

水浴淬火优化高碳钢盘条： 82B 钢索氏体组织的精准 调控与性能提升

Water Bath Quenching for 82B High-carbon Wire Rod: Microstructural Control and Property Improvement

供稿|叶梦元¹, 石科学¹, 李俊琛² / YE Mengyuan¹, SHI Kexue¹, LI Junchen²

内 容 导 读

为了研究 82B 高碳钢盘条 ($\phi 12.5$ mm) 的水浴淬火工艺, 以 82B 高碳钢制备测试探头, 采用 LTC1200 型冷却特性测试仪测定不同介质浓度、不同介质工作温度下水溶性淬火介质聚丙烯酸钠 (AQ110) 的冷却特性曲线, 探寻最佳淬火介质条件, 并通过系列对比实验明确了 82B 高碳钢盘条的最佳出水温度和吐丝温度。结果表明: 当 82B 高碳钢盘条的吐丝温度为 850°C 、出水温度为 560°C 时, 在介质质量分数为 12%、工作温度 $>95^{\circ}\text{C}$ (沸液) 条件下, 盘条的索氏体转化率可达 96.58%, 平均片层间距为 156.5 nm; 盘条抗拉强度高达 1218 MPa, 延伸率为 17%, 断面收缩率为 37%, 该实验条件下, 盘条的微观组织性能与力学性能均优于斯太尔摩风冷产品。

82B 钢盘条在经热处理、拉拔等工序后可制成具有良好力学性能的钢丝绳。该产品常被用于桥梁、公路、铁路等领域, 是我国建筑领域的一种重要制品^[1-3]。研究发现, 通过优化 82B 钢盘条的热处理工艺可以获得不同含量与间距的索氏体组织, 这种组织形态对其后续拉拔过程中的力学性能具有极大影响^[4]。为了实现热处理行业的绿色健康发展, 目前国内一些钢厂一直致力于绿色无污染的淬火工艺研究, 新型、节能、环保的水浴淬火工艺作为一种新生的淬火工艺, 已成为重要的选择方向之一。目

前, 水溶性聚合物淬火介质作为一种无污染的淬火介质, 得到了广泛研究^[5-7]。聚丙烯酸钠类聚合物淬火介质可以通过调整其浓度和温度来控制冷却速度, 从而获得理想的索氏体组织, 因此被普遍应用于盘条水浴淬火生产中^[8-10]。

本文以聚丙烯酸钠水溶性淬火介质 (AQ110) 及 $\phi 12.5$ mm 的 82B 高碳钢盘条为实验材料, 分别研究了该水浴淬火介质在不同工艺参数下的冷却特性曲线, 以及不同出水温度和吐丝温度对盘条组织性能的影响。

作者单位: 1. 西安汉唐分析检测有限公司, 陕西 西安 710200; 2. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050

实验装置及方法

实验装置与实验材料

本实验采用浓缩的聚丙烯酸钠 (AQ110) 为水溶性淬火介质, 采用 LTC1200 型冷却特性测定仪测定 AQ110 在不同实验参数下的冷却特性曲线。采用 $\phi 12.5 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的 82B 高碳钢为冷却特性测定仪探头; 采用外壳为 Incone1600 合金、直径为 1.5 mm 的热电偶, 准确安装于探头本体中心, 外壳型号与实验用冷却特性测定仪匹配。实验用 82B 钢的化学成分如表 1 所示。

表 1 实验用 82B 钢化学成分 (质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.821	0.205	0.812	≤ 0.02	≤ 0.01	0.196

冷却特性曲线的测定

将淬火介质 AQ110 用去离子水稀释, 使其质量分数分别为 0 (纯去离子水)、4%、8%、12%, 介质工作温度分别为 40、60、80、90 和 $>95^\circ\text{C}$ (沸液), 共 20 组淬火介质。将加工好的 82B 高碳钢探头连接到冷却特性测定仪上, 放入加热炉中加热到 850°C , 保温 5 min 后, 迅速将其放入体积为 1 L 的

