



Si对缆索钢丝绳用热轧盘条组织和力学性能的影响

李建平¹, 唐正友¹, 张翰文¹, 邓通武²

(1 东北大学材料科学与工程学院, 沈阳 110006; 2 攀钢集团研究院有限公司, 攀枝花 617000)

摘要: 利用扫描电镜和能谱(EBSD)仪器对两种不同Si含量的热轧盘条的横截面和纵截面的组织形貌进行观测,并用万能试验机测试热轧盘条的拉伸性能,结果表明:随着Si含量的增加,珠光体转变的过冷度增加,热轧盘条的珠光体团尺寸和珠光体片间距减小。Si元素使Mn元素在渗碳体中偏聚,增加了渗碳体的稳定性,减小了渗碳体片层的球化倾向。Si元素使盘条横、纵截面珠光体的织构强度减弱,珠光体组织更加均匀,取向更加随机。Si元素能大幅度提升热轧盘条和成品钢丝的强度,小幅度提升塑性。低Si盘条的抗拉强度为1 134 MPa,均匀伸长率为7.1%;高Si盘条的抗拉强度为1 263 MPa,均匀伸长率为7.3%。低Si钢丝的抗拉强度为1 937 MPa,均匀伸长率为2.2%;高Si钢丝的抗拉强度为2 106 MPa,均匀伸长率为2.3%。

关键词: 缆索钢丝绳; 热轧盘条; Si元素; 珠光体; 组织性能

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00029 **中图分类号:**TG142. 1

The Influence of Si on Microstructure and Mechanical Properties of Hot-Rolled Wire Rods for Cable Steel Wire Ropes

Li Jianping¹, Tang Zhengyou¹, Zhang Hanwen¹, Deng Tongwu²

(1 School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006, China;
2 Research Institute of Panzhihua Iron and Steel Group Co., Ltd., Panzhihua 617000, China)

Abstract: The cross section and longitudinal section microstructure morphology of two different Si contents hot-rolled wire rods were observed using scanning electron microscopy and energy spectrum (EBSD) instruments. The tensile properties of the hot-rolled wire rods were tested using a universal testing machine. The results show that with the increase of Si content, the undercooling of pearlite transformation increases, and the size of pearlite colony and pearlite interlamellar spacing in hot-rolled wire rods decrease. The Si element causes the Mn element to segregate in the cementite, increasing its stability and reducing the spheroidization of the cementite lamellae. The Si element weakens the texture strength of the pearlite in the transverse and longitudinal sections of the wire rod, leading the pearlite structure more uniform and the orientation more random. The Si element can greatly improve the strength of hot-rolled wire rods and finished steel wires, while slightly improving plasticity. The tensile strength of low Si wire rod is 1 134 MPa, and the uniform elongation is 7.1%; The tensile strength of high Si wire rod is 1 263 MPa, and the uniform elongation is 7.3%. The tensile strength of the low Si wire is 1 937 MPa, and the uniform elongation is 2.2%; The tensile strength of the high Si wire is 2 106 MPa, and the uniform elongation is 2.3%.

Key Words: Cable Steel Wire Rope; Hot-Rolled Wire Rod; Si Element; Pearlite; Microstructure and Mechanical Properties

随着全球经济的发展,世界各国对海洋资源的开发也越来越重视。海洋工程装备是实施海洋战略、建设海洋强国的物质和技术基础,也是建设制造强国的重要支撑^[1]。缆索钢丝是实施大型海洋工程的重要保障。国标 GB/T 20067—2017,《粗直径钢丝绳》规定,国内钢丝绳中的钢丝抗拉强度级别最高为1 960 MPa。目前,国内生产此强度级别的钢丝较为困难,钢丝存在强塑性匹配不良、组织均匀

