

· XXXX ·



Nb微合金化对双金属带锯条背材X32钢带产品的组织性能影响

秦 洁, 张志波, 徐 梅, 李 聪

(山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心, 太原030003)

摘 要:在中碳Cr-Mo-Ni-V高合金成分体系基础上添加0.05% $w[\text{Nb}]$ 、经热轧后750℃退火、用户多轧程冷轧及1050℃淬火+500℃回火等加工热处理工序生产的一种Nb微合金化双金属带锯条背材X32钢带产品。对Nb微合金化双金属带锯条背材X32试验钢在不同工序状态下的力学性能进行了分析,并通过金相显微镜(OM)和透射电子显微镜(TEM)等方法对试验钢微观组织及碳化物析出相进行了表征分析。结果表明,X32钢带退火态组织主要为粒状珠光体,细小铁素体组织基体上弥散分布着 M_{23}C_6 碳化物(尺寸约30~100 nm);成品组织主要为回火屈氏体,板条内存在少量未溶的(Nb,M)C碳化物及以Cr、Fe为主的细针状合金偏聚区。采用Nb微合金化的双金属带锯条背材试验钢(X32-Nb)在热轧退火、冷轧半成品及其成品工序中,较X32钢的硬度、强度均略有升高,伸长率未明显降低,锯条成品空转试验寿命更长。X32-Nb试验钢成品硬度50.5HRC、强度1548 MPa、伸长率14.5%,锯条空转试验寿命70.5 h,满足用户使用要求。

关键词:Nb微合金化;带锯条背材;组织性能;碳化物析出

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260084 **中图分类号:**TF142.3

Effect of Nb Microalloying on the Microstructure and Properties of X32 Steel Strip for Backing Material of Bimetallic Band Saw Blade

Qin Jie, Zhang Zhibo, Xu Mei, Li Cong

(Technical Center of Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003, China)

Abstract: The Nb micro-alloyed X32 steel strip, used as the backing material for bimetallic band saw blades, is based on a medium-carbon Cr-Mo-Ni-V high-alloy composition system with the addition of 0.05% $w[\text{Nb}]$. The manufacturing route involves hot rolling and annealing at 750℃ carried out by TISCO, followed by multi-pass cold rolling, quenching at 1050℃, and tempering at 500℃ performed by the users. The mechanical properties of the Nb micro-alloyed X32 steel used as backing material for bimetallic band saw are analyzed under different processing states, and the microstructure and carbide precipitates of the experimental steel are characterized by optical microscopy (OM) and transmission electron microscopy (TEM). The results show that the microstructure of X32 steel strip in the annealed state is mainly granular pearlite, with a large number of M_{23}C_6 spherical carbides approximately 30 nm-100 nm dispersed in the fine ferrite matrix; the microstructure of the finished product is mainly tempered troostite, with a small amount of undissolved (Nb,M)C carbides and fine needle-like alloy segregation zones (primarily composed of Cr and Fe) distributed within the laths. The Nb micro-alloyed X32-Nb experimental steel used as backing material for bimetallic band saw exhibits higher hardness and strength at the hot-rolled and annealed, cold-rolled semi-finished, and finished processes compared to X32 steel, without obvious deterioration in elongation. Moreover, the finished saw blade demonstrates a longer service life in the idling test. The finished X32-Nb experimental steel saw blade exhibited a hardness of 50.5HRC, a tensile strength of 1548 MPa, an elongation of 14.5%, and an idling-test service life of 70.5 h, thereby meeting the application requirements of users.

