



盐浴等温热处理对超高强硬线钢 100Si 组织和性能的影响

郭洛方¹, 徐 凯¹, 高永彬¹, 孙 强¹, 牛 斌²

(1 青岛特殊钢铁有限公司线材研究所, 青岛 266409; 2 中国铁道科学研究院铁建所, 北京 100081)

摘 要:通过测定 100Si 钢 $\Phi 14$ mm 盘条等温 TTT 曲线和设计盐浴热处理工艺实验对 100Si 钢盘条强塑性进行工艺技术研究。结果表明:100Si 钢的鼻尖温度为 580 °C 左右, 对应等温转变孕育期最短时间为 5 s 左右, 且 100Si 钢等温相变行为对温度十分敏感; 随盐浴等温温度(510 ~ 580 °C) 的升高, 盘条抗拉强度以及断面收缩率呈降低趋势; 随离线奥氏体化温度升高, 100Si 钢盘条的珠光体球团尺寸增加; 与热轧盘条相比, 盐浴热处理条件下盘条的索氏体片层间距分布比较集中, 且索氏体片层间距随着盐浴温度的降低而减小; 温度低于 920 °C 时, 100Si 钢中的 V 将以 VC 的形式在奥氏体中析出, 且 VC 在铁素体中的析出发生在珠光体转变之后; 在较低的奥氏体化温度以及较低的盐浴温度下盘条中析出的 VC 粒子质量分数较少, 会减弱析出强化; 920 °C 离线奥氏体化、530 °C 盐浴等温的热轧盘条具有最好的索氏体相强化效果与析出强化效果之间的平衡, 其较好的力学性能为抗拉强度 1 650 MPa, 断面收缩率 32.5%。

关键词:桥梁缆索; 100Si 钢; 盐浴热处理; 片层间距; 析出强化

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2022-00118

Effect of Salt Bath Isothermal Heat Treatment on Structure and properties of Ultra High Strength Hard Wire 100Si Steel

Guo Luofang¹, Xu Kai¹, Gao Yongbin¹, Sun Qiang¹, Niu Bin²

(1 Research Institute of Wire Materials, Qingdao Special Steel Co., Ltd., Qingdao 266409;
2 Railway Construction Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The strong plasticity technology of 100Si steel $\Phi 14$ mm wire rod is studied by measuring the isothermal TTT curve of 100Si steel wire rod and designing off-line salt bath heat treatment process experiment. The results show that the nasal tip temperature of 100Si steel is about 580 °C, and the shortest incubation period of the isothermal transition is about 5 s, and the isothermal phase transition behavior of 100Si steel is very sensitive to temperature; With the increase of salt bath isothermal temperature (510 - 580 °C), the tensile strength and reduction of area of wire rod basically decrease; With the increase of off-line austenitizing temperature, the pearlite pellet size of 100Si steel rod increases; Compared with hot rolled wire rod, the distribution of the lamellar spacing of the bottom wire rod by salt bath heat treatment is more concentrated, and the lamellar spacing decreases with the decrease of salt bath temperature; When the temperature is lower than 920 °C, V in 100Si steel can be precipitated in austenite with the form of VC, and the precipitation of VC in ferrite occurs after pearlite transformation; At the lower austenitizing temperature and the lower salt bath temperature, the mass fraction of VC particles precipitated is less, which can weaken the precipitation strengthening; The hot-rolled wire rod with 920 °C off-line austenitizing and 530 °C salt bath isotherm has the best balance between the strengthening effect of sorbitic phase and precipitation strengthening effect, the better mechanical properties are tensile strength 1 650 MPa and reduction of area 32.5%.

