

热处理对 1 000 MPa 级工程机械结构用钢组织和性能的影响

钱亚军 余 伟 武会宾 杨跃辉

北京科技大学冶金工程研究院, 北京 100083

摘 要 设计了一种低碳 Mn-Mo-Nb-Cu-B 系超高强度工程机械结构用钢, 研究了在同种成分条件下 TMCP (thermomechanical control process) + 回火与控轧 + 直接淬火 + 回火两种工艺对钢组织和性能的影响. 对比分析了热处理前后钢板各项力学性能和组织的变化. 结果表明, 两种工艺条件下钢的屈服强度和冲击性能的变化趋势相似, 经 500 ~ 620℃ 回火 1 h 后钢的屈服强度均有大幅度提高. 控轧 + 直接淬火 + 回火得到的钢板综合性能明显优于 TMCP + 回火, 前者在 600℃ 回火后屈服强度仍达到 1 000 MPa 以上, 同时延伸率达到 18%, -40℃ 冲击功大于 30 J 而后者塑性较好但强度稍低; 随回火温度的升高, 控轧 + 直接淬火 + 回火工艺条件下的组织演化速度要快于 TMCP + 回火工艺.

关键词 结构用钢; 工程机械; 热处理; 显微组织; 力学性能

分类号 TG142.1

Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 1 000 MPa grade structural steel for construction machinery

QIAN Ya-jun, YU Wei, WU Hui-bin, YANG Yue-hui

Metallurgical Engineering Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT A low carbon Mn-Mo-Nb-Cu-B ultra high strength structural steel for construction machinery was designed and the effect of TMCP (thermomechanical control process) + tempering (TMCP+T) technology and controlled rolling + direct quenching and tempering (CR+DQ+T) technology on its microstructure and mechanical properties under the same composition was studied. The changes in mechanical properties and microstructures of the steel plates before and after heat treatment were comparatively analyzed. The results show that after tempering from 500℃ to 620℃ for 1 h, there is a substantial increase of the steel plates in yield strength. The performance of the steel plates treated by CR+DQ+T process is obviously superior to that by TMCP+T process, and the yield strength of the former is still more than 1 000 MPa after tempering at 600℃. Besides, the elongation can reach 18% and the impact energy at -40℃ is more than 30 J. However, the plasticity of the latter is better but the strength slightly lower. With the tempering temperature increasing, the evolution speed of microstructures under the condition of CR+DQ+T is more quickly than that under the condition of TMCP+T.

KEY WORDS structural steel; construction machinery; heat treatment; microstructure; mechanical properties

近几年我国工程机械制造业发展迅速, 同时对高强度钢的需求也越来越大. 目前大量使用的高强钢, 强度级别大多在 800 MPa 以下, 国内只有鞍钢、宝钢等少数几家钢厂可以生产 800 MPa 以上级别的高等级钢, 但仍然存在合格率较低的问题, 高等级钢仍需进口^[1-3]. 大规模使用高强度钢对于提高工程机械的能力效率、延长使用寿命、减轻自重和降低能耗都具有十分重要的作用.

传统的工程机械用高强度钢板主要以固溶强化、析出强化为主来提高强度, 其中碳和合金元素含量较高, 生产工艺大多为调质处理, 如美国的高屈服强度钢 HY80 ~ 130 ($\sigma_{0.2}$ = 550 ~ 890 MPa). 近年来,

TMCP工艺和直接淬火工艺有了很大发展,可以简化生产工艺,降低碳和合金元素含量,提高工程机械高强度结构用钢的综合性能,如美国利用TMCP工艺发展了含C高强度低合金钢HSLA-100($\sigma_{0.2}=690$ MPa),并用来取代HY80~100.在没有明显降低强度的情况下,改善了韧性和焊接性能^[4]. Ghosh等^[5]采用低C质量分数为0.08%微合金化工艺的同时,添加质量分数3.46%的Mo和1.88%的Cu,通过TMCP工艺获得了屈服强度达1300 MPa的超高强度钢,但是延伸率(12%~16%)和冲击功偏

低(-40℃冲击功小于25 J). Chen等^[6]研究了此类钢中Ti、Ti-Mo和Ti-Nb组合对强度的贡献,结果得出(Ti-Mo)析出贡献最大,并且其纳米级尺寸稳定性高.目前国内也有一些关于高强度工程机械结构用钢的研究,但多集中于屈服强度在1000 MPa以下(Q690、Q800等)的开发和研究上^[7-10]. 本文结合前人的相关研究,设计了一种低碳Mn-Mo-Nb-Cu-B系超高强度工程机械结构用钢,并采用两种工艺(分别称之为工艺1、2,图1)进行了实验室试制.