Key Words: Nb Microalloying; Band Saw Backing Material; Microstructure and Properties; Carbide Precipitation

双金属带锯条主要用于各种金属、合金钢、贵重木材等高硬度材料的连续切削加工,广泛应用于机械制造、汽车船舶、航空航天等领域^[1]。为匹配双金属带锯条高速钢齿材的成品热处理工艺,背材需经热轧、冷轧、退火及高温淬火回火等多道加工工序

后,仍具有高硬度、高强度。

本研究中X32试验钢作为M42(高速钢)双金属带锯条的背部材料,在中碳Cr-Mo-Ni-V高合金成分设计基础上,采用Nb微合金化并结合热轧退火、冷轧、成品淬火回火等过程工序,产生高密度位错、晶粒

作者简介: 秦 洁(1983—),女,硕士,高级工程师; **E-mail:** qinjie22@163.com; **收稿日期:** 2026-06-10

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

细化及弥散强化^[2-4]效果,使锯条背材成品具有高硬度、强度及良好的抗热疲劳性能^[5-6],并对多工序状态下X32的力学性能、微观组织及其析出相进行了检验分析。

1 试验材料及方法

双金属带锯条背材X32经太钢180 t转炉+炉外精炼+热连轧轧制成3.5 mm厚钢卷退火后,再经用户冷轧成1.13 mm薄规格钢带,并与齿材M42焊接后经高温淬火+回火等加工热处理工序,最终制成双金属带锯条成品^[7-8]。背材成品硬度约49~52HRC,抗拉强度>1 400 MPa。

试验钢X32-Nb是在X32中添加0.05%w[Nb],其熔炼成分见表1。

分别对试验钢带的热轧退火、冷轧及成品状态进行取样检验,按GB/T230.1—2018在HRB和HRC试验机上进行硬度测试。沿轧向将试样磨平、抛光,经4%硝酸酒精侵蚀后置于Zeiss Axiovert 40MAT光学显微镜和LEO-1450型扫描电镜下观察。根据GB/T 228—2002沿钢板轧向切取板拉伸试样,在CMT4105型万能拉伸试验机上以1 mm/min的速度进行拉伸实验。用线切割机从试验钢X32-Nb成品上切取薄片,磨到50 μm厚度,冲成直径为φ3 mm的圆片,然后电解双喷至穿孔,电解液为6%的高氯酸酒精溶液,双喷电压为28V,最后在JEM-2100TEM透射电镜200kV条件下分析试验钢中精细结构,结合THERMO-CALC热力学模拟软件分析碳化物析出相类型。

2 试验结果

2.1 力学性能

2.1.1 热轧退火

对比分析厚度为3.5 mm的热轧钢卷X32和X32-Nb试验钢在热轧退火后的性能,结果见表2。

试验钢热轧钢卷经750 °C退火后,X32-Nb试验钢较X32硬度值提高2HRB,屈服、抗拉强度分别提高58、64 MPa,伸长率未明显改变。

2.1.2 冷轧半成品

表3是试验钢X32和X32-Nb热轧退火卷经冷轧成厚度为1.3 mm薄钢带的力学性能及其洛氏硬度。

热轧退火卷经冷轧后,试验钢屈服强度、抗拉强度及硬度均有显著提高,伸长率降低。

X32-Nb较X32试验钢具有更高的冷轧态硬度、强度,冷轧后硬度提高2.5HRC,强度提高70 MPa左右,伸长率相差不大。

2.1.3 热处理成品

对比分析X32和X32-Nb试验钢冷轧后经1 050 °C高温淬火、500 °C回火后的成品力学性能及锯条空转试验寿命,结果见表4。

X32、X32-Nb试验钢经高温淬、回火后成品强度、硬度显著提高,抗拉强度均>1 400 MPa、硬度分别为50、50.5HRC,伸长率良好。成品空转试验平均寿命分别为66、70.5 h。

图1为X32、X32-Nb试验钢分别在热轧退火、冷轧半成品及热处理成品状态下的抗拉强度值。

通过在热轧、冷轧及各工序状态的试验钢X32-Nb、X32力学性能比较,可以看出:添加0.05%w[Nb]微合金化的试验钢X32-Nb在热轧、冷轧及成品工序状态均表现出更高的硬度、强度及空转试验寿命。