Key Words: Bridge Cable; 100Si Steel; Salt Bath Heat Treatment; Lamellar Spacing; Precipitation Strengthening

近十几年来,随着社会经济的快速发展,国内外跨江和跨海等特大型桥梁建设进入蓬勃发展时期,桥梁跨度不断增加。与此同时,我国桥梁建设也进入高峰阶段,跨江、跨海等超大跨距桥梁的建设逐渐被纳入规划和提上日程^[1-4]。因此,开发高强度桥梁缆索用钢有着巨大的前景和经济效益,既可以节约用材,又可降低桥梁建设成本。最终成品热

镀锌钢丝的性能很大程度上依赖原始热轧盘条的组织性能。为顺应桥梁建设向大跨度和超高强度方向的发展趋势,国内急需开发超高强度更高级别的桥梁缆索用钢盘条^[5]。

继 1 960、2 000 MPa 级南沙大桥、沪苏通大桥等建成通车,马鞍山公铁大桥、张靖皋长江大桥等桥索钢丝设计强度达到 2 100、2 200 MPa 级。青岛特

基金项目: 中国铁道科学研究院科研项目(2020YJ035)

作者简介: 郭洛方(1985-),男,博士,高级工程师;

E-mail: guoluofang@citicsteel.com;

收稿日期: 2022-09-06

钢继完成1 960、2 000、2 060 MPa级桥索钢丝用盘条开发后,对Φ7 mm 2 100 MPa级和Φ5.6 mm 2 200 MPa级桥索钢丝用盘条的组织性能展开深入研究,逐步开展实验室试验研究并进行工业化试制,为工业化生产做技术储备。

1 研究方法

为研究盐浴等温热处理工艺对高碳高合金桥梁索用钢组织性能的影响,在2 100 MPa和2 200 MPa级桥梁索用钢工业化试制前,利用实验室盐浴炉开展100Si钢盘条的等温热处理工艺研究。盐浴热处理实验所用试样为少量试验的青钢斯太尔摩风冷线生产的100Si钢盘条,盘条的直径为Φ14.0 mm,其生产工艺流程为:高炉铁水→铁水预处理(脱硫、脱磷)→100 t顶底复吹转炉吹炼→100 t LF精炼→100 t RH炉真空精炼→9 m弧形连铸机。盘条钢的成分见表1。离线盐浴热处理试样为Φ14.0 mm×120 mm的圆棒。

1.1 等温TTT曲线测定试验方法

为设计盐浴等温试验做准备,首先利用DIL805L淬火热膨胀仪,对100Si钢盘条的等温相变行为进行研究;等温相变行为研究的工艺简图如图1所示,奥氏体化温度设定为920℃。

1.2 盐浴等温热处理工艺试验

利用实验室的箱式炉和盐浴炉研究不同的离线奥氏体化温度以及盐浴等温温度对盘条钢组织

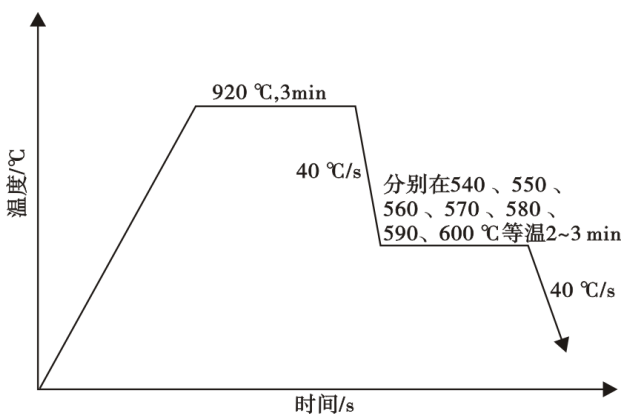


图1 试验100Si钢盐浴等热温处理工艺

Fig. 1 Salt bath isothermal heat treatment process of test 100Si steel

性能的影响,以确定最佳的离线索氏体化处理工艺。箱式炉以及盐浴炉的型号分别为SX2-5-12型箱式电阻炉以及ZSG-9-12型井式电阻炉。

利用箱式电阻炉将Φ14.0 mm×120 mm的圆棒试样加热到不同奥氏体化温度(900、920、940、960℃),保温10 min后,迅速转入冷却浴中,冷却浴温度设定为480℃,冷却10 s后转入恒温浴,恒温浴温度分别设定为510、530、550、580℃,在恒温浴中等温8 min后水冷,工艺路线简图如图2所示。

