

退火工艺对 2 000 MPa 级冷拉钢丝 组织和性能的影响

苏红艳

(鹤壁职业技术学院建筑设计与工程学院, 河南 鹤壁 458030)

摘 要:利用扫描电子显微镜、透射电子显微镜,并结合常规的力学检测手段,采用退火模拟了一种冷拉钢丝的镀锌过程,研究了镀锌过程中冷拉钢丝组织和性能的变化。试验结果表明:退火时间是影响钢丝微观组织和力学性能的主要因素,随着退火时间的延长,冷拉钢丝的强度轻微波动后大幅度下降,扭转性能呈现先降低后上升的趋势,且其强度上升的阶段与其扭转性能显著恶化的阶段一致。钢丝表层组织首先出现退化,片层状的渗碳体断裂,形成渗碳体颗粒,且铁素体内部位错密度降低,而钢丝内部组织可保持相对完整的珠光体片层结构;经长时间保温处理后,其表层和内部的珠光体片层组织均出现全面退化。冷拉钢丝在镀锌过程中扭转性能剧烈恶化的原因是其表层组织与内部组织不一致,表层强度较高且扭转过程中变形最大,由此产生的应力集中迅速恶化扭转性能。

关键词:冷拉钢丝;退火;强度;扭转性能;组织

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)02-0172-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.02.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

The effect of annealing process on the microstructures and properties of 2 000 MPa cold-drawn steel wire

Su Hongyan

(School of Architectural Design and Engineering, Hebi Vocational and Technical College, Hebi 458030, Henan, China)

Abstract: Annealing was used to simulate the galvanizing process of a kind of cold drawn steel wire, and the changes in the structure and properties of the cold drawn steel wire during the galvanizing process were studied utilizing a scanning electron microscope, transmission electron microscope, combined with conventional mechanical testing methods in this paper. The test results showed that the annealing time affected the steel wire's microstructure and mechanical properties. With the extension of annealing time, the strength of cold drawn steel wire fluctuated first and then decreased significantly subsequently. Meanwhile, the torsional property showed a trend of decreasing first and then rising, and the stage of strength rising was consistent with the stage of significant deterioration of its torsional property. In addition, the surface structure of the steel wire firstly degenerated, the lamellar cementite breaks, forming cementite particles, and the internal dislocation density in the ferrite decreased, while the internal structure of the steel wire could maintain a relatively complete pearlite lamellar structure; after a long time of heat treatment, the surface and internal pearlite lamellar structures all degenerated. The severe deterioration of the torsional properties of cold drawn steel wire in the process of galvanizing

收稿日期: 2020-11-28

基金项目: 河南省高校重点科研项目(21B56005)。

作者简介: 苏红艳(1978—),女,汉族,副教授,硕士研究生,长期从事建筑结构用材料的研发与教学, E-mail: jgxyshy@163.com。

was the surface structure inconsistent with the internal structure, and the surface strength was high, causing the deformation was the largest in the torsion process. As a result, stress concentration rapidly deteriorated the torsional performance.

Key words: cold-drawn steel wire, annealing, strength, torsion property, microstructure

0 引言

镀锌钢丝是制造桥梁缆索的主要材料,是现代大型桥梁的核心材料,也广泛应用于建筑工程领域。随着桥梁跨度的增加,对镀锌钢丝的强度要求也越来越高^[1-3]。目前全球瞩目的沪通长江大桥桥索钢丝尺寸及强度要求为 $\text{Ø}6.9 \text{ mm}-2\ 000 \text{ MPa}$,是目前世界上最高强度的桥梁缆索,同时,镀锌钢丝要求具有极优的扭转性能(≥ 12 次)。为提高钢丝的耐腐蚀性能,必须对钢丝在锌池中进行热镀锌处理^[4],典型的热镀锌工艺为 $450\text{ °C}-50 \text{ s}$,热镀锌后钢丝直径增加约 0.1 mm 。冷拔钢丝经热镀锌后出现扭转分层一直是科研人员关注的重点^[3-6],且钢丝强度越高,其扭转性能在热镀过程中的恶化趋势越大,2 000 MPa 级冷拔钢丝热镀锌后的扭转合格率普遍低于 20%,研究热镀锌过程中钢丝组织和性能的变化从而抑制其扭转性能的恶化,进而提高材料的扭转合格率,对于保证桥梁整体结构安全是非常必要的。