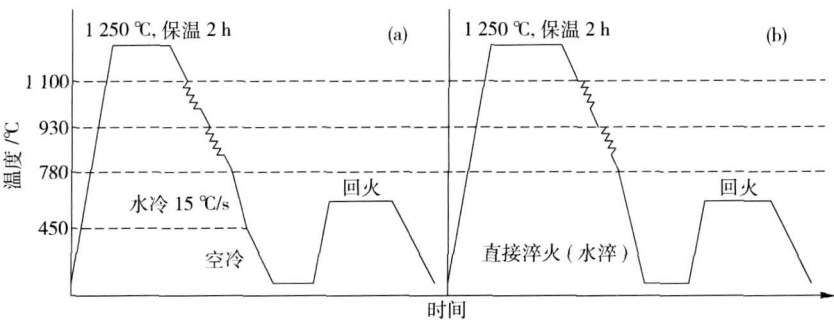


图 1 两种工艺热轧及冷却制度示意图。(a) 工艺 1: TMCP+T (b) 工艺 2: CR+DQ+T

Fig. 1 Schematic diagrams of hot rolling and heat treatment of the two processes: (a) Process 1: TMCP+T (b) Process 2: CR+DQ

1 实验材料和方法

1.1 化学成分

实验用钢是在真空感应电炉冶炼,其成分设计

的主要思路是:降低碳含量,改善韧性和焊接性能,添加适量合金元素,以保证得到满足性能要求的组织.主要成分如表1所示.

表 1 实验钢的主要成分(质量分数)
Table 1 Main chemical composition of the experimental steel %

C	Si	Mn	Mo	Nb	V	Ti	Ni	Cu	B	S	P
0.06	0.24	1.8	0.3	0.045	0.067	0.012	0.79	0.8	0.0014	0.005	0.008

1.2 实验工艺

1.2.1 热轧工艺及冷却制度

将钢锭热锻成90 mm×90 mm×120 mm的热轧坯,在北京科技大学高效轧制国家工程研究中心350试验轧机上进行了轧制,经过7道次,轧成厚13 mm的钢板.根据实验钢化学成分特点,将加热温度确定为1250℃,保温时间为2 h.将钢板的轧制分为两个阶段来控制轧制,粗轧开轧温度为1100℃,粗轧三道次轧制温度控制在1000℃以上,精轧阶段的开轧温度控制在950℃以下,终轧温度850℃,精轧压下率大于60%.对于TMCP工艺,轧后空冷到780℃,然后水冷至450℃.对于CR+DQ工艺,轧后空冷到780℃,然后直接淬火至室温,如图1所示.

1.2.2 热处理工艺

从轧后(TMCP)1#和(CR+DQ)2#钢板各取七

块钢,在箱式电阻炉内进行七个温度段的回火(450、500、550、600、620、650和700℃),保温1 h后空冷至室温,再将钢块机加工成标准拉伸样和冲击样.

1.3 性能测试和组织结构观察设备

在CMT-4105型万能试验机和JB-30B型冲击试验机上进行力学性能测试.用IEO-1450型扫描电镜对组织演化过程进行观察,并将部分试样制备成萃取碳复型和金属薄膜样品,用JEM-2000FX型透射电镜和JEM-2010型高分辨电子显微镜对精细结构和析出物进行观察和分析.

2 实验结果

2.1 热处理前后的力学性能变化

从图2可以看出,工艺2条件下钢轧态的抗拉

强度要比工艺 1 条件下高出 200 MPa 以上, 屈服强度也要高出 100 MPa, 但是塑性和冲击韧性要低于工艺 1, 说明控冷和弛豫工艺有助于改善钢的塑韧性. 在回火过程中, 两种工艺钢呈现的共同特点是: 随回火温度升高, 屈服强度变化曲线均呈现 M 形, 存在两个强度峰值, 在 500 ~ 600 °C 范围内屈服强度提高, 屈强比也逐渐升高, 同时韧性下降; 大于 600 °C 时屈服强度降低, 延伸率迅速提高, 韧性改

善, 抗拉强度开始快速下降. 不同之处在于: 600 °C 以下回火时, 抗拉强度变化趋势不同, 工艺 1 条件下钢在 500 °C 以下回火时, 强度一直上升, 在 500 ~ 600 °C 时变化较为平稳; 而工艺 2 条件下钢在 500 °C 以下回火时, 强度则是快速下降, 下降幅度达 100 MPa 后又上升, 550 °C 时达到峰值, 同时两种工艺钢在屈服强度达到峰值时的温度点也有所差别, 工艺 2 高于工艺 1.

