Ni含量对控轧控冷船舶用Nb-Ti微合金化NiCr钢组织和性能的影响

李振华[1] 王灏旭[1] 李 壮[1] 蔡一钦[1] 苗博闻[1] 宋殿福[1] 张 利[1] 李艳梅[2]
(1 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院,沈阳 110136;
2 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室,沈阳 110819)

摘 要 研究了0.31%Ni和0.88%Ni二种控轧控冷Nb-Ti微合金化NiCr钢的组织和性能。结果表明,船舶用钢控轧控冷获得粒状贝氏体、上贝氏体、针状铁素体、多边形铁素体及少量珠光体等组成的复合组织。控轧控冷造成铁素体晶粒尺寸细化,细小M-A岛增多。二种钢均获得较高的抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度,0.88Ni-0.32Cr钢性能优于0.31Ni-0.33Cr钢。船舶用钢-80 ℃试样纵向冲击功都在200 J以上,0.88Ni-0.32Cr钢甚至超过了300 J。该钢中最佳的Ni含量为0.88%Ni。由于控轧控冷造成了铁素体细晶强化、M-A岛复合强化、析出强化和位错强化,合金元素镍有效的提高了船舶钢的低温冲击韧性。

关键词 船舶用钢 控轧控冷 铁素体晶粒 M-A岛 析出强化

Influence of Nickel Content on Microstructure and Mechanical Properties of Controlled Rolling and Cooling Marine Nb-Ti Microalloyed NiCr Steel

Li Zhenhua[1], Wang Haoxu[1], Li Zhuang[1], Cai Yiqin[1], Miao Bowen[1], Song Dianfu[1], Zhang Li[2] and Li Yanmei[2]
(1 College of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136;
2 State Key Lab of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract The microstructure and mechanical properties of controlled rolling and controlled cooling 0.31% Ni and 0.88% Ni two Nb-Ti microalloyed NiCr steel are investigated. The results show that granular bainite, upper bainite, acicular ferrite, polygonal ferrite and a little of pearlite in marine steel are obtained by controlled rolling-cooling. Controlled rolling and controll cooling result in the refinement of the ferrite grain and the increase of M-A islands. Both steels have high tensile strength, yield strength, elongation and hardness, and the mechanical properties of 0.88Ni- 0.32Cr steel are higher than those of 0.31Ni- 0.33Cr steel. The impact energy of longitudinal direction all of the marine steels exceeds 200 J, and that of 0.88Ni-0.32Cr steel exceeds 300 J at -80 ℃. 0.88% Ni is optimum of containing nickel of steel. This is attributed to the ferrite grain refinement strengthening, M-A islands compound strengthening, precipitation strengthening and dislocation strengthening due to controlled rolling and controlled cooling. Nickel effectively improves low-temperature impact toughness of marine steel.

Material Index Marine Steel, Controlled Rolling-Cooling, Ferrite Grain, M-A Islands, Precipitation Strengthening

船舶用钢一般指的是用于制造船舶船体结构用的微合金钢。船舶用钢因其在水中使用及其构造等原因,要求钢材具有较高的强度、良好的塑性、超好的耐腐蚀和冲击韧性,以及较好的焊接性能[1-3]。

通过控制轧制、控制冷却工艺,可以使船用钢板具有良好的低温冲击韧性,满足大型船舶制造的特殊要求[4-6]。

1 实验材料及方法

实验所用材料为国内钢厂提供的两种热轧钢

表1 实验钢的化学成分/%

Table1 Chemical composition of test steel /%

实验钢	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb	Ti	Alt	N
0.31Ni-0.33Cr	0.050	0.21	1.50	0.004	0.003	0.31	0.33	0.21	0.020	0.014	0.02	≤0.004
0.88Ni-0.32Cr	0.045	0.20	1.53	0.003	0.002	0.88	0.32	0.21	0.020	0.014	0.02	≤0.004

