

DOI: 10.11973/jxgccl230519

# 淬火配分对工程机械用 22MnB5 钢组织与性能的影响

晁晓杰<sup>1</sup>, 高展<sup>1</sup>, 郭晓光<sup>2</sup>, 卢志安<sup>2</sup>

(1. 河南农业职业学院智能制造学院, 郑州 451450; 2. 郑州大学材料科学与工程学院, 郑州 450001)

**摘要:** 将工程机械用 22MnB5 钢奥氏体化后, 分别进行直接淬火, 淬火至不同配分温度(305, 330 °C)保温不同时间(10, 20, 30, 60, 80, 100, 120 s)后淬火(一步法淬火配分), 淬火至 330 °C 再升温至 405 °C 保温 20 s 后淬火(两步法淬火配分)处理, 对比研究了淬火配分工艺对试验钢组织和性能的影响。结果表明: 一步法淬火配分试样主要由马氏体和碳化物组成, 配分时间为 60 s 时碳化物数量较多、尺寸较小; 两步法淬火配分试样主要由板条马氏体、碳化物和少量块状马氏体组成, 且残余奥氏体分解更完全、碳化物尺寸更大; 直接淬火试样由淬火板条马氏体和少量碳化物组成; 一步法淬火配分试样的抗拉强度随着配分时间延长逐渐减小, 断后伸长率先增大后减小, 强塑积先减小后增加再减小, 在配分时间为 60 s 时断后伸长率和强塑积达到最大; 直接淬火试样、两步法淬火配分试样、一步法淬火配分试样的强塑积依次增加。

**关键词:** 22MnB5 钢; 淬火配分; 配分温度; 力学性能; 显微组织

**中图分类号:** TG161

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3738(2024)10-0041-06

## 0 引言

现代工程机械轻量化、大型化方向的发展对工程机械用钢的性能也提出了更高要求, 特别是强韧性<sup>[1-2]</sup>。将钢加热到奥氏体化温度后在模具中进行快速冲压成形, 在保压状态下进行淬火冷却的热冲压成形技术是高强度工程机械构件的重要制造工艺<sup>[3-4]</sup>。然而, 热冲压成形工艺制备的构件组织几乎全是马氏体, 韧性相对较差<sup>[5]</sup>, 在使用过程中容易造成开裂并影响使用寿命和安全性<sup>[6]</sup>, 因此有必要对热冲压成形件进行后续热处理以改善其强韧性。淬火配分热处理工艺是一种将钢奥氏体化后先淬火至马氏体转变温度, 再在一定温度停留以使碳由马氏体扩散至奥氏体, 调控马氏体和残余奥氏体含量而改善强韧性的热处理工艺<sup>[7]</sup>。将淬火配分工艺应用于热冲压成形过程, 有望获得高强度和高塑性的构件。但是目前, 淬火配分工艺对热冲压成形钢组织与力学性能的影响规律尚未清楚<sup>[8-10]</sup>。

22MnB5 钢是一种高强度钢, 主要用于机械、船舶、车辆和容器等工程结构。作者以热冲压成形 22MnB5 钢为研究对象, 对其进行了不同工艺淬火配

分以及直接淬火处理, 对比研究了淬火配分工艺对 22MnB5 钢组织和性能的影响。

## 1 试样制备与试验方法

试验材料为冷轧退火态 22MnB5 钢板, 厚度为 2 mm, 由中国宝武钢铁集团有限公司提供; 采用电感耦合等离子体发射光谱法测得其化学成分(质量分数/%)为 0.22C, 1.38Mn, 0.26Si, 0.22Cr, 0.003 2B, 0.006P, 0.002S, 余 Fe。采用 Formastor-F II 型全自动相变仪和 DIL805 型热膨胀仪测得其奥氏体化温度  $A_{c3}$  为 865 °C, 马氏体转变开始温度  $M_s$  为 367 °C, 马氏体转变结束温度  $M_f$  为 295 °C。根据相变温度将奥氏体化温度设为 915 °C, 淬火终点温度在  $M_s \sim M_f$ <sup>[11]</sup> 之间。