性差等多方面问题。

缆索钢钢丝由热轧盘条冷拔制备,热轧盘条的组织性能对最终钢丝的组织性能有着至关重要的作用,为开发出更高强度级别的高强度缆索钢丝,必须对热轧盘条的组织性能进行调控。Si作为一种钢材中常添加的元素,能提升盘条的力学性能^[2],在盘条生产中有巨大的应用价值。本实验从组织均匀性和片层间距大小等多个角度出发,研究了Si元

素对缆索高强钢丝绳用热轧盘条组织性能的影响,并成功制备了 2 060 MPa 级别高强钢丝,为 2 060 MPa 级别以及更高级别的高强钢丝开发提供理论基础。

1 实验材料与方法

实验使用的坯料为攀钢炼制的 20 cm×20 cm×30 cm 的方坯,经过自由锻造机锻造成直径为 $\phi 27.5$ mm 的圆棒,之后利用实验室线材轧机,经过 9 道次轧制成直径为 $\phi 12.5$ mm 的盘条。开轧温度为 1 150 °C,终轧温度为 950 °C,吐丝温度为 920 °C,热轧后风冷至室温。盘条索氏体化处理后经 9 道次拉拔成直径为 $\phi 5.05$ mm 的钢丝。试验钢成分见表 1,试验钢 1 (低 Si) 和试验钢 2 (高 Si) 除了 Si 元素含量不同外,其他元素含量都基本相同。

表 1 试验钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of test steel %							
试验钢	C	Si	Mn	Cr	V	S	P
1	0.88	0.21	0.62	0.22	<0.005	<0.005	<0.005
2	0.88	0.99	0.61	0.21	<0.005	<0.005	<0.005

利用 Gleeble3800 热模拟试验机分别对两种成分试验钢的动态 CCT 曲线进行测试。分别在两种成分盘条的横截面和纵截面中心区域取一个 6 mm×6 mm×2 mm 的试样,如图 1 所示。横截面(Transverse Section)垂直于轧制方向,以下简称为 TS,纵截面(Longitudinal Section)平行于轧制方向,以下简称为 LS。将试样研磨和机械抛光之后,用体积浓度为 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀,通过扫描电子显微镜(SEM)观察微观结构。然后将试样经过机械研磨后在温度为 -30 °C,体积浓度为 6.6% 的高氯酸酒精溶液中进行电解抛光,并在 EBSD 仪器上观察晶粒取向。试验钢的拉伸性能使用万能试验机进行测试,试样尺寸根据国标 GB/T228.1—2021 设计,如图 2 所示。

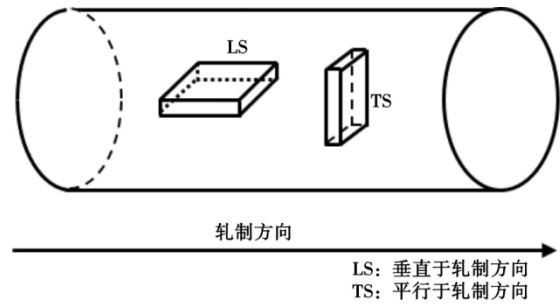


图 1 试验钢的取样图
Fig. 1 Sampling diagram of test steel

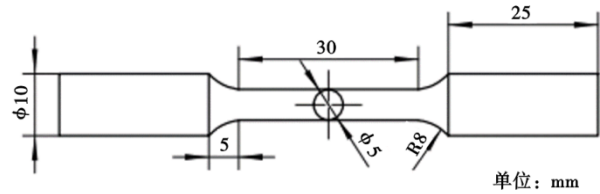


图 2 拉伸试样示意图
Fig. 2 Schematic diagram of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 Si 元素对缆索钢丝用热轧盘条组织的影响

