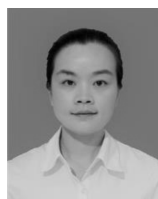


文章编号:1673-9981(2020)03-0184-06

高碳冷拔钢丝退火过程中的显微组织演变及其对强度的影响

刘瑞娟

鹤壁职业技术学院,河南 鹤壁 458030



摘要:利用常规力学性能检验设备、透射电镜及差示扫描量热仪,研究了一种冷拔高碳钢线材在退火过程中的强度变化及其对应的组织演变。试验结果表明:冷拔钢丝在加热过程中的组织共发生三阶段变化,第一阶段和第二阶段的性能变化主要是由于碳原子扩散至片状铁素体中的位错附近和片状渗碳体的部分退化分解,该两阶段不会导致冷拔钢丝强度的大幅度恶化,与低温退火(200℃)阶段一致;第三阶段是由于片状渗碳体的大幅度球化或细小渗碳体颗粒的重新析出,该组织变化伴随着强度的剧烈恶化,与高温退火(400℃以上)阶段一致,在实际热镀过程中应尽量避免。

关键词:冷拔钢丝;渗强化机理;渗碳体;DSC曲线

中图分类号:TG142.1

文献标识码:A

镀锌钢丝是制造桥梁缆索的主要材料,随着桥梁跨度的增加,镀锌钢丝强度要求越来越高^[1]。镀锌钢丝的强度是维持整座桥梁结构的必要要求,且镀锌钢丝强度的提高可以大幅度降低桥梁的建造和维护成本。冷拔工艺生产高强度钢已成为钢丝行业的一个重要课题,冷拔过程可以有效地提高了材料的抗拉强度而不显著降低其延展性,目前已研发的高强桥索用冷拉钢丝已被证明可以达到2500 MPa^[2]。

为提高钢丝的耐蚀性,必须对钢丝进行热镀锌处理^[3],钢丝在450℃锌液中浸润约1 min,热镀后的钢丝直径增加。冷拔钢丝在加热过程中的力学性能变化一直是科研人员关注的重点,加热过程中发生的组织变化可以显著改变钢丝的强度^[3-6]。因此,为了保证冷拔钢丝在热镀过程中的强度不出现大幅度变化,研究冷拔钢丝在退火过程中的组织变化及其对强度的影响是十分有必要的。早期研究表明,渗碳体在珠光体钢的大变形过程中会发生部分溶解^[5-9]。渗碳体溶解的机制已被报道与位错(在渗碳

体/铁素体界面附近的铁素体中)和碳原子(在渗碳体中)^[9-10]之间的相互作用有关,或由于其界面自由能的增加而导致渗碳体失稳^[10],在任何机制中都需要碳原子穿过铁素体/渗碳体界面来实现溶解。因此,通过研究冷拔钢丝在退火过程中的碳原子变化,进而实现钢丝强度的控制,摸索其强化机理是可行的,抑制热镀锌中的硬化和软化进而达到强度稳定是一个重要课题。

研究了退火温度和退火时间对高碳冷拔钢丝力学性能和微观组织的变化,并利用差示扫描量热仪(DSC)和对应的透射形貌确定了退火过程中的强度及其组织变化的原因。

1 试验材料与方法

选用的试验材料为斯太尔摩控冷的热轧盘条,其化学成分如表1所示。热轧盘条(直径13 mm)被酸洗后连续拉拔为直径为5.92 mm的钢丝,拉拔总减面率为79%(总应变量 $\epsilon=1.57$),各道次减面率

不超过 20%。对冷拔钢丝进行退火处理以模拟其热
度过程,退火时间为 0.5,1,15,60 min,退火温度为
200,300,400,450 ℃。

表 1 试样的主要化学成分

Table 1 Main chemical components of samples					
C	Si	Mn	P	S	Cu
0.90	0.95	0.35	0.005	0.011	0.25