淬火介质中。淬火介质冷却特性测定仪可自动采集探头温度随时间的变化数据, 并生成冷却特性曲线。

吐丝温度、出水温度模拟实验

将 5 组 (每组各 3 个) $\phi 12.5 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 的 82B 高碳钢盘条加热到 850°C , 保温 5 min, 进行水浴淬火实验, 每组分别淬火冷却至 600、560、520、480 和 440°C 时取出, 将淬火后的试样制备成扫描电镜试样和金相试样, 后续对其微观组织结构进行对比分析。

实验结果与分析

AQ110 淬火介质条件对冷却曲线的影响

淬火介质为纯去离子水时不同淬火介质温度下的冷却特性曲线如图 1 所示。由图 1 可知, 当淬火介质温度为 40 和 60°C 时, 冷却特性曲线无蒸汽膜阶段, 不能有效控制冷却速度。当淬火介质温度为 80°C 时, 冷却特性曲线出现不太明显的蒸汽膜阶段, 该阶段冷却速度较快且持续时间很短, 在此阶段不能有效控制组织的转变。当淬火介质温度为 90 和 $>95^\circ\text{C}$ 时, 冷却特性曲线上并未出现“驼峰平台”, 说明在这一阶段珠光体并未发生转变。

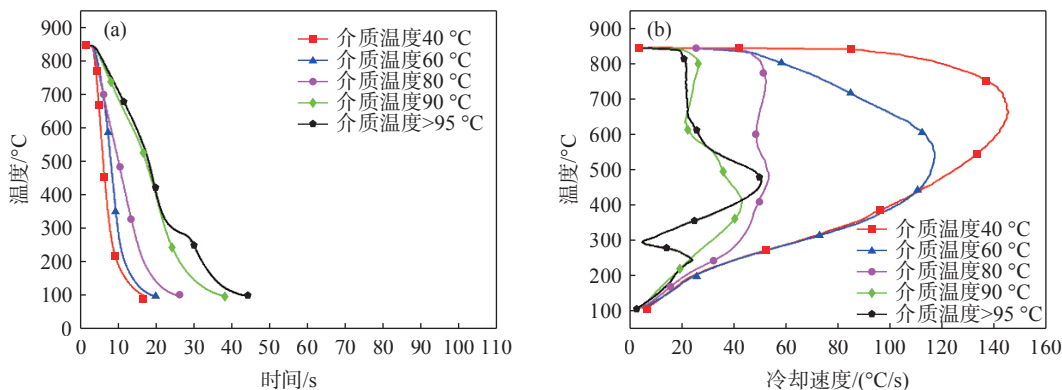


图 1 纯去离子水为淬火介质时不同淬火介质温度下的冷却特性曲线: (a) 时间-温度曲线; (b) 冷却速度-温度曲线

淬火介质质量分数为 4% 时不同淬火介质温度下的冷却特性曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 当淬火介质温度为 40 和 60°C 时, 冷却特性曲线出现蒸汽膜阶段, 但此阶段同纯去离子水淬火时一样, 冷却速度较快、时间短, 不能有效控制组织转变。当淬火介质温度为 80°C 时, 冷却特性曲线上并未出现

“驼峰平台”, 说明在这一阶段珠光体转变并不明显。当淬火介质温度为 90 和 $>95^\circ\text{C}$ 时, 蒸汽膜稳定阶段平均冷却速度约为 20°C/s , 而且在此反应过程中冷却速度波动较大, 不利于产生均匀且片层间距较小的索氏体组织。