在扫描电镜下观测试样的组织形貌,如图 3 所示,图 3 中(a)、(b)、(c)、(d)分别为试样 1 和试样 2 的横截面和纵截面的组织形貌。从图 3 中可以看出,低 Si 试样的横、纵截面和高 Si 试样的横、纵截面都是完全的珠光体组织,珠光体团界限清晰,铁素体和渗碳体片层明显。可以明显看出,高 Si 试样的横、纵截面的珠光体团较低 Si 试样的更小,珠光体组织也更细。通过测量,低 Si 试样横截面珠光体片间距平均为 182.9 nm,纵截面珠光体片间距平均为 161.4 nm;高 Si 试样横截面珠光体片间距平均为 137.3 nm,纵截面珠光体片间距为 132.6 nm。在两个截面上,高 Si 试样的珠光体片间距都要小于低 Si 试样。

珠光体转变是一种典型的扩散型相变,两种成分试验钢的动态 CCT 曲线如图 4 所示(图 4 中 P 为珠

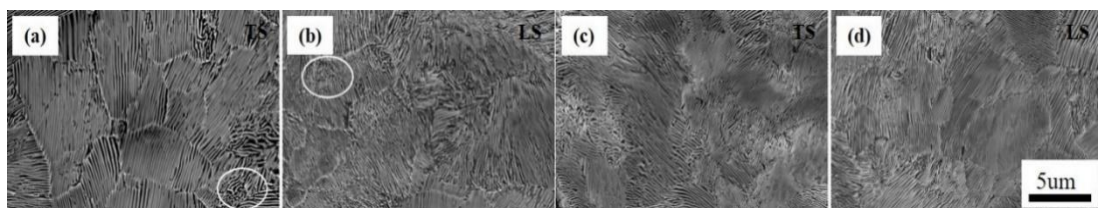


图 3 热轧盘条的 SEM 图像:(a)低 Si(TS), (b)低 Si(LS), (c)高 Si(TS), (d)高 Si(LS)
Fig. 3 SEM images of hot-rolled wire rods : (a) low Si(TS), (b) low Si(LS), (c) high Si(TS), (d) high Si(LS)

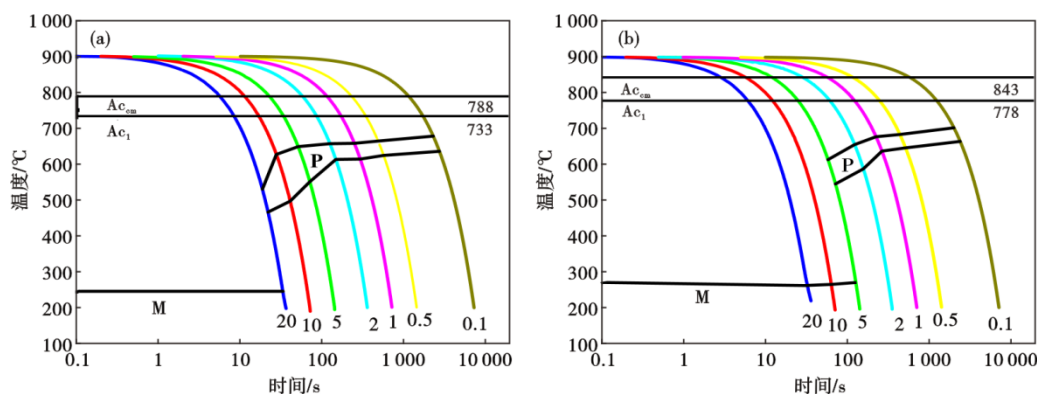


图4 试验钢的动态CCT曲线:(a)低Si,(b)高Si

Fig. 4 Dynamic CCT curve of test steel : (a) low Si, (b) high Si

光体, M为马氏体)。从CCT曲线可以看出, Si含量的增加, 提高了试验钢的 Ac_{cm} 和 Ac_1 温度 (Ac_{cm} 为加热时二次渗碳体全部溶入奥氏体的终了温度; Ac_1 为加热时珠光体向奥氏体转变的开始温度)^[3], 同时使C曲线略微的向右下方移动。这是由于Si元素作为非碳化物形成元素, 具有阻碍渗碳体析出的作用, 能够延迟珠光体转变^[4]。因此, 两种成分试样钢以相同速度冷却时, 高Si试样发生珠光体转变时具有更大的过冷度, 根据经验公式^[5]:

$$S_0 = \frac{8.02}{\Delta T} \times 10^3 \quad (1)$$

式中, S_0 为珠光体片间距 (nm), ΔT 为过冷度 ($^{\circ}\text{C}$), 珠光体片间距和过冷度成反比, 因此, 高Si试样的珠光体片层更细小。

