

Mn 含量对铸造高铌 TiAl 合金组织和性能的影响

王艳丽 李时磊 彭凌剑 林均品 陈国良

北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083

摘 要 选择两种 Mn 含量不同的高铌 TiAl 合金 Ti46Al8Nb2Mn0.2B 和 Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B, 通过热等静压(HIP)及后续热处理, 结合组织和力学性能的分析, 研究了 Mn 含量对高铌 TiAl 合金的组织 and 性能的影响. XRD 和 SEM 背散射电子实验结果表明: Mn 含量较高的 Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金, 经热等静压及循环热处理, 得到的双态组织较粗大, 并且有少量脆性 β 相存在; Mn 含量较低的 Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金, 经热等静压后直接在双相区长时间保温处理, 得到了细小的双态组织, 并且完全消除了 β 相. 室温拉伸实验表明, Mn 含量的降低提高了 Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金的力学性能, 其延伸率、屈服强度和断裂强度分别达到 2.4%、548 MPa 和 660 MPa. 断口形貌分析表明, 室温下两种合金都属于解理断裂.

关键词 高铌 TiAl 合金; Mn 含量; 双态组织; 热等静压

分类号 TG146.2

Effect of Mn content on the microstructure and mechanical properties of cast high Nb containing TiAl alloys

WANG Yan-li, LI Shi-lei, PENG Ling-jian, LIN Jun-pin, CHEN Guo-liang
State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT The microstructure and mechanical properties of two high Nb containing TiAl alloys with different Mn contents, Ti46Al8Nb2Mn0.2B and Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B, were studied. XRD and SEM results show that the Ti46Al8Nb2Mn0.2B alloy obtains duplex microstructure with a few brittle β phases after hot isostatic pressing (HIP) and cyclic heat treatment. By thermostatic treatment in two-phase area for long time after HIP, no β phases were found in the microstructure of the Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B alloy. Tensile test shows that the mechanical properties improve with decreasing Mn content, and the elongation, yield strength and breaking strength of the Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B alloy are 2.4%, 548 MPa and 660 MPa, respectively. The fracture morphologies indicate that the fracture of the two alloys at room temperature belongs to brittle cleavage fracture.

KEY WORDS High Nb containing TiAl alloy; Mn content; duplex microstructure; hot isostatic pressing

高铌 TiAl 金属间化合物是新一代高温高性能的 γ -TiAl 合金, 是最有工程应用前景的 TiAl 合金, 因其具有优异的高温性能、抗氧化性和抗蠕变性能而受到广泛的关注. 近年来, 对该合金的相图、抗氧化性、显微组织^[1]以及力学性能等方面进行了广泛的研究并取得了很大的进展. 但是, 高含量铌的加入在带来良好的高温性能的同时, 也进一步降低了其室温和高温塑性, 尤其是室温塑性比普通 TiAl 合金低. 因此, 室温脆性仍然是高铌 TiAl 合金实用化的主要障碍, 改善其室温塑性是高铌 TiAl 合金走向

工业化的关键^[2-4], 合金化和显微组织控制等是优化合金性能的主要手段^[5-10]. 本文通过 Mn 合金化, 研究 Mn 含量对铸造高铌 TiAl 合金组织及其力学性能的影响.

1 实验方法

本研究选用的两种合金的名义成分(原子分数, %)为 Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 和 Ti46Al8Nb2Mn0.2B. 合金原材料为 99.99% 的纯海绵 Ti、99.99% 的高纯 Al、电解纯 Mn 和 NbAl 中间合金. 合金由真空悬浮

熔炼炉熔炼,熔炼过程中采用氩气保护. 炼得直径为 30 mm、柱高为 100 mm 以上的圆柱试样. 将铸棒冒口处切掉后,经热等静压处理(温度 1200 ℃,压力 200 MPa,时间 4 h),以减轻铸态组织的枝晶偏析,使合金的组织、成分进一步均匀化,并减少缩孔、缩松等缺陷以致密化. 对合金进行不同方式的热处理,热处理工艺如表 1 所示.