淬火介质质量分数为 8% 时不同淬火介质温度

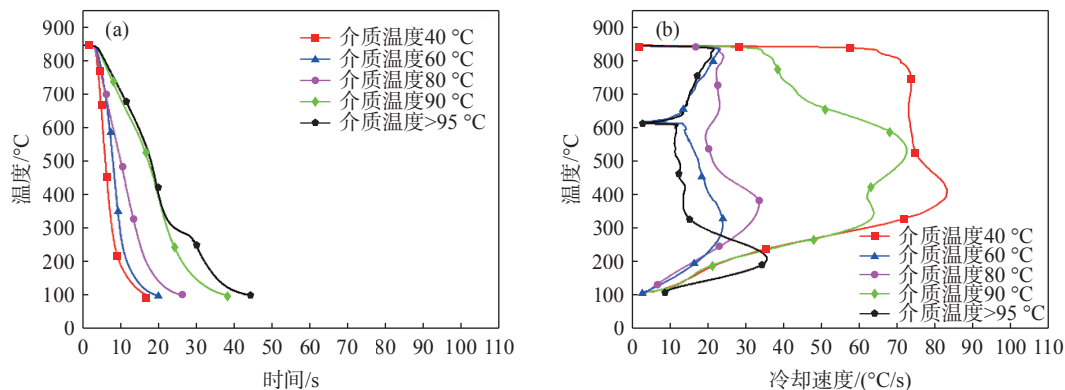


图2 介质质量分数为4%时不同淬火介质温度下的冷却特性曲线: (a) 时间-温度曲线; (b) 冷却速度-温度曲线

下的冷却特性曲线如图3所示。由图3可知,当淬火介质温度为40、60和80 °C时,冷却特性曲线均出现蒸汽膜阶段,但此阶段冷却速度均大于20 °C/s,在这几个温度下反应过程比较剧烈,不利于产生均匀且片层间距较小的索氏体组织。当淬火介质温度为90和>95 °C时,蒸汽膜能够达到稳定阶段,此时冷却速度降为12 °C/s左右,仍>10 °C/s,不利于

形成细小均匀的索氏体组织。

淬火介质质量分数为12%时不同淬火介质温度下的冷却特性曲线如图4所示。由图4可知,当淬火介质温度为40和60 °C时,冷却速度仍>20 °C/s,反应过程剧烈,不能得到稳定的蒸汽膜,不利于索氏体转变。当淬火介质温度为80 °C时,如图4所示,可以得到较为稳定的蒸汽膜阶段,此阶段冷却