另外在图3(a)、(b)中白圈附近, 可以明显看出, 低Si试样的横、纵截面上都出现了渗碳体球化现象, 而在高Si试样的横、纵截面都未出现明显的球化现象。这是由于Si元素作为非碳化物形成元素, 能促进Mn元素向渗碳体相分配^[6], 增加渗碳体的稳定性, 降低珠光体中的渗碳体片层在高温时的球化倾向, 同时Si原子在两相界面附近, 亦能提高珠光体的稳定性, 因此, Si元素能够有效增加珠光体的稳定性, 减少了渗碳体片层的球化现象。

高低Si试样两个截面的反极图如图5所示, 其中晶界是由大于 15° 的取向差确定的。通过反极图能够更加直观的看出珠光体团的大小, 利用AZtec软件, 统计高低Si两种成分两个观察方向试样的珠光体团的尺寸, 见表2。高Si试样的横截面和纵截面的平均珠光体团尺寸和最大珠光体团尺寸均小于低Si试样, 说明Si元素能够通过相同的变形量更好地细化珠光体晶粒尺寸。这主要是由于Si元素对热轧盘条再结晶过程的影响。热轧盘条的轧制温度高于奥氏体化温度, 轧制过程受到再结晶控制。初始奥氏体晶粒度、固溶体中的合金成分和变形温度以及应变速率都会影响动态再结晶动力学^[7]。溶质原子Si对盘条在热变形过程中的微观结构发展至关重要。在热变形过程中, 它可以通过对奥氏体晶界的钉扎作用来延缓动态再结晶的发生^[8]。因此, 在热变形过程中, 应变可能会增加到更大的水平, 从而在相变过程中细化晶粒^[9-10]。同时, 与TS试样相比, LS试样表现出更大的形变量, 因此, LS试样的平均晶粒尺寸总是小于TS试样, 另外低Si试样LS的平均晶粒尺寸较TS减小了11.6%, 高Si试样LS的平均晶粒尺寸较TS减小了37.4%, 进一步说明Si元素具有保留形变, 延缓动态再结晶, 细

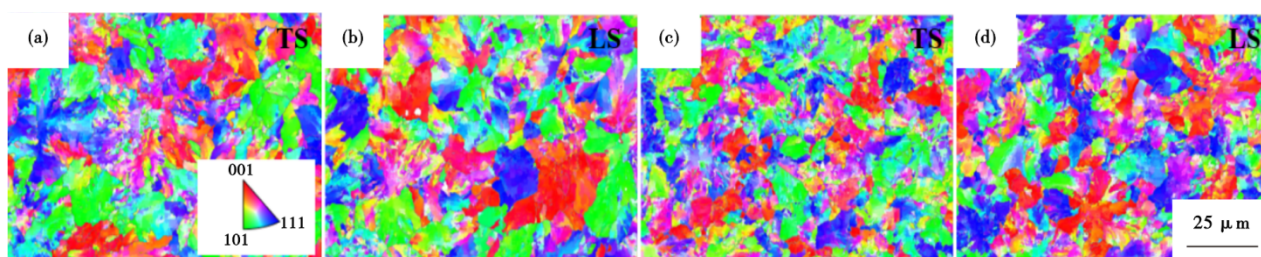


图5 试样的反极图:(a)低Si(TS),(b)低Si(LS),(c)高Si(TS),(d)高Si(LS)

Fig. 5 Inverse pole images of test steel: (a) low Si(TS), (b) low Si(LS), (c) high Si(TS), (d) high Si(LS)