通讯作者:李 壮,教授,沈阳航空航天大学材料科学与工程学院,沈阳110136。
E-mail : Lizhuang20047@163.com

材,化学成分如表 1 所示。

两种 90 mm 厚的热轧板在 Φ450 mm 轧机上经过如下工艺处理:加热温度为 1 200 ℃,压下规程为 90-72-57-45-36-29-25 mm,其中中间坯厚度 45 mm,未再结晶区最后 3 道次的道次压下率≥15%,总压下率为 0.812 5。第Ⅰ阶段开轧温度为 1 130 ℃,开轧的规格为 90 mm;第Ⅱ阶段开轧温度为 900 ℃,开轧的规格为 45 mm;终轧温度为 830 ℃,开冷温度为 790 ℃,返红温度为 390 ℃。

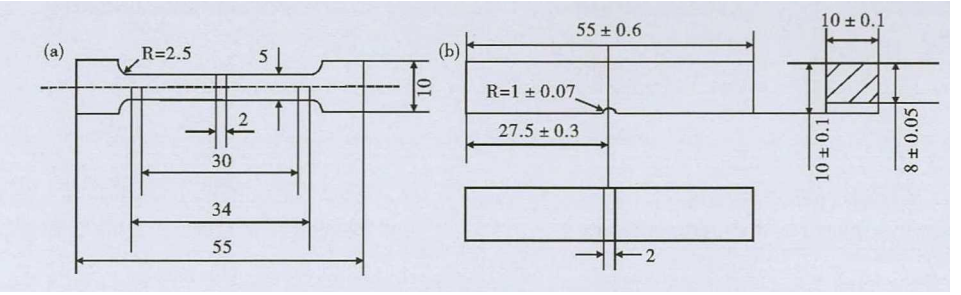

图 1　图 1 拉伸试样(a)和冲击试样(b)示意图

Fig. 1　Schematic illustration of tensile (a) and impact (b) specimens

将两种控轧控冷后的坯料使用线切割机分别机加工成金相试样、3 块拉伸试样以及分别与轧制方向呈平行、垂直、45 度角机加工成 3 块冲击试样。试样尺寸分别如图 1(a,b)所示(单位:mm)。将试样打磨、抛光。使用 4% 硝酸酒精以及 Lepera[7] 试剂对金相试样进行腐蚀,使用 HVS-50 维氏硬度机(加载载荷为 1 000 g)测量其硬度。在 5105-SANS 型微机控制电子万能试验机上按照 GB/T228-2002 进行拉伸试验,在 ZBC-300C 型摆锤冲击试验机上,对进行液氮浸泡达到 -80 ℃的冲击试样进行冲击实验。用 KYKY-2800B 型扫描电镜和 EM400T 型透射电镜(TEM)对试样拉断、冲断后断口及控轧控冷后的显微组织进行分析。

2　实验结果与分析

2.1　控轧控冷后显微组织

实验钢控轧控冷后,获得由粒状贝氏体、上贝氏体、针状铁素体、多边形铁素体及少量珠光体等组成的复合组织。图 2(a)组织中多边形铁素体尺寸为 12 ~ 15 μm,图 2(b)中铁素体晶粒尺寸相对减小,尺寸为 6 ~ 10 μm。经 Lepera 试剂腐蚀后组织中各种相呈现出不同的颜色(图 3),其中铁素体变为灰色,贝氏体、珠光体变为黑色,马氏体-奥氏体岛变为白色。图 3(b)中细小的白色的颗粒状马氏体-奥氏体(M-A)岛很多,均匀分布在组织之中,这种 M-A 岛尺寸细小,约为 2 ~ 5 μm。