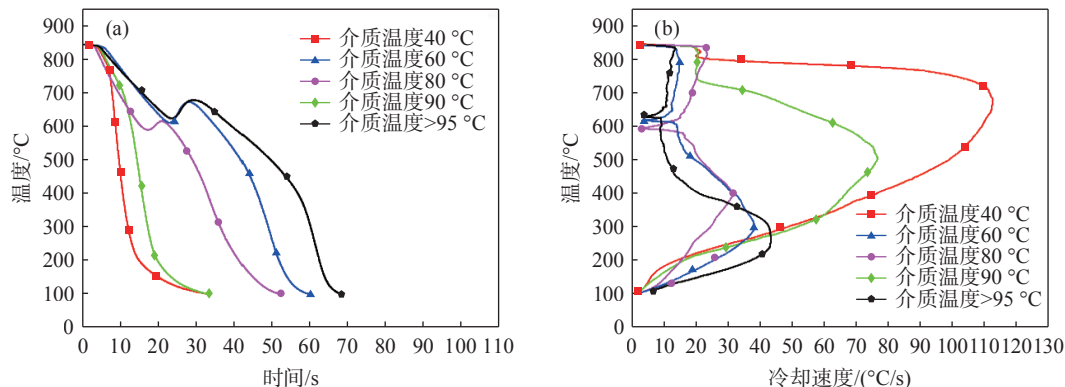


图3 介质质量分数为8%时不同淬火介质温度下的冷却特性曲线: (a) 时间-温度曲线; (b) 冷却速度-温度曲线

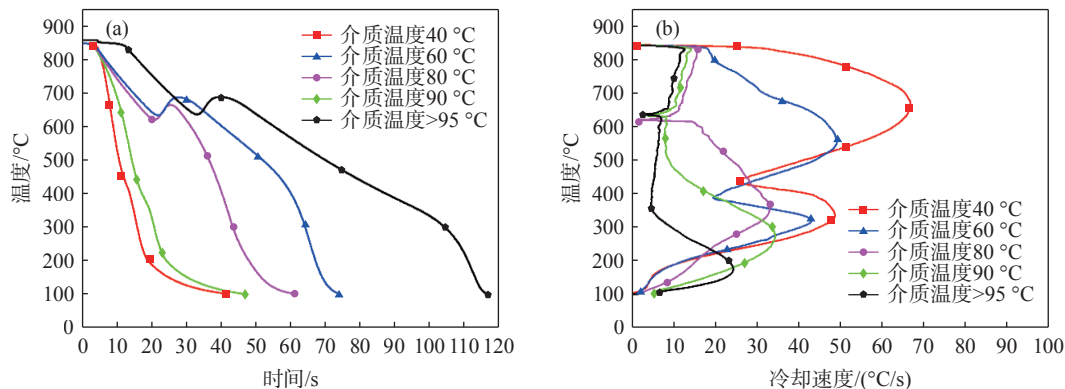


图4 介质质量分数为12%时不同淬火介质温度下的冷却特性曲线: (a) 时间-温度曲线; (b) 冷却速度-温度曲线

速度基本控制在 10~20 °C/s 范围内,可以有效促进珠光体发生转变。但在 80 °C 淬火介质温度下,蒸汽膜破裂温度约为 620 °C,不利于得到均匀的索氏体组织。当淬火介质温度为 90 和 >95 °C 时,可以得到稳定的蒸汽膜阶段,此阶段冷却速度可以有效控制在 7 °C/s 左右。索氏体转变过程中,在高温区保持较低的冷却速度可以使其转变更完全^[1]。因此,当淬火介质质量分数为 12%,淬火介质温度为 90 和 >95 °C 时,可对 82B 钢盘条进行水浴淬火。由于在工业化生产中水浴淬火介质温度控制在 >95 °C 沸液状态比控制在 90 °C 更容易实现,因此确定淬火介质温度为 >95 °C。

82B 钢盘条出水温度的确定

将 5 组(每组 3 个) $\phi 12.5 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 的 82B 高碳钢盘条试样加热到 850 °C,保温 5 min 后,在质量分数为 12%、工作温度为 >95 °C 的水溶性淬火介质中进行淬火,分别淬火冷却至 600、560、520、480 和 440 °C,根据冷却特性曲线计算得到在水时间分别为 55、60、66、73 和 79 s,到时间后迅速取出后制成金相试样。不同出水温度(600、560、520、480 和 440 °C)下 82B 高碳钢盘条的显微组织如图 5 所示,在进行索氏体化率计算时,每组 3 个试样各取 5 个不同视场进行统计,取平均值,结果如表 2 所示。由表 2 可知,出水温度为 560 °C 时盘条的索氏体化率最高。

