

低温回火下冷拔珠光体钢丝组织和性能的研究

胡亚楠

(鹤壁职业技术学院机电工程学院, 河南 鹤壁 458030)

摘要: 利用扫描电子显微镜、透射电子显微镜、X射线衍射仪,并结合常规力学检测手段,研究了冷拔珠光体钢丝经200~300℃低温回火后组织和性能的变化,探究了冷拔珠光体钢丝在低温回火过程中的强韧化机理。结果表明:冷拔珠光体钢丝的渗碳体片层呈非连续状,且在拉拔和回火过程中均存在纳米渗碳体析出行为。经过低温回火后,冷拔钢丝的强度和延展性均提高,但随着回火温度的提高,其强度小幅度降低,而延展性进一步提高。材料的强度变化主要是由于位错强化效应所致,而延展性提高是由于新析出的纳米渗碳体颗粒可以通过旋转和滑动降低拉伸过程中的应力集中。

关键词: 冷拔珠光体钢丝; 低温回火; 组织; 力学性能; 纳米渗碳体

中图分类号: TF76, TG156.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2020)04-0157-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.04.028

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of Low Tempering Temperature on Microstructure and Properties of Cold-drawn Pearlite Steel Wires

Hu Yanan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Vocational and Technical College, Hebei 458030, Henan, China)

Abstract: The properties and structure changes of a cold-drawn pearlite steel wire annealed at 200~300℃ were studied, and the strengthening and toughening mechanism during tempering was revealed by means of scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, X-ray diffraction and conventional mechanical testing methods in this paper. The results show that the pearlite layer of cold drawn steel wire is not continuous, and the precipitation behavior of cementite nanocrystals exists during drawing and tempering. The strength and ductility of cold-drawn steel wire are improved after annealing. With the increasing of annealing temperature, the strength is increased slightly and the ductility is further improved. The change of strength is mainly due to the dislocation strengthening effect, while the improved ductility is due to the fact that the newly precipitated nanocrystalline particles can reduce the stress concentration during tension by rotation and sliding.

Key words: cold drawn pearlite steel wire, low temperature annealing, microstructure, properties, nano-cementite

0 引言

冷拔珠光体钢丝广泛应用于桥梁缆索、汽车轮

胎子午线及弹簧等领域,通常由原始热轧珠光体盘条进行连续多道次冷拉拔生产而成^[1-2]。珠光体是由铁素体和渗碳体交替组成的机械混合物,尽管硬

收稿日期: 2020-04-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102318206)。

作者简介: 胡亚楠(1983—),男,汉族,河南安阳人,讲师,硕士,主要研究方向: 汽车相关配套材料的设计及研发, 0392-3300261, E-mail: 3174513698@qq.com。

相渗碳体仅占珠光体总体积约 $1/9$,但其对冷拔钢丝的强度至关重要^[3],渗碳体的形态变化对材料的性能具有显著的影响。冷拔钢丝在深加工多个阶段都会经历一定程度的升温,而由于冷拔过程钢丝中聚集了大量的能量而处于不稳定状态,冷拔钢丝在加热过程中的组织和性能变化明显,回火处理是模拟钢丝受热的一种常用手段。沈云霞^[4]等人通过对冷拔珠光体钢丝进行 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不同时间的回火处理,研究了加热过程中钢丝的组织和性能变化。王雷^[5]等人研究了在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下低温条件下冷拔钢丝的组织及扭转性能变化。

钢丝在拉拔过程中会由于形变而产生大量热量,造成钢丝温度显著上升,钢丝经拉拔处理后会缠绕在工字轮上,钢丝的密集排列会导致热量聚集,相当于一个低温回火的过程,经实测其温度范围约为 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冷拔珠光体钢丝在 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内渗碳体结构演变及其对钢丝力学性能影响的研究较少,且探究低温回火条件下钢丝性能变化机理对于进一步提升材料的强度和韧性具有重要的意义。

笔者在实验室条件下,研究一种冷拔珠光体钢丝在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火过程中的渗碳体结构和性能的变化,探索了低温回火条件下钢丝力学性能进一步提高的可能性,为改善其综合力学性能提出理论依据。

1 试验材料及方法

试验材料选用宝钢生产的一种 $\phi 14.0\text{ mm}$ 热轧盘条连续冷拉拔成的 $\phi 6.9\text{ mm}$ 钢丝,其主要化学成分如表 1 所示。拉拔整体压缩率为 75.7% (应变 $\varepsilon = 1.42$),最大单道次压下率不超过 19.7% 。为避免钢丝在拉拔过程中的剧烈升温影响其后续低温回火的效