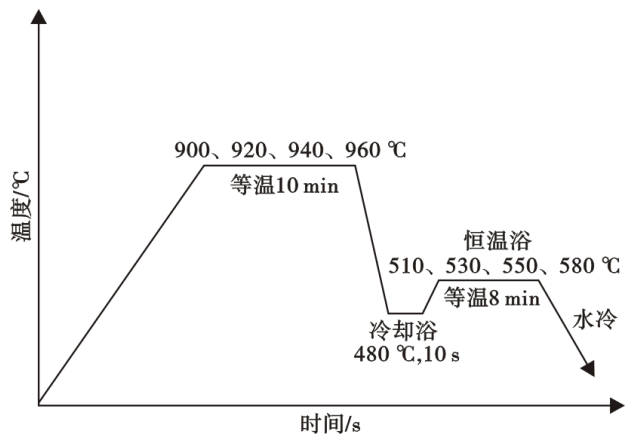


图2 100Si钢离线盐浴热处理的实验工艺简图

Fig. 2 Experimental process diagram of off-line salt bath heat treatment of 100Si steel

1.3 检测设备与方法

采用SPECTRO LAV M10直读光谱仪对盘条钢成分进行元素分析;采用Imager.A1M金相显微镜和Discovery.V8体视显微镜对盘条钢中心偏析、晶粒度、脱碳层、表面缺陷进行观察;采用Quanta 200 MK2扫描电镜对盘条钢微观组织、珠光体片层间距进行观察检测;采用GNT2000Y-D拉伸试验机对盘条钢力学性能进行检测。采用DIL805L淬火热膨胀仪对100Si钢盘条的等温相变行为的测试,记录测试的温度点、转变时间;采用TF20场发射透射电子显微镜对盐浴处理后的100Si钢盘条进行TEM组织观察,并观察渗碳体片层之间铁素体上存在的析出物。

表1 100Si桥梁索用钢盘条成分(质量分数)

Table 1 Composition of 100Si bridge cable steel wire rod

C	Si	Mn	Cr	V	Ti	Ni	Als	B
0.95~1.05	0.50~1.50	0.20~0.70	0.10~0.60	0.010~0.085	≤0.01	≤0.01	0.067	≤0.001

2 结果分析与讨论

2.1 100Si 钢等温 TTT 曲线

采用 DIL805L 淬火热膨胀仪对青钢公司生产 100Si 钢盘条的等温相变行为的检测结果如图 3 所示。

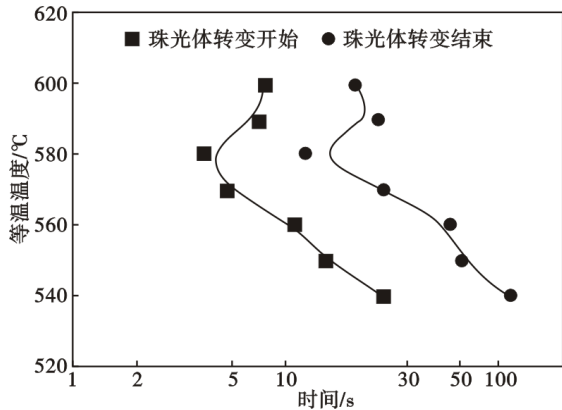


图 3 100Si 桥梁缆索钢 Φ14 mm 盘条等温转变曲线

Fig. 3 Isothermal transformation curves of 100Si bridge cable steel Φ14 mm wire-rod

如图 3 所示 100Si 钢的鼻尖温度(即等温转变所需时间最短的温度)为 580 °C 左右,当等温温度为鼻尖温度时,100Si 钢的等温转变孕育期时间为 5 s 左右。100Si 钢等温相变行为对温度十分敏感,当等温温度为 540 °C 时,相变孕育期时间为 28 s,相变时间为 83 s,而等温温度为 580 °C 时,相变孕育时间仅为 5 s 左右,相变时间为 8 s。

