冷轧压下率对该钢组织和力学性能的影响。试验结果表明:当冷轧压下率达到 90% 时,碳化物的数量由原始退火态的 0.1×10^6 个/mm² 大幅提高至 2.35×10^6 个/mm²,而碳化物的平均直径则由 1.11 μm 降低到 0.22 μm,同时碳化物的分布更加均匀。此外,材料的硬度和屈服强度分别由原始退火态的 170 HV 和 335 MPa 分别大幅提高到冷轧压下率为 90% 的 325 HV 和 1 108 MPa,而延伸率在冷轧压下率为 0%~40% 时出现大幅下降,之后则逐渐稳定在 6% 左右。

关键词 含氮马氏体不锈钢 420U6 冷轧 碳化物 组织 机械性能

Effect of Cold Rolling Reduction on Microstructure and Mechanical Properties of Nitrogen Bearing Martensitic Stainless Steel 420U6

Li Xiao^{1,2}, Wei Yinghui^{1,3}, Wang Bin⁴ and Wei Zhengyan²

(1 School of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;
2 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003;
3 Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024;
4 Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The hot rolled and annealed nitrogen bearing martensitic stainless steel 420U6 (∕% :0.16C,13.63Cr,0.083N) was cold rolled by a 4-high reversible cold rolling mill with the cold rolling reductions 10%~90%, and the effect of cold rolling reduction on microstructure and mechanical properties of the steel was studied. The results show that the number of the carbides considerably increases from 0.1×10^6 /mm² at the initial annealed state to 2.35×10^6 /mm² at the 90% cold rolled state, while the average diameter of the carbides decreases from 1.11 μm to 0.22 μm and the distribution of the carbides become more evenly. Additionally, hardness and yield strength hugely increases from 170 HV and 335 MPa in the initial annealed state to 325 HV and 1 108 MPa at the 90% cold rolled state respectively, while the elongation reduces sharply when cold rolling reduction increases from 0% to 40%, after which the elongation gradually stabilizes at about 6%.

Material Index Nitrogen Bearing Martensitic Stainless Steel 420U6, Cold Rolling, Carbide, Microstructure, Mechanical Property

马氏体不锈钢被广泛应用于制作刀具、轴承、高精度调整垫片等对材料硬度、耐磨性能及耐腐蚀性能有较高要求的部件^[1-2]。马氏体不锈钢中的碳含量通常为 0.1%~0.9%,铬含量通常为 12%~18%,另外还会根据使用要求添加一些可提高其韧性、耐腐蚀性能及硬度的元素,如镍、钼、钒等。近年来氮作为一个有益且廉价的元素也被加入到马氏体不锈钢当中。氮可以使马氏体不锈钢中的其它合金元素分布更为均匀并减少富铬碳化物的析出倾向从而提高其耐腐蚀性能。因此氮合金化马氏体不锈钢通常在对耐腐蚀性能要求更高的应用领域里被用于替代传统的马氏体不锈钢。冷轧是含氮马氏体不锈钢生产中的一个重要工序。冷轧时通过选择合理的冷轧工艺可获得合适的冷轧态组织以为再结晶退火

提供良好的组织准备^[3],另外冷轧变形量会对退火态马氏体不锈钢中碳化物的尺寸、数量等产生显著影响,从而在很大程度上决定了淬、回火时的组织转变及最终的各项性能^[4]。在冷轧工艺对不锈钢组织和性能的研究方面,以往主要集中于奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢^[5-6],马氏体不锈钢相对较少^[7],含氮马氏体不锈钢则未见报道。本文研究了冷轧压下率对一种含氮马氏体不锈钢 420U6 组织和性能的影响。

1 试验材料与方法

试验材料是厚度为 3.0 mm 的 420U6 热轧退火态钢板,其生产工艺流程为 180 t AOD → 180 t LF → 连铸(200 mm 厚连铸坯) → 热连轧轧制(3.0 mm 厚热轧卷板) → 全氢罩式退火炉球化退火(850 ℃退

火) → 连续退火酸洗。试验钢的化学成分列于表 1, 其原始组织示于图 1, 由图 1 可知, 冷轧原始组织是典型的粒状碳化物弥散分布于铁素体基体上的球化退火态组织, 铁素体的平均晶粒直径约为 $6 \mu\text{m}$ 。