表 1 两种合金的热处理工艺

合金	热处理工艺
Ti46Al8Nb2Mn0.2B	1 200 ℃/ 50h+ 1 300 ℃/ 16h 炉冷× 3(循环热处理 3 次)
Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B	1 250 ℃/ 24h 空冷

采用金相显微镜、扫描电镜背散射模式(SEM-BSE)和 X 射线衍射仪(XRD)对两种合金的铸态组织、热等静压组织和热处理后的组织进行分析. 将热处理后的合金进行拉伸实验,拉伸试样尺寸如图 1 所示.拉伸实验在室温下 MTS-809 型材料试验机上进行,应变速率为 10^{-4} s^{-1} . 在扫描电镜中观察拉伸试样的断口形貌.

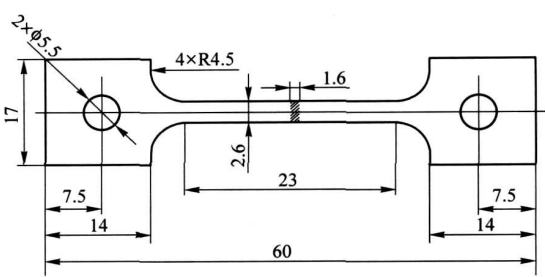


图 1 板状拉伸试样几何外形(单位: mm)

Fig 1 Geometric shape of tensile specimens(unit:mm)

2 实验结果与讨论

2.1 组织分析

图 2 为 Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金的铸态组织和热等静压(HIP)后的组织. 该合金的铸态组织在枝晶间 γ 偏析的部位还有成条带分布的硼化物存在. 文献[11-12]表明这种条带分布的是 TiB 或者 TiB₂ 化合物,但是片层组织同样也穿越这些钛的硼化物. 经过 HIP 得到的组织中仍然存在着枝晶偏析,图 3 的 X 射线衍射结果表明,在较高温度生成的 β 相仍然存在,但是被破碎为较小的块状(如

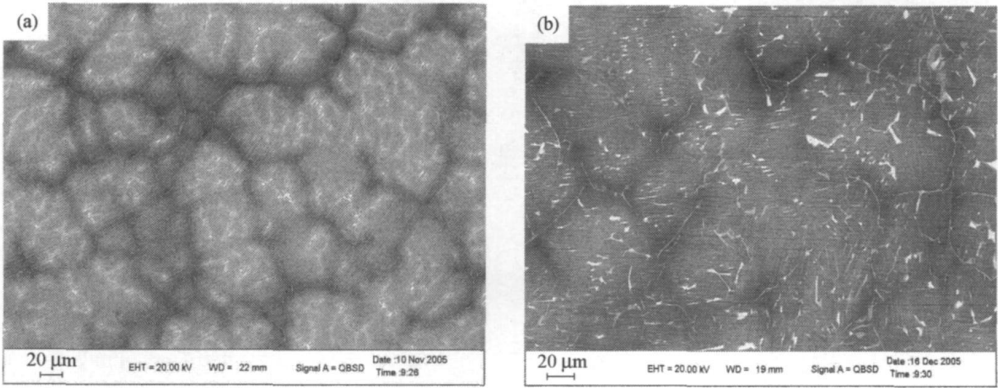


图 2 Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金的铸态组织(a)和 HIP 后的组织(b)

Fig. 2 Structures of Ti46Al8Nb2Mn0.2B of as cast (a) and after HIP (b)

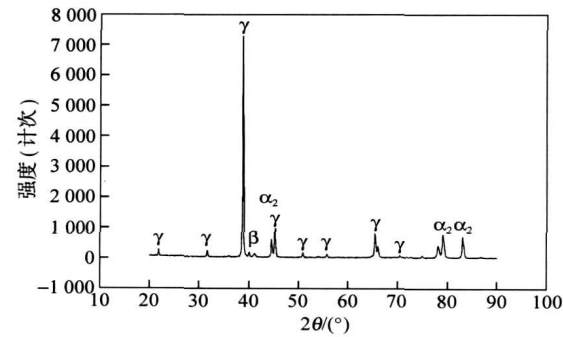


图 3 Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金 HIP 后的 XRD 谱

Fig. 3 XRD pattern of Ti46Al8Nb2Mn0.2B after HIP

图 2(b)). 经过表 1 所示的热处理之后,46Al8Nb2Mn0.2B 的金相组织和 SEM-BSE 组织如图 4 所示.

Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金的铸态组织和 HIP 后的组织如图 5 所示,可见其铸态组织和 Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金的一样,但是经过 HIP 后的组织中,白亮衬度的 β 相得到了彻底消除. 经过表 1 中所示的热处理之后,得到 Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金的金相组织和 SEM-BSE 组织如图 6 所示. 从金相组织中测得其平均晶粒大小为 30 μm ; 扫描电镜下发现完全没有白亮衬

度的相的存在, 少量白点分布的是硼化物 (TiB 或 TiB₂), 这种组织完全消除了β 相, X 射线衍射结果

(如图 7 所示) 也表明没有β 相的衍射峰.

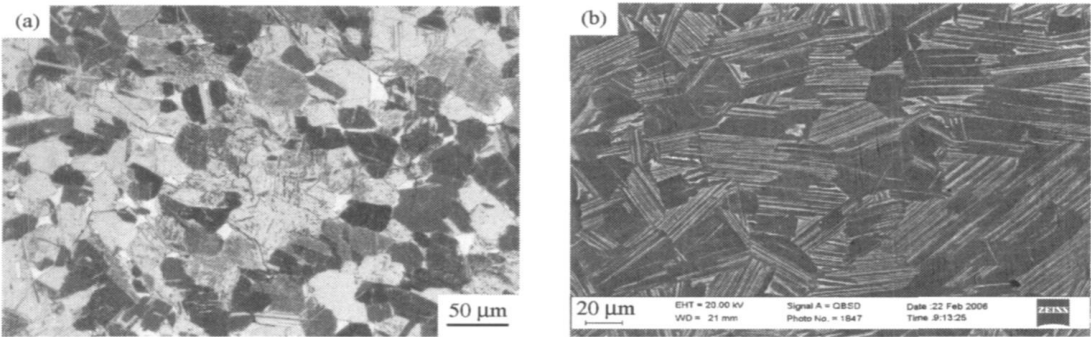


图 4 Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金经过热处理后的金相组织(a) 和 SEM-BSE 组织(b)

Fig 4 Metallographic structure (a) and back scattering microstructure (b) of Ti46Al8Nb2Mn0.2B after heat treatment

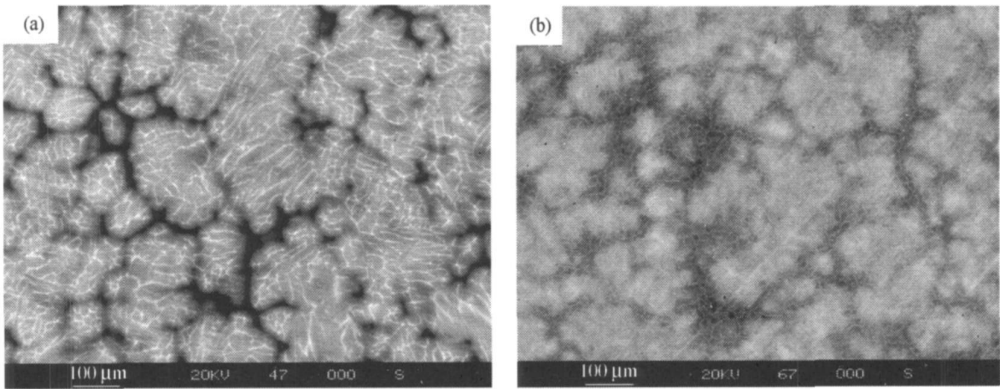


图 5 Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金的铸态组织(a) 和 HIP 后的组织(b)

Fig. 5 Structures of Ti46Al8Nb2Mn0.2B of as cast (a) and after HIP (b)