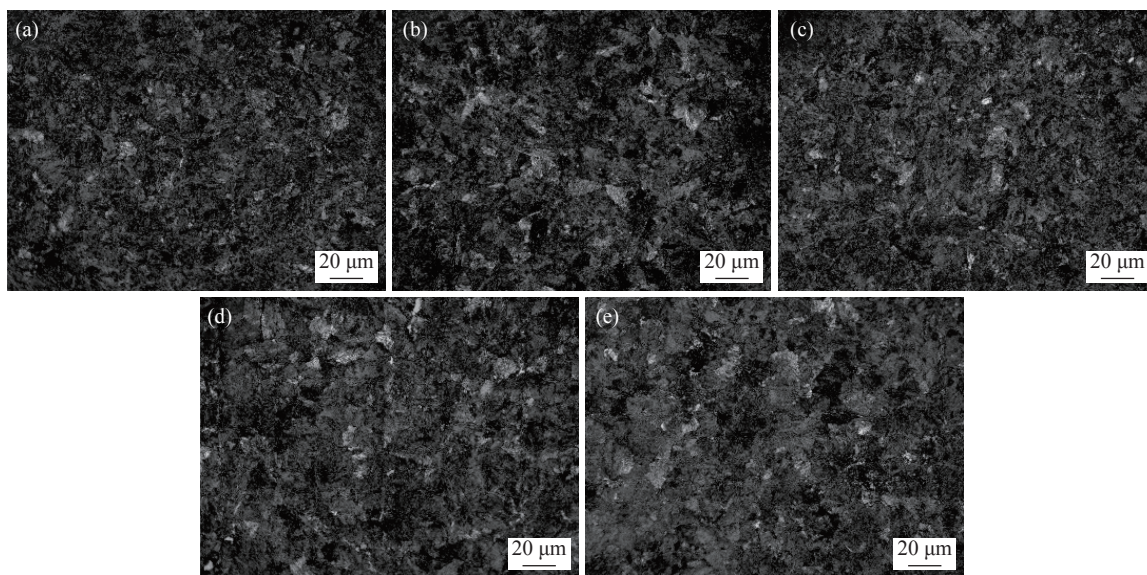


图 5 不同出水温度下 82B 高碳钢盘条试样的显微组织示意图: (a) 600 °C; (b) 560 °C; (c) 520 °C; (d) 480 °C; (e) 440 °C

表 2 不同出水温度的索氏体化率对比表 %

600 °C	560 °C	520 °C	480 °C	440 °C
94.73	96.58	95.90	95.14	94.59

82B 钢盘条吐丝温度的确定

将 5 组(每组 3 个) $\phi 12.5 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 的 82B 高碳钢盘条试样加热到 820、850、880、910 和 940 °C(模拟吐丝温度),保温 5 min 后,在介质质量分数为 12%、工作温度为 >95 °C 的水溶性淬火介质中淬火至 560 °C。根据冷却特性曲线计算得到在水时间分别为 45、48、51、54 和 55 s,到时间后迅

速取出,制成扫描电镜试样,在 10000 倍放大倍数下测量各试样的索氏体片层间距。不同吐丝温度下的索氏体片层间距如图 6 所示,在进行索氏体片层间距计算时,每组 3 个试样各取 5 个不同视场进行统计,取平均值,结果如表 3 所示。由表 3 可知,吐丝温度为 850 °C 时,82B 钢盘条的索氏体片层间距最小。

