



超高强度 50SiMnCr 弹簧扁钢及其连续冷却转变行为

侯世耀¹, 张阳², 杨东欧¹, 赵阳³, 陈礼清²

(1 青岛特殊钢铁有限公司棒材研究所, 青岛 266000; 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; 3 东北大学材料科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 超高强度弹簧扁钢的研发及应用对于实现汽车轻量化具有重要的意义, 掌握这类钢的连续冷却转变行为有助于制定其热轧后冷却工艺和淬火-回火工艺。以一种新设计的超高强弹簧扁钢 50SiMnCr 钢为研究对象, 在力学性能检测的基础上, 结合金相-硬度和热膨胀法研究了冷却速率对实验钢显微组织和硬度的影响, 由此绘制连续冷却转变曲线。结果表明, 50SiMnCr 钢的强塑性满足 2 000 MPa 级别要求, 其相变点 $A_{c1}=721\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_{c3}=758\text{ }^{\circ}\text{C}$, $M_s=220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $M_f=103\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当冷却速率为 0.05~0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时, 发生铁素体和珠光体转变; 当冷却速率提高至 1 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时, 发生贝氏体转变; 当冷却速率为 2 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以上时, 发生马氏体转变。随着冷却速率的增加, 该钢的硬度随之升高。

关键词: 50SiMnCr 钢; 2000 MPa 级弹簧钢; 连续冷却转变; 显微组织; 硬度

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00192 **中图分类号:** TG 141

Ultra-High Strength 50SiMnCr Spring Flat Steel and Its Continuous Cooling Transformation Behavior

Hou Shiyao¹, Zhang Yang², Yang Dongou¹, Zhao Yang³, Chen Liqing²

(1 Institute of Bar Steel, Qingdao Special Steel Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2 State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3 School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The development and application of ultra-high strength spring flat steel is of great significance in achieving automotive lightweight. Understanding the continuous cooling transformation behavior of this type of steel aids in developing its post-hot rolling cooling and quenching-tempering processes. On the basis of mechanical property testing, this study focuses on a newly designed ultra-high strength flat spring steel, 50SiMnCr, to investigate the effect of cooling rate on the microstructure and hardness of experimental steel by a combination of metallographic-hardness and thermal expansion method, thereby constructing continuous cooling transformation (CCT) curves. The results show that the strength and ductility of 50SiMnCr steel meet the requirements of the 2 000 MPa level, with phase transition point $A_{c1}=721\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_{c3}=758\text{ }^{\circ}\text{C}$, $M_s=220\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $M_f=103\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ferrite and pearlite transformation occurs when the cooling rate is 0.05 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ~0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$. Bainite transformation takes place when the cooling rate is increased to 1 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$. Martensite transformation happens when the cooling rate is above 2 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$. The hardness of the this steel increases with increasing the cooling rate.

Key Words: 50SiMnCr steel; 2000 MPa Grade Spring Steel; Continuous Cooling Transformation; Microstructure; Hardness

钢板弹簧是汽车悬架结构中应用最广泛的元件, 它不仅能够高效传递车轮与车身之间的力矩, 还可以大幅度减弱崎岖不平路面对车身带来的冲击感, 从而保证车辆的稳定性^[1-4]。在节能减排的要求以及汽车轻量化的大背景下, 减轻占整车重量 7% 左右的钢板弹簧重量能够有效降低汽车的总重量^[5-7]。钢板弹簧的重量与其设计应力具有关联性。研究表明, 设计应力越大, 则钢板弹簧的重量就越小^[8]。而设计应力与钢板弹簧热处理后的抗拉强度密切相关, 抗拉强度越高, 设计应力也就越高。这说明, 提高钢板弹簧的抗拉强度是减轻钢板

弹簧重量的重要途径^[9-10]。目前, 主流钢板弹簧的抗拉强度大多在 1 400~1 600 MPa, 还有少数产品其抗拉强度可以达到 1 800 MPa^[11]。因此, 进一步开发强度级别更高的钢板弹簧的母材-弹簧扁钢, 例如 2 000 MPa 级产品意义重大。

在开发 2 000 MPa 级弹簧扁钢产品时, 需要精确控制其热轧后冷却工艺以及淬火-中温回火工艺, 以保证获得所需的组织、强度和硬度^[12-14]。例如, 在生产弹簧扁钢时, 为保证板簧厂下料的方便, 通常控制热轧态弹簧扁钢的硬度不高于 321HBW, 这就要求钢厂在热轧后进行缓慢冷却以降低弹簧扁钢