对钢丝进行退火处理是模拟钢丝热镀锌过程中组织和性能变化的一种常用手段。涂益友^[7]等人通过对钢丝进行不同时间的退火处理,研究了加热过

程中钢丝的组织 and 性能变化;有人研究了不同退火时间对钢丝扭转过程中出现分层现象的影响^[8],并对剪切拉伸双向应力条件下退火温度对中碳钢渗碳体球化的影响也进行了研究;王雷^[9]等人研究了 200 °C 以下低温回火时冷拔钢丝组织及性能的变化。但目前对冷拔钢丝在热镀锌过程中扭转性能恶化的原因尚无统一论,对高强钢丝扭转性能提高和稳定方法的探索相当匮乏。

笔者在实验室中对钢丝样进行了不同温度、不同时间的镀锌加热模拟,全面研究了加热过程中钢丝的性能及组织变化,分析了冷拉钢丝热镀过程中扭转性能恶化的原因,并探究了稳定并提高钢丝扭转性能的方法,以期对钢丝生产提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料选用某钢厂生产的一种 $\text{Ø}14.0 \text{ mm}$ 热轧盘条拉拔成的直径为 $\text{Ø}6.9 \text{ mm}$ 的钢丝,拉拔整体压缩率为 75.7%,采用 8 个道次进行连续冷拉拔,最大单道次压下率不超过 19.7%,钢丝主要化学成分见表 1。

表 1 试验材料的主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of tested material

C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ti	%
0.97	0.95	0.55	0.015	0.010	0.35	0.06	0.03	

典型热镀锌工艺约为 $450\text{ °C}-50 \text{ s}$,由于热镀锌是在锌液中进行的,热传导效率显著高于加热炉,因此为了全面模拟热镀锌过程中的组织和性能变化,模拟退火适当延长延长时间,分别为 0.5、1、2、3、5、15、30、60 和 120 min;同时为了研究退火温度对钢丝组织和性能的影响,选择退火温度为 420、450 和 480 °C;退火处理均在 MSRA-621 高温加热炉中进行。

退火前后钢丝材料的抗拉强度在室温下使用 CMT 5105 式万能试验机进行测试,根据国家标准 GB/T 228—2002 进行。钢丝的扭转性能通过 CTT 500 类型扭转试验机测试,扭力测试按照国家标准

GB/T 10128—1998 进行。钢丝的横截面显微硬度测试通过 Q 60A+型维氏硬度计,按照国家标准 GB/T 4340.1—2009 进行。钢丝的微观结构使用扫描电子显微镜 (SEM, FEI Siron-400) 和透射电子显微镜 (TEM, JEM 2000 EX) 进行检测。

2 试验结果分析及讨论

2.1 抗拉强度及扭转性能变化

钢丝的扭转性能和抗拉强度在 $420\sim 480\text{ °C}$ 、 $0\sim 3 \text{ min}$ 范围内随保温温度及时间的变化如图 1 所示,从图 1 可以看出:保温温度对钢丝的抗拉强度

及扭转性能影响较小, 钢丝性能变化的关键因素是热处理时间。在试验范围内, 随着保温时间的延长, 冷拔钢丝的抗拉强度先下降, 然后升高, 下降幅度约 80 MPa, 经 3 min 保温后可回升至之前水平。在 1 min 范围内, 钢丝的扭转性能可维持在 15 次以上,

扭转断口呈平齐状, 钢丝表面具有均匀的扭转变形痕迹, 如图 2(a)所示; 随着保温时间进一步延长, 热处理时间达 1 min 以上时, 钢丝扭转性能剧烈恶化, 断口呈劈裂状, 扭转表面区域表面有明显的分层特征, 如图 2(b)所示。