2.2 金相组织

试验钢X32-Nb的热轧退火态金相组织形貌如图2所示。从图2中可以看出,其微观组织为粒状珠光体组织,在细小铁素体基本上弥散分布着大量点、球状碳化物。

如图2(a)所示,试验钢X32-Nb经热轧、卷取后冷却组织为片层状铁素体+珠光体组织;如图2(b)所示,经750 °C退火后珠光体组织球化均匀,强度、硬度会有所降低,塑性提高,为冷轧提供良好的加工条件^[9]。

试验钢X32-Nb的冷轧、退火态金相组织形貌如图3所示。从图3(a)可以看出,试验钢X32-Nb冷轧半成品组织为索氏体组织,晶粒沿轧制方向被拉长、产生加工硬化,使强度、硬度上升、塑性下降。

表1 试验钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of the experimental steels									%
项目	C	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Nb
标准	0.30~0.38	0.20~0.35	≤0.009	≤0.005	3.2~4.2	0.90~1.50	0.60~1.00	0.32~0.42	≤0.10
X32	0.32	0.26	0.007	0.003	3.85	1.30	0.75	0.35	—
X32-Nb	0.32	0.26	0.007	0.003	3.85	1.30	0.75	0.35	0.05

表2 试验钢热轧退火态力学性能

Table 2 Mechanical properties of the experimental steels in the hot-rolled and annealed state

试验钢种	屈服强度 $R_{p0.2}/$ MPa	抗拉强度 $R_m/$ MPa	伸长率 A/%	洛氏硬度 (HRB)
X32	495	641	22	92
X32-Nb	553	705	21.5	94

表3 试验钢的冷轧半成品力学性能

Table 3 Mechanical properties of the experimental steels in the cold-rolled semi-finished state

试验钢种	屈服强度 $R_{p0.2}/$ MPa	抗拉强度 $R_m/$ MPa	伸长率 A/%	洛氏硬度 (HRC)
X32	759	801	8.0	23.0
X32-Nb	824	875	7.5	25.5

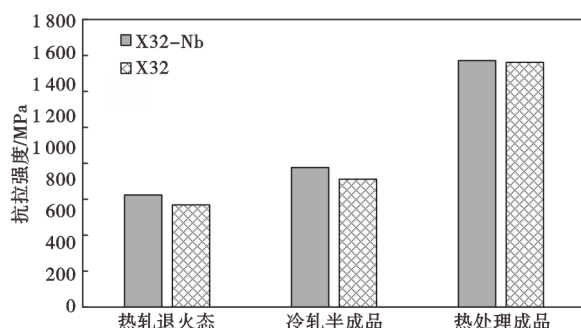


图1 试验钢X32、X32-Nb各工序状态的抗拉强度

Fig. 1 Tensile strength of experimental steels at various processing stages

从图3(b)可以看出,冷轧经中间退火可消除加工硬

化,形成更为细小的晶粒组织,使塑性得到恢复,兼具高强韧性及良好的加工性能。

试验钢X32-Nb的热处理成品金相组织形貌如图4所示。从图4(a)可以看出,经1 050 °C高温淬火^[10]后组织为马氏体及少量残余奥氏体,碳化物几乎完全回溶;如图4(b)中所示,试验钢X32-Nb经500 °C中温回火后组织向回火屈氏体转变^[11]。热处理后成品具有很高的硬度、强度,塑韧性良好。

2.3 碳化物析出相分析

通过Thermo-calc热力学计算软件,根据试验钢X32-Nb化学成分模拟计算钢液在平衡凝固过程中可能生成的平衡相和各相组成随温度的变化曲线,如图5所示。

结果表明:在 A_1 点以下平衡相主要由铁素体、 M_6C 、 $M_{23}C_6$ 类型碳化物组成。当温度降低至 γ -Fe $\rightarrow$ α -Fe+P转变区间,开始从奥氏体中析出 M_7C_3 型碳化物,在700 °C左右达到峰值,随后发生 M_7C_3 型碳化物向 $M_{23}C_6$ 型碳化物转变,500 °C时 $M_{23}C_6$ 质量分数达到峰值约0.06,随着时间延长开始部分向 M_6C 型碳化物转变。