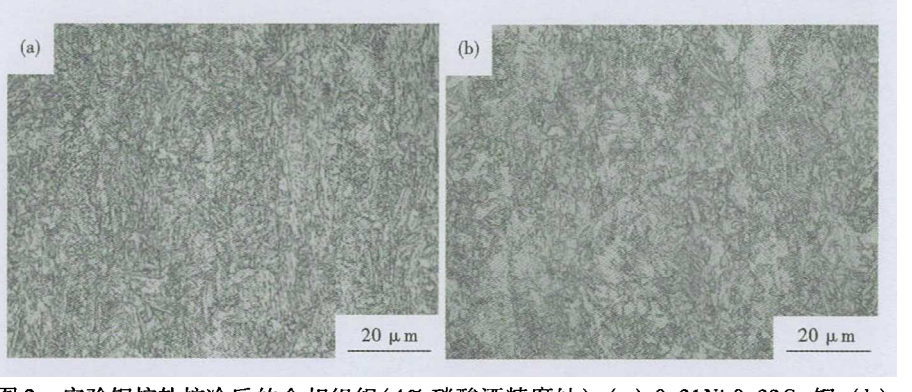

图 2　实验钢控轧控冷后的金相组织(4% 硝酸酒精腐蚀):(a) 0.31Ni-0.33Cr 钢;(b) 0.88Ni-0.32Cr 钢

Fig. 2　Optical micrographs of test steel after controlled rolling and cooling (4% nital etched):(a) 0.31Ni-0.33Cr steel;(b) 0.88Ni-0.32Cr steel

0.88Ni-0.32Cr 钢控轧控冷后的透射电镜组织如图 4 所示。图 4 中,M-A 岛在电镜下清晰可见(图 4a),铁素体内发现有大量的位错(图 4b),在铁素体内可以见

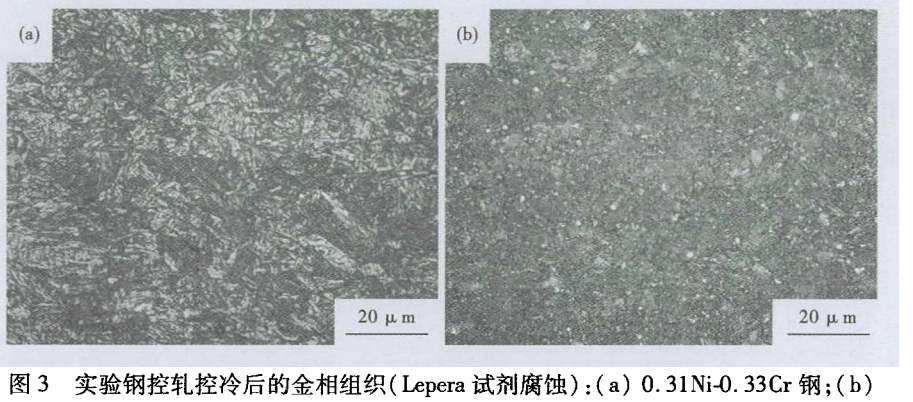

图 3　实验钢控轧控冷后的金相组织(Lepera 试剂腐蚀):(a) 0.31Ni-0.33Cr 钢;(b) 0.88Ni-0.32Cr 钢

Fig. 3　Optical micrographs of test steel after controlled rolling and cooling (Lepera etched):(a) 0.31Ni-0.33Cr steel;(b) 0.88Ni-0.32Cr steel