的硬度。一般来说,弹簧扁钢的强度越高,钢中合金元素的添加量就越多。一方面,高合金元素会导致弹簧扁钢淬透性增强;另一方面,弹簧扁钢在热轧后的冷却过程中容易形成贝氏体或马氏体组织,这使得钢材的硬度降低较为困难。由此可见,开发高强度弹簧扁钢时,控制热轧后冷却工艺是生产难点之一。对板簧厂而言,弹簧扁钢的马氏体转变结束温度(M_f)应高于淬火油的温度,以避免淬火后弹簧扁钢中出现大量的残余奥氏体,对钢材的强度造成损害。高强度弹簧钢中通常含有较多的合金元素,这会导致其 M_f 可能低于淬火油温度。所以,在开发 2 000 MPa 级弹簧扁钢时,还应测定其 M_f ,确保 M_f 高于淬火油温度^[15]。钢的连续冷却转变曲线(CCT 曲线)是研发高强度弹簧钢的有效工具^[16]。CCT 曲线既包含了其临界相变温度(A_{c1} 和 A_{c3})、马氏体转变开始和结束温度(M_s 和 M_f),也包含了不同冷却速率下的相变组织和相应的硬度^[17]。以一种新设计的超高强弹簧扁钢 50SiMnCr 为研究对象,首先对其热处理后的力学性能进行了检测,其次测定其 A_{c1} 、 A_{c3} 、 M_s 和 M_f ,研究冷却速率对该钢微观组织和硬度的影响,研究结果能够为制定该钢的热轧后冷却工艺和淬火+中温回火工艺提供理论依据。

1 实验材料及方法

实验材料用 50SiMnCr 钢,其化学成分见表 1。热轧时,将 240 mm×300 mm 坯料轧制成规格为 28 mm×90 mm 的扁钢,生产工艺为 100 t KR→100 t BOF→100 t LF→RH→CCM (240 mm×300 mm)→加热炉加热→高压水除鳞→轧制。沿弹簧扁钢的轧制方向切取长度为 80 mm 的样块,对其淬火+回火处理。淬火时的加热温度为 880 °C,保温 40 min 后立即油冷至室温;随后进行回火,回火温度为 380 °C,保温 2 h 后水冷至室温。在热处理后的钢板上沿轧制方向切取 3 个拉伸试样。拉伸试样为直径 5 mm、标距为 25 mm 的圆棒状试样,采用 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》在 CMT 5105 微机控制电子万能试验机上进行拉伸试验,拉伸速率为 1 mm/min。利用电火花数控切割机床沿纵向在该弹簧扁钢上切取大小为 $\phi 3$ mm×10 mm 的试样。在试样一侧加工大小为 $\phi 2$ mm×2 mm 的圆孔,以便测量样品实验过程中的实时温度。

使用 Formastor-FII 型全自动相变仪对制备好的

表 1 实验用 50SiMnCr 弹簧扁钢的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of experimental 50SiMnCr spring flat steel

项目	C	Si	Mn	Cr	Ni+V	Fe
标准	0.45~0.54	0.90~1.70	0.80~1.40	0.80~1.40	0.20~0.50	余量
实验钢	0.50	1.10	1.00	1.05	0.30	余量

试样进行静态 CCT 实验。首先以 0.05 °C/s 的速率升温至 900 °C,测定实验钢的临界点,也就是临界相变温度 A_{c1} 和 A_{c3} 。50SiMnCr 钢升温过程膨胀量随温度的变化曲线如图 1 所示,通过切线法确定该钢的奥氏体转变开始温度 A_{c1} =721 °C,完全奥氏体化温度 A_{c3} =758 °C。其次将试样在 20 °C/s 的升温速率下加热至 880 °C,保温 5 min 后分别以不同冷却速率(0.05、0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20、40 °C/s)冷却至室温,测量不同冷却速率下实验钢的相变开始温度和终了温度。50SiMnCr 钢 CCT 实验方案示意图如图 2 所示。