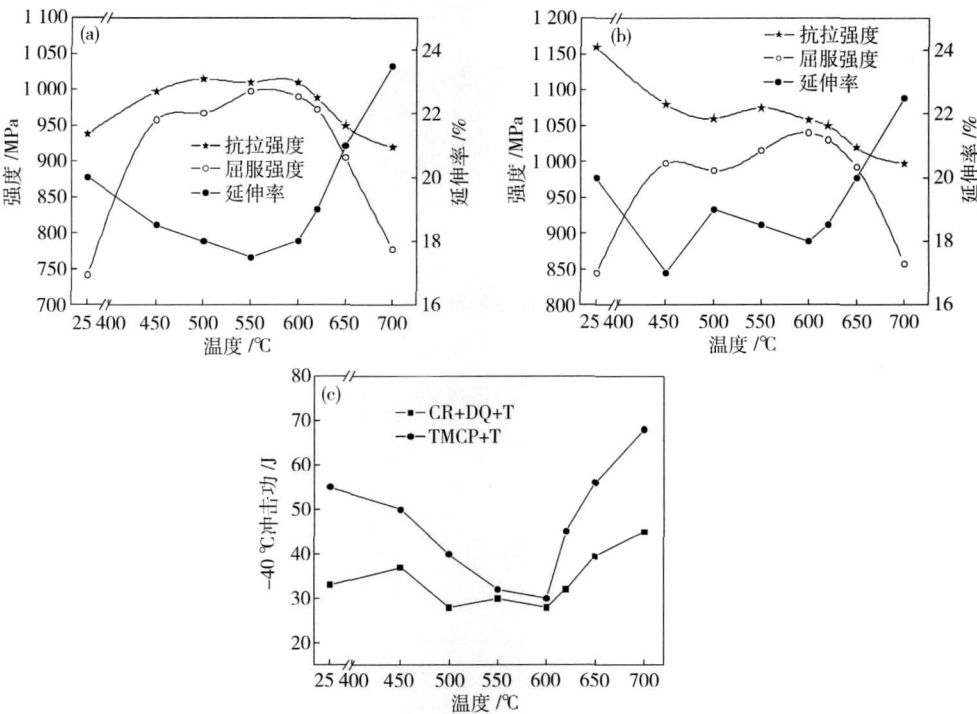


图 2 回火温度对两种工艺钢力学性能的影响. (a) 工艺 1 (b) 工艺 2 (c) 两种工艺钢 -40 °C 冲击功的变化

Fig 2 Effect of tempering temperature on the mechanical properties of the steel plates treated by the two processes (a) Process 1 (b) Process 2 (c) changes in impact energy at -40 °C

两种工艺相比, 工艺 1 下钢的屈服强度均没有超过 1 000 MPa, 而工艺 2 在低于 620 °C 温度区间都可以达到 1 000 MPa 并且延伸率都大于 16%, 综合力学性能良好.

2.2 热处理前后的显微组织

图 3 所示是两种工艺条件下钢的微观组织随回火温度变化的情况. 由于含有 B、Mn 等高淬透性元素和其他合金元素, 这两种工艺钢均具有较高的淬透性和奥氏体稳定性. 图 3 和图 4 分别为两种工艺钢的轧态组织 SEM 和 TEM 照片. 工艺 1 钢轧态组织是由板条状贝氏体和粒状贝氏体组成的混合组织, 以板条状贝氏体为主, 板条较为粗短, 不同晶粒内板条束取向差异明显, 有少量的 M-A 岛 (martensite austenite, M-A 岛) 沿界面处分布, 并且碳化物在基体上弥散分布. 工艺 2 钢基体组织是以淬火马氏体和贝氏体板条为主, 含有少量粒状和长条状 M-A

岛. 板条束由晶界开始生长, 同一板条束内板条取向一致, 板条细长甚至贯穿整个晶粒. 由于在未再结晶区变形量较大, 原奥氏体晶粒明显被压扁拉长, 晶界清晰, 晶粒内部存在较多的变形带. 由 TEM 照片可以看出, 工艺 2 所得到的淬火马氏体板条宽度 (250 ~ 300 nm) 小于工艺 1 所得到的贝氏体板条, 同时位错密度较高.