将试验钢在 Nabertherm LHT08/18 型热处理炉中加热至 915 °C ( $A_{c3}$  以上), 保温 180 s 进行奥氏体化后分别进行直接淬火至室温(直接淬火), 淬火至不同配分温度(305, 330 °C)保温不同时间(10, 20, 30, 60, 80, 100, 120 s)后水淬至室温(一步法淬火配分)以及淬火至 330 °C 再升温至 405 °C 保温 20 s 配分后水淬至室温(两步法淬火配分)处理。

在淬火配分后试验钢上制备金相试样, 经磨抛、用体积分数 3.5% 的硝酸乙醇溶液腐蚀后, 采用 Nova NanoSEM 450 型扫描电子显微镜(SEM)观察微观形貌。采用 XRD-7000 型 X 射线衍射仪(XRD)

收稿日期: 2023-10-29; 修订日期: 2024-09-10

基金项目: 河南省科技攻关项目(192102310244); 学院科研创新团队项目(HNACKT-2020-04)

作者简介: 晁晓杰(1981—), 男, 河南舞钢人, 实验师, 学士

进行物相分析, 钼靶,  $K_{\alpha}$  射线, 工作电压为 35 kV, 电流为 200 mA, 扫描速率为  $2(^{\circ}) \cdot \text{min}^{-1}$ , 根据 XRD 检测结果计算奥氏体含量<sup>[12]</sup>。根据 GB/T 228.1—2010 制取尺寸如图 1 所示的拉伸试样, 采用 MTS-810 型液压伺服万能试验机进行拉伸试验, 测试温度为室温, 拉伸速度为  $0.05 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[13]</sup>。经丙酮超声清洗后, 采用 S-4800 型 SEM 观察拉伸断口形貌。

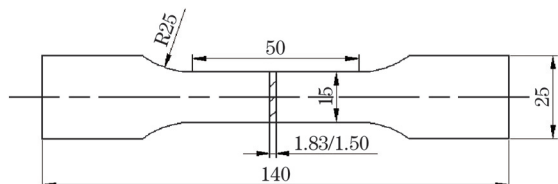


图 1 拉伸试样的尺寸  
Fig. 1 Size of tensile sample

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 对显微组织的影响

由图 2 可见: 淬火至  $330^{\circ}\text{C}$  保温 60 s 的一步法淬火配分试样和直接淬火试样的 XRD 谱中均出现  $\alpha$  相(马氏体)的(110)、(200)和(211)晶面衍射峰; 此外, 一步法淬火配分试样中还存在  $\gamma$ -奥氏体(111)、(200)、(220)和(311)晶面衍射峰, 而直接淬火试样的 XRD 谱中未见明显  $\gamma$ -奥氏体衍射峰, 表明直接淬火试样中基本没有残余奥氏体<sup>[14-15]</sup>。计算可得, 淬火至  $330^{\circ}\text{C}$  保温 60 s 配分的一步法淬火配分试样中

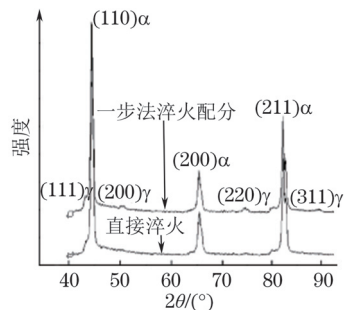


图 2 一步法淬火配分 (配分温度  $330^{\circ}\text{C}$ , 配分时间 60 s) 试样和直接淬火试样的 XRD 谱

Fig. 2 XRD spectra of one-step quenching-partitioning (partitioning temperature of  $330^{\circ}\text{C}$  and partitioning time of 60 s) and direct quenching samples

的残余奥氏体含量(体积分数, 下同)为 5.3%。

由图 3 可见: 一步法工艺下, 当配分温度为  $305^{\circ}\text{C}$ , 配分时间为 10 s 时, 试样的显微组织主要为淬火马氏体, 碳化物析出较少; 配分时间延长至 60 s, 试样的显微组织为回火马氏体, 碳化物析出增多; 继续延长配分时间至 120 s, 马氏体板条束界面模糊, 碳化物析出数量增多, 部分碳化物发生粗化长大。当配分温度为  $330^{\circ}\text{C}$  时, 随着配分时间延长, 马氏体和碳化物的整体变化趋势与配分温度  $305^{\circ}\text{C}$  时相似, 但是由于其淬火终点温度和配分温度更高, 相同配分时间下的一次马氏体(第一次淬火)含量相对较低<sup>[16-17]</sup>, 二次马氏体(第二次淬火形成)含量相对较高。