化晶粒的作用。

表 2 高 Si 和低 Si 试验钢不同观察方向试样珠光体团尺寸
Table 2 The size of pearlite clusters in specimens of high Si and low Si test steels with different observation directions

项目	珠光体团尺寸/ μm			
	低 Si (TS)	低 Si (LS)	高 Si (TS)	高 Si (LS)
平均	7.52	6.65	6.77	4.24
最大	95.60	81.72	85.11	75.61

平均珠光体团尺寸的减小表明珠光体的细化,而最大珠光体团尺寸的减小在一定程度上表明了组织的均匀化。从另一方面,珠光体团取向的随机性分布,也表明了组织的均匀性。为了表征织构分布,采用铁素体的晶体取向来表征珠光体的织构。每个样品在坐标轴三个方向([100][010]和[001])上的优先取向和极密度可以在如图 6 所示的反极图中获得,其中,TS 试样中[001]方向为轧向,LS 试样中[100]方向为轧向。并且平行于每个样品方向的优先取向晶体具有不同的梯度颜色,如图 7 所示。热轧的作用之一是让盘条的组织变得更均匀,以提高盘条的拉拔成型性能。钢材相变后仍存在奥氏体织构,但是盘条经过热轧后不会形成传统的织构,因此,根据偏转角分布,绘制出了样品坐标方向上最强的三个织构,如图 8 所示(图 8 中 PO 为优先取向,RD 为轧制方向)。

图 8(a)、(c)中,[001]方向代表着轧制方向,两个试样横截面的优先取向和极密度分别为 $\langle 304 \rangle 1.24$ 、 $\langle 223 \rangle 1.41$,图 8(b)、(d)中[100]方向代表着轧制方向,两个试样在纵截面的优先取向和极密度分别为 $\langle 114 \rangle 1.25$ 、 $\langle 112 \rangle 1.31$ 。在图 8 中,曲线的斜率越大代表着晶体取向朝向该方向的趋势也越大。在低 Si 试样中,最强的织构仍然是沿着轧制方向,而在高 Si 试样中,最强的织构不是沿着轧制方向,

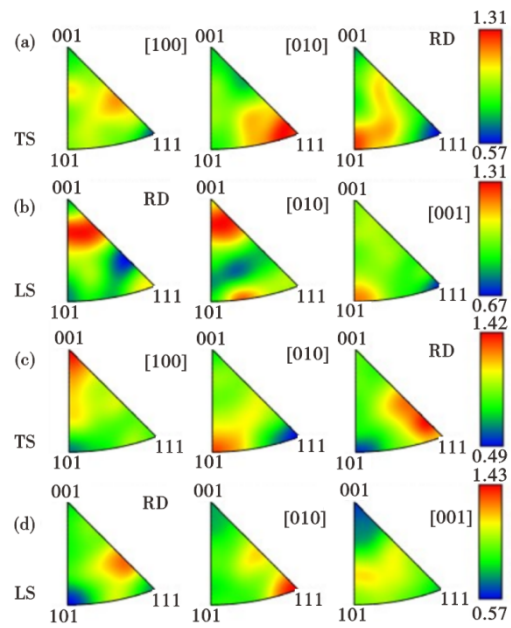


图 6 试样的反极图像和极密度:(a)低 Si (TS), (b)低 Si (LS), (c)高 Si (TS), (d)高 Si (LS)

Fig. 6 Reverse pole image and pole density of specimens: (a) low Si (TS), (b) low Si (LS), (c) high Si (TS), (d) high Si (LS)

这表明在高 Si 试样中,珠光体表现出了更加随机的织构,两个截面不再受轧向织构支配,这可能是由于 Si 元素的增加,能够使变形过程中更多的微结构得以保留,而这些微结构可以被认为是更细小、取向更加随机的晶粒^[11]。