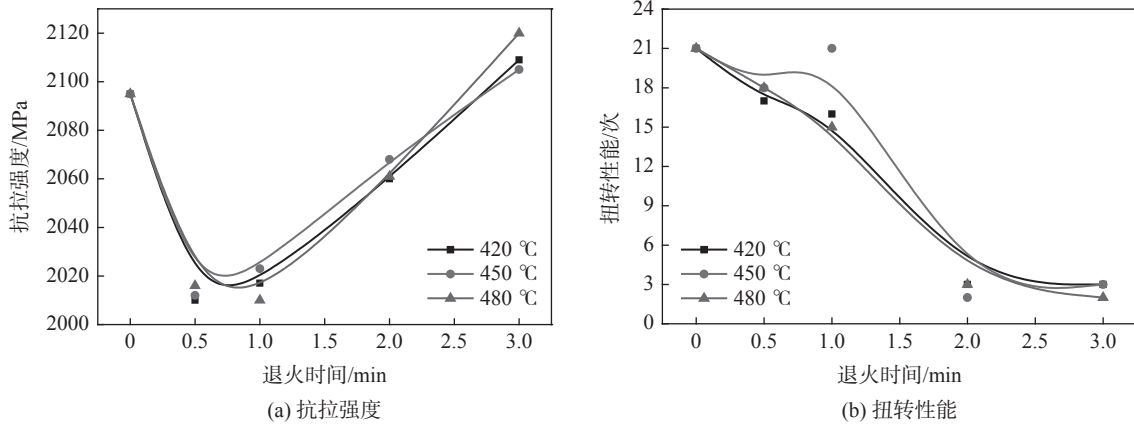


图 1 退火温度对材料力学性能的影响
Fig. 1 Effect of annealing temperature on the mechanical properties of materials

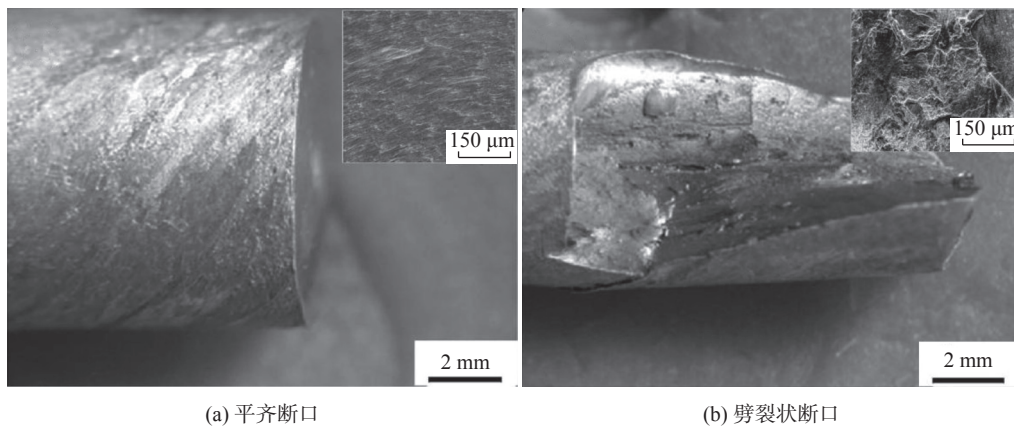


图 2 扭转断口宏观形貌
Fig. 2 Macroscopic features of torsion fracture

徐忠良^[10]测量了一种光面钢丝的 DSC 曲线, 发现在 450 °C 附近出现了一个明显的放热峰, 解释该现象是钢丝组织在 450 °C 时发生了变化, 而且推测 450 °C 时的组织变化剧烈恶化了扭转性能。试验结果显示, 在 420 ~ 480 °C 范围内保温时间超过 1 min 后, 钢丝扭转性能的恶化与温度不存在强烈的影响关系。锌的熔点为 419 °C, 过高的锌温会导致锌液的剧烈挥发, 污染环境且造成成本增加, 因此通过调整锌液温度来改善钢丝扭转性能不可行。

保持加热温度为 450 °C 一定, 钢丝的抗拉强度及扭转性能随保温时间的变化如图 3 所示, 在 3 min 以内钢丝的强度可维持在 2 000 MPa 以上; 当