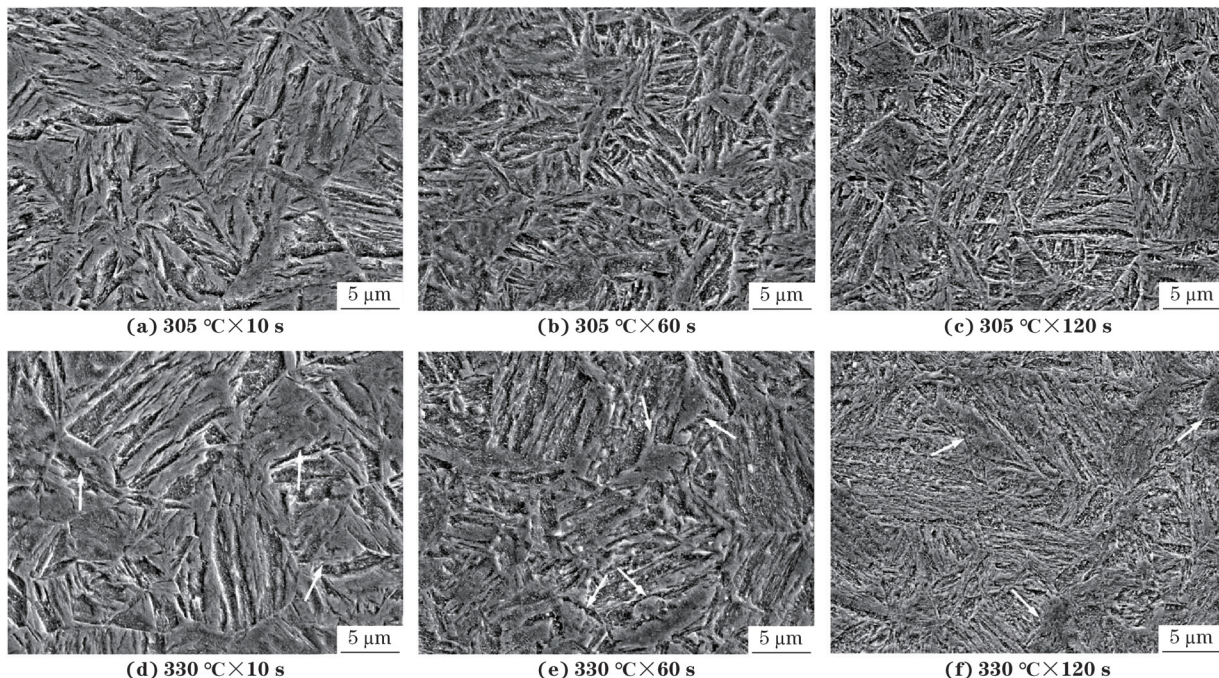


图 3 不同配分温度和时间下一步法淬火配分试样的显微组织

Fig. 3 Microstructure of one-step quenching-partitioning samples at different partitioning temperatures and times



从图4可见,与淬火终点温度相同的一步法淬火配分试样相比,两步法淬火配分工艺的配分温度较高(405 ℃),试样的回火会相对更加充分,因此显微组织中形成轮廓模糊的板条马氏体、亮白色碳化物

和少量块状马氏体,且由于较高配分温度下的残余奥氏体分解更加完全,碳化物尺寸也更加粗大;直接淬火试样中有轮廓清晰的板条马氏体,表现出典型淬火马氏体特征,且亮白色碳化物数量较少。

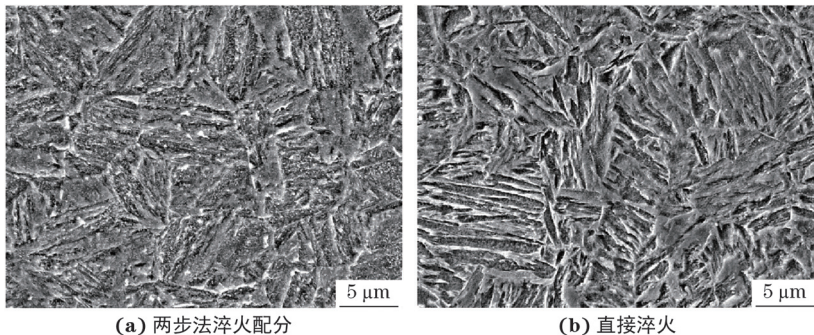


图4 两步法淬火配分试样和直接淬火试样的显微组织

Fig. 4 Microstructure of two-step quenching-partitioning samples (a) and direct quenching samples (b)