2.2 Si 元素对缆索钢丝绳用热轧盘条性能的影响

不同成分热轧盘条和成品钢丝的工程应力应变曲线如图 9 所示,低 Si 盘条的抗拉强度为 1 134 MPa,均匀伸长率为 7.1%;高 Si 盘条的抗拉强度为 1 263 MPa,均匀伸长率为 7.3%。高 Si 盘条的抗拉强度较低 Si 盘条提高了 129 MPa,均匀伸长率略有上升,这得益于多方面原因。Si 是一种非碳化物形元素,大量存在于铁素体中^[12],对铁素体起到固溶强化的作用,直接增加珠光体中软相铁素体的强度。因此,珠光体的强

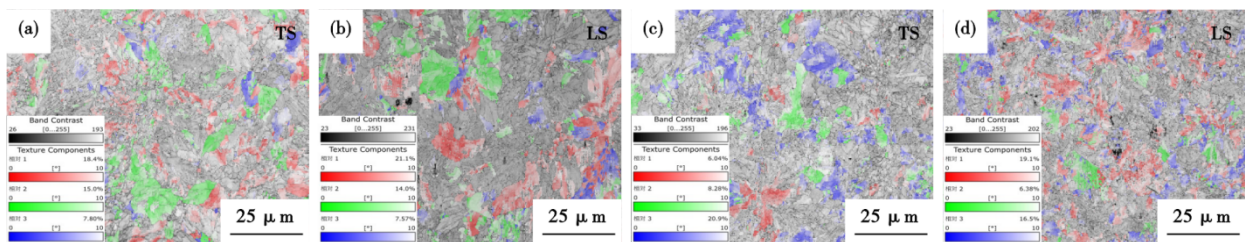


图 7 晶体方向角偏差在 10° 范围内的取向分布图:(a)低 Si (TS), (b)低 Si (LS), (c)高 Si (TS), (d)高 Si (LS)

Fig. 7 Orientation distribution of crystal orientation angle deviation within the range of 10° : (a) low Si (TS), (b) low Si (LS), (c) high Si (TS), (d) high Si (LS)

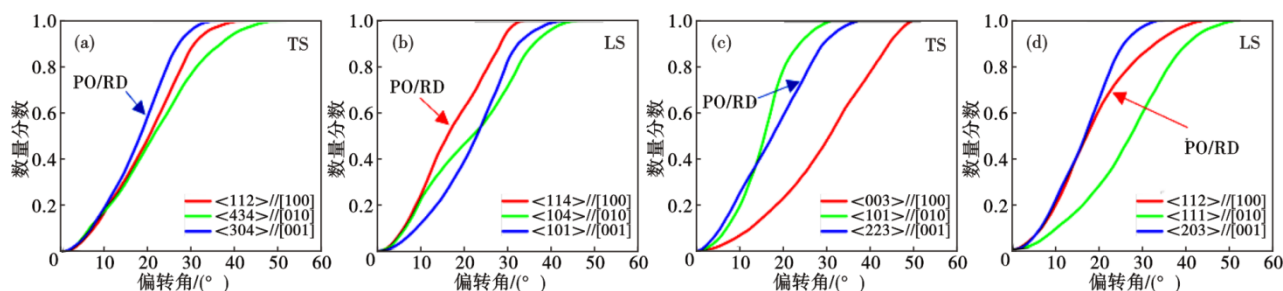


图8 试样在坐标轴方向上的优先取向分布:(a)低Si(TS), (b)低Si LS, (c)高Si(TS), (d)高Si LS

Fig. 8 The preferred orientation distribution of the specimen in the coordinate axis direction : (a) low Si(TS), (b) low Si(LS), (c) high Si(TS), (d) high Si LS