2.2 盐浴热处理工艺对 100Si 钢拉伸性能的影响

如图 4 所示,经过盐浴热处理后,部分工艺条件下的盘条抗拉强度以及断面收缩率均高于原始盘条钢,其中 920 °C 离线奥氏体化后 530 °C 盐浴等温

的盘条拉伸性能最好。

从整体趋势来看,随着盐浴等温温度的升高,盘条钢抗拉强度以及断面收缩率基本呈降低趋势,但对于 900 °C 以及 920 °C 离线奥氏体化的盘条钢,其在 510 °C 盐浴等温的抗拉强度低于其他温度下等温的抗拉强度,显示了离线奥氏体化温度对盘条钢力学性能影响的复杂性。对于 530 °C 盐浴等温,抗拉强度的峰值出现在 920 °C 离线奥氏体化的时候,而后随着离线奥氏体化温度的升高,抗拉强度降低。550 °C 以及 580 °C 盐浴等温时,离线奥氏体化温度对抗拉强度影响不大。当盐浴等温温度为 530、550、580 °C 时,离线奥氏体化温度对断面收缩率影响不大;而当 510 °C 盐浴等温时,920 °C 离线奥氏体化的盘条钢断面收缩率最高。

2.3 盐浴热处理工艺对 100Si 钢显微组织的影响

对不同盐浴处理工艺条件下的 100Si 钢盘条进行显微组织检测,检测结果如图 5 所示。

如图 5(a) 所示,随着离线奥氏体化温度升高,100Si 钢盘条的珠光体球团尺寸增加;相同盐浴温度下,960 °C 离线奥氏体化后珠光体球团尺寸比 900 °C 离线奥氏体化后的尺寸增加 22%~36%。

图 5(b) 为 100Si 钢热轧盘条以及不同盐浴热处理工艺下的盘条钢索氏体片层间距分布情况的对比数据。原始热轧盘条钢的索氏体片层间距在较大的范围内波动,波动为 45~135 nm,分布概率存在多个峰值,分别在 65 nm、95 nm 以及 120 nm;而其他盐浴热处理条件下盘条的索氏体片层间距分布也比较集中:920 °C 奥氏体化、530 °C 盐浴等温的盘条索氏体片层间距在 45~115 nm 波动,大部分集中在 45~85 nm;960 °C 奥氏体化、580 °C 盐浴等温的盘条钢索氏体片层间距在 65~135 nm 波动,大部分集中

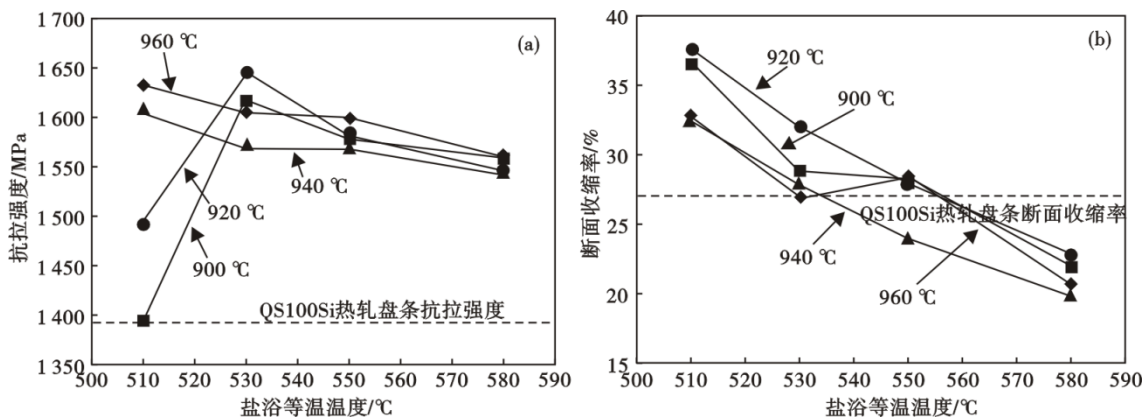


图 4 盐浴等温温度对 100Si 钢盘条抗拉强度(a)和断面收缩率(b)的影响

Fig. 4 Effect of salt bath isothermal temperature on tensile strength (a) and reduction of area (b) of 100Si steel wire rod