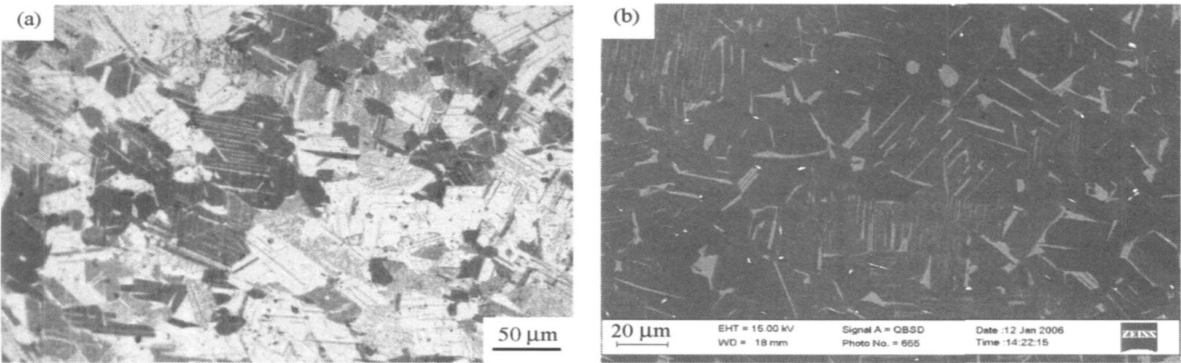


图 6 Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金经过热处理后的金相组织(a) 和 SEM-BSE 组织(b)

Fig.6 Metallographic structure (a) and back scattering microstructure (b) of Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B after heat treatment

2.2 力学性能分析

图 8 给出了两种合金在室温下应变速率为 $10^{-4} s^{-1}$ 时的真应力—真应变曲线, 拉伸力学性能如表 2 所示. 可见 Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金具有更好的室

温塑性, 延伸率达到 2.4%. Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金的室温塑性较差, 延伸率仅为 1.2%. Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金比 Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金的屈服强度和抗拉强度都得到了明显的提高.

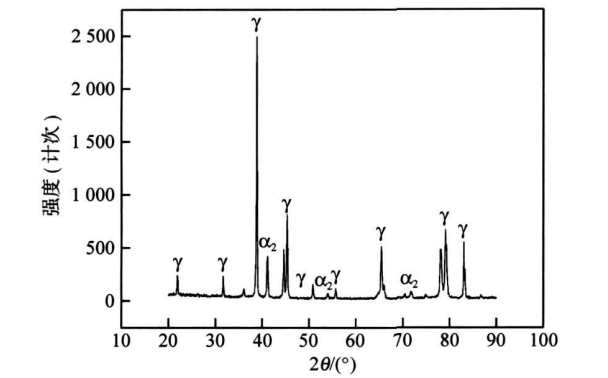


图 7 Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金 HIP 后的 XRD 分析

Fig. 7 XRD analysis of Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B after HIP

表 2 两种合金在室温下应变速率为 10^{-4} s^{-1} 时的拉伸力学性能

Table 2 Tensile properties of the two alloys at room temperature with a strain rate of 10^{-4} s^{-1}

材料	延伸率/ %	屈服强度/ MPa	断裂强度/ MPa
Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B	2.4	548	660
Ti46Al8Nb2Mn0.2B	1.2	465	531

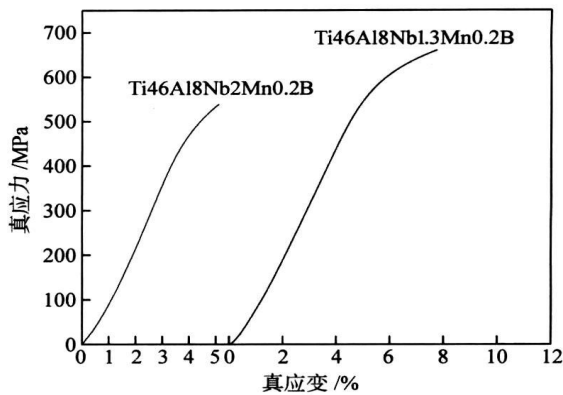


图 8 两种合金在室温下应变速率为 10^{-4} s^{-1} 时的真应力-真应变曲线

Fig. 8 True stress-true strain curves of the two alloys at room temperature with a strain rates of 10^{-4} s^{-1}

2.3 断口形貌分析

图 9 是两种合金的室温拉伸断口形貌。可见 Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金发生了穿晶的解理断裂;Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金也是穿晶的解理断裂,且裂纹穿越 γ 晶粒时得到的是典型的河流状花样。