水浴淬火与斯太尔摩风冷盘条试样组织性能的对 比分析

图 7 为 82B 钢盘条经斯太尔摩风冷工艺处理和上述最佳淬火介质条件下水浴淬火后的显微组织照

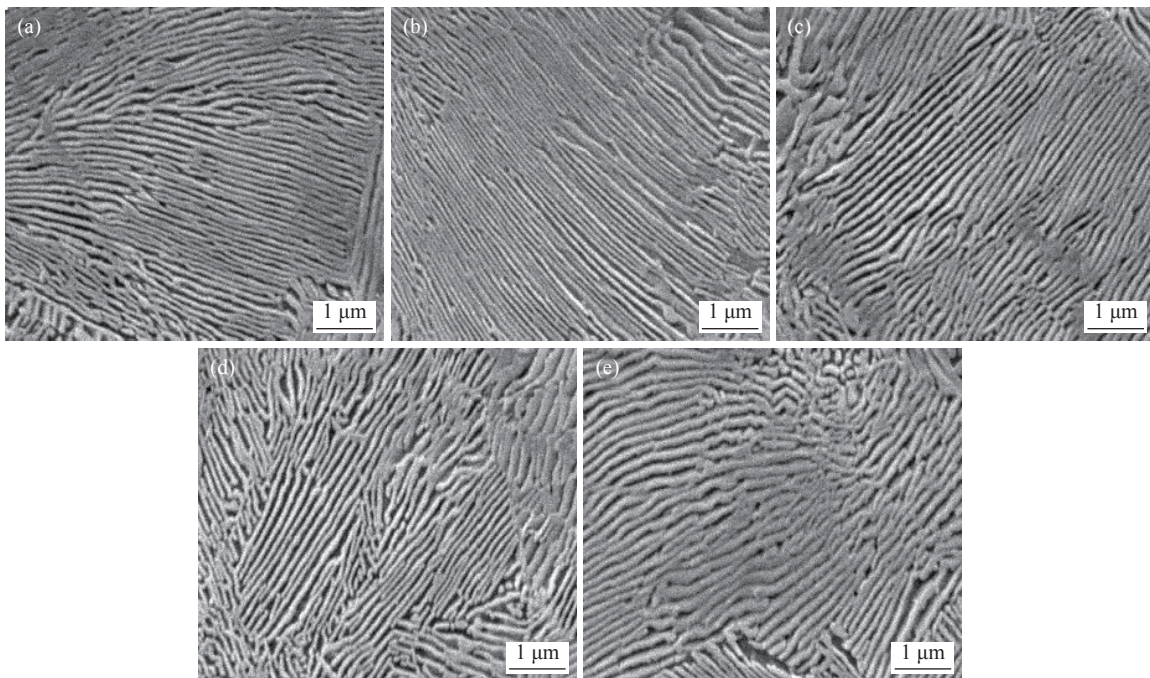


图6 不同吐丝温度下82B高碳钢盘条试样索氏体片层间距示意图: (a) 820 °C; (b) 850 °C; (c) 880 °C; (d) 910 °C; (e) 940 °C

表3 不同吐丝温度下82B高碳钢盘条索氏体平均片层间距

nm				
820 °C	850 °C	880 °C	910 °C	940 °C
179.0	156.5	204.3	218.9	265.8

片,可以看出,经水浴淬火后得到的盘条索氏体组织更加均匀且细小。经计算,风冷处理试样的索氏

体含质量分数88%,平均片层间距为192.5 nm;水浴淬火试样的索氏体质量分数为96.58%,平均片层间距为156.5 nm。可见,经水浴淬火后索氏体含量提高,片层间距得到细化。

水浴淬火得到的82B钢盘条力学性能见表4,某钢厂风冷生产线产品的力学性能见表5,每组工艺

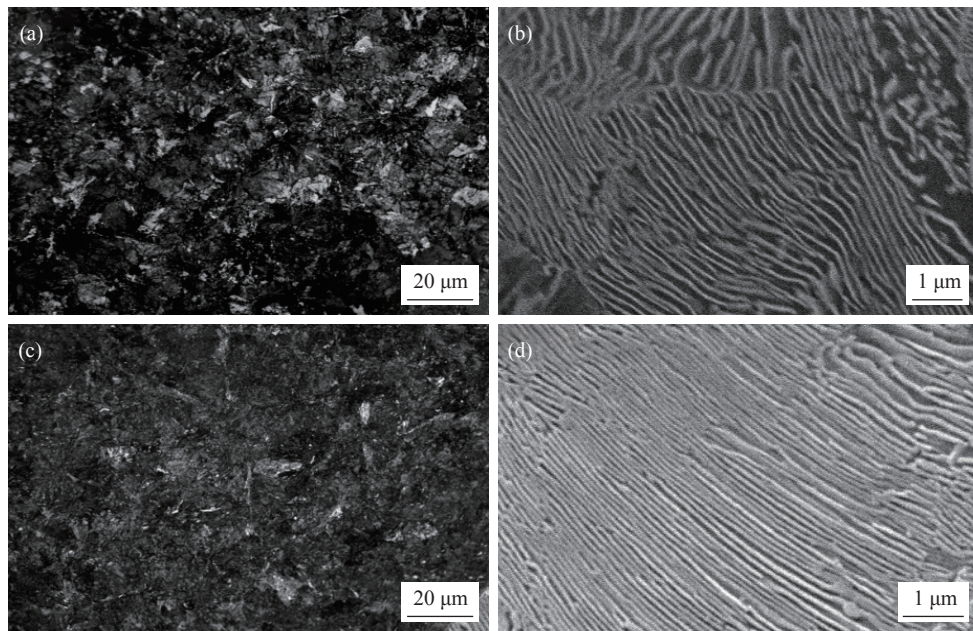


图7 斯太尔摩风冷与水浴淬火显微组织照片对比图: (a, b) 斯太尔摩风冷试样; (c, d) 水浴淬火试样

表 4 水浴淬火 82B 高碳钢盘条试样的力学性能

吐丝温度/℃	规格/mm	抗拉强度/MPa	延伸率/%	断面收缩率/%
820	φ12.5	1198	12.5	35
850	φ12.5	1218	17.0	37
880	φ12.5	1175	13.0	33
910	φ12.5	1150	12.0	34
940	φ12.5	1095	11.5	31