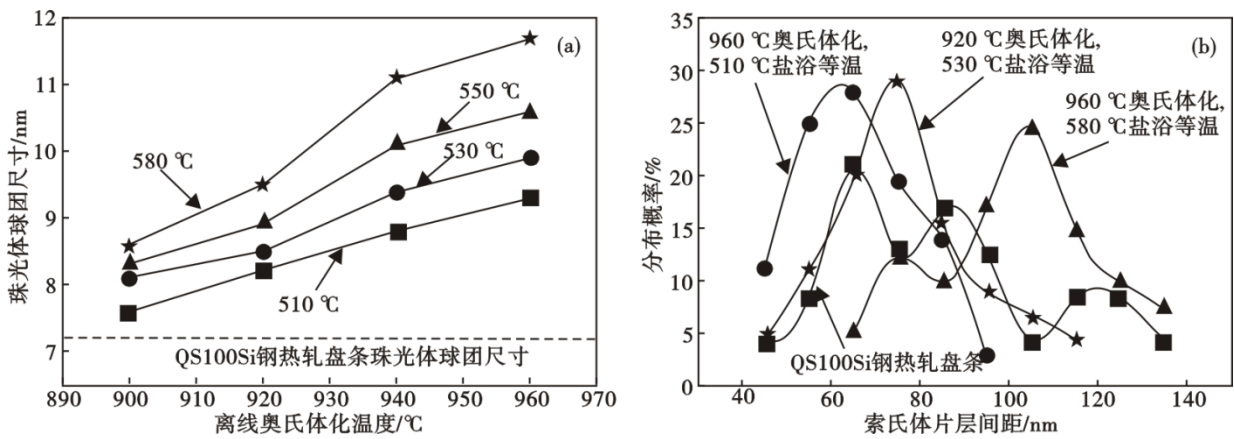


图5 盐浴热处理工艺对100Si钢盘条珠光体团尺寸(a)和索氏体片层间距(b)的影响 wire rod
Fig. 5 Effect of salt bath heat treatment process on size of pearlite pellet (a) and lamellar spacing of sorbite (b) on 100Si steel

在95~115 nm,还有少部分片层较细,约为75 nm左右。不同的盐浴热处理工艺对显微组织影响较大,从而对力学性能具有显著的影响。

2.4 VC在100Si钢离线盐浴热处理过程中的析出行为

根据二元第二相在钢中的溶度积公式以及100Si钢中C、V的含量可以计算不同温度下VC在奥氏体中的溶解度,计算公式见式(1)^[6]。

$$\lg\{[V] \cdot [C]\}_\gamma = 6.72 - 9500/T \quad (1)$$

式中:[V]、[C]分别为奥氏体中固溶的V、C的质量分数,T为温度(K),计算结果如图6所示。

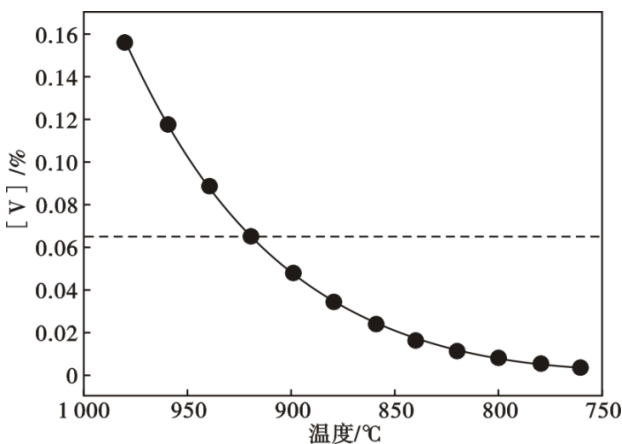


图6 VC在奥氏体中的溶解度曲线
Fig. 6 Solubility curve of VC in austenite

如图6所示,随着温度降低,VC在奥氏体中的溶解度减小,当温度低于920 °C时,100Si钢中的V无法完全固溶于基体中,将以VC的形式析出。当时间足够长时,V元素在750 °C就几乎能完全析出。