图6为试验钢X32-Nb退火态的主要碳化物析出相的TEM透射电镜图。退火态透射电镜组织以大量细小铁素体基体组织、晶内有大量位错缠结^[12],如图6(a)(b)所示,基体上弥散着点、球状碳化物6(c)及6(d)碳化物电子衍射图- $M_{23}C_6$ 。

表4 试验钢的成品热处理力学性能和空转试验寿命

Table 4 Mechanical properties and idling-test service life of the finished experimental steels after heat treatment

项目	屈服强度 $R_{p0.2}/$ MPa	抗拉强度 $R_m/$ MPa	伸长率 A/%	硬度(HRC)	空转试验寿命/h
标准	$\geq 1\ 100$	$\geq 1\ 400$	≥ 12	≥ 48	≥ 50
X32	1 172	1 536	14.5	50.0	66.0
X32-Nb	1 195	1 548	14.5	50.5	70.5

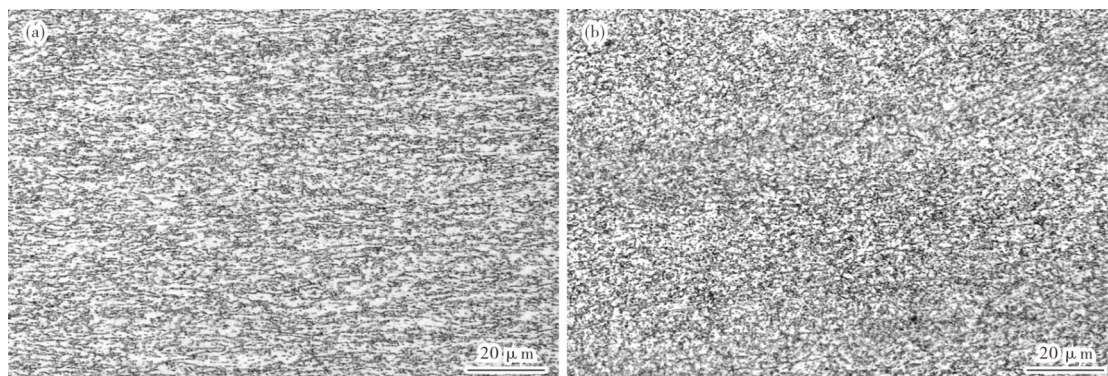


图2 X32-Nb试验钢金相组织照片:(a)热轧,(b)退火态

Fig. 2 Microstructure of the X32-Nb experimental steel: (a) hot-rolled state, (b) annealed state