## 2.2 对拉伸性能的影响

由图5可见:随着配分时间延长,一步法淬火配分试样的抗拉强度减小,断后伸长率先增大后减小,强塑积先减小后增加再减小。试样的断后伸长率和强塑积均在配分时间为60 s时最大,当配分温度分别为305, 330 ℃时,试样断后伸长率分别为14.3%, 14.5%,强塑积分别为20 349, 20 590 MPa·%,此时抗拉强度分别为1 423, 1 420 MPa。当配分时间由10 s延长至20 s时,试样强塑积均有所减小,这主要是因为此时试样的强度降低幅度较大,而断后伸

长率增加幅度较小。两步法淬火配分试样的抗拉强度、断后伸长率和强塑积分别为1 373 MPa, 13.1%, 17 986 MPa·%,直接淬火试样分别为1 670 MPa, 9.0%, 15 030 MPa·%。可见:与两步法淬火配分试样相比,相同淬火终点温度和配分时间下一步法淬火配分试样的强度和强塑积较高,而直接淬火试样的强塑积较低,这因为其强度虽较高,但断后伸长率明显较小。因此,采用一步法淬火配分工艺对试验钢进行热处理可以取得相对两步法淬火配分和直接淬火法更好的强度和塑性结合。

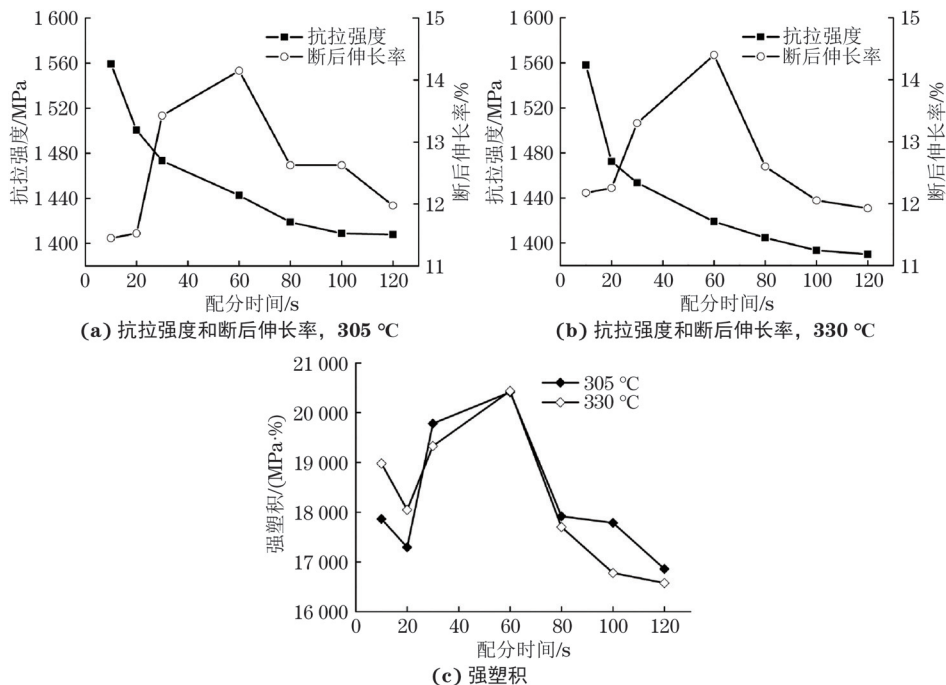


图5 不同配分温度下一步法淬火配分试样的拉伸性能随配分时间的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of Tensile properties vs partitioning times of one-step quenching-partitioning samples at different partitioning temperatures: (a-b) tensile strength and percentage elongation after fracture and (c) product of strength and elongation