表 5 斯太尔摩风冷 82B 高碳钢盘条试样的力学性能

批次	规格/mm	抗拉强度/MPa	延伸率/%	断面收缩率/%
1批次	φ12.5	1158	10.5	31

条件取 3 个平行试样。对比表 4 和表 5 可以发现,当吐丝温度为 850℃ 时,水浴淬火得到的 82B 高碳钢盘条强度高于斯太尔摩风冷产品,塑性同样优于斯太尔摩风冷产品。

结束语

(1) 通过系列对比实验,确定 φ12.5 mm 的 82B 高碳钢盘条水浴淬火工艺参数如下:水溶性淬火介质(AQ110)的质量分数为 12%、介质工作温度为 >95℃(沸液),吐丝温度为 850℃,出水温度 560℃,在水时间 48 s。在此工艺条件下,可以形成稳定的蒸汽膜阶段,有利于形成均匀细小的索氏体组织。

(2) 通过对比最佳淬火介质条件下水浴淬火和斯太尔摩风冷工艺对 82B 高碳钢盘条组织与性能的影响,发现水浴淬火后盘条的平均索氏体化率比风冷产品提高约 8.58%,平均索氏体片层间距减小约 36 nm,盘条的抗拉强度提高 60 MPa,延伸率及断面收缩率明显改善。在该工艺条件下,盘条钢的综合力学性能大幅度提升。

参考文献

[1] 张秀香,刘志璞,牟立君,等.气保焊丝用热轧盘条 ER50-6E-

ZJ 拉拔断丝分析.金属世界,2024(4): 74

- [2] 张伟,陆继欢,赵文渊,等.10.9 级紧固件用热轧 10B33 钢盘条的研发实践.金属世界,2026(3): 87
- [3] 夏云峰,秦帅,高建峰,等.大规格 82B 钢盘条工艺对比研究与分析.山西冶金,2024,47(10): 39
- [4] 王金涛,沈奎,李战卫,等.SWRH82B 高碳钢热轧盘条心部组织控制.金属热处理,2024,49(3): 103
- [5] 张春雷,李宗科,邵红红,等.AQ110 聚合物淬火介质冷却特性及其应用.金属热处理,2016,41(9): 195
- [6] 张富群.聚合物水基淬火介质在锻造冷作模具钢上的应用.热处理技术与装备,2021,42(1): 47
- [7] 杨锐,罗新民.高碳钢丝在铅浴和 CMC 水溶液中的冷却行为.热处理技术与装备,2006(4): 44
- [8] 田志鹏.82B 高碳钢盘条连续冷却转变曲线的测定及其相变规律.理化检验:物理分册,2023,59(6): 29
- [9] 罗宇媛,揭晓华,卢国辉,等.新配方水基淬火介质的制备及冷却特性.金属热处理,2016,41(2): 215
- [10] 李俊杰,Andrew G,刘伟.奥氏体化与冷却速率对过共析钢组织的影响.金属学报,2013,49(5): 583
- [11] 王层.高速线材生产用水浴冷却技术的应用研究[学位论文].兰州:兰州理工大学,2019.

作者简介:叶梦元(1994—),男,陕西西安人,工程师。2022 年毕业于兰州理工大学材料工程专业,主要研究方向:金属材料的加工与组织分析。通信地址:陕西省西安市经开区泾高北路中段 18 号(西安汉唐分析检测有限公司);E-mail: yuanmengye@icloud.com。