对试验在室温下以恒定的位移速度进行拉伸试
验,初始应变率为 8.3×10^{-4} /s。采用传统的电解抛
光技术在试样的纵截面上截取薄箔,使用透射电子
显微镜(TEM)分析不同温度退火后样品的薄箔。
对各试样在流动氩气气氛下采用差示扫描量热计进
行热分析,选用 5,10,20,30 ℃/min 四种不同加热
速率测量其峰值位置。

2 试验结果及讨论

2.1 力学性能变化

图 1 为冷拔钢丝样在退火过程中的抗拉强度随

退火温度和时间的变化。从图 1(a)可见,试样的抗
拉强度随退火温度的变化趋势分为两个阶段,第一
阶段为 0.5~1.0 min 短退火时间,第二阶段为 15~
60 min 长退火时间。第一阶段,在温度升高至 300
℃过程中抗拉强度随温度的升高而升高,而随着退
火温度进一步提高其强度下降。第二阶段,试样强
度随着退火温度的持续上升而呈现连续下降趋势,
试样强度的连续下降说明其组织中发生了软化行
为。得注意的是,试样经 200 ℃退火 15 min 和 60
min 时,与冷拔钢丝中抗拉强度为 1941 MPa 相比,
试样抗拉强度上升至 2000 MPa 以上。从图 1(b)可
见:在 200 ℃退火条件下,随退火时间从 1 min 延长
至 15 min 时,试样的抗拉强度出现了大幅度的增
加;在 300~450 ℃温度范围内进行退火后,试样的
抗拉强度出现连续的降低;在 200 ℃退火时,退火
0.5 min 和 1 min 后的试样抗拉强度与冷拔钢丝
(1941 MPa)相近,而随着退火时间的增加,拉伸强
度增加到 2055 MPa(15 min),然后降低到 2045
MPa(60 min)试样经 300 ℃退火后的钢丝抗拉强度
均高于冷拔钢丝。

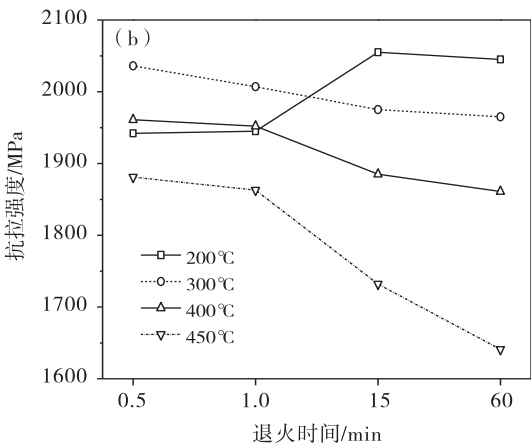
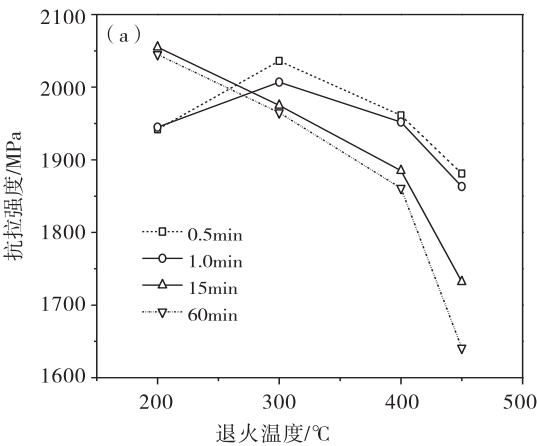


图 1 冷拔钢丝退火过程中抗拉强度随退火温度(a)和退火时间(b)的变化

Fig. 1 Variation of tensile strength with annealing temperature (a) and annealing time (b) during annealing of cold drawn steel wires

2.2 组织演变

冷拔钢丝退火前后的典型透射形貌如图 2 所
示,结合其强度变化可发现:由于退火导致的组织
硬化行为不会伴有冷拔钢丝显微结构的显著变化,
片状渗碳体的形状不发生明显的溶解或球化现象,
微观片层结构无显著改变。试样强度在 200~300
℃间的提升与组织硬化行为密切相关。有人^[11]描