由图6可见:不同配分温度和配分时间下一步法淬火配分试样的拉伸断口均主要由尺寸不等的韧窝和局部撕裂棱组成,表现出韧性断裂特征<sup>[18]</sup>。相比

配分时间为120 s下,配分时间为60 s下的拉伸断口中大尺寸韧窝的数量较多且韧窝较深,说明试样断后伸长率较大,塑性较好。

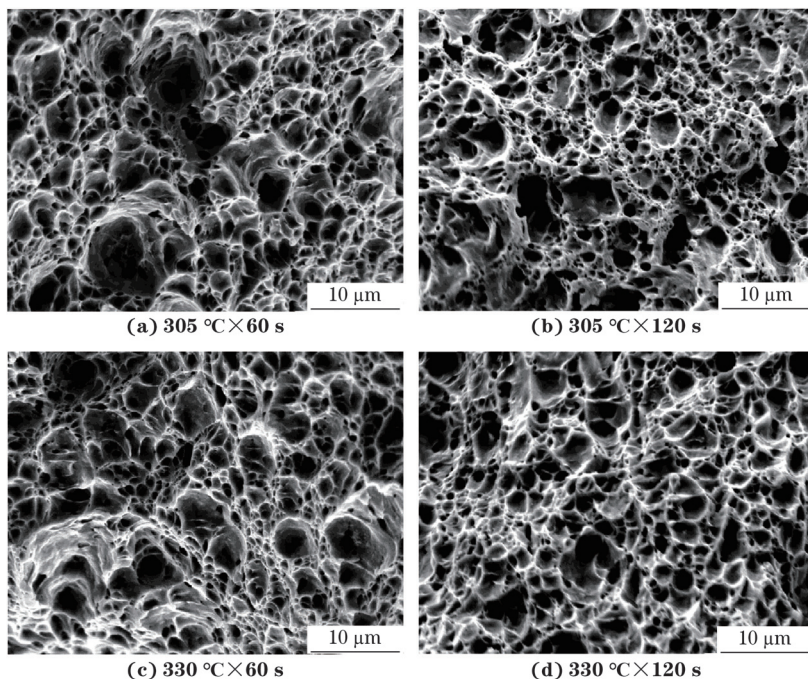


图6 不同配分温度和时间下一步法淬火配分试样的拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture morphology of one-step quenching-partitioning samples at different partitioning temperatures and times

由图7可见:两步法淬火配分试样和直接淬火试样的拉伸断口均主要由细小的等轴韧窝组成,整体表现为韧性断裂特征,但是与相同条件下一步法淬

火配分试样的拉伸断口相比,韧窝平均直径较小、韧窝深度较浅,韧性相对较差<sup>[19]</sup>,这与拉伸性能的测试结果相吻合。

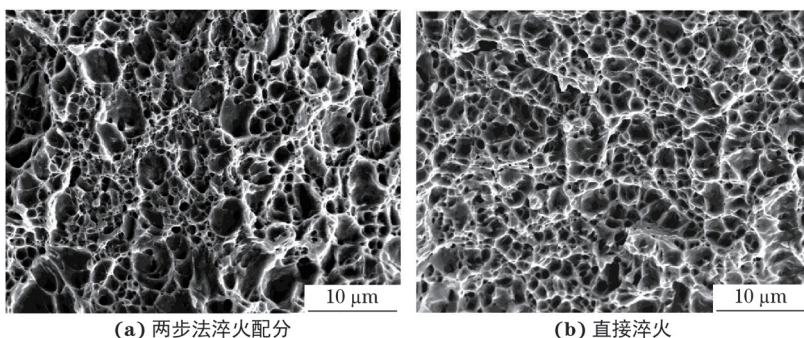


图7 两步法淬火配分试样和直接淬火试样的拉伸断口形貌

Fig. 7 Tensile fracture morphology of two-step quenching-partitioning samples (a) and direct quenching samples (b)

### 3 结 论

(1)经不同配分温度和时间的一步法淬火配分后,22MnB5钢主要由马氏体和碳化物组成,配分时间为60 s时钢中碳化物数量较多、尺寸较小。两步法淬火配分后22MnB5钢主要由轮廓模糊的板条马氏体、少量块状马氏体和碳化物组成,且残余奥氏体分解更完全、碳化物尺寸更大。直接淬火处理的