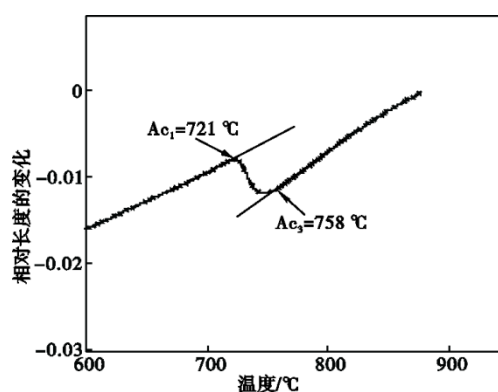


图 1 50SiMnCr 钢的临界相变温度

Fig. 1 Critical phase transformation temperature of 50SiMnCr steel

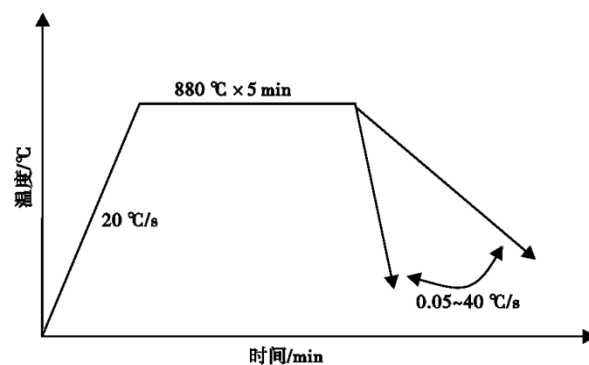


图 2 50SiMnCr 钢 CCT 实验方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CCT test of 50SiMnCr steel

根据实验数据绘制冷却时膨胀量随温度的变化曲线,并利用切线法来确定不同冷却速率下的相转变开始温度和终了温度。首先将试样用电火花切割机沿轴向剖开,随后经砂纸研磨、机械抛光并用体积分数 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后,利用 LEICA Q550 IW 光学显微镜选取剖面中心位置来观察不同冷却速率下的微观组织。使用 FALCON 450 宏观维氏硬度计,采用 GB/T 4340.1—2009《金属材料维氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》测量不同实验条件下试样的硬度值,对试样进行多次测量,选取 5 个有效测量值的平均值作为最终测量结果^[18]。

2 实验结果与分析

2.1 力学性能

50SiMnCr 钢经 880 °C 淬火+380 °C 回火后的应力-应变曲线如图 3 所示,其相应的力学性能见表 2。从图 3 可以看出,50SiMnCr 钢经 880 °C 淬火及 380 °C 回火后,其应力-应变曲线呈现连续屈服的特征。从表 2 可以看出,该钢热处理后的抗拉强度达到了 2 095 MPa,屈服强度为 1 855 MPa,伸长率为 8.4%,断面收缩率为 28.0%。该钢的基本力学性能达到了 2 000 MPa 级,符合设计要求。

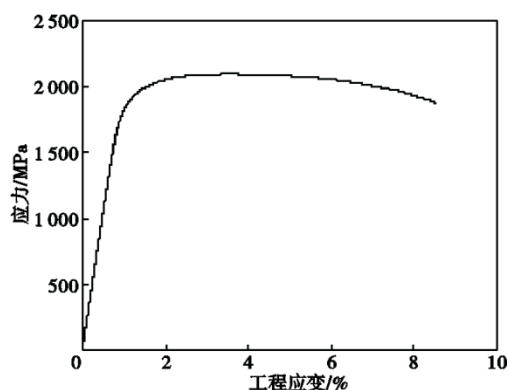


图 3 50SiMnCr 钢经 880 °C 淬火及 380 °C 回火后的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of 50SiMnCr steel after quenching at 880 °C and tempering at 380 °C

表 2 50SiMnCr 钢经 880 °C 淬火及 380 °C 回火后的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 50SiMnCr steel after quenching at 880 °C and tempering at 380 °C

项目	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/%	断面收缩 率/%
实验钢	1 855	2 095	8.4	28.0
标准	≥1 800	≥2 000	≥8.0	≥25.0

2.2 不同冷却速率下的显微组织

50SiMnCr 钢在不同冷速下的显微组织如图 4 所示。如图 4(a)~(d)所示,当冷却速率为 0.05~0.5 °C/s 时,由于冷却速率较慢,该钢中除珠光体组织外,还观察到少量的铁素体组织。当冷却速率为 1 °C/s 时,如图 4(e)所示,该钢的微观组织转变为贝氏体和马氏体。如图 4(f)~(j)所示,当冷却速率大于等于 2 °C/s 时,微观组织基本上全转变为马氏体。