450 °C 回火后两种工艺的宏观组织仍然保持着热轧状态. 工艺 1 板条清晰, M-A 岛和碳化物发生分解相比轧态数量明显减少并缩小; 工艺 2 淬火马氏体板条间和原奥氏体晶界处仍然含有较多的长条状和短棒状的 M-A 岛. 随着回火温度的升高, 贝氏体-马氏体板条发生部分合并连接和粗化 (图 3(f), 图 4(d)), 但大部分板条依然清晰可见. 工艺 2 粗化特征要大于工艺 1, 同时 M-A 岛和碳化物明显减少. 650 °C 回火时, 工艺 1 板条继续粗化并生成了少

量多边形铁素体;而工艺 2板条变短粗化更为明显, M-A岛和碳化物完全分解, 已经形成了较多的多边

形铁素体(图 3(h)). 从上述比较可以看出, 工艺 1 组织的回火稳定性要强于工艺 2

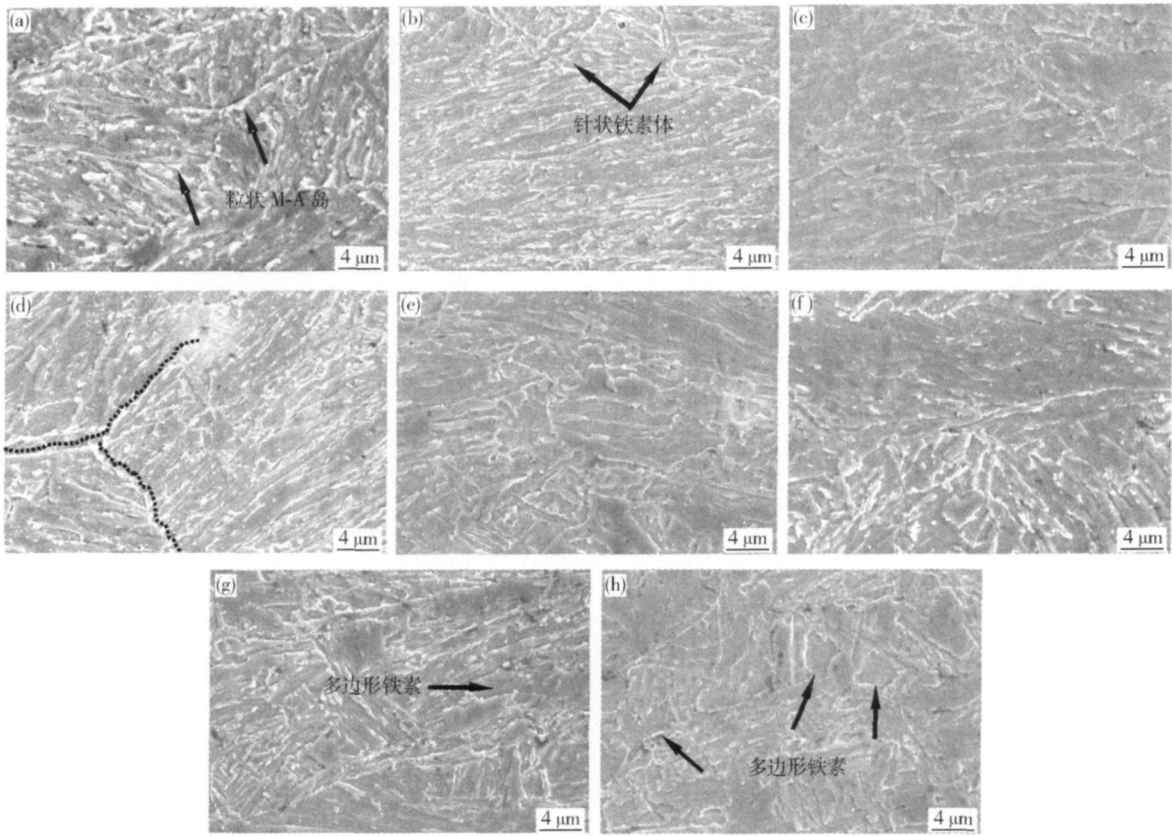


图 3 随回火温度增加组织演化情况. (a)、(b)、(c)和(d)分别为工艺 1 轧态、450 °C、550 °C和 650 °C回火时组织; (e)、(f)、(g)和(h)分别为工艺 2 轧态、450 °C、550 °C和 650 °C回火时组织