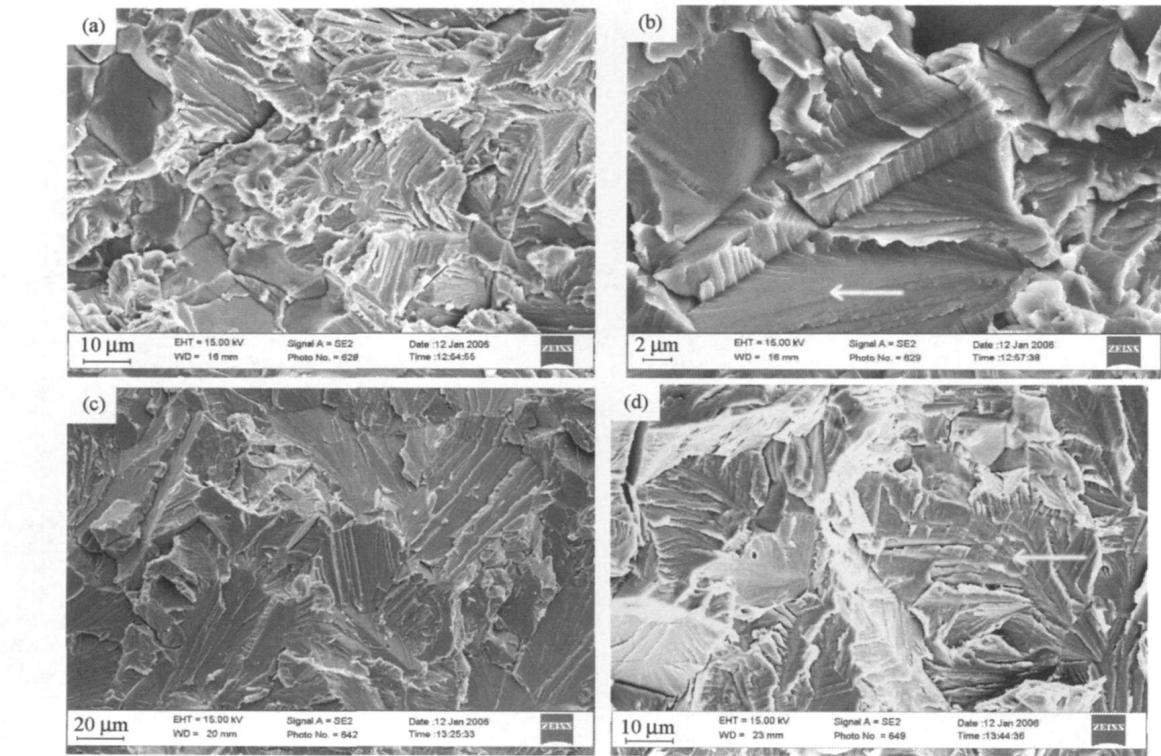


图 9 室温拉伸断口形貌。(a, b) Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金; (c, d) Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金

Fig. 9 Fracture morphologies at room temperature: (a, b) Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B alloy; (c, d) Ti46Al8Nb2Mn0.2B alloy

3 结论

(1) Mn 含量较低的 Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金,通过热等静压之后直接在双相区长时间保温处

理,可以获得细小的双态组织,并且完全消除了 β 相的存在。

(2) 由于消除了脆性 β 相, Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金的延伸率、屈服强度和断裂强度分别达到

2.4%、548 MPa 和 660 MPa, 与 Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金相比都有了提高。

(3) Ti46Al8Nb1.3Mn0.2B 合金和 Ti46Al8Nb2Mn0.2B 合金的室温拉伸断口均为脆性解理断口。

参 考 文 献

- [1] Peng L J, Wang Y L, Lin J P, et al. Duplex microstructure transformation of a cast high-Nb containing TiAl alloy. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2007, 29(3): 278
(彭凌剑, 王艳丽, 林均品, 等. 铸造高铌 TiAl 合金双态组织转变过程. 北京科技大学学报, 2007, 29(3): 278)
- [2] Gao J F. *Study on the Structure Optimization and Properties of Forged High Nb Containing TiAl Alloy* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2005
(高建峰. 变形高 Nb-TiAl 合金组织优化及性能研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2005)
- [3] Chen G L. R&D status and prospect on the ordered structural intermetallics. *Mater Rev*, 2000, 14(9): 1
(陈国良. 金属间化合物结构材料研究现状与发展. 材料导报, 2000, 14(9): 1)
- [4] Liu C T, Maziasz P J. Microstructural control and mechanical properties of dual-phase TiAl alloys. *Intermetallics*, 1998, 6(7/8): 653
- [5] Hu D. Effect of boron addition on tensile ductility in lamellar TiAl alloys. *Intermetallics*, 2002, 10(9): 851

