

正火工艺对EA1N车轴组织与性能的影响

余亚东, 于文坛, 史娜, 姚三成, 刘学华, 邹强

马鞍山钢铁股份有限公司技术中心 安徽马鞍山 243000

摘要: 采用光学显微镜、力学性能测试, 研究不同加热温度及保温时间对EA1N车轴钢正火态显微组织与力学性能的影响, 且采用黑匣子(耐热温度记录仪)测试生产过程车轴温度变化, 开展工艺优化后生产试验验证。结果表明: 锻态EA1N车轴经正火后, 显微组织细化, 铁素体含量降低, 而强度略微下降, 塑性明显提高; 正火在保温时间为60min, 温度在830~890℃之间时, 对EA1N车轴组织及性能的影响不大, 晶粒度为8~9级, 屈服强度和抗拉强度极差均<5MPa; 选择在860℃正火, 保温时间在0~120min之间时, 对车轴的组织及性能的影响较小, 均由细珠光体和铁素体组成, 强度极差<8MPa; EA1N车轴热处理生产试验缩短正火保温时间甚至零保温后, 各项性能指标均满足EN 13261: 2020技术要求。

关键词: EA1N车轴; 正火; 组织; 力学性能

Study on the influence of normalizing process on the structure and performance of EA1N axle

YU Yadong, YU Wentan, SHI Na, YAO Sancheng, LIU Xuehua, ZOU Qiang

Technology Center, Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China

Abstract: Optical microscopes and mechanical property tests were used to study the effects of different heating temperatures and holding times on the normalized microstructure and mechanical properties of EA1N axle steel, and a black box (heat-resistant temperature recorder) was used to test the temperature changes of the axle during the production process to carry out the process production test verification after optimization. The results show that after normalizing, the microstructure of the forged EA1N axle is refined, the ferrite content is reduced, the strength is slightly reduced, and the plasticity is significantly improved; normalizing is performed when the holding time is 60 minutes and the temperature is between 830℃ and 890℃, has little effect on the structure and performance of the EA1N axle, the grain size is 8~9, and the yield strength and tensile strength range are both less than 5MPa; when normalizing is selected at 860℃ and the holding time is between 0~120min, It has little impact on the structure and performance of the axle, which is composed of fine pearlite and ferrite, and the strength difference is less than 8MPa; after the EA1N axle heat treatment production test shortened the normalizing and holding time or even zero holding, all performance indicators met EN 13261: 2020 skills requirement.

Keywords: EA1N axle; normalizing; structure; mechanical properties

1 序言

铁道车轴用钢EA1N是欧洲标准EN 13261: 2020《铁路应用—轮对和转向架—车轴—产品要求》中

规定的一类车轴材料, 因其具有材质成本低、性能稳定和性价比高等优点而在国内外得到广泛应用^[1, 2]。国内EA1N车轴热处理多采用正火+回火的方式,

在满足EN 13261：2020技术和质量要求的前提下，EA1N车轴热处理工艺和标准并不统一。为提高产品一次合格率，中车长江车辆有限公司采用两次正火和一次回火的工艺^[3]；株洲中车天力锻业有限公司简化了热处理工艺，提出一次正火的工艺^[4, 5]。一般来说，EA1N车轴正火处理是为了细化晶粒，得到均匀的铁素体+珠光体组织形态，从而获得较高的强度和韧性。其正火设备均为大功率的台车式或悬挂式连续热处理炉，正火时间越长，设备能耗越大。为降低生产成本，提高生产效率，各单位在工艺路径上进行了优化调整，但从EA1N车轴正火温度和保温时间的影响角度进行探讨的较少。一般实际

生产中EA1N车轴的正火温度都比较高，通常取 Ac_3 以上50~100℃，保温时间则参考经验公式^[6]，热处理过程用时较长，能耗较高。本文主要对EA1N车轴正火工艺进行研究，通过确定合理的正火温度并缩短保温时间，分析工艺优化的可行性，并进行工艺验证，提出节能增效的EA1N车轴正火处理方法。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验用EA1N车轴材料化学成分见表1。车轴轧制方坯经快锻液压机组锻造后形成轴身直径220mm的毛坯轴，如图1所示。

表1 EA1N车轴钢坯化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
0.24~0.38	0.23~0.32	0.91~1.01	0.008~0.012	0.001~0.006	0.054~0.068	0.015~0.038	0.003~0.008	0.009~0.015	0.015~0.041