Fig 3 Microstructure evolution with tempering temperature (a)、(b)、(c) and(d) are the SEM images of the steel plates under hot rolled state after being tempered at 450 °C、550 °C and 650 °C in Process 1, respectively (e)、(f)、(g) and(h) are the SEM images of the steel plates under hot rolled state after being tempered at 450 °C、550 °C and 650 °C in Process 2, respectively

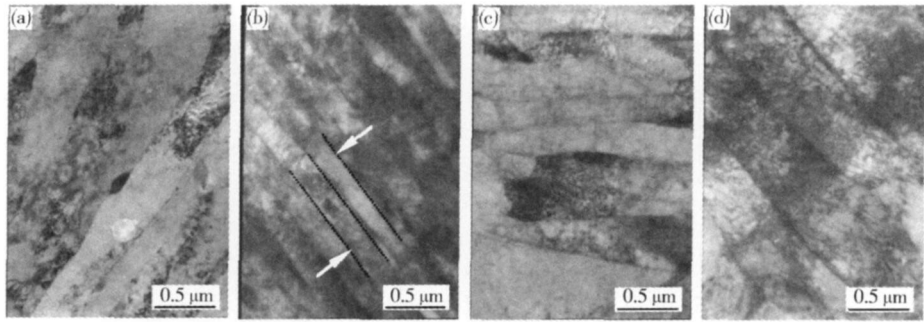


图 4 两种工艺钢板组织 TEM照片. (a)和(c)分别为工艺 1 轧态、550 °C回火; (b)和(d)分别为工艺 2 轧态、550 °C回火

Fig 4 TEM images of two types of experimental steels (a) and(c) are the micrographs of the steel plates under hot rolled state and after being tempered at 550 °C in Process 1, respectively (b) and(d) are the micrographs of the steel plates under hot rolled state and after being tempered at 550 °C in Process 2, respectively

3 结果分析与讨论

通过轧后热处理, 两种工艺钢的力学性能都有较大幅度的改善, 屈服强度提高了 190 ~250 MPa 两种工艺钢都经过未再结晶区大变形量控轧, 组织

细化, 贝氏体-马氏体板条内位错密度较高, 在变形各道次之间, 特别是在终轧变形后的弛豫阶段, 由于应变诱导作用, 将生成大量极为细小的 Nb-T 碳氮化物和 ϵ -Cu 粒子等沉淀在位错上并将其钉扎, 这些位错在相变过程中基本上被继承下来, 并且仍然

保持被钉扎状态(图 5(a)). 450 ℃回火时, 它们将继续析出, 对位错的钉扎作用加强, 因此两种工艺条件下屈服强度均出现了第 1 个峰值. 随后, 屈服强度有所下降主要是由于 ϵ -Cu 粒子开始粗化, 沉淀密度数减少, 对位错钉扎作用减弱造成的^[11]. 工艺 2 由于轧后直接淬火发生马氏体相变, 产生了大量的相变位错, 并且由于冷却速率较快, 位错回复程度低, 密度更高, 因此钢的轧态强度很高, 抗拉强度达

到 1 160 MPa, 屈服强度也达 845 MPa. 然而, 相变位错比较平直且大部分没有被析出物钉扎, 在回火过程中容易消失和重新排列^[12], 因此造成了 500 ℃以下回火时抗拉强度迅速下降. 由于 ϵ -Cu 等粒子优先在位错线上析出, 马氏体板条的高位错密度提供了更多的沉淀形核位置, 从而导致 ϵ -Cu 等粒子析出更细小, 分布更均匀, 强化效果更好^[13], 屈服强度明显高于工艺 1(图 6(a)).