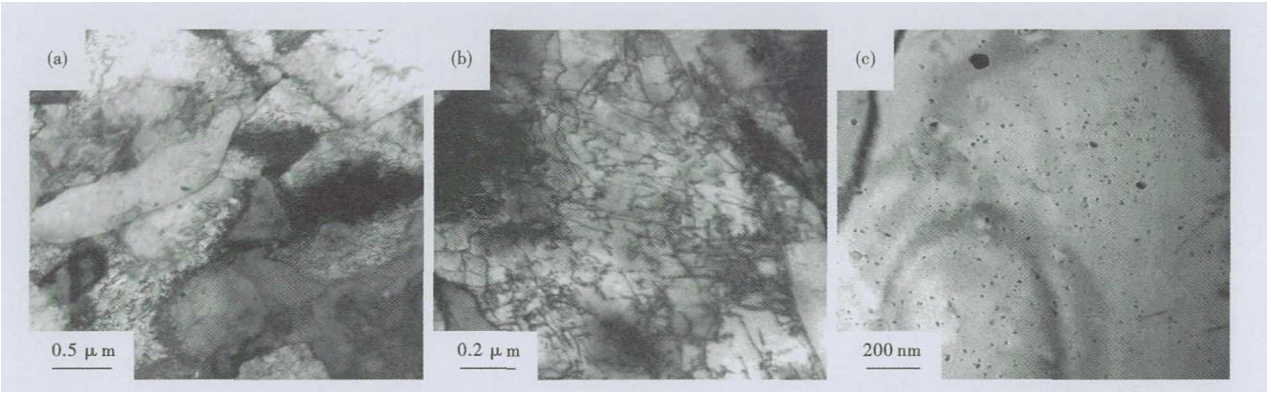

图 4 0.88Ni-0.32Cr 钢控轧控冷后的透镜组织(TEM):(a) M-A 岛;(b)位错;(c)沉淀相

Fig. 4 TEM Micrographs of 0.88Ni-0.32Cr steel after controlled rolling and cooling: (a) M-A island; (b) dislocation and (c) precipitated phase

表 2 实验钢拉伸后力学性能

Table 2 Mechanical properties of experimental steel

实验钢	Rm/MPa	$R_{0.2}$/MPa	A_{50}/%	硬度值(HV)	-80 ℃冲击吸收功/J		
					0°	45°	90°
0.31Ni-0.33Cr	738.96	641	9.60	255	238.74	188.23	101.16
0.88Ni-0.32Cr	889.56	648	13.37	364	309.87	235.66	223.80

到有沉淀相析出(图 4c)。

2.2 控轧控冷后硬度与力学性能

表 2 中,当含 Ni 量为 0.3%时,实验钢的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到 738.96 MPa、641M Pa 和9.60%的较高值,0.88Ni-0.32Cr 钢性能优于 0.31Ni-0.33Cr钢。随着 Ni 含量的增加,实验钢的强度升高,抗拉强度达到 889.56 MPa的较高值,伸长率则由9.60% 提高到 13.37%。两种钢在 -80 ℃具有较好的低温韧性,0.88Ni-0.32Cr 钢冲击吸收功高于 0.31Ni-0.33Cr 钢。

2.3 试样断口形貌

图 5 为两种钢拉伸后的断口形貌,两种钢的断口均为微孔聚合剪切断裂。0.88Ni-0.32Cr钢的韧窝明显的较多且较深。冲击试样断口形貌如图 6 所示。

本次冲击实验是在 -80 ℃下进行的,在此实验条件下,两种钢断口形貌都是大量呈卵形及抛物线形的韧窝,尤其是 0.88Ni-0.32Cr 钢中,呈现出大而深的韧窝,这表明两种钢在此低温条件下均具有很好的冲击韧性。

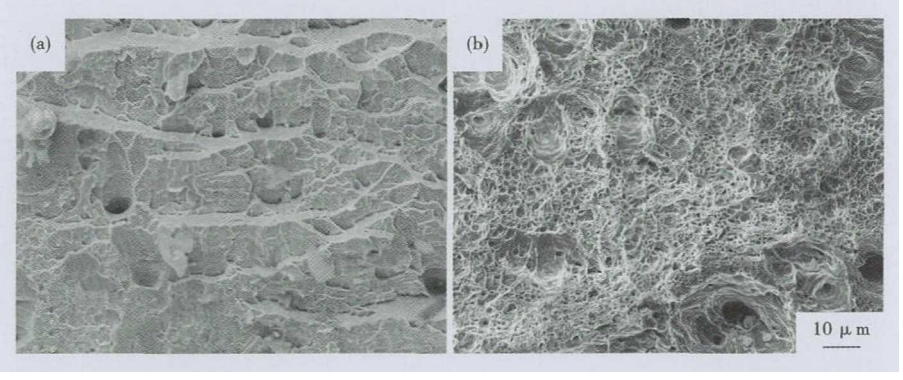

图 5 (a) 0.31Ni-0.33Cr 钢和(b) 0.88Ni-0.32Cr 钢拉伸断口形貌

Fig. 5 Tensile fracture morphologies of (a) 0.31Ni-0.33Cr steel and (b) 0.88Ni-0.32Cr steel