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steel / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	N
0.16	0.36	0.58	0.018	0.001	13.63	0.083

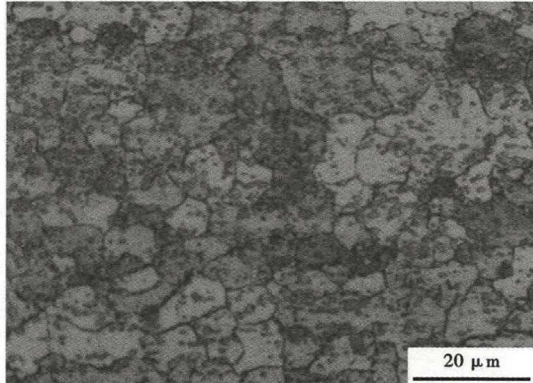


图 1 试验钢原始组织的形貌

Fig. 1 Metallograph of initial microstructure of test steel

采用直立式四辊可逆冷轧机进行冷轧试验。试验前先将钢板沿原始轧制方向剪切成 9 块尺寸 (mm) 为 $3.0 \times 240 \times 500$ 的试样, 之后沿着试样的长度方向 (即原始钢板的轧制方向) 依次将这 9 块钢板分别轧制成 9 种厚度规格, 各试样的具体轧后厚度及相应的冷轧压下率列于表 2。在对每块钢板进行轧制时, 每道次的压下量约为 0.2 mm 。

冷轧试验结束后, 在每种厚度的钢板上分别切取金相、硬度和拉力试样。采用 Leica DM4000 M LED 型光学显微镜和 Nova Nano SEM430 型扫描电子显微镜对侵蚀后的平行于轧制方向的截面进行观

表 2 冷轧试验压下率及厚度

Table 2 Cold rolling reduction and thickness of cold rolling test

道次	压下率/%	厚度/mm
1	10	2.7
2	20	2.4
3	30	2.1
4	40	1.8
5	50	1.5
6	60	1.2
7	70	0.9
8	80	0.6
9	90	0.3

察并采用 Image-pro plus6.0 软件对电镜照片中碳化物的尺寸和数量进行统计。采用 LCR-500 型半自动维氏硬度计对试样硬度进行检测。拉力试样的拉伸方向垂直于原轧制方向并将其加工成定标距为 50 mm 且平行部分为 25 mm 的标准拉力试样, 采用 WE-30 型液压压力试验机进行拉力试验测试。

2 试验结果与讨论

2.1 冷轧压下率对组织的影响

420U6 不锈钢经不同变形量轧制后的光学显微组织照片示于图 2 中。由图 2 可知, 经冷轧后 420U6 不锈钢的组织仍然由铁素体基体和分布于基体上的粒状碳化物组成, 但随着冷轧压下率的提高, 铁素体晶粒逐渐被拉长。当冷轧变形率为 10% 时 [即冷轧板厚度为 2.7 mm 时, 如图 2(a)], 与原始退火态相比铁素体晶粒形貌变化不大, 仍以等轴状为主, 但其中部分较大的晶粒有向轧制方向转动的趋势, 说明此时铁素体基体开始进行塑性变形。由于粒状碳化物较铁素体基体的硬度高, 在冷变形量较低时 (10%) 并未出现明显的塑性变形的迹象。另外, 此时铁素体基体中的位错密度较退火态时有所提高。由于受到粒状碳化物的阻碍, 位错将按 Orowan 机制绕过粒状碳化物并在其周围形成位错