对VC在100Si钢中析出过程的PTT曲线进行

理论计算^[7-8],计算结果如图7所示。VC在铁素体中沉淀析出时的PTT曲线呈单“C”型,随着奥氏体化温度的升高,鼻尖温度上升,并且VC析出所需的孕育期缩短。当温度低于600 °C时,随着温度升高,孕育期时间减少。

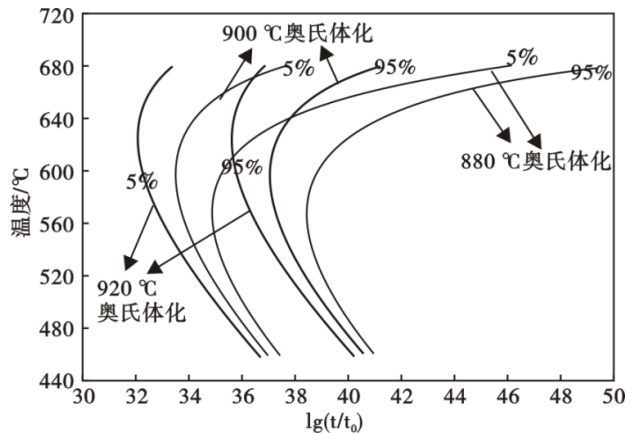


图7 VC在铁素体中沉淀析出时的PTT曲线
Fig. 7 PTT curves of VC precipitation in ferrite

由于盐浴热处理过程中,离线奥氏体化后盘条钢直接进入盐浴中等温,降温过程十分迅速,时间远小于VC粒子析出的孕育期,此时VC粒子无法析出,这样VC粒子应该在盐浴等温过程中析出。由于VC长大需要大量的V原子,而V的含量仅为0.065%,并且V原子扩散远慢于Fe原子,故盐浴等温过程中过冷奥氏体首先发生珠光体转变,而后在相间析出VC粒子。为验证理论预测的结论,对盐浴处理后的100Si钢盘条进行透射电镜(TEM)组织观察,如图8所示100Si钢盘条的TEM组织,可以观察到渗碳体片层之间的铁素体上存在方形析出物,

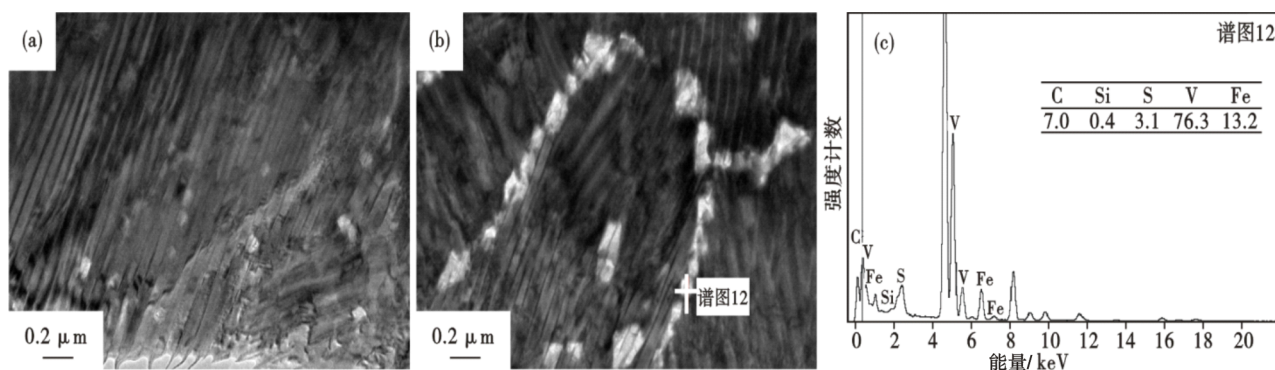


图8 100Si钢盘条TEM组织(a) (b)及能谱分析(c)