2.3 宏观维氏硬度

50SiMnCr 钢的宏观维氏硬度随冷却速率的变化如图 5 所示。由图 5 可见,该钢的宏观维氏硬度与冷却速率呈正相关关系,但不同冷却速率下,宏观维氏硬度的增速并不相同。当冷却速率较低(≤ 0.5 °C/s)时,50SiMnCr 钢的硬度总体增幅较小。结合微观组织来看,冷速增大使得珠光体含量有所增加,但总体微观组织保持不变。当冷却速率达到 1 °C/s,50SiMnCr 钢的宏观维氏硬度较冷却速率为 0.5 °C/s 时有显著提升。结合微观组织分析,由于冷却速率增加,马氏体含量提高。当冷却速率到 2 °C/s 时,该钢的硬度较冷却速率为 1 °C/s 时有明显提高。此时的微观组织基本上全部转变为马氏体。而当冷却速率大于 2 °C/s,硬度值缓慢增加,增速放缓。结合微观组织,此时,50SiMnCr 钢转变组织为完全的马氏体。

2.4 静态 CCT 曲线

根据实验数据绘制所得的冷却过程中膨胀量-温度曲线只能获得实验钢的相转变开始温度和相转变终了温度,要想绘制静态 CCT 曲线还需要结合不同冷却速率下的微观组织,以此来确定相变类型。50SiMnCr 钢的静态 CCT 曲线如图 6 所示。该钢在低冷却速率(0.05~0.5 °C/s)下发生铁素体和珠光体转变、较高冷却速率(1 °C/s)下发生贝氏体转变,高冷却速率(≥ 2 °C/s)下则发生马氏体转变。在 0.05~0.5 °C/s 低冷却速率的范围内,主要为珠光体和铁素体两相组织,且相转变开始温度和相转变结束温度与冷却速率呈负相关关系。当冷却速率为 1 °C/s 时,相变组织转变为贝氏体和马氏体。而当冷却速率增加至 2 °C/s 及以上时,相变组织全部转变为马氏体。综上分析,50SiMnCr 钢获得全部马氏体组织的临界冷却速率为 2 °C/s。相关研究表明,52CrMoV4 弹簧钢的马氏体临界转变冷却速率为 20 °C/s^[19],60Si2Mn 弹簧钢的马氏体临界转变冷却速率为 40 °C/s^[20],可见 50SiMnCr 钢的马氏体临界