述了组织硬化的两个组织变化行为,即碳原子向铁
素体位错附近的聚集及退火过程中片状渗碳体的
部分分解。由于变形珠光体中的渗碳体处于不稳
定状态,因此在退火过程中容易分解,而溶解至铁
素体中的碳原子会对维持产生钉扎作用,进而在低
于 300 ℃的退火温度下组织硬化导致材料抗拉强
度小幅度上升。

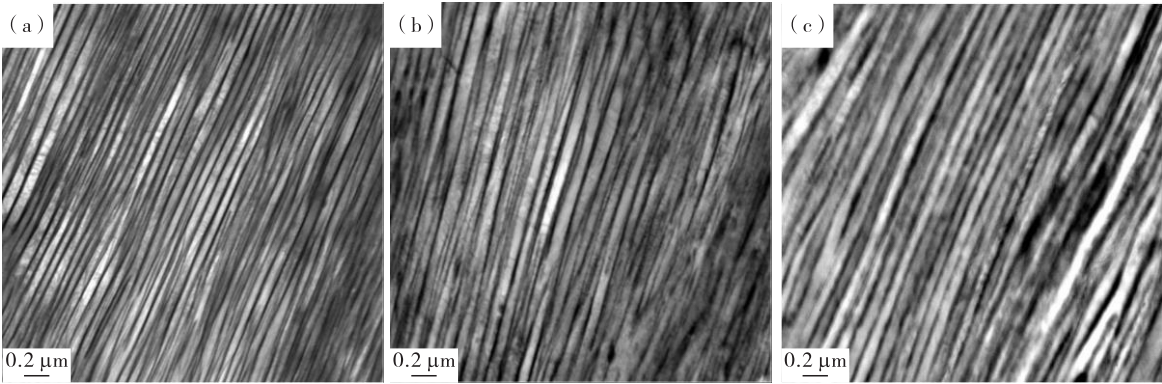


图2 低温退火前后冷拔钢丝后的透射形貌

(a)冷拔钢丝;(b)200 °C退火 0.5 min;(c)200 °C退火 60 min

Fig. 2 Transmission morphology of cold drawn steel wires before and after low temperature annealing

(a) cold drawn steel wire;(b) annealed at 200 °C for 0.5 min;(c) annealed at 200 °C for 60 min

随着退火温度增加至 400 °C,退火前后的试样显微组织和力学性能均发生了很大的变化,图 3 为高温退火后冷拔钢丝的透射形貌. 从图 3(a)可见,试样经 400 °C退火 0.5 min 后,其组织中以完整的片状渗碳体为主,变形片状渗碳体未形成球化颗粒,这说明 400 °C退火 0.5 min 并不是启动片状渗碳体球化的充分条件. 从图 3(b)可见,随着 400 °C

退火时间延长至 15 min 时,其组织中的片状渗碳体开始出现部分球化(图 3(b)中的圆圈区域). 从图 3(c)可见,当退火温度升高至 450 °C 时,即使经过 0.5 min 的短时间退火,试样的组织中也出现了片状渗碳体球化(图 3(c)中的圆圈区域). 从图 3(d)可见,随着 450 °C退火时间达到 60 min 时,钢丝组织中的大多数片状渗碳体均出现了显著球化特征.