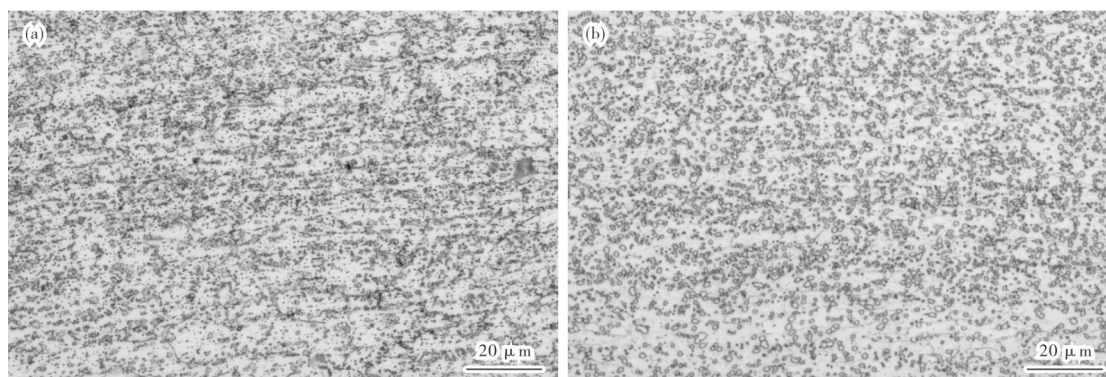


图3 X32-Nb试验钢金相组织照片: (a) 冷轧态, (b) 退火态

Fig. 3 Microstructure of the X32-Nb experimental steel: (a) cold-rolled state, (b) annealed state

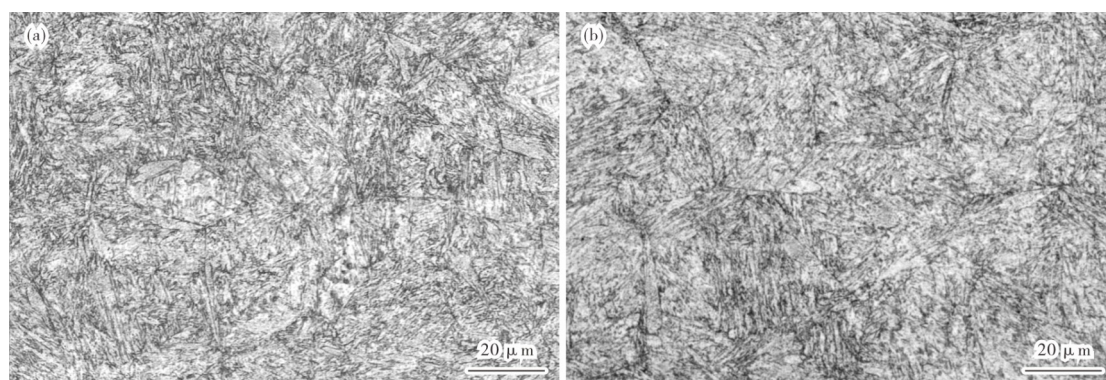


图4 X32-Nb试验钢成品金相组织照片: (a) 淬火态, (b) 回火态

Fig. 4 Microstructure of the finished X32-Nb experimental steel: (a) quenched state, (b) tempered state

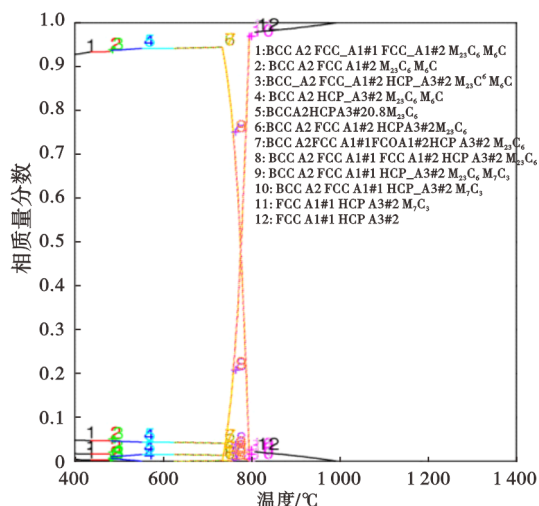


图5 试验钢X32-Nb热力学计算平衡相图

Fig. 5 Thermodynamically calculated equilibrium phase diagram of the X32-Nb experimental steel

从试验钢退火态组织的碳化物析出相形貌可以看出,钢液在非平衡状态下碳及合金元素来不及充分扩散,在 α -Fe铁素体组织基体上弥散分布着大量纳米尺寸为30~100 nm的颗粒状 $M_{23}C_6$ 碳化物形