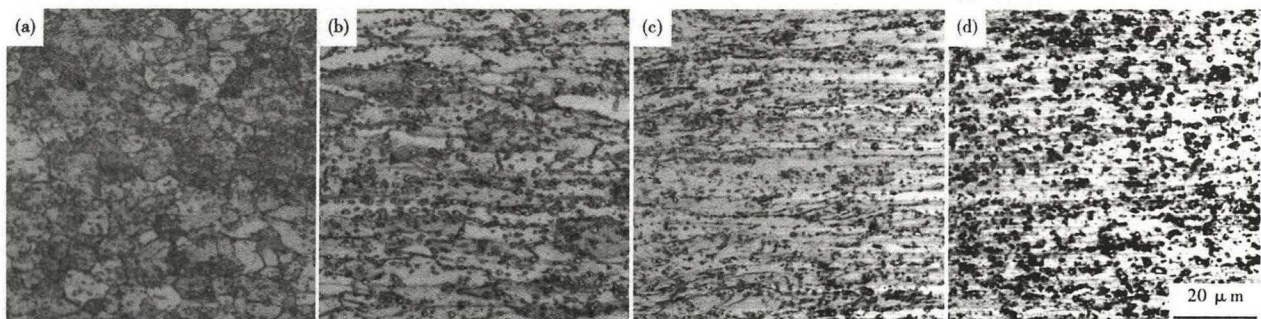


图 2 420U6 钢冷轧后的显微组织形貌: (a) 2.7 mm, (b) 1.5 mm, (c) 0.9 mm 和 (d) 0.3 mm

Fig. 2 Morphology of structure of cold rolled steel 420U6: (a) 2.7 mm, (b) 1.5 mm, (c) 0.9 mm and (d) 0.3 mm

环^[8],从而使此处具有更高的位错密度。

当冷轧变形率为 50% 和 70% 时[即冷轧板厚度为 1.5 mm 和 0.9 mm 时,如图 2(b,c)],铁素体晶粒已完全沿轧制方向被拉长,且随着冷轧变形率的增加,铁素体晶粒的横向尺寸显著减小,而硬度较高的碳化物颗粒则逐渐在铁素体基体塑性变形的带动下沿着轧制方向发生了转动和塑性变形,且某些大颗粒碳化物甚至发生了断裂。因此随着冷轧压下率的提高,碳化物的尺寸逐渐减小而数量则逐渐增加。另外在此阶段冷轧时,铁素体基体中的位错密度进一步提高。由于铁素体基体具有较高的层错能,位错在冷变形时容易发生交滑移因此可形成鲜明的胞状结构。同时由于粒状碳化物数量的提高,可进一步促进位错增殖。当冷轧变形率进一步提高至 90% 时[即冷轧板厚度为 0.3 mm 时,如图 2(d)],铁素体晶粒的横向尺寸进一步减小以至于晶界已难以分辨,同时碳化物的数量进一步增加、尺寸进一步减小。

2.2 冷轧压下率对碳化物的影响

420U6 不锈钢被冷轧至不同厚度时试样微观组织的典型扫描电镜(SEM)照片示于图 3 中。不同厚度试样内碳化物的平均粒径及单位面积内碳化物的数量示于图 4 中。由图 3 可知,不同厚度试样中的碳化物仍以粒状为主,但随着冷轧厚度的降低,碳化物有被拉长的趋势,尽管这一趋势并不明显。对于热轧退火态的原始试样,其碳化物的平均粒径为 1.1 μm。随着冷轧厚度的降低,碳化物的尺寸逐渐减小,同时大颗粒的碳化物的数量也在减少,碳化物尺寸及分布的均匀性均得到改善。但是在各冷轧厚度的试样当中均可以观察到粒径大于 1 μm 的碳化物,它们会对材料的热处理和最终性能产生不利影响。冷轧厚度的降低不但会减小碳化物的平均粒径,而且还会产生新的且更加细小的甚至是纳米级的碳化物。另外如图 4 所示,碳化物的数量随冷轧压下率的提高而逐渐增加,当冷轧压下率不大于 70% (即冷轧厚度不大于 0.9 mm 时)碳化物数量增加较为缓慢,而当冷轧压下率大于 70% 后,碳化物的数量则快速增加。