保温时间超过 3 min 后, 钢丝的强度出现大幅度降低。钢丝的扭转性能随保温时间的延长出现先降低后升高的趋势, 在 2 ~ 5 min 范围内钢丝的扭转性能恶化至 5 次以下, 而后又逐渐回升, 扭转断口形态从劈裂状转变为平口状。

镀锌钢丝要求为抗拉强度 $\geq 2\ 000$ MPa, 扭转 ≥ 12 次。根据图 3 中钢丝性能的变化, 仅保温 0.5 min 和 1 min 后试样的综合性能满足要求, 通过延长保温时间来达到强度和扭转性能的匹配是不可能的。在实际生产中, 由于要保证镀锌层的厚度, 钢丝的镀锌时间不能降低, 这也是制约高强镀锌钢丝质量的关键。

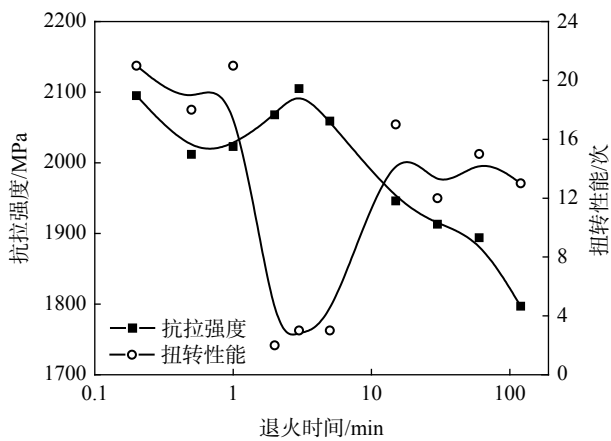


图 3 450 °C 不同退火时间对钢丝强度及扭转的影响

Fig. 3 Effects of different annealing times on strength and torsional ductility of steel wire at 450 °C

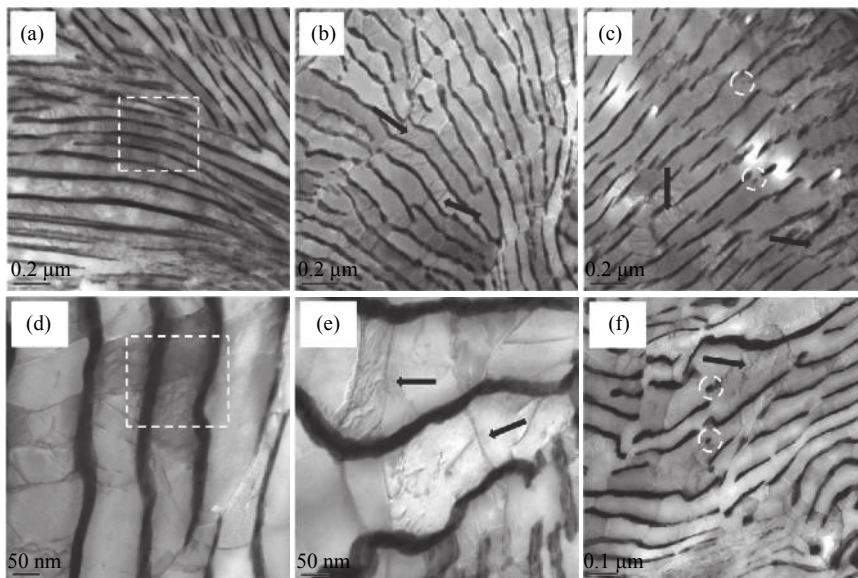
2.2 组织观察

退火前后试样心部的典型透射电镜照片如图 4 所示。冷拔钢丝组织中存在大量的高密度位错,如图 4 中方形区域所示,其片层珠光体组织中的渗碳

体保持连续平直的片状结构。经过 450 °C-5 min 退火后,试样组织中的位错密度降低并形成较稳定的亚晶界,如箭头所示,片层组织沿亚晶界弯曲错开,渗碳体平直度下降;随着退火时间延长至 15 min,连续的渗碳体大幅度断开,片层组织退化严重,另形成部分纳米级别的渗碳体颗粒,如环形区域所示。