果,采用加强润滑和水冷等措施对钢丝进行降温处理,保证钢丝拉拔过程中的最大温度不超过 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 试样主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of sample %

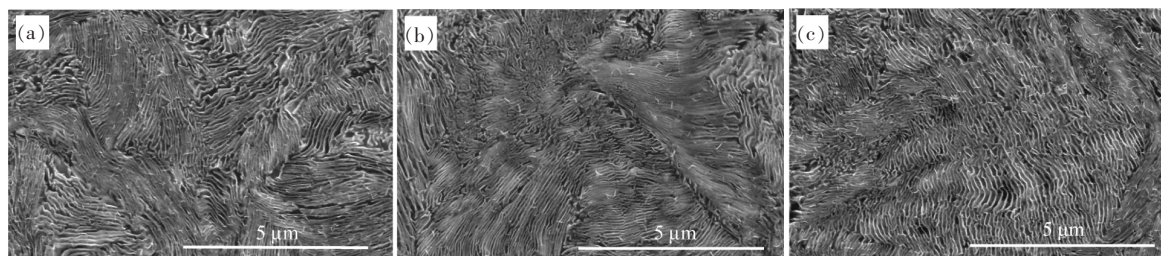
C	Si	Mn	P	S	Cr
0.84	0.23	0.37	0.008	0.006	0.25

采用油浴加热方式对钢丝进行回火处理,油液温度分别为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温时间均为 15 min ,冷却方式为空冷至室温。采用 CMT5105 式万能试验机,在室温下测量回火前后钢丝试样的拉伸性能,拉伸速率为 4 mm/min ,每组试样测量四个样品,取平均值作为有效结果,试验过程参照标准 GB/T228—2002。对试样进行线切割横剖和纵剖,利用扫描电子显微镜 (SEM, FEI Siron-400) 对试样横截面微观形貌进行观察,利用透射电子显微镜 (TEM, JEM 2000 EX) 和 X 射线衍射仪 (MAX2100 型) 对试样纵截面组织进行检测。

2 试验结果分析及讨论

2.1 SEM 组织观察

钢丝回火前后横截面的组织形貌如图 1 所示,可见,回火前后的试样组织一致,均呈现扭曲的珠光体团簇,但珠光体片间距不一致,局部存在碎化现象,说明拉拔过程中钢丝局部形变不一致,且低温回火未对组织产生明显影响。有研究^[6]表明:当珠光体钢丝拉拔过程应变达到一定程度 ($\varepsilon > 2.6$) 后,珠光体中的渗碳体会发生分解,而本研究的拉拔应变 $\varepsilon = 1.42$,因此其中的珠光体片层保持相对完整。



(a)冷拔态(Cold drawing);(b)200 $^{\circ}\text{C}$,15 min 回火;(c)300 $^{\circ}\text{C}$,15 min 回火