Fig. 8 TEM structure (a), (b) and energy spectrum analysis (c) of 100Si steel wire rod

经能谱分析为VC粒子,说明VC粒子在珠光体转变后析出。

2.5 显微组织及VC析出物对盐浴热处理后100Si钢强度的影响

经过盐浴热处理后的100Si钢的强度及塑性主要受到珠光体片层间距、VC析出物状态两方面的影响。可以用式(2)霍尔佩奇和析出强化所示的关系式^[9]来描述100Si钢的抗拉强度(R_m)与珠光体片层间距以及VC析出物体积分数、尺寸之间的关系。

$$R_m = A + kS_0^{-0.5} + B(f^{0.5} \cdot d^{-0.5}) \quad (2)$$

式中: A 代表固溶强化、位错强化贡献的强度之和(由于各个热处理条件下的盘条钢成分相同,热处理之前的热加工率相同,可以将 A 近似为常数); S_0 为珠光体片层间距; f 、 d 分别为VC析出物的体积分数以及尺寸; k 、 B 均为常数。

由式(2)可以看出,珠光体片层间距越细小,盘条钢的抗拉强度越高。与此同时,VC析出物的体积分数越大,析出物越细小,盘条的抗拉强度越高。对照离线盐浴热处理后100Si钢的抗拉强度,900℃离线奥氏体化处理的盘条钢抗拉强度普遍偏低。这是因为900℃时,原始100Si钢热轧盘条钢中的VC粒子无法完全溶解(由图6可知),部分尺寸较大的VC粒子残留于奥氏体中,并在随后的盐浴等温过程中保留下来。并且根据VC在铁素体中沉淀析出时的PTT曲线(图7),离线奥氏体化温度越低,随后盐浴等温过程VC粒子在铁素体中沉淀析出所需的孕育期时间越长,盐浴等温8 min过程中析出VC粒子的体积分数就少,所以其抗拉强度偏低^[10]。

因在较低的奥氏体化温度以及最低的盐浴等温温度下,VC粒子沉淀析出所需的孕育期时间远长于其他热处理工艺下所需的时间,故900、920℃离线奥氏体化,510℃盐浴等温工艺,组织中析出物体

积分数远小于其他工艺的,所以虽然低温等温所形成的珠光体片层间距很小,但是不足以抵消析出强化的损失,所以抗拉强度较低。而当920℃离线奥氏体化、530℃盐浴等温时,珠光体片层间距较小,组织中存在一定质量分数的VC粒子析出物,并且由于保温温度较低,析出物能保持较小的尺寸,故此,热处理条件下索氏体相强化以及析出强化达到了较好的平衡,其综合力学性能最佳。

3 结论

(1)经盐浴等温TTT曲线检测,100Si钢的鼻尖温度为580℃左右,其对应的等温转变孕育期最短时间为5 s左右,且100Si钢等温相变行为对温度十分敏感;

(2)随盐浴等温温度的升高,盘条钢抗拉强度以及断面收缩率基本呈降低趋势,但对于900℃及920℃离线奥氏体化的盘条,其在510℃盐浴等温的抗拉强度低于其他温度下等温的抗拉强度,显示了离线奥氏体化温度对盘条力学性能影响的复杂性;

(3)随离线奥氏体化温度升高,100Si钢盘条的珠光体球团尺寸增加;与热轧盘条钢相比,盐浴热处理条件下盘条的索氏体片层间距分布比较集中,且索氏体片层间距随着盐浴温度的降低而减小;

(4)温度低于920℃时,100Si钢中的V无法完全固溶于基体中,将以VC的形式在奥氏体中析出,且VC粒子在铁素体中的析出发生在珠光体转变之后,沉淀析出时的PTT曲线呈单“C”型,随着奥氏体化温度的升高,鼻尖温度上升,并且VC粒子析出所需的孕育期缩短;