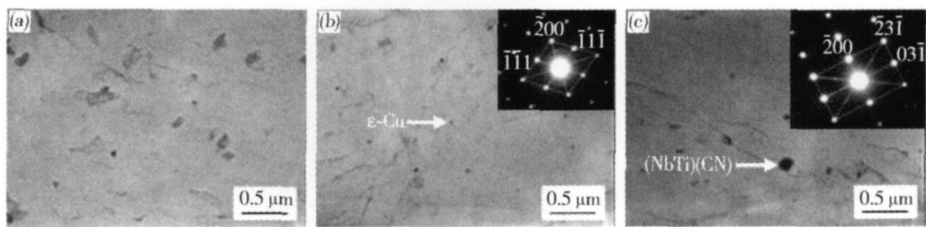


图 5 工艺 2 热处理前后析出物形貌. (a) 轧态; (b) 550 ℃回火; (c) 650 ℃回火

Fig 5 Morphologies of precipitates in Process 2 before and after heat treatment (a) hot-rolled state (b) tempered at 550 ℃; (c) tempered at 650 ℃

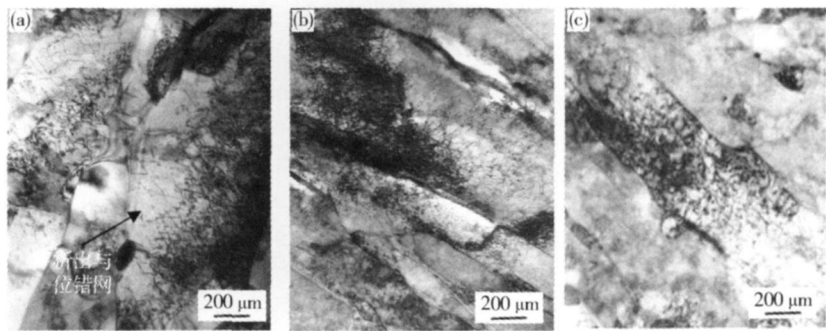


图 6 工艺 2 回火过程中位错与析出物的相互作用. (a) 450 ℃回火; (b) 550 ℃回火; (c) 650 ℃回火

Fig 6 Interaction between precipitates and dislocation networks in the tempering process of Process 2 (a) tempered at 450 ℃; (b) tempered at 550 ℃; (c) tempered at 650 ℃

工艺 1 条件下, 由于钢板弛豫后控冷过程中位错多被钉扎, 并且在随后不同温度回火过程中, 将会有进一步析出(Nb Mo 和 V 等, 两种工艺下的二次强度峰值也是由这些合金元素的析出所产生的, 同时也造成了塑性和韧性相应降低(图 5(c)、图 6(c)), 造成新的硬化现象, 这时原来被析出钉扎的位错不能回复消失, 因此回火过程中组织稳定性较好^[12], 这也是在 500 ~ 600 ℃时抗拉强度变化较为平稳的原因. 同时由于工艺 1 细化了基体组织, Nb Mo 和 V 等合金元素的形核位置多、扩散距离短, 因此屈服强度达到二次峰值时的温度比工艺 2 低. 工艺 1 条件下冲击性能随强度的提高, 下降较多, 但总体上一一直高于工艺 2. 这是由于工艺 1 条件下位错多被稳定钉扎, 可动性变差所致, 但亚晶内的贝氏体板条束间取向差异大, 对微裂纹的扩展起了一定的阻碍作用, 提高了钢的韧性.

当回火温度大于 600 ℃高温回火时, 析出物开始相互吞并粗化, 对位错的钉扎作用减小, 对变形奥氏体回复过程的阻碍作用减弱. 同时位错可动性大大增强, 密度下降造成基体软化, 强度很快下降, 塑性和韧性提高. 综合看来, 在工艺 2 条件下, 钢的力学性能较为优秀, 在强度大幅度提高的情况下, 塑性和韧性并没有大幅度下降.

4 结语

- (1) 实验钢种碳含量和合金元素含量在同类钢中相对较低, 在保证满足性能要求的同时, 也提高了钢的焊接性能. 回火过程中微合金元素以及 Cu Mo 的大量析出对强度的提升作用明显, 尤其是对屈服强度的影响, 550 ~ 600 ℃回火时, 屈服强度上升了 190 ~ 250 MPa, 与此同时, 抗拉强度下降较少.
- (2) 热处理前的组织准备对热处理后钢的综合

力学性能有明显影响,采用两阶段控轧结合直接淬火工艺所得到的综合力学性能优于 TMCP+T工艺,同时工艺更加简化. CR+DQ+T条件下, 620℃回火时钢的屈服强度仍可以达到 1 030 MPa,塑性也较好,延伸率达到 18%,并且 -40℃冲击功也大于 30 J,性能优于日本 JFE公司的 HY960^[14].