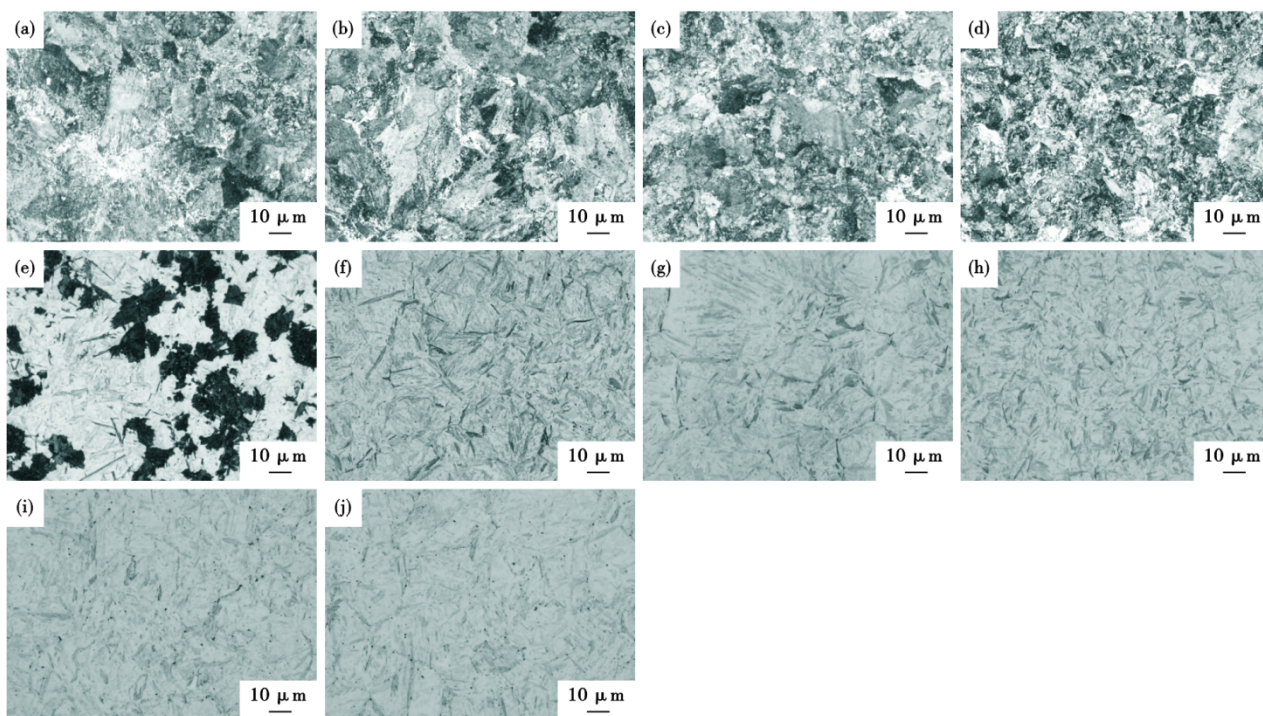


图 4 50SiMnCr 钢在不同冷速下的显微组织: (a) 0.05 °C/s, (b) 0.1 °C/s, (c) 0.2 °C/s, (d) 0.5 °C/s, (e) 1 °C/s, (f) 2 °C/s, (g) 5 °C/s, (h) 10 °C/s, (i) 20 °C/s, (j) 40 °C/s

Fig. 4 Microstructures of 50SiMnCr steel at different cooling rates : (a) 0.05 °C/s, (b) 0.1 °C/s, (c) 0.2 °C/s, (d) 0.5 °C/s, (e) 1 °C/s, (f) 2 °C/s, (g) 5 °C/s, (h) 10 °C/s, (i) 20 °C/s, (j) 40 °C/s

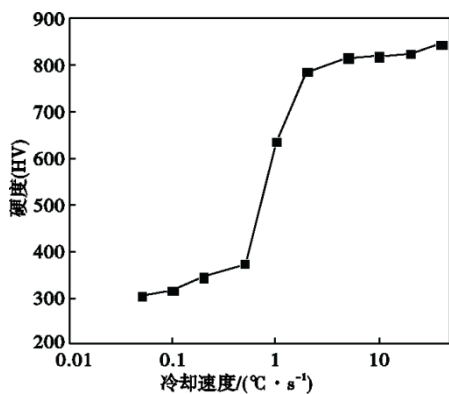


图 5 50SiMnCr 钢的硬度-冷却速率变化曲线

Fig. 5 Relationship between hardness and cooling rate of 50SiMnCr steel

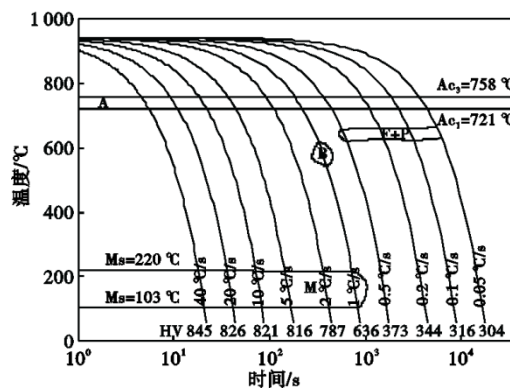


图 6 50SiMnCr 钢的静态 CCT 曲线

Fig. 6 Static CCT curve of 50SiMnCr steel

转变冷却速率显著低于 52CrMoV4 弹簧钢和 60Si2Mn 弹簧钢,这是因为实验钢具有较高质量分数的合金元素。

静态 CCT 曲线在制定弹簧钢轧制和热处理工艺中起着非常重要的作用。例如,结合 50SiMnCr 钢的静态 CCT 曲线可知,该钢进行油冷淬火时的冷却速率应大于马氏体临界转变冷却速率(2 °C/s);为保证该钢淬火过程中马氏体不发生回火,淬火油的油温应低于 M_f 温度(103 °C)。

3 结论

(1) 获得了热处理条件下 50SiMnCr 钢的力学性能,达到了 2 000 MPa 级别的设计要求。经 880 °C 淬火+380 °C 回火后,其抗拉强度为 2 095 MPa,屈服强度为 1 855 MPa,伸长率为 8.4%,断面收缩率为 28.0%。