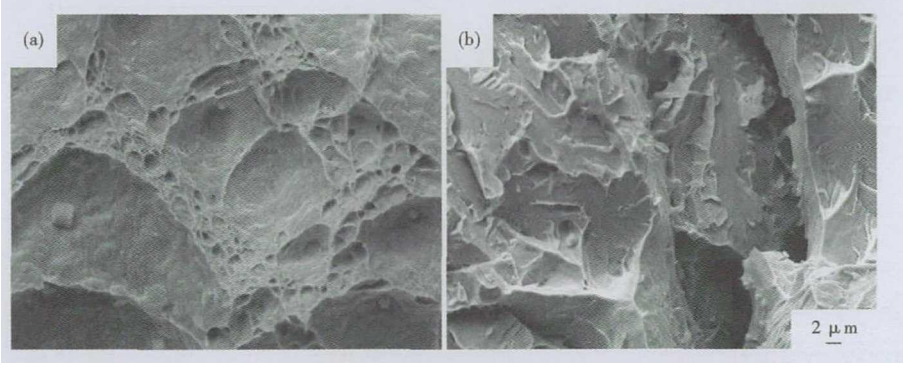

图 6 (a) 0.31Ni-0.33Cr 钢和(b) 0.88Ni-0.32Cr 钢冲击断口形貌

Fig. 6 Impact fracture morphologies of (a) 0.31Ni-0.33Cr steel and (b) 0.88Ni-0.32Cr steel

2.4　分析与讨论

0.31Ni-0.33Cr 钢、0.88Ni-0.32Cr 钢铁素体晶粒尺寸分别达 12 ~ 15 μm 和 6 ~ 10 μm。根据 Hall-Petch 关系式,晶粒尺寸的减小一般导致极限抗拉强度和屈服强度的增加。钢的伸长率亦随晶粒细化而增加。因此,0.88Ni-0.32Cr 钢获得了较高的强度、硬度和伸长率,而且 0.88Ni-0.32Cr 钢性能均高于 0.31Ni-0.33Cr 钢(表 2)。控轧控冷造成的晶粒细化,还会提高钢的冲击韧性,冲击断口的韧窝形貌,是钢具有很好韧性的反映。

由于实验钢采用控制轧制,碳在奥氏体/铁素体界面处富集,奥氏体侧碳含量的增加使其稳定性增加,在随后的控制冷却中,一部分奥氏体会转变成马氏体组织,同时也会有一定量的未转变的奥氏体残留下来,转变后的马氏体和未转变的奥氏体共同构成了细小弥散分布的 M-A 岛。M-A 岛具有复合强化作用,0.31Ni-0.33Cr 钢、0.88Ni-0.32Cr 钢的高强度、高硬度与此相关,0.88Ni-0.32Cr 钢中具有相对较多的 M-A 岛(图 3),由于 M-A 岛的强化作用,造成 0.88Ni-0.32Cr 钢的强度、硬度高于 0.31Ni-0.33Cr钢。尺寸细小、分布均匀的 M-A 岛能显著阻碍位错运动和疲劳裂纹扩展,提高钢的低温韧性。

本研究的船舶用钢含有 Cr 元素,在钢的铁素体中起着固溶强化作用。而 Cu、Nb、Ti 等合金元素,在实验钢轧制过程中会沉淀析出碳化物和碳氮化物(图 4c),细小的第二项粒子不仅细化了晶粒,而且由于其与位错的相互作用,阻碍位错运动,造成析出强化和细晶强化[8-9],钢的强度增加[10]。