态析出。

图7为试验钢X32-Nb经高温淬火+回火后成品组织及析出相的透射电镜照片。

如图7(a)所示,X32-Nb试验钢经冷轧、淬火后,其基体组织为细小的条片状马氏体,电子衍射图如图7(d)所示,基体上分布着少量残余奥氏体。图7(b)中成品经淬、回火后组织由回火马氏体向屈氏体转变、位错密度增加;板条内仍存在少量未溶MC碳化物^[13]析出及大量细针状合金偏聚区。图6(c)中淬火马氏体板条内均匀分布着与基体界面模糊的细针状黑色物,其能谱分析为Cr、Fe元素的偏聚区。

通过热力学软件计算,试验钢X32-Nb成品中的Nb元素主要存在于 $M_{23}C_6$ 碳化物中,由Cr、Mo、Fe、V、Ni及微量Nb等合金元素组成。

图8为试验钢X32-Nb中含Nb析出相的透射电镜照片及选区电子衍射图,析出相为面心立方结构的含Nb的MC型碳化物。

试验钢X32-Nb成品中存在少量未溶的含(Nb,M)C的碳化物。通过透射电镜图片8(b)分析

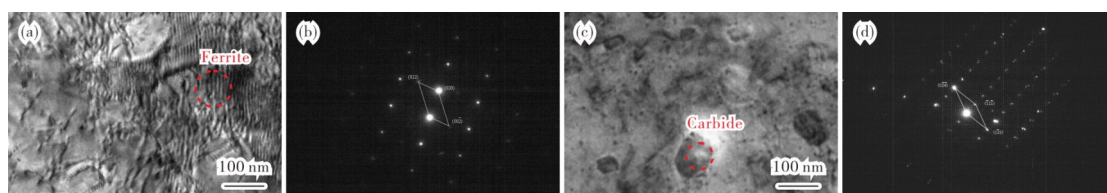


图6 X32-Nb试验钢退火态透射电镜照片及选区电子衍射图:(a)退火态基体组织,(b)基体电子衍射图- α -Fe,(c)球状碳化物,(d)碳化物电子衍射图- $M_{23}C_6$

Fig. 6 TEM images and selected area electron diffraction patterns of the X32-Nb experimental steel in the annealed state: (a) matrix microstructure of X32-Nb in the annealed state, (b) electron diffraction pattern of the matrix- α -Fe, (c) spherical carbide, (d) electron diffraction pattern of the carbide- $M_{23}C_6$

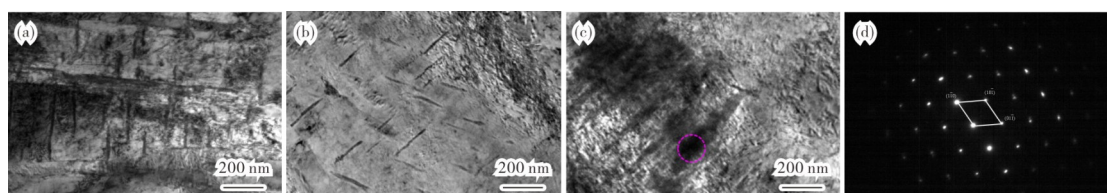


图7 X32-Nb成品淬回火组织透射电镜照片及选区电子衍射图:(a)成品淬火组织,(b)成品回火后组织,(c)马氏体基体组织,(d)基体电子衍射图- α -Fe

Fig. 7 TEM images and selected area electron diffraction patterns of the finished X32-Nb experimental steel in the quenched and tempered state: (a) microstructure of X32-Nb in the quenched state, (b) microstructure of X32-Nb in the tempered state, (c) martensitic matrix structure of X32-Nb, (d) electron diffraction pattern of the matrix- α -Fe