(2) 测试得到了 50SiMnCr 钢的相变温度以及由奥氏体区经不同速率冷却后的显微组织。其 $A_{c1}=721$ °C, $A_{c3}=758$ °C, $M_s=220$ °C, $M_f=103$ °C。当冷却速率在 0.05~0.5 °C/s 范围内时,由于冷却速率较

为缓慢,此时存在两种相变组织,分别为珠光体和铁素体。当冷却速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,转变为贝氏体和马氏体的两相组织。当冷却速率达到 $2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 及以上

时,50SiMnCr钢全部由马氏体组织组成。随着冷却速率的增加,50SiMnCr钢的宏观维氏硬度随之增加。

参考文献

- [1] 杨 涵,杨广丰,刘宁豪.膜式空气弹簧变活塞型线对静刚度特性的影响[J].汽车实用技术,2024,49(13):83-89.
- [2] 赵海兴.煤矿双桥驱动铰接式自卸车钢板弹簧悬架设计[J].工程机械,2023,54(3):82-89.
- [3] 姜军平,叶明瑞,辛庆锋,等.钢板弹簧横置对车辆操纵稳定性影响的研究[J].机械制造,2022,60(2):8-11+21.
- [4] Bhatt C D, Nadarajan M, Balaji R, et al. Leaf spring model for heavy load vehicle using solid works and ANSYS analysis[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 33: 4764-4770.
- [5] Noronha B, Yesudasan S, Chacko S. Static and dynamic analysis of automotive leaf spring: A comparative study of various materials using ANSYS [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2020, 20(3): 804-818.
- [6] Venkatesan M, Devaraj D H. Design and analysis of composite leaf spring in light vehicle [J]. International Journal of Modern Engineering Research, 2012, 2(1): 2249-6645.
- [7] 周 洲,肖罗喜,程 杨,等.主副式复合材料板簧结构设计及性能验证[J].工程塑料应用,2018,46(7):74-77+82.
- [8] 汪 玥.新型高强度汽车板簧钢加工工艺与组织性能研究[D].沈阳:东北大学,2017.
- [9] 韩建中,韩 晖,高 伟,等.高性能新型弹簧钢在汽车弹簧上的应用研究[J].汽车技术,2000(12):24-26.
- [10] 蒋文森,胡志华,栾道成,等.新型贝氏体板簧钢的组织及性能[J].金属热处理,2022,47(7):151-155.
- [11] 陈礼清,王 帅,赵 阳.超高强韧弹簧钢及其研究现状和发展趋势[J].材料与冶金学报,2022,21(5):313-322.
- [12] Matjeke V J, van der Merwe J W, Vithi N L. Determination of critical transformation temperatures for the optimisation of spring steel heat treatment processes[J]. Metals, 2021, 11(7): 1014.
- [13] Wang X W, Hu Q F, Zhang C L, et al. Optimization of heat treatment for 38Si7 spring steel with excellent mechanical properties and controlled decarburization [J]. Materials, 2022, 15 (11) : 3763.
- [14] Liu F B, Chen K, Kang C P, et al. Effects of V-Nb microalloying on the microstructure and properties of spring steel under different quenching-tempering times[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 779-793.
- [15] 路 峰,张 佩,李 琦,等.18CrNiMo7-6钢静态CCT曲线测定与组织分析[J].特殊钢,2024,45(3):91-95.
- [16] 黄 刚,吴开明,周 峰,等.薄板坯连铸连轧生产65Mn钢的CCT曲线和淬透性[J].材料工程,2012,40(4):52-55+61.
- [17] 朱 帅,李 阳,王广顺,等.锅炉扁钢用免退火12Cr1MoV盘条控轧控冷工艺优化[J].特殊钢,2024,45(1):94-97.
- [18] 赵 阳,江 飞,孙艳姣.50CrVA弹簧钢的连续冷却转变行为研究[J].四川冶金,2022,44(5):5-7+35.
- [19] 万 源,张金鑫,李 泽,等.52CrMoV4弹簧钢CCT曲线的测定和分析[J].山东冶金,2023,45(6):41-43.
- [20] 孙 伟,张炜星,张慧星,等.60Si2Mn弹簧钢连续冷却组织调控研究[J].中国测试,2020,46(2):137-142.