- [6] Wiezorek J M K, Deluca P M, Fraser H L. Mechanisms of plasticity and fracture of partially lamellar titanium aluminium. *Intermetallics*, 2000, 8(2): 99
- [7] Chen G L, Zhang C. Deformation mechanism at large strains in a high-Nb containing γ -TiAl alloy at room temperature. *Mater Sci Eng A*, 2002(329/331): 163
- [8] Rao G B, Liu K, Han E H. Mechanism of grain refinement effect of boron addition on γ -TiAl based alloys. *Chin J Nonferrous Met*, 2004, 14(Suppl 1): 265
(饶光斌, 刘奎, 韩恩厚. 硼化物细化 γ -TiAl 基合金晶粒的机制. 中国有色金属学报, 2004, 14(增刊 1): 265)
- [9] Li W, Xia K. Kinetics of the α grain growth in a binary Ti-44Al alloy and a ternary Ti-44Al-0.15Gd alloy. *Mater Sci Eng A*, 2002, 323: 430
- [10] Kim Y M. Intermetallic alloys based on gamma titanium aluminium. *JOM*, 1989, 41(7): 24
- [11] Zheng R L, Guo F A, Zhang Y G, et al. Fracture mechanics of tensile ductility of TiAl alloy with duplex structure. *Chin J Nonferrous Met*, 2001, 11(52): 114
(郑瑞廷, 郭富安, 张永刚, 等. 双态组织 TiAl 基合金拉伸塑性的断裂力学. 中国有色金属报, 2001, 11(52): 114)
- [12] Xu J W. *Study on the Composition, Structures and Properties of As-Cast High Nb Containing TiAl Alloy* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2004
(许敬文. 铸造高铌 TiAl 合金成分组织和性能的研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2004)

(上接第 173 页)

- [8] Yuan S Q, Yang S W, Wu H B, et al. Strain-induced precipitation in a multi-microalloyed steel. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2003, 25(5): 414
(苑少强, 杨善武, 武会宾, 等. 多元微合金钢中的应变诱导复合析出. 北京科技大学学报, 2003, 25(5): 414)
- [9] Nie Y, Dong W L, Zhao Y T, et al. Effects of process parameters and intermediate transformation structure on mechanical properties of a high strength low carbon bainitic steel. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2006, 28(8): 733
(聂斌, 董文龙, 赵运堂, 等. 高强度低碳贝氏体钢工艺和组织对性能的影响. 北京科技大学学报, 2006, 28(8): 733)
- [10] Sarkar P P, Kumar P, Manna M K, et al. Microstructural influence on the electrochemical corrosion behavior of dual-phase steels in 3.5% NaCl solution. *Mater Lett*, 2005, 59(19/20): 2488
- [11] Bi H Y. Suppression mechanism of chromium depletion by twin-induced grain boundary engineering of 304 stainless steel. *Iron*

Steel, 2005, 40(6): 68

(毕洪运. 晶界工程抑制 SUS304 不锈钢晶界贫铬机制. 钢铁, 2005, 40(6): 68)

- [12] Chief Editor Committee of Iron and Steel Material Handbook. *Iron and Steel Material Handbook*, II. *Low Alloying High Strength Steel*. Beijing: Standard Press of China, 2003, 32
(《钢铁材料手册》总编辑委员会. 钢铁材料手册: II. 低合金高强度钢. 北京: 中国标准出版社, 2003. 32)
- [13] Chen X H, Dong J H, Han E H, et al. Effect of Ni on the ion-selectivity of rust layer on low alloy steel. *Mater Lett*, 2007, 61(19/20): 4050
- [14] Choi Y S, Shim J T, Kim J G. Corrosion behavior of low alloys steels containing Cr, Co and W in synthetic potable water. *Mater Sci Eng A*, 2004, 385(1/2): 148
- [15] Choi Y S, Shim J T, Kim J G. Effects of Cr, Cu, Ni and Ca on the corrosion behavior of low carbon steel in synthetic tap water. *J Alloys Compd*, 2005, 391(1/2): 162