对各试样横截面的非片层状组织进行定量统计,结果如图 5 所示。可以看出,试样表层组织的退化程度始终高于心部组织,而且表层与心部组织的退化差异随退火时间的延长出现先增大后降低的趋势。

冷拔珠光体钢丝经 450 °C 退火 2~5 min 后扭转性能恶化明显,而该阶段钢丝的强度和硬度仍处于较高水平,结合前人对冷拔珠光体钢丝组织和强度的变化规律研究^[5,11],可推理出在该阶段的显微组织变化为碳原子扩散至铁素体中的位错附近钉扎位错和片状珠光体的部分退化,与图 4 一致。



(a, d) 退火前; (b, e) 450 °C, 5 min; (c, f) 450 °C, 15 min

图 4 退火前后试样的横截面中心位置的典型 TEM 照片

Fig. 4 Typical TEM photographs of the samples before and after annealing (the cross-sectional center)

2.3 显微硬度测量

对 450 °C 不同时间保温后钢丝试样的横截面显微硬度(HV10)进行测量,测量曲线为通过钢丝圆心的两条垂直线,测量点间隔为 0.5 mm。钢丝试样的表层硬度普遍高于心部硬度,对各试样的硬度均值、表层和心部的硬度差值进行统计,结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,试样的硬度均值变化趋势与强度变化一致:随着保温时间的延长,试样硬度先上

升再下降,并在 3 min 处达到顶峰。钢丝表面及内部的显微硬度差整体上先增大后降低,与钢丝扭转性能变化趋势相反,在 2~5 min 范围内,钢丝的硬度(HV10)差异处于较高水平,在 5 min 处达到最大值 49。显微硬度差说明钢丝的表层组织和心部组织存在差异,表层组织出现了退化,而心部组织尚未变化。随着保温时间的进一步延长,钢丝的心部和表层发生同样的球化,强度差异降低。冷拔钢丝表

层与心部组织产生差异的主要原因是拉拔过程中表层组织变形量更大,其中储存能量更多,位错密度更高;在加热过程中表层组织受热程度更大,因此在加热过程中钢丝表层组织变化更为剧烈。

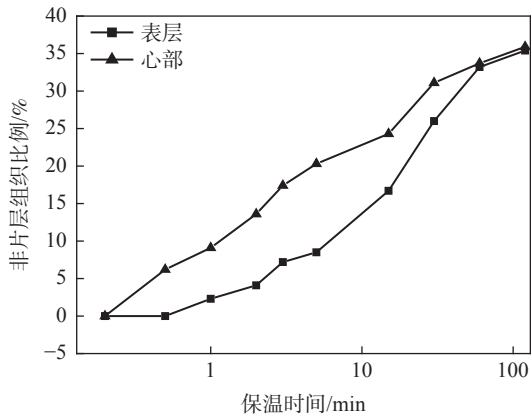


图5 各试样横截面表层及心部组织的非片层组织比例
Fig. 5 The proportion of non-lamellar structures in surface and matrix structures for the cross sections of each specimen

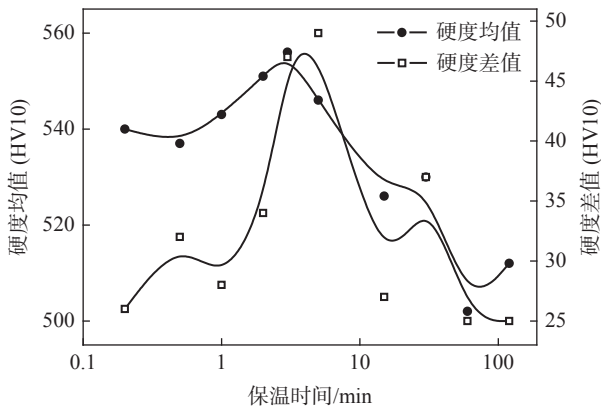


图6 450 °C 下不同时间保温后钢丝的硬度
Fig. 6 Hardness of steel wires after holding at 450 °C for different times