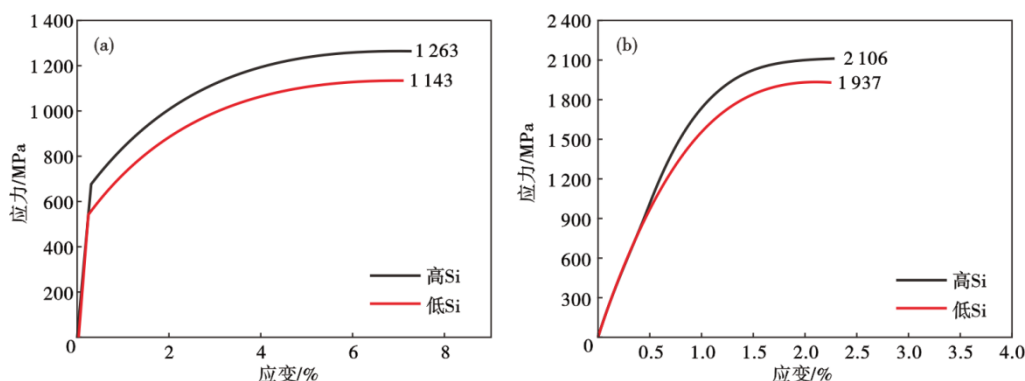


图9 高Si和低Si试样的工程应力应变曲线:(a) $\phi 12.5\text{ mm}$ 热轧盘条, (b) $\phi 5.05\text{ mm}$ 成品钢丝

Fig. 9 Engineering stress-strain curves of high Si and low Si specimens : (a) $\phi 12.5\text{ mm}$ hot-rolled wire rod, (b) $\phi 5.05\text{ mm}$ finished steel wire

度也得到提升。但是由于珠光体变形时,形变大部分发生在铁素体当中, Si原子对铁素体产生强化的同时,也会阻碍位错的运动,降低铁素体的塑性,导致珠光体的塑性降低。固溶在铁素体中的Si元素还能促进Mn元素向渗碳体中偏聚,能够增加渗碳体的稳定性,减少渗碳体的球化现象。珠光体的片层状组织是珠光体高强度和良好塑性的保障,一旦珠光体的片层结构遭到破坏,将极大的恶化珠光体的力学性能, Si元素的添加,减小了渗碳体球化的倾向,保持了珠光体良好的片层结构,能够提高珠光体的强度和塑性。

在热轧的加热过程中, Si原子固溶 in 奥氏体当中, Si含量的增加会减小奥氏体界面的迁移能^[13], 减小奥氏体晶粒的长大速率, 高Si试样的原始奥氏体晶粒小于低Si试样, 有助于减小最终珠光体团的尺寸, 得到更加细小均匀的珠光体组织^[14-15]。在轧制过程中, 由于Si原子对奥氏体晶界的钉扎作用, 能够延缓奥氏体的再结晶, 增加珠光体转变的过冷度, 减小最终珠光体的片间距。在对珠光体组织的分析当中, 还发现Si元素能够使热轧盘条中的组织

分布更加随机。由于更加细小均匀的珠光体团和珠光体片层, Si元素不仅能提高热轧盘条的强度, 同时还能改善其塑性。

另一方面, 在热轧过程中, 储存的部分变形能量将在奥氏体再结晶中消耗掉。在珠光体转变过程中, 剩余的变形能导致晶体中位错和点缺陷的形成。当大量位错在晶体中积累时, 位错逐渐相交, 形成位错壁和亚晶界。如果亚晶界继续吸收位错, 就会发生动态再结晶, 亚晶界逐渐转变为高角度晶界。当盘条变形时, 固溶的Si原子也能和位错发生交互作用, 经过再结晶后保留更高的位错密度, 由于热轧后的相变, 位错密度越大, 残余应力越小^[11]。与低Si试样相比, 高Si试样轧制后能获得更大的形变量, 相应的也能得到更高的位错密度和更小的残余应力。钢中的残余应力越大越容易造成钢中的应力集中, 恶化钢的力学性能。Si元素减小了盘条中的残余应力, 这也是Si元素能提高热轧盘条强度的原因之一。