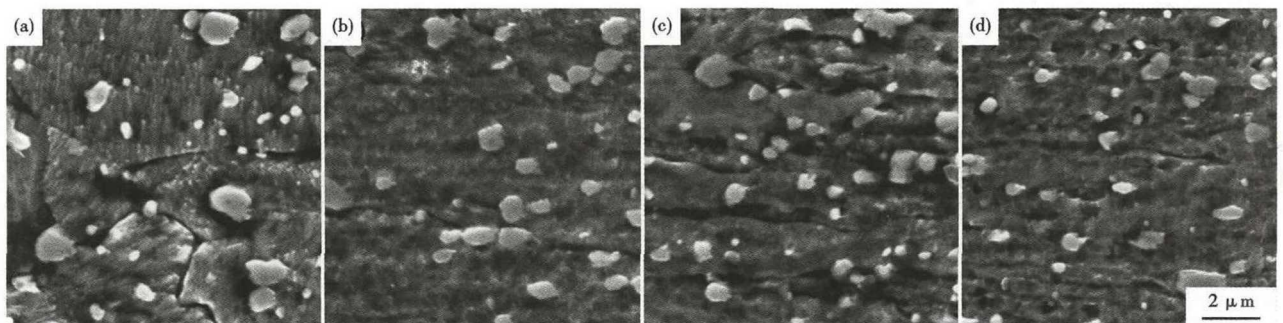


图 3 420U6 钢冷轧后组织,SEM:(a)2.7 mm,(b)2.1 mm,(c)0.9 mm 和(d)0.3 mm

Fig.3 Morphology of structure of cold rolled steel 420U6, SEM: (a) 2.7 mm, (b) 2.1 mm, (c) 0.9 mm and (d) 0.3 mm

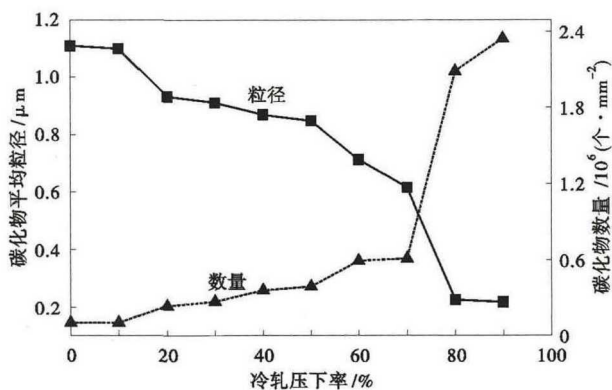


图 4 冷轧压下率对 420U6 钢冷轧后碳化物平均粒径及碳化物数量的影响

Fig.4 Effect of cold rolling reduction on mean diameter and carbide number of cold rolled steel 420U6

2.3 冷轧压下率对力学性能的影响

420U6 不锈钢拉伸性能及硬度与冷轧压下率的关系示于图 5 中。由图 5 可知,在冷轧压下率由 0% 增加到 90% 的过程中,材料的屈服强度、抗拉强度及硬度均持续提高,延伸率在冷轧压下率为 0% 到 40% 的范围内大幅下降了 79.5%,之后则基本维持在 6% 左右,且在冷轧压下率超过 70% 之后有小幅回升。随着冷轧压下率的提高,材料内部空位、位错密度、形变亚晶等晶体缺陷显著提高,这些缺陷的存在有效地阻止了位错的滑移从而提高了材料的强度而降低了其塑性。另外,如前所述,随着冷轧压下率的提高,碳化物的尺寸逐渐降低,而数量及其分布的均匀性则得到提高。碳化物是一种硬度较高的