图 1 回火前后冷拔珠光体钢丝的 SEM 形貌

Fig. 1 SEM images of cold-drawn pearlite filament before and after tempering

2.2 TEM 组织观察

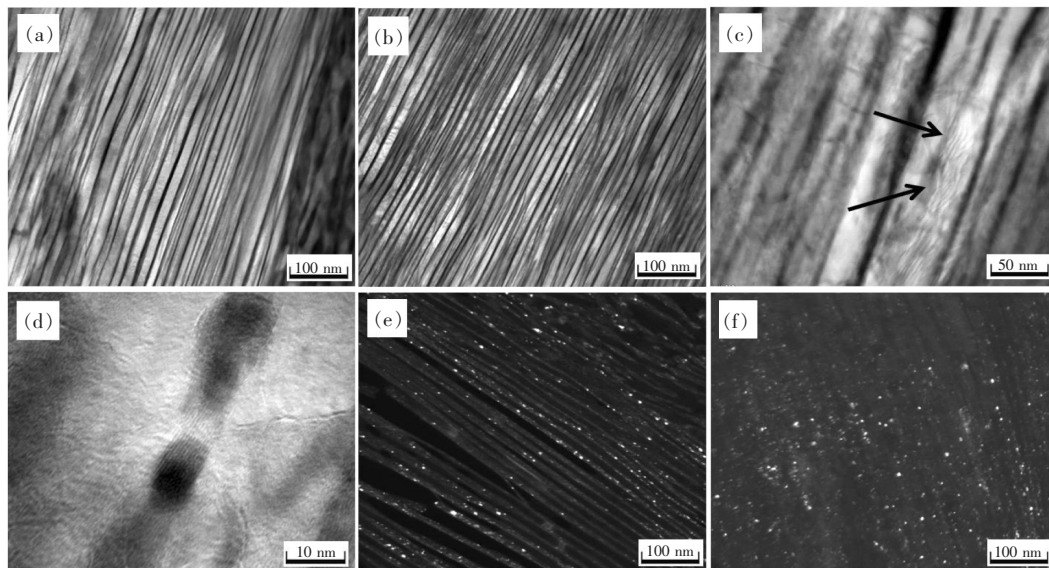
采用透射电镜对回火前后试样的横截面组织进

行微观检测组织特征,结果见图 2。

与扫描电镜观察结果一致,通过对比 2(a) 和 2

(b) 可以看出,回火前后试样的渗碳体及铁素体未发生显著变化,未出现渗碳体球化特征,渗碳体及铁素体片层经过拉拔处理后的排列方向与拉拔方向平行,渗碳体及铁素体片层间距约 30 ~ 50 nm。对冷拔钢丝微观形貌进一步放大,见图 2(c) 和 2(d),铁素体内部可见明显的位错团,如图 2(c) 箭头所示;

而且渗碳体片层并不是完全连续分布,在部分区域出现断层,如图 2(d)。对试样回火前后的暗场像进行对比,见图 2(e) 和 2(f),冷拔钢丝和回火钢丝组织中的渗碳体片层并非单一晶体结构,在其中嵌杂着白亮色的纳米颗粒,而且经过回火后,纳米渗碳体颗粒的析出程度更大,且渗碳体颗粒的分布更均匀。



(a)冷拔钢丝形貌明场像;(b)冷拔钢丝 300 °C回火 15 min 后的形貌明场像;(c)、(d)放大后的冷拔钢丝微观形貌明场像;(e)冷拔钢丝形貌暗场像;(f)为冷拔钢丝 300 °C回火 15 min 后的形貌暗场像

图 2 回火前后冷拔珠光体钢丝的 TEM 形貌

Fig. 2 TEM images of cold-drawn pearlite filaments before and after tempering

2.3 XRD 衍射分析

图 3 为冷拔珠光体钢丝($\varepsilon = 1.42$)及经不同温度回火 15 min 后的 X 射线衍射光谱。可以看出:冷拔钢丝中(121)和(221)位置较为平缓,没有明显渗碳体峰,说明钢丝组织中的单一渗碳体已部分转变成纳米渗碳体,与图 2(e) 观察结果一致。随着回火温度的提高,(121)和(221)渗碳体峰均出现强度增大,可以解释为冷拔珠光体中的纳米渗碳体颗粒比例增加,与图 2(f) 结果一致。

回火后试样的峰值强度较拉拔态更高,且峰值强度随回火温度的升高而增强,说明了新析出的渗碳体颗粒尺寸较小^[9]。经过回火后,试样的 XRD 能谱中未出现其它异相峰值,仅存在铁素体和渗碳体的衍射峰,证明钢丝在回火过程中并未出现新相,析出的白亮色颗粒为渗碳体。

2.4 拉伸曲线测定

图 4 为冷拔珠光体钢丝($\varepsilon = 1.42$)在不同温度

下回火 15 min 的工程应力—应变曲线。对于冷拔珠光体钢丝,其抗拉强度和极限应变(即延展性)均值分别为 1 750 MPa 和 5.8%。

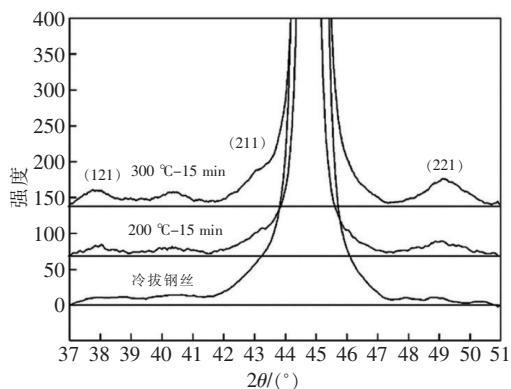


图 3 回火前后冷拔珠光体钢丝的 XRD 衍射结果

Fig. 3 XRD diffraction patterns of cold-drawn pearlite filaments before and after tempering