22MnB5钢中板条马氏体清晰,碳化物数量较少,呈典型淬火马氏体特征。

(2)随着配分时间延长,一步法淬火配分试样的抗拉强度减小,断后伸长率先增大后减小,强塑积先减小后增加再减小,断后伸长率和强塑积均在配分时间为60 s时最大。相同的淬火终点温度与配分时间下,直接淬火试样、两步法淬火配分试样、一步法淬火配分试样的强塑积依次增加,相比之下,一步法



淬火配分可以获得更好的强度塑性结合。

(3) 不同配分温度和配分时间下一步法淬火配分试样的拉伸断口均主要由尺寸不等的韧窝和局部撕裂棱组成,呈韧性断裂特征。相比之下两步法淬火配分试样和直接淬火试样韧窝平均直径较小、韧窝深度较浅,韧性略差。

#### 参考文献:

- [1] 刘汉卿. 工程机械用钢应用现状和发展前景[J]. 冶金与材料, 2022, 42(5): 171-172.  
LIU H Q. Application status and development prospect of steel for construction machinery[J]. Metallurgy and Materials, 2022, 42(5): 171-172.
- [2] KHALAJ O, SAEBNOORI E, MAŠEK B, et al. The influence of cooling rate between ms and mf on the mechanical properties of low alloy 42SiCr steel treated by the Q-P process[J]. Metals, 2022, 12(12): 2081.
- [3] KRBATA M, KRIZAN D, ECKERT M, et al. Austenite decomposition of a lean medium Mn steel suitable for quenching and partitioning process: Comparison of CCT and DCCT diagram and their microstructural changes[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2022, 15(5): 1753.
- [4] 桂晓露, 张宝祥, 高古辉, 等. Q-P-T处理贝氏体/马氏体复相高强钢疲劳断裂特性研究[J]. 金属学报, 2016, 52(9): 1036-1044.  
GUI X L, ZHANG B X, GAO G H, et al. Fatigue behavior of bainite/martensite multiphase high strength steel treated by quenching-partitioning-tempering process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(9): 1036-1044.
- [5] 王波, 张崎静, 徐颖梅. 淬火冷却温度对工程机械用中锰钢淬火-配分后组织与性能的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47(6): 20-24.  
WANG B, ZHANG Q J, XU Y M. The effect of quenching and cooling temperature on the microstructure and properties of medium manganese steel used in engineering machinery after quenching and partitioning[J]. Mechanical Engineering Materials, 2023, 47(6): 20-24.
- [6] 林双平, 司红, 钟振前, 等. 汽车减震器活塞杆断裂失效分析[J]. 物理测试, 2019, 37(1): 44-48.  
LIN S P, SI H, ZHONG Z Q, et al. Failure analysis of piston rod fracture in automotive shock absorbers[J]. Physical testing, 2019, 37(1): 44-48.
- [7] 闫强军, 温长飞, 姜在伟, 等. 淬火工艺对Q1100超高强度工程机械用钢组织与性能的影响[J]. 上海金属, 2018, 40(6): 39-44.
- [8] YAN Q J, WEN C F, JIANG Z W, et al. Effect of quenching process on microstructure and properties of Q1100 ultra-high strength engineering machinery steel[J]. Shanghai Metals, 2018, 40(6): 39-44.
- [9] MAISURADZE M V, RYZHKOV M A, NAZAROVA V V. Dilatometric study of structure formation in steel 30Kh2GSN2VM under quenching-partitioning and austempering[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2023, 65(3): 209-220.
- [10] 韩文奎, 张彦敏, 王要利, 等. Q-P-T工艺中C配分对4Cr5MoSiV1Ti钢力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(5): 96-103.  
HAN W K, ZHANG Y M, WANG Y L, et al. Effect of C partitioning in Q-P-T process on mechanical properties of 4Cr5MoSiV1Ti steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(5): 96-103.
- [11] 钟瑶瑶, 陈思思, 韩先洪. 淬火&碳配分工艺对27SiMn钢的力学性能和显微组织影响[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(6): 124-129.  
ZHONG Y Y, CHEN S S, HAN X H. Study on quenching & partitioning heat treatment for mechanical properties and microstructure of steel 27SiMn[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(6): 124-129.
- [12] 彭艳, 刘才溢, 王宁宁, 等. 一种新型热处理工艺对中碳钢组织性能影响[J]. 钢铁, 2021, 56(1): 85-90.  
PENG Y, LIU C Y, WANG N N, et al. Effect of a novel heat treatment process on microstructure and mechanical properties of medium carbon steel[J]. Iron and Steel, 2021, 56(1): 85-90.
- [13] 董纪, 杨晓斌, 刘晨曦, 等. 超高强度钢热处理组织中碳化物演化行为研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(10): 1052-1063.  
DONG J, YANG X B, LIU C X, et al. Research progress of carbide evolution behavior in heat treated structure of ultra-high strength steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 1052-1063.
- [14] KRESSER S, SCHNEIDER R, ZUNKO H, et al. Investigations on the effect of cooling rate on quenching & partitioning (Q&P) in martensitic stainless steels[J]. Journal of Heat Treatment and Materials, 2023, 78(4): 217-232.
- [15] 李万东. 钒微合金化对Q-P-T工艺处理的中碳钢力学性能的影响[J]. 四川冶金, 2019, 41(5): 21-24.  
LI W D. Effect of vanadium micro-alloying on the mechanical property of medium carbon steel treated by Q-P-T process[J]. Sichuan Metallurgy, 2019, 41(5): 21-24.