综合以上检验结果可以发现,当试样横截面表层与心部组织的退化差异程度超过 8% 时,其横截面显微硬度(HV)极值差超过 40,对应的扭转性能小于 3 次,说明钢丝表层与心部的组织和性能差异是造成其扭转性能恶化的主要原因。扭转过程中表层组织变形最大,导致钢丝在扭转过程中产生内应力集中^[7],进而造成扭转分层。前人研究表明^[4]:渗碳体表面形成的空洞^[8]以及层状铁素体中碳浓度的差异^[2]均被认为是可能的应力集中来源。

参考文献

[1] Wan Baotian. High strength galvanized steel wire for bridge cables[J]. *World Bridge*, 2005, (1): 62–66. (万宝田. 桥梁缆索用高强度镀锌钢丝[J]. *世界桥梁*, 2005, (1): 62–66.)

在 450 °C,1 min 以内时,钢丝珠光体组织保持稳定的片层状结构,钢丝的强韧性匹配俱佳。当保温时间超过 1 min 后,钢丝表层组织中由于碳原子的扩散运动而出现渗碳体部分退化, Watte^[12] 等人从能量角度进行了解释,位错位置的能量状态较间隙位置更低,当碳原子在受热后会获得能量越过能量势垒聚集于位错位置。退火过程中钢丝表层处聚集于位错的碳原子对位错产生钉扎作用,起到了强化钢丝的效果,而钢丝内部组织未发生改变;扭转过程中表层组织变形最大,由于表层和心部组织的差异造成了应力集中,钢丝从表层渗碳体发生退化部位起裂,最终导致钢丝发生异常断裂。这与图 3 中检测到的随着试样强度的上升,其扭转性能显著恶化的趋势一致。针对该原因,可以通过两种方式来提高钢丝加热过程中的扭转性能:强化珠光体组织中的渗碳体强度,维持其片层状结构,抑制渗碳体在加热过程中的球化;削弱纳米级渗碳体对位错的钉扎作用,减缓表层组织塑性降低程度,减少应力集中。

3 结论

在实验室条件下研究了镀锌模拟退火过程中钢丝组织演变与力学性能的关系,并重点讨论了其扭转性能恶化的原因,得出如下结论:

- 1)退火时间是影响钢丝微观组织和力学性能的主要因素,通过调整保温或延长加热时间来达到强度和扭转性能的匹配是不可行的。
- 2)钢丝表层与心部的片层状变形珠光体在加热过程中退化程度不一致是造成其扭转性能恶化的主要原因,当钢丝横截面表层与心部组织的非片层状组织差异程度超过 8% 时,其横截面显微硬度(HV10)极值差超过 40,扭转性能小于 3 次。
- 3)扭转过程中表层组织变形最大,表层和心部的组织差异会造成钢丝在扭转过程中产生应力集中,进而导致钢丝发生扭转分层。冷拔钢丝表层与心部组织差异的主要原因是拉拔过程中表层组织变形量更大,储存能量更多,位错密度更高;而且在加热过程中表层组织受热程度更大,因此在加热过程中钢丝表层组织变化更为剧烈。