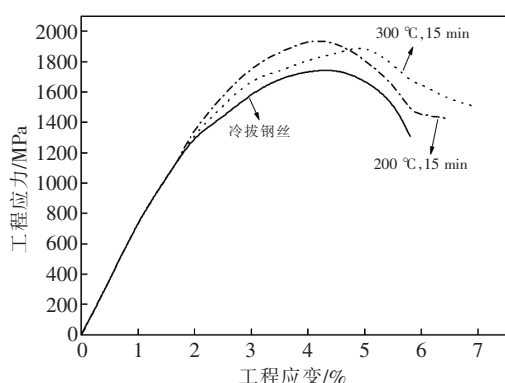


图4 回火前后冷拔珠光体钢丝的工程应力—应变曲线
Fig. 4 Engineering stress-strain curves of cold-drawn pearlite wires before and after tempering

在 200 °C 回火 15 min 后, 钢丝的拉伸强度增加到 1 930 MPa, 延展性也上升到 6.5%。随着回火温度进一步提高到 300 °C, 钢丝的拉伸强度略有下降, 达到 1 915 MPa, 而其延展性进一步上升至 6.9%。

传统的回火过程往往伴随着材料强度的下降和韧性的上升, 但是对于本文研究的冷拔珠光体钢丝而言, 材料的强度和韧性经低温回火后均出现了提升, 但是随着低温回火温度的提高, 其强度出现下降, 但其韧性持续上升, 这证明提高低温回火温度来提升该类材料的强韧性是可行的。

根据 TEM 明暗场像观察及 XRD 检测结果, 冷拔钢丝在拉拔和低温回火过程中均发生了纳米渗碳体析出行为。钢丝的高强度依赖其细化后的珠光体片间距和拉拔过程中植入的高密度位错, 其中渗碳体—铁素体界面及纳米渗碳体阻碍了位错的运动, 且拉拔过程中渗碳体溶解形成的碳原子可以钉扎位错运动, 细晶强化和位错强化共同保证了钢丝的高强度。前人研究成果^[7-10]表明: 珠光体片层结构是钢丝获得高强度和高韧性的基本组织保证。冷拔珠光体钢丝经过一定程度的高温回火后, 钢丝组织中的片层状渗碳体溶解, 碳原子进入铁素体中并以纳米级碳化物颗粒形式析出, 细小的析出相钉扎位错会造成强度上升, 但是由于珠光体片层结构的退化, 材料的强度韧性均下降。

综合而言, 冷拔钢丝组织中具有非连续的渗碳体片层和新析出的纳米渗碳体颗粒, 且纳米渗碳体颗粒在回火过程中会进一步析出, 并导致渗碳体—铁素体界面破坏和珠光体片层结构的分解。回火过程中材料的强度变化决定于位错强化效应: 回火初期碳原子在位错区域的偏聚形成的位错强化效应会提高材料强度, 但是位错在回火过程中会发生运动合并, 且渗碳体—铁素体界面破坏造成对位错的阻力降低, 因此材料的强度逐渐下降。而新析出的纳米渗碳体颗粒可以通过旋转和滑动来改善拉伸过程中的应力集中, 进而提高材料的延展性, 因此随着回火温度的提高, 材料的延展性持续增加。为了保证冷拔珠光体钢丝的强韧性匹配, 在回火过程中需要控制组织变化, 维持珠光体的片层状态, 避免其中的纳米渗碳体过量析出, 进而造成渗碳体—铁素体界面的破坏和珠光体片层结构的退化, 导致材料的强度和韧性均下降。

3 结论

研究了一种 $\phi 6.9$ mm 冷拔珠光体钢丝在 200 °C 和 300 °C 低温回火 15 min 后的性能变化, 并从微观组织角度出发, 揭示了冷拔珠光体钢丝的强韧化机理, 形成了以下结论:

- 1) 珠光体在拉拔过程中会出现渗碳体片层断裂, 冷拔钢丝和回火钢丝组织中的渗碳体片层并非单一晶体结构, 存在着纳米渗碳体析出行为; 回火钢丝的纳米渗碳体析出程度较冷拔钢丝更大, 且分布更为均匀。
- 2) 冷拔钢丝经低温回火后的强度提高, 但随回火温度的提高, 其强度出现小幅度下降。其强度变化主要由于位错强化效应: 回火初期碳原子向位错偏聚, 钉扎位错程度增加, 提高强度; 随着回火温度提高, 位错发生运动而合并, 渗碳体—铁素体界面破坏, 对位错的阻力减弱, 材料强度降低。
- 3) 经低温回火后, 冷拔钢丝的延展性提高, 且回火温度越高, 材料的延展性越好。其组织源于为低温回火过程中存在的纳米渗碳体颗粒的析出行为, 而渗碳体颗粒可以通过旋转和滑动来降低拉伸过程中的应力集中程度。