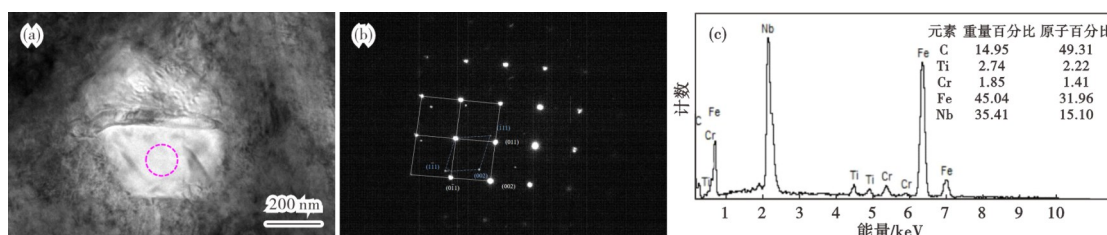


图8 Nb析出相透射电镜照片及选区电子衍射图:(a)含Nb碳化物,(b)选区电子衍射图-MC碳化物,(c)析出相EDS分析

Fig. 8 TEM images and selected area electron diffraction patterns of Nb precipitates in the X32-Nb steel: (a) Nb-containing carbides, (b) selected area electron diffraction pattern-MC carbide, (c) EDS analysis of Nb precipitates

表明,含(Nb,M)C型碳化物析出具有面心立方结构,与 α -Fe铁素体基体之间遵循 Baker-Nutting 关系, $[100]_{\alpha\text{-Fe}} // [110]_{\text{NbC}}$ 。由于NbC和 α -Fe的晶格常数差异很小,这种晶体学位向关系有助于降低界面能并增强钉扎效果,有效抑制奥氏体晶粒的长大,细化组织。试验钢X32-Nb较X32在热轧退火、冷轧及成品各工序状态均具有更高的硬度及强度。

成品实际服役过程中,回火屈氏体板条内的细针状合金偏聚区为更多的 $M_{23}C_6$ 碳化物的形成提供了化学驱动力和析出位置,抗回火软化能力强,具有优良的抗高温疲劳性能。

3 讨论

试验钢X32-Nb较X32在热轧退火、冷轧及淬回火工序状态下的室温硬度、强度均有所提高,这主

要是由于在轧制过程中,通过部分固溶的Nb原子的溶质拖拽效应抑制形变奥氏体的再结晶及纳米级NbC碳化物析出对奥氏体晶界的钉扎作用,位错密度升高、位错滑移阻力增加,使后续 $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ 相变时提供了更多的形核点位,从而提高了材料的强度和硬度^[14-15]。

在退火过程中,试验钢X32-Nb中的纳米级NbC碳化物析出仍在铁素体再结晶过程中发挥作用^[16],钉扎再结晶晶界,抑制铁素体晶粒及碳化物过度长大,从而获得更细小、均匀的珠光体组织,从而使冷轧退火后仍保持较高的硬度、强度,且塑性损失相对较小。

在成品高温淬、回火阶段,试验钢X32-Nb经完全奥氏体化淬火后获得板条马氏体组织,少量以未溶NbC析出存在。淬火后X32-Nb钢中的Nb部分重

新回溶,可略微抑制奥氏体晶粒在高温阶段的异常长大。在回火过程中,马氏体板条内的Nb随Cr、Fe等合金元素以 $M_{23}C_6$ 纳米级碳化物形式弥散析出^[17-18],500℃左右 $M_{23}C_6$ 质量分数达到峰值约0.06,成品硬度和强度升高。

4 结论

1)添加0.05%w[Nb]微合金化的试验钢X32-Nb较X32经热轧退火、冷轧后硬度、强度均有所提高,最终淬回火后成品硬度约50.5HRC,抗拉强度1548 MPa,伸长率14.5%,锯条空转试验寿命平均70.5 h,满足成品使用性能。

2)X32-Nb试验钢热轧退火后,在细小的铁素体

基体上弥散分布着大量颗粒状、短棒状碳化物,随退火时间延长 $M_{23}C_6$ 会逐渐向 M_6C 碳化物转变。试验钢X32-Nb经冷轧后晶粒组织更加细小、位错密度增加,Nb元素可抑制退火晶粒长大、细化组织,碳化物球化弥散。