- [2] Chen Xianzhong, Yan Guanglin, Xu Wei, *et al.* Development of high strength and toughness galvanized steel wire[J]. *Metal Products*, 2009, (5): 11-13.
(陈贤忠, 鄢光霖, 徐伟, 等. 强韧性特高强度镀锌钢丝的研制[J]. *金属制品*, 2009, (5): 11-13.)
- [3] Zhang Yunxiang. Research on microstructure evolution and property prediction system of high strength wire rod during hot working[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
(张云祥. 高强度线材热加工的组织演变和性能预报系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.)
- [4] Shen Yunxia, Fang Feng, Jiang Jianqing. Microstructure and properties of cold drawn pearlite steel wire during isothermal treatment[J]. *Journal of Material Heat Treatment*, 2009, 30(5): 83-86.
(沈云霞, 方峰, 蒋建清. 等温处理过程中冷拔珠光体钢丝的组织及其性能[J]. *材料热处理学报*, 2009, 30(5): 83-86.)
- [5] Ye Jueming. Broken wire problem of steel wire for cable[J]. *Steel Structure*, 2003, (2): 35-36.
(叶觉明. 缆索用钢丝的断丝问题[J]. *钢结构*, 2003, (2): 35-36.)
- [6] Zhang Xiaodan, Liu Wei. Microstructure and ferrite orientation and texture evolution during cold drawing of pearlite steel wire[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(2): 141-146.
(张晓丹, 刘伟. 珠光体钢丝冷拔过程中微观组织及铁素体微区取向与织构演变[J]. *金属学报*, 2010, 46(2): 141-146.)
- [7] Tu Yiyou. Microstructure and mechanical properties of high speed and large strain cold drawn steel wire[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
(涂益友. 高速大应变冷拔钢丝的组织 and 力学性能[D]. 南京: 东南大学, 2006.)
- [8] Meng Xiancheng, Liu Yu, Shi Binghua, *et al.* Study on thermal diffusion law of central carbon segregation in cord billet[J]. *Metal Heat Treatment*, 2009, 34(11): 101-104.
(孟宪成, 刘宇, 史秉华, 等. 帘线钢坯中心碳偏析的热扩散规律研究[J]. *金属热处理*, 2009, 34(11): 101-104.)
- [9] Wang Lei, Ma Han, Li Ping, *et al.* Effect of temperature rise on torsion property of high carbon steel wire during wire drawing[J]. *Metal Heat Treatment*, 2012, 37(11): 33-36.
(王雷, 麻晗, 李平, 等. 拉丝过程中升温对高碳钢丝扭转性能的影响[J]. *金属热处理*, 2012, 37(11): 33-36.)
- [10] Xu Zhongliang. Microstructure and torsion properties of SWRS82B hot rolled wire rod for long span bridge cables[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
(徐忠良. 大跨度桥梁缆索用SWRS82B热轧盘条的组织与钢丝扭转性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.)
- [11] Xiao Yinglong, Tang Mingzhu. Effect of cementite decomposition on delamination of high carbon steel wire[J]. *Metal Products*, 2006, (2): 15-21.
(肖英龙, 唐明珠. 渗碳体分解对高碳钢丝分层的影响[J]. *金属制品*, 2006, (2): 15-21.)
- [12] Watte P, Humbeek J V, Aernoudt E, *et al.* Strain ageing in heavily drawn eutectoid steel wires[J]. *Scripta Materialia*, 1996, 34(1): 85-95.

编辑 杨冬梅

(上接第 132 页)

- [23] Chen Y S, Haley D, Gerstls S A, *et al.* Direct observation of individual hydrogen atoms at trapping sites in a ferritic steel[J]. *Science*, 2017, 355: 1196-1199.
- [24] Kimura T, Kawabata F, Amano K, *et al.* The third-generation TMCP combined with fine inclusion metallurgy and development of heavy gauge H-shapes with excellent seismic-resistance for building structure[J]. *Materia Japan*, 1999, 38(2): 160-162.
- [25] Liu Jian, Wang Huakun, Song Liqiu, *et al.* Research and application of vanadium nitrogen microalloying high strength steel[J]. *Sichuan Metallurgy*, 2006, 28(1): 24-27.
(刘建, 王华昆, 宋立秋, 等. 钒氮微合金化高强度钢的研究及应用[J]. *四川冶金*, 2006, 28(1): 24-27.)
- [26] Kang Y, Jeong S, Kang J H, *et al.* Factors affecting the inclusion potency for acicular ferrite nucleation in high-strength steel welds[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47A(6): 2842-2854.
- [27] Yang Jichun, Yang Quanhai, Zhao Wei. Effect of yttrium on corrosion resistance of X100 pipeline steel[J]. *Rare Earth*, 2018, 39(3): 101-107.
(杨吉春, 杨全海, 赵伟. 钇对 X100 管线钢抗腐蚀性能的影响[J]. *稀土*, 2018, 39(3): 101-107.)

实习编辑 梁光芬

编辑 杨冬梅