由于Si元素在热轧盘条中的多方面作用, 盘条的强度提升明显, 塑性略有上升。经过冷拔加工

后的成品钢丝,低Si试样的抗拉强度为1 937 MPa,均匀伸长率为2.2%;高Si试样的抗拉强度为2 106 MPa,均匀伸长率为2.3%,高Si试样强度较Si试样提升了169 MPa,均匀伸长率略有提升,满足了2 060 MPa级钢丝的生产要求。

3 结论

(1) Si元素增加了珠光体相变时的过冷度,减小了珠光体团的尺寸和珠光体片间距。Si元素促使Mn元素向渗碳体中偏聚,增加了渗碳体的稳定性,改善了渗碳体的球化现象。

(2) 由于Si原子对奥氏体晶界的钉扎作用,减

小了初始奥氏体的晶粒尺寸,同时保留了更大的形变量,细化了珠光体晶粒。Si元素的添加,使盘条横、纵截面的珠光体织构分布更加随机,珠光体组织更加均匀。同时由于盘条纵截面的形变量大于横截面的形变量,纵截面的珠光体团尺寸和珠光体片间距均小于横截面。

(3) 由于Si元素含量的增加,盘条的抗拉强度从1 134 MPa增加至1 263 MPa,均匀伸长率从7.1%增加至7.3%。成品钢丝的抗拉强度由1 937 MPa增加至2 106 MPa,均匀伸长率从2.2%增加至2.3%,满足2 060 MPa级钢丝的生产要求。

参考文献

- [1] 刘运成,穆峻青,张志高. 8×61FWS-IWRC-φ96 mm 镀锌高强度海工钢丝绳研制[J]. 金属制品, 2021, 47(4): 1-4+10.
- [2] 李世琳,阮士朋. Si含量对10B21钢热轧盘条组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2020, 41(2): 15-17.
- [3] 田志鹏. 82B高碳钢盘条连续冷却转变曲线的测定及其相变规律[J]. 理化检验-物理分册, 2023, 59(6): 29-32.
- [4] 向 嵩,沈 涛,冀宣名,等. 大过冷工艺下珠光体钢亚结构组织及力学性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(6): 1465-1472.
- [5] 徐德超,张博明,王彭涛,等. Si、Mn元素对热成形钢连续冷却转变行为影响[J]. 物理测试, 2020, 38(3): 1-6.
- [6] 岳超华. Cr元素对珠光体转变组织及性能的影响[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [7] Fernandez A, Uranga P, Lopez B, et al. Dynamic recrystallization behavior covering a wide austenite grain size range in Nb and Nb - Ti microalloyed steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 361(1-2): 367-376.
- [8] Mohebbi M S, Rezayat M, Parsa M H, et al. The impact of Nb on dynamic microstructure evolution of an Nb-Ti microalloyed steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 723: 194-203.
- [9] Shaban M, Eghbali B. Determination of critical conditions for dynamic recrystallization of a microalloyed steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(16-17): 4320-4325.
- [10] Cho S H, Kang K B, Jonas J J. The dynamic, static and metadynamic recrystallization of a Nb-microalloyed steel [J]. ISIJ International, 2001, 41(1): 63-69.
- [11] Zhou J, Hu C Y, Hu F, et al. Insight into the effect of Nb microalloying on the microstructure - property relationship of a novel wire rod [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 276-289.
- [12] 芦 莎,周学源,廖书全,等. 微合金化对高碳钢中渗碳体片球化及长大过程的影响研究[J]. 山西冶金, 2023, 46(6): 7-9.
- [13] 黄玲惠. 合金元素相分配对珠光体钢共析转变过程及性能的影响[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [14] 万志健,刘学华,赵 海,等. 钒对高碳珠光体钢组织及拉伸性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(3): 140-145.
- [15] Yang Z D, Zhang X, Sang C H, et al. Effects of hot deformation on the evolution of microstructure in pearlitic steel wire rod [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2023, 36(12): 2058-2068.