3)X32-Nb试验钢经高温淬火+回火后,成品以回火屈氏体为主,合金元素几乎完全回溶,仅板条内存在少量细针状合金偏聚区(Cr、Fe、C)及(Nb,M)C碳化物析出。NbC碳化物析出与 α -Fe铁素体基体之间遵循Baker-Nutting关系,有助于降低界面能并增强钉扎效果,抑制晶粒粗化、细化组织。成品具有更高的硬度及强度,抗回火软化能力强,具有高抗热疲劳性能。

参考文献

- [1] 杨世伟,于大川,席慧智.双金属机锯条热处理工艺参数的探讨[J].应用科技,1990(1):45-51.
- [2] 李明.Nb在中碳Cr-Mo-V-Nb调质钢中的组织细化和强韧化作用[D].秦皇岛:燕山大学,2014.
- [3] 宋少威,董明振,尉文超,等.17Cr2Ni2MoVNb齿轮钢中NbC析出相对晶粒长大的影响[J].金属热处理,2023,48(1):122-127.
- [4] 董常福,袁清,徐光,等.Nb对热轧低碳贝氏体钢组织与性能的影响[J].涟钢科技与管理,2020(4):12-15.
- [5] 胡俊杰,任英,张立峰.铌微合金化高强钢中NbC析出相的生成机理[J].工程科学学报,2023,45(10):1729-1739.
- [6] 姚远超.30Cr4MoNiV超高强度钢热变形行为及热处理工艺研究[D].长沙:湖南大学,2021.
- [7] Singh P P, Muruges Kumar R, Mula S. Synergistic effects of hot rolling and heat treatments on microstructural characteristics and achieving ultra-high strength in a V-Nb microalloyed steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2025, 56(10): 4524-4542.
- [8] 匡旭光,杨俊.热处理工艺对硬质合金带锯条背材RM80钢组织和性能的影响[J].特殊钢,2018,39(6):54-57.
- [9] 黄爱军,潘小成,王洪斌.X32冷轧薄板相变温度和退火组织研究[J].轧钢,2018,35(2):64-66.
- [10] 张永,马党参,刘建华,等.Nb含量对W3Mo2Cr4V(Nb)高速钢组织和力学性能的影响[J].特殊钢,2007,28(3):44-46.
- [11] 刘博文,路新,皮自强,等.M42热处理中淬火温度对碳化物转变机制的影响[J].稀有金属材料与工程,2017,46(3):829-834.
- [12] 李天生,徐慧,刘新彬.热处理工艺对微Nb高Mo型H13钢组织与性能的影响[J].金属热处理,2019,44(7):39-45.
- [13] Li X L, Deng X T, Lei C S, et al. New orientation relationship with low interfacial energy in MC/ferrite system observed in Nb-Ti bearing steel during isothermal quenching process [J]. Scripta Materialia, 2019, 163: 101-106.
- [14] Azevedo de Araujo A L. Effects of microalloying on hot-rolled and cold-rolled Q&P steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2017(707): 225-235.
- [15] 李万明,伍思源.工模具钢中碳化物控制[J].材料与冶金学报,2025,24(4):309-321+331.
- [16] Zhao T, Hao X H, Wang Y F, et al. Influence of thermo-mechanical process and Nb-V microalloying on microstructure and mechanical properties of Fe-Mn-Al-C austenitic steel [J]. Coatings, 2023, 13(9): 1513.
- [17] 柳艳,李贵茂,王瑞,等.回火工艺对M42-X32双金属带锯条组织及性能的影响[J].热加工工艺,2019,48(10):217-219+223.
- [18] Craven A J, He K, Garvie L A J, et al. Complex heterogeneous precipitation in titanium-niobium microalloyed Al-killed HSLA steels—II. Non-titanium based particles [J]. Acta Materialia, 2000,48(15): 3869-3878.