参 考 文 献

- [1] Shuai Q, Luan Y W. Preliminary exploring the state of China's Engineering construction and machinery steel. China Steel Focus, 2007(4): 36
(帅奇, 栾玉武. 我国工程建设机械用钢市场营销初探. 冶金管理, 2007(4): 36)
- [2] Li C M, Wang J J, Yan Z H. Domestic development status and market forecast of construction machinery steel. Shandong Metall, 2008, 30(4): 9
(李灿明, 王建景, 闫志华. 国内工程机械用钢发展现状和市场预测. 山东冶金, 2008, 30(4): 9)
- [3] Shen F Y. Domestic production of construction machinery steel with ultra-high strength. World Metals, 2006-05-16(A05)
(沈福元. 国内生产出机械工程用超高强度钢. 世界金属导报, 2006-05-16(A05))
- [4] Wu S D. Development of Advanced Ship structural Materials. Dev Appl Mater, 1999, 14(2): 36
(吴始栋. 舰船先进结构材料的发展. 材料开发与应用, 1999, 14(2): 36)
- [5] Ghosh A, Mishra B, Das S, et al. Structure and properties of a low carbon Cu bearing high strength steel. Mater Sci Eng A, 2005, 396: 320
- [6] Chen C Y, Yen H W, Kao F H, et al. Precipitation hardening of high strength low alloy steels by nanometer sized carbides. Mater Sci Eng A, 2009, 499: 162
- [7] Wang J Z, Kang Y L, Yang S W, et al. Effect of tempering temperature on the structure and properties of a ultra low carbon bainite steel (ULCB). Heat Treat Met, 2007, 32(11): 19
(王建泽, 康永林, 杨善武, 等. 回火温度对超低碳贝氏体钢 (ULCB)组织与性能的影响. 金属热处理, 2007, 32(11): 19)
- [8] Lan H F, Du L X, Liu Y C, et al. Effect of finish cooling temperature on properties of high strength engineering machinery steel. Mater Mech Eng, 2008, 32(9): 29
(蓝慧芳, 杜林秀, 刘彦春, 等. 终冷温度对高强度工程机械用钢性能的影响. 机械工程材料, 2008, 32(9): 29)
- [9] Yao L D, Zhao S X, Zhao X T, et al. 800MPa grade heavy plates with low susceptibility to welding crack produced by direct quenching. Trans Mater Heat Treat, 2009, 30(3): 132
(姚连登, 赵四新, 赵小婷, 等. 直接淬火研制 800 MPa级低焊接裂纹敏感性高强度钢板. 材料热处理学报, 2009, 30(3): 132)
- [10] Guo J, Guo A M, Guo H, et al. Effect of zirconium addition on austenite grain coarsening behavior and mechanical properties of 900 MPa low carbon bainite steel. J Univ Sci Technol Beijing, 2008, 15(6): 688
- [11] Osamura K, Okuda H, Asano K. SANS Study of phase decomposition in Fe-Cu alloy with Ni and Mn addition. ISIJ Int, 1994, 34(4): 346
- [12] Wu H B, Shang C J, Zhao Y T, et al. Effect of tempering on stability of microstructure and mechanical properties of low carbon bainitic steel. Iron Steel, 2005, 40(3): 62
(武会宾, 尚成嘉, 赵运堂, 等. 回火对低碳贝氏体钢组织稳定性及力学性能的影响. 钢铁, 2005, 40(3): 62)
- [13] Ghasemi S S, Banadkouki D, Dunne D P. Formation of ferritic products during continuous cooling of a Cu-bearing HSLA steel. ISIJ Int, 2006, 46(5): 759
- [14] Nagao A, Ito T, Obinata T. Ultra high strength steel plates of 960 and 1100 MPa class yield point with excellent toughness and high resistance to delayed fracture for construction and industrial machinery use. JFE Tech Rep, 2007, 18: 29