参考文献

- [1] Luan Baifeng, Zhang Da, Guo Ning, et al. Quantitative characterization of microstructure of used eutectoid steel hot rolled wire rod for bridge cable [J]. Journal of Material Heat Treatment, 2011, 32(7): 78-82.

- (栾佰峰,张达,郭宁,等. 桥梁缆索用过共析钢热轧盘条微观组织定量表征 [J]. 材料热处理学报,2011,32(7) : 78-82.)
- [2] Li Junjie, Godfrey Andrew, Liu Wei. Effect of austenitizing and cooling rate on the microstructure of hypereutectoid steel [J]. Acta Metalica Sinica, 2013, 49(5) : 583-592.
- (李俊杰, Godfrey Andrew, 刘伟. 奥氏体化与冷却速率对过共析钢组织的影响 [J]. 金属学报, 2013, 49(5) : 583-592.)
- [3] Tu Yiyu. 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.)
- [4] Shen Yunxia, Fang Feng, Jiang Jianqing. Microstructure and properties of cold drawn pearlitic 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] Wang Lei, Ma Han, Li Ping, et al. Effect of temperature rise on torsional properties of high carbon steel wire during drawing [J]. Metal Heat Treatment, 2012, 37(11) : 28-31.
- (王雷, 麻哈, 李平, 等. 拉丝过程中温升对高碳钢丝扭转性能的影响 [J]. 金属热处理, 2012, 37(11) : 28-31.)
- [6] Zhu Jiachen, Liu Jing, Cheng Chaoyang, et al. Effect of wire rod structure and texture on torsion performance of bridge cable steel wire [J]. Hot Working Process, 2016, 45(18) : 49-52.
- (朱家晨, 刘静, 程朝阳, 等. 盘条组织及织构对桥梁缆索钢丝扭转性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(18) : 49-52.)
- [7] Zhang Xiaodan, Godfrey A, Liu Wei, et al. Microstructure, ferrite orientation and texture evolution of pearlitic steel wire during cold drawing [J]. Acta Metalica Sinica, 2010, 46(2) : 141-146.
- (张晓丹, Godfrey A, 刘伟, 等. 珠光体钢丝冷拉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.)
- [8] Guo Ning, Luan Baifeng, Zhou Zheng, et al. Analysis of microstructure and mechanical properties of wire rod with different heat treatment processes [J]. Journal of Material Heat Treatment, 2012, 33(4) : 44-49.
- (郭宁, 栾佰峰, 周正, 等. 不同热处理工艺盘条微观组织及力学性能分析 [J]. 材料热处理学报, 2012, 33(4) : 44-49.)
- [9] Xu Zhongliang. Study on the structure and torsion property of SWRS82b hot rolled wire rod for long span bridge cable [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.)
- [10] Xiao Yinglong, Tang Mingzhu. Effect of cementite decomposition on delamination of high carbon steel wire [J]. Metal Products, 2006(2) : 15-17, 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) : 15-17, 21.)

编辑 杨冬梅

蓝鸦矿业公司在格陵兰的钛铁矿项目即将投产

据东南欧矿业网站(MINING SEE) 2020 年 6 月 26 日报道, 蓝鸦矿业公司(Bluejay Mining) 正在推进其在格陵兰岛的邓达斯(Dundas) 钛铁矿项目, 该项目将在近期投入生产。

蓝鸦公司表示, 矿产资源部(Ministry of Mineral Resources) 已正式通告, 邓达斯的公众咨询程序将提交部长级会议讨论。该公司认为“邓达斯钛铁矿项目已被证明是全球品位最高的钛铁矿矿砂项目, 符合 JORC 要求的钛铁矿资源量为 117 百万 t, 品位为 6.1%; 未开发的近海勘探目标具有 300~530 百万 t 钛铁矿, 其原位钛铁矿平均预期品位介于 0.4%~4.8%。”

(摘自 <http://ggmd2.ngac.cn/DepositsNewsCen.aspx?id=1804>)