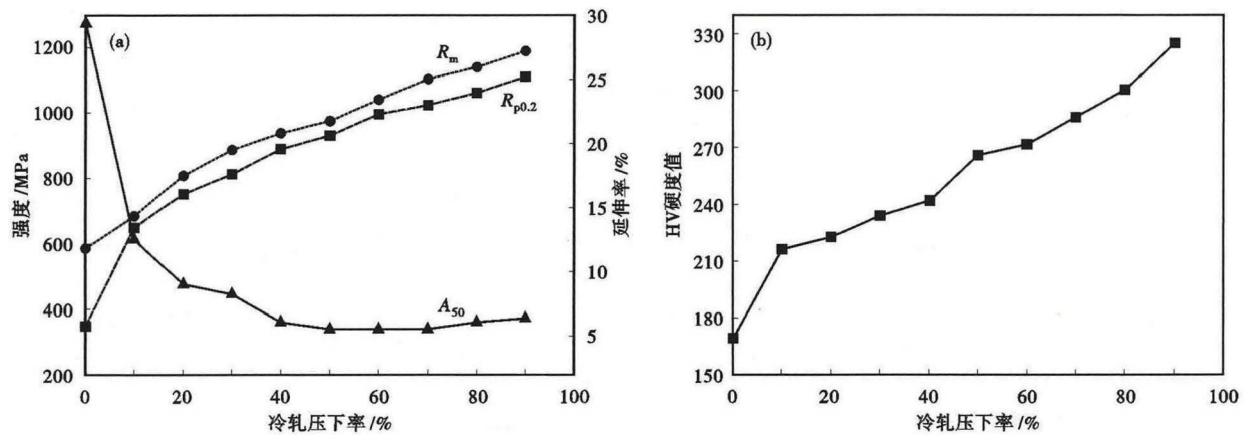


图 5 420U6 钢冷轧压下率对 (a) 拉伸性能和 (b) 硬度的影响

Fig. 5 Effect of cold rolled reduction on (a) tensile properties and (b) hardness of cold rolled steel 420U6

相,当其数量增多而尺寸减小时,会在加工硬化的基础上进一步提高材料的强度。但由于碳化物尺寸随冷轧压下率而不断减小,特别是当冷轧压下率达到 70% 以上时,碳化物的平均粒径显著降低(图 4),碳化物的这一细化作用使材料的延伸率在冷轧压下率达到 40% 后趋于稳定甚至当冷轧压下率大于 70% 之后有小幅回升。

3 结论

(1) 随着冷轧压下率从 0% 提高到 90%, 铁素体晶粒逐渐沿着轧制方向被拉长, 碳化物的数量从 0.10×10^6 个/ mm^2 大幅提高到 2.35×10^6 个/ mm^2 , 而碳化物的平均直径则由 $1.11 \mu\text{m}$ 下降至 $0.22 \mu\text{m}$, 另外碳化物的分布更趋均匀。

(2) 随着冷轧压下率从 0% 提高到 90%, 由于加工硬化效应和硬质碳化物数量的增加, 材料的硬度值和屈服强度分别从 170 HV 和 335 MPa 大幅提高至 325 HV 和 1108 MPa, 而延伸率则由 29% 下降至 6.5%, 由于碳化物的细化作用, 使延伸率在冷轧压下率大于 40% 之后基本维持在 6% 左右。

参考文献

- [1] Fanyu D, Dangshen M and Jianhua L, et al. Effect of Heat Treatment Process on Structure and Properties of New Martensite Stainless Steel 6Cr15Mo for Tool[J]. Special Steel, 2010, 31(6): 53-55.
- [2] 秦 斌. 热处理对马氏体不锈钢 5Cr15MoV 冷轧退火板组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2011, 32(2): 66-68.
- [3] 关小军, 周家娟, 陈晓闽, 等. 不同冷轧状态的 ELC-BH 钢板连续退火再结晶规律[J]. 金属热处理, 2003, 28(2): 31-33.
- [4] 赵步青, 龚真忠, 纪正祥, 等. 碳化物对高速钢刀具寿命的影响[J]. 热处理技术与装备, 2011, 32(3): 60-64.
- [5] Takuro Masumura, Nobuo Nakada and Toshihiro Tsuchiyama, et al. The Difference in Thermal and Mechanical Stabilities of Austenite Between Carbon- and Nitrogen-Added Metastable Austenitic Stainless Steels[J]. Acta Materialia, 2015, 84: 330-338.
- [6] Andrey Belyakov, Yuuji Kimura and Yoshitaka Adachi, et al. Microstructure Evolution in Ferritic Stainless Steels during Large Strain Deformation[J]. Materials Transactions, 2004, 45(9): 2812-2821.
- [7] 武志平, 高 登. 5Cr15MoV 马氏体不锈钢冷轧工艺研究[J]. 中北大学学报, 2012, 33(3): 350-352.
- [8] 于 宏, 田素贵, 耿 新. 钢中渗碳体的冷变形特征及其作用[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(3): 43-46.

李 筱(1981-), 男, 博士生, 2004 年西安建筑科技大学(本科)毕业, 不锈钢研发. E-mail: lixiao_sgpv@163.com

收稿日期: 2019-04-12

“讲文明树新风”公益广告

绿化环境

从我做起