- [15] WEI J H, RAN X, YING H. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of low carbon high silicon alloy steel treated by Q-P-T process [J]. *Materials Science Forum*, 2020, 993: 592-596.
- [16] WANG Y, LI R B, ZUO X W, et al. The twice softening of martensitic matrix in Q-P-T steels and its effect on ductility[J]. *Heat Treatment and Surface Engineering*, 2019, 1(1/2): 2-10.
- [17] FIDA HASSAN S, ALWADEI H. Ultrahigh strength ductile microalloyed steel with a very low yield ratio developed by quenching and partitioning heat treatment [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 7949.
- [18] 沈聪, 孔令男, 尹臣男, 等. 基于Q-P-C-T工艺的NM300耐磨钢组织、综合性能及残余应力调控[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(4): 1231-1240.
- SHEN C, KONG L N, YIN C, et al. Structure, comprehensive properties, and residual stress control of NM300 wear-resistant steel based on Q-P-C-T process[J] *Journal of Central South University(Natural Science Edition)*, 2022, 53(4): 1231-1240.
- [19] ZHANG J Z, QIN S W, LIU Y, et al. Effect of Al replacing Si on mechanical properties of high carbon Q-P-T martensitic steels[J]. *Heat Treatment and Surface Engineering*, 2019, 1(1/2): 17-22.

## Effect of Quenching-Partitioning on Structure and Properties of 22MnB5 Steel for Construction Machinery

CHAO Xiaojie<sup>1</sup>, GAO Zhan<sup>1</sup>, GUO Xiaoguang<sup>2</sup>, LU Zhi'an<sup>2</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, China;

2. School of Intelligent Manufacturing, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** 22MnB5 steel for construction machinery was autenitized first and then was subjected to direct quenching, quenching to different partitioning temperatures (305, 330 °C), holding for different times (10, 20, 30, 60, 80, 100, 120 s) partitioning and quenching (one-step quenching-partitioning) and quenching to 330 °C than partitioning at 405 °C for 20 s and quenching (two-step quenching-partitioning), respectively. The effect of quenching-partitioning process on the structure and properties of the test steel was studied. The results show that the one-step quenching-partitioning sample was mainly composed of martensite and carbides, and the quantity of carbides were relatively large and size were relatively small when the partitioning time was 60 s. The two-step quenching-partitioning sample was mainly composed of lath martensite, carbides and a small amount of massive martensite, and the decomposition of residual austenite was complete and the size of carbide was large. The direct quenching sample was composed of hardened lath martensite and a small amount of carbides. With the extension of the partitioning time, the tensile strength of one-step quenching-partitioning sample decreased, the percentage elongation after fracture increased first and then decreased and the product of strength and elongation decreased first and then increased and then decreased. The percentage elongation after fracture and product of strength and elongation reached the maximum values when the partitioning time was 60 s. The product of strength and elongation of the direct quenching sample, the two-step quenching-partitioning sample and the one-step quenching-partitioning sample increased successively.

**Key words:** 22MnB5 steel; quenching-partitioning; partitioning temperature; mechanical property; microstructure