实验钢控轧控冷后,铁素体和部分准多边形铁素体组织上存在有较高密度的位错(图 4b)。钢中高密度的位错相互缠结、塞积形成亚晶,起位错强化作用。由于钢中位错的强化作用,使两种钢的强度升高。

图 6 中,在扫描电镜下对冲击试样断口表面区域进行观察,两种钢在冲击断口附近处晶粒都发生了非常严重的塑性变形,晶粒被明显拉长并呈纤维状分布,较大程度的塑性变形是提高低温冲击韧性的关键所在。钢中含不同的 Ni 量,Ni 有效的提高了船舶用钢的冲击性能。

3　结论

(1)船舶用钢采用控轧控冷获得粒状贝氏体、上贝氏体、针状铁素体、多边形铁素体及少量珠光体等组成的复合组织。两种钢铁素体晶粒尺寸细化,达 6 ~ 10 μm。M-A 岛尺寸细小,为 2 ~ 5 μm。

(2)两种钢均获得较高的抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度,0.88Ni-0.32Cr 钢性能优于 0.31Ni-0.33Cr 钢。两种钢在 -80 ℃冲击断口呈现出大而深的韧窝,表明其具有较好的低温韧性,试样纵向冲击功都在 200 J 以上,0.88Ni-0.32Cr 钢甚至超过了 300 J。其纵向冲击性能优于横向冲击性能,0.88Ni-0.32Cr 钢冲击性能优于 0.31Ni-0.33Cr 钢。两种钢中最佳的 Ni 含量为 0.88% Ni。

(3)两种船舶用钢均获得良好的性能是由于控轧控冷造成了细晶强化、M-A 岛复合强化、析出强化和位错强化,合金元素镍有效的提高了实验钢的低温冲击韧性。

十三五国家重点研发计划项目(2017YFB0305301)
沈阳航空航天大学大学生创新创业训练计划项目(201910143485)资助

参考文献

[1]赵　捷.我国高品质船舶、海洋工程用钢研究进展[J].材料导报,2018,32(31):428-431.
[2]王红涛,田　勇,叶其斌,等.极寒环境下厚规格船舶用钢的发展[J].轧钢,2018;35(5):48-53.
[3]叶其斌,刘振宇,王国栋.极地船用低温钢发展[C].中国金属学会:第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集,北京,2015:1-7.
[4]袁　国,陈　冬,康　健,等.大型热连轧线基于超快速冷却的新一代控轧控冷技术开发与应用[J].钢铁研究学报,2019,31(2):150-158.
[5]陈华辉,梁　锐.控轧控冷对高强建筑用钢组织与性能的影响[J].金属热处理,2019,44(1):138-141.
[6]高吉祥,李烈军,温志红,等.厚规格高强高韧船用钢板的组织性能控制研究[J].工程技术研究,2017,1:10-13.
[7]Meyer M D, Vanderschueren D, Cooman B C D et al. The Influence of the Substitution of Si By Al on the Properties of Cold Rolled C-Mn-Si TRIP Steels [J], ISIJ International, 1999, 39(8): 813-822.
[8]Andrii G K, Olexandra O M, Chris R K, et al. Strengthening Mechanisms in Thermomechanically Processed NbTi-Microalloyed Steel [J]. Metall Mater Trans A, 2015(8), 46A, 3470-3480.
[9]Kim Y W, Song S W, Seo S J, et al. Development of Ti and Mo Microalloyed Hot-Rolled High Strength Sheet Steel By Controlling Thermomechanical Controlled Processing Schedule [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 565: 430-438.
[10]Xie Z J, Ma X P, Shang C J, et al. Nano-Sized precipitation and Properties of a Low Carbon Niobium Micro-Alloyed Bainitic Steel [J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 641(5): 37-44.

李振华(1998-),男,2021 年沈阳航空航天大学(本科)毕业,金属材料的组织与性能研究。
E-mail:923455371@qq.com

收稿日期:2019-12-27