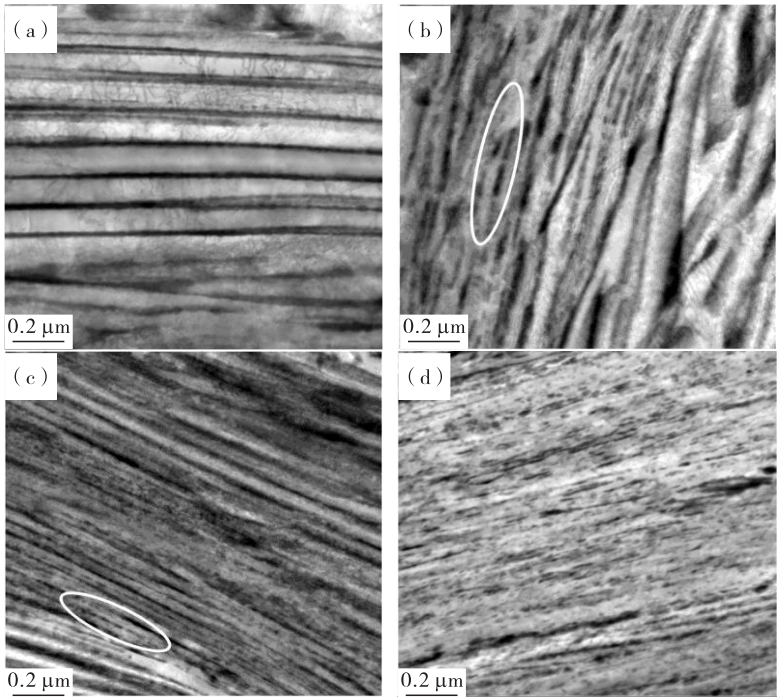


图3 高温退火后冷拔钢丝的透射形貌

(a)400 °C退火 0.5 min;(b)400 °C退火 15 min;(c)450 °C退火 0.5 min;(d)450 °C退火 60 min

Fig. 3 Transmission morphology of cold drawn steel wires after high temperature annealing

(a)annealed at 400 °C for 0.5 min;(b)annealed at 400°C for 15min;(c)annealed at 450°C for 0.5min;(d) annealed at 450°C for 60min

结合试样在 300 ℃ 以上进行退火处理时的组织及强度变化,可确定:退火过程中的组织软化变化主要包括片状渗碳体的球化、渗碳体颗粒的生长;当退火温度升高至 450 ℃ 时,片状渗碳体的球化和铁素体的回复会导致拉伸强度的显著降低。

退火过程中的试样的显微组织变化是导致其抗拉强度变化的主要原因。200 ℃ 条件下退火 1~15 min 的试样抗拉强度的显著增加,可以归因于在 200 ℃ 下片状渗碳体的部分分解,而随着退火时间延长至 60 min,其抗拉强度的下降意味着组织软化行为的发生。当退火温度为 400 ℃ 时,由于组织硬化和软化的平衡,退火 0.5 min 和 1 min 的钢丝的抗拉强度与冷拔钢的抗拉强度相近,然而随着退火时间的增加(60min),组织软化行为加剧,拉伸强度大幅度降低到 1860 MPa。

2.3 DSC 热分析

采用差示扫描量热仪(DSC)对冷拉钢丝进行了研究,如图 4 所示。从图 4 可见,试样的 DSC 曲线显示出三个放热峰,这些峰值可以间接表征冷拔钢丝退火过程中的不同组织变化阶段。

试样的三个温度峰值的大概区域分别为 100~250 ℃,200~350 ℃ 和 400~500 ℃。结合前文中试样加热过程中的组织和性能变化,可确定:第一峰(100~250 ℃)对应的组织变化为间隙溶解的碳原子迁移到片状铁素体中并与位错发生钉扎作用^[7];第二峰(200~350 ℃)对应的组织变化与片状渗碳体的局部溶解密切相关^[8,11];第三峰(400~450 ℃),关于第三峰的机理还没有明确的解释,可能受到一个或多个微观结构变化的影响,例如渗碳体的