(5)盐浴热处理后,100Si钢的强度及塑性除受索氏体体积分数以及片层间距影响外,还受到VC析出粒子的影响,在较低的奥氏体化温度以及较低

的盐浴温度下盘条中析出的 VC 粒子质量分数较少,会减弱析出强化,920 °C 离线奥氏体化、530 °C 盐浴等温的盘条具有最好的索氏体相强化效果与析

出强化效果之间的平衡,故力学性能最佳,为抗拉强度 1 650 MPa,断面收缩率 32.5%。

参考文献

[1] 叶觉明,张太科,鲜 荣,等. 1 960 MPa 级钢丝加工及其在悬索桥主缆上的应用[J]. 金属制品, 2015, 41(2): 1-6.

[2] 冯路路,吴开明,鲁修宇,等. 桥梁缆索用超高强度钢的现状和发展趋势[J]. 中国材料进展, 2020, 39(5): 395-403.

[3] 高宗余,梅新咏,徐 伟,等. 沪通长江大桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2015 45(6): 1-6.

[4] 张秀凤,张海东,周代义. 悬索桥主缆用Φ5.1 mm 1 860 MPa 热镀锌钢丝的研制[J]. 金属制品, 2009(5): 14-18.

[5] 江阴兴澄特种钢铁有限公司,冶金工业信息标准研究院,等. YB/T4264-2020 桥梁缆索钢丝用盘条[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.

[6] Song H R, Kang E G, Nam W J. Effect of alloying elements on work hardening behavior in cold drawn hyper-eutectoid steel wires [J]. Materials Science and Engineering, 2007, 449A(13): 1147-1150.

[7] 张 可,孙学军,张明亚,等. 42Ti-V-Mo 复合微合金钢中(Ti, V,Mo)+C 在 γ-α 中沉淀析出的动力学[J]. 金属学报, 2018, 54(8): 1122-1130.

[8] M. C. M. Cornelissen. Mathematical Model for Solidification of Multicomponent Alloys [J]. Ironmaking&Steelmaking, 1986, 13(4):204-212.

[9] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 15.

[10] 沈 奎,江卓俊,于学森,等. 微合金化铌钒对高碳钢组织转变影响[J]. 特殊钢,2019. 40(4):62-65.

关于认准《特殊钢》网址、防范假冒网站的声明

《特殊钢》期刊由中信泰富特钢集团旗下大冶特殊钢有限公司主管主办,由《特殊钢》编辑部负责运营,是全国特殊钢行业知名的综合性科技刊物(双月刊);《特殊钢》期刊于 1980 年创刊发行,国际标准刊号为 ISSN1003-8620,国内统一刊号为 CN42-1243/TF。《特殊钢》期刊的宗旨:“构建特钢共享平台,引领行业创新发展。

编辑部发现网络上存在大量假冒《特殊钢》期刊的网页,为维护我刊良好声誉和广大作者、读者的利益,本编辑部郑重声明如下:

(一) www.specialsteeljournal.com 为《特殊钢》期刊的唯一网址,备案号为鄂 ICP 备 2022000839 号,请广大作者、读者使用本网址进行投稿、订阅、论文免费下载等操作;

(二) 除维普、万方、知网、超星为本社授权合作网站,具有数字化复制权、发行权、汇编权、翻译权、信息网络传播权、版式设计专有权,其余网站皆未经本编辑部授权,无权从事相关内容的刊登、收费阅读,承揽稿件,承接广告等行为,请广大作者、读者提高警惕,注意甄别,谨防受骗,由此造成的一切损失和后果,本编辑部不承担任何经济 and 法律责任;同时也鼓励向本编辑部进行举报相关侵权线索。

(三) 未经授权网站请于 2023 年 7 月 31 日前自行将与《特殊钢》期刊相关的内容撤除,逾期仍存在涉嫌侵害著作权、名誉权的单位或个人,本编辑部保留进一步发函、举报、诉讼等法律手段进行维权,必要时上报公安机关依法追究刑事责任。

《特殊钢》编辑部