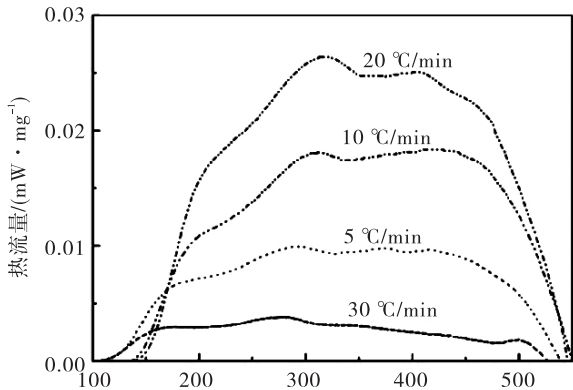


图 4 不同加热速度下冷拔钢丝的 DSC 曲线

Fig. 4 DSC curves of samples at different heating speeds

重新析出、片状渗碳体的大范围球化或铁素体的回复和再结晶等。

为验证退火过程中冷拔钢丝的组织变化不同阶段,对钢丝试样进行 10℃/min 的加热处理,加热至不同温度后进行透射形貌观察,图 5 为冷拔钢丝试样的典型透射形貌。经 275 ℃ 保温后试样显著组织(图 5(a)),虽然经历了组织的前两个阶段变化,但其微观组织与原始冷拔钢丝未见明显区别。随着加热温度提高至 420℃(图 5(b)),其组织中的片状渗碳体出现轻微的断裂,拉丝过程中存储的缺陷发生静态回复,但并没有观察到片状铁素体中渗碳体的析出现象。当加热温度达到 500 ℃ 时(图 5(c)),片状渗碳体的形状不再保持连续,个别渗碳体颗粒开始粗化,另外片状铁素体中渗碳体颗粒的存在意味着渗碳体发生了重新析出。结合三阶段的组织变化可确定,第三峰值是由渗碳体的再沉淀和片状渗碳体的大幅度球化控制的。

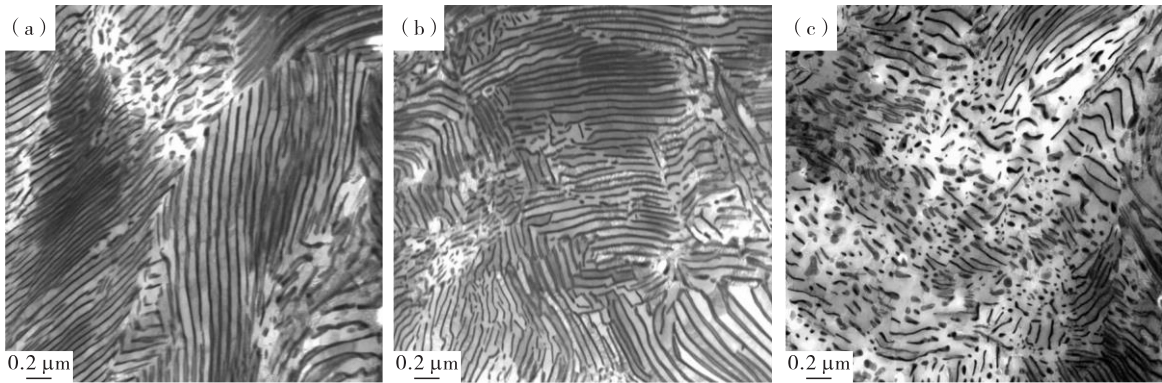


图 5 冷拔钢丝试样的典型透射形貌

(a) 275 ℃ ;(b) 420 ℃ ;(c) 500 ℃

Fig. 5 Typical transmission morphology of cold drawn steel wires

(a) heating to 275℃ ; (b) heating to 420 ℃ ; (c) heating to 500 ℃

综合冷拔钢丝在退火过程中的强度变化和
组织演变,以及 DSC 曲线和 TEM 图像所示的组织变化的表现可确定:试样在低温退火条件下的抗拉强度增加是由组织硬化引起的,其组织变化为片状渗碳体的部分溶解和碳原子溶解至片状铁素体中并钉扎作用,这与 DSC 曲线的第一峰和第二峰对应;而高温退火条件下试样拉伸强度的降低则归因于组织软化,主要组织变化为片状渗碳体的大幅度球化和渗碳体颗粒的再沉淀,对应于 DSC 第三峰。因此,为维持冷拔钢丝试样的强度稳定,在热镀过程中需调整热镀温度及时间,以控制渗碳体的再沉淀和片状渗碳体的大幅度球化,即出现第三峰,进而避免冷拔钢丝强度在热镀过程中出现剧烈恶化。

3 结 论

研究了一种冷拔高碳钢丝退火过程中的强度变化及其组织演变,并结合 DSC 试验,说明了冷拔钢丝试样的组织演变行为对其对力学性能的影响。

高强冷拔钢丝加热过程中 DSC 曲线显示的三个峰值对应着其退火过程中的三个组织变化阶段,即碳原子扩散到片状铁素体中的位错附近、片状渗碳体发生部分溶解、渗碳体发生重新析出或片状渗碳体的大幅度球化。

冷拔钢丝在 200 ℃退火过程中的组织硬化行为与其片状渗碳体的部分溶解和碳原子溶解至片状铁素体中并钉扎作用相关,而在 400 ℃以上退火温度下试样抗拉强度的降低是由于片状渗碳体的大幅度球化和渗碳体颗粒的再沉淀。为避免冷拔钢丝在热镀过程中强度剧烈恶化,需通过工艺调整来避免 DSC 第三峰值的出现。

参考文献:

- [1] FENG Fang, HU Xianjun, CHEN Shaohui, et al. Revealing microstructural and mechanical characteristics of cold-drawn pearlitic steel wires undergoing simulated galvanization treatment [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 547: 51-54.
- [2] WANG Lei, MA Han, LI Ping, et al. Influence of temperature increasing during wire drawing on the torsional property of high-carbon steel wire [J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(11): 28-31.
- [3] 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.
- [4] TU Yiyong, HUANG Linghui, WANG Xiaohui, et al. Effect of Si and Mn interactions on the spheroidization and coarsening behavior of cementite during annealing in severe cold-drawn pearlitic steel [J]. Metall Mater Trans A-Phys Metall Mater Sci, 2016, 47A: 254-259.
- [5] 朱家晨, 刘静, 程朝阳, 等. 盘条组织及结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.
- [6] 张晓丹, GODFREY A, 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组织演变 [J]. 金属学报, 2010, 46(2): 141-146.
- [7] 郭宁, 栾佰峰, 周正. 不同热处理工艺盘条微观组织及力学性能分析研究 [J]. 材料热处理学报, 2012, 33(4): 44-49.
- [8] 栾佰峰, 张达, 郭宁. 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.
- [9] 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.
- [10] 李俊杰, GODFREY A, 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.
- [11] 刘晓丽, 高志平, 张贺宗. 硬线盘条组织中局部晶粒粗大原因分析 [J]. 金属热处理, 2005, 30(11): 85-87.

Microstructure evolution of high carbon cold drawn steel wire during annealing and its effect on strength

LIU Ruijuan

Hebi Polytechnic, Hebi 458030, China

Abstract: The strength and microstructure evolution of a cold-drawn high carbon steel wire during annealing were studied by means of conventional mechanical properties testing equipment, transmission electron microscope and differential scanning calorimeter. The results show that three stages of microstructure change of cold drawn steel wires occurred in the heating process. The performance changes in the first and second stages are mainly due to the diffusion of carbon atoms near dislocations in the flake ferrite and the partial degradation and decomposition of the flake cementite. These two stages do not lead to a significant deterioration of the strength of cold-drawn steel wire, which is consistent with the low-temperature annealing (200 °C) stage. The third peak is due to the large spheroidization of flake cementite or the re-precipitation of fine cementite particles. The change of microstructure is accompanied by the severe deterioration of strength, which is consistent with the high-temperature annealing (above 400 °C) stage and should be avoided as much as possible in the actual hot-dipping process.

Key words: cold drawn steel wire;infiltration strengthening mechanism;cementite;DSC curve