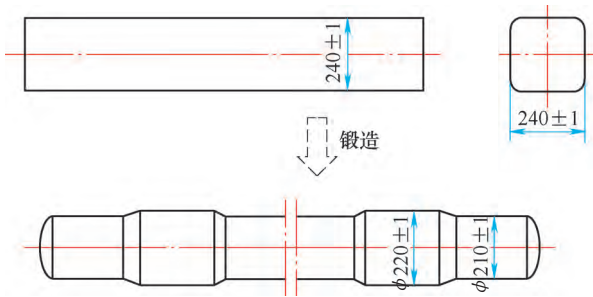


图1 EA1N车轴锻造毛坯

2.2 试验方法

(1) 正火试验 实验室正火试验取样自同批次生产的EA1N锻造毛坯轴的同一轴身近表面1/2半径处，大小为150mm×20mm×20mm的块状试样18套。图2所示为EA1N车轴钢奥氏体连续冷却组织转变图， Ac_3 为785℃，设计热处理试验工艺参数见表2。为减小试验误差，在同一工艺条件下各取2个试样，对正火后的试样进行显微组织和力学性能检测。

生产试验选用同批次锻造毛坯轴，热处理在悬挂式连续加热炉中进行，随后按EN 13261：2020技术要求进行取样检测。

(2) 生产过程车轴温度的测定 车轴生产过程采用悬挂式热处理炉加热，为验证EA1N车轴正火

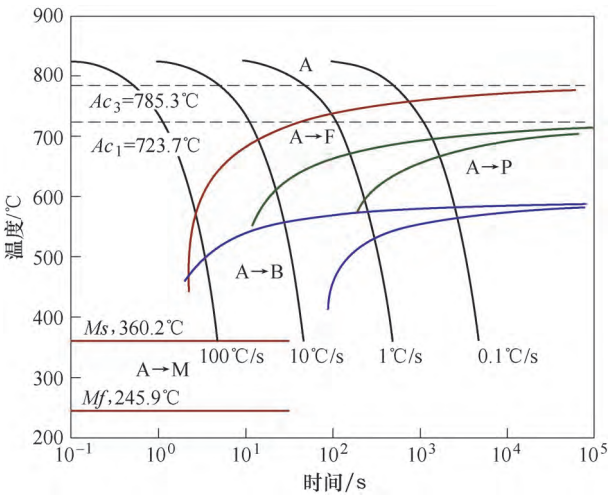


图2 EA1N车轴钢奥氏体连续冷却组织转变图

表2 正火试验工艺参数

试样组号	正火温度/℃	保温时间/min	冷却
NO.1	830	60	空冷
NO.2	860		
NO.3	890		
NO.4	860	0	空冷
NO.5		30	
NO.6		60	
NO.7		90	
NO.8		120	
NO.9	OS（未热处理）		

工艺优化的可行性,通过对EA1N毛坯轴钻孔,预埋热电偶,利用SMT-7-128K-1290C-K黑匣子(耐热温度记录仪)测定车轴实际热处理温度变化曲线。由于车轴不同部位存在尺寸差异,因此同一时刻的轴心部与表面受热程度也不同。为更准确测定车轴不同部位的温度,评估车轴受热的均匀性,分别在车轴轮座的不同深度处布置热电偶进行测温。测温点分别位于近表面20mm, $R/2$ (R 为半径)及心部,位置分布和编号如图3所示。

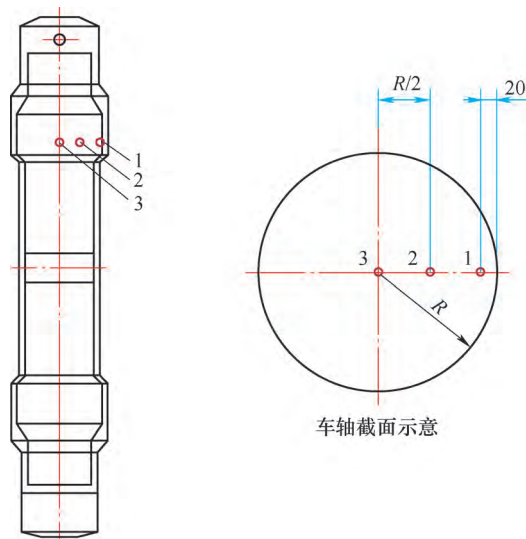


图3 车轴测温点位置示意

3 结果与分析

3.1 实验室正火试验

(1) 正火温度的影响 不同正火温度处理后的EA1N车轴组织与性能见表3,显微组织如图4所示。从表3、图4可看出,显微组织无明显差异,均由细铁素体和珠光体组成,铁素体含量为43%~49%,晶粒度为8~9级。正火温度对材料力学性能影响不大,其强度极差 $<5\text{MPa}$,均满足EN 13261:2020技术要求。相较于正火前的EA1N车轴试样,正火后的组织明显均匀,铁素体含量减少,屈服强度和抗拉强度略微降低,断后伸长率和断面收缩率提高。

锻态车轴正火后屈服强度和抗拉强度下降的原因主要是正火后组织均匀、晶粒细化,试样发生动态回复,材料中的位错等缺陷密度降低,综合因素作用下使得强度下降^[7, 8]。研究认为,正火加热温度决定了奥氏体的形成温度,加热温度越高,转变孕育期和完成转变的时间越短^[9]。试验结果表明,正火温度在 830°C 以上适当保温足以完成奥氏体转变且晶粒长大并不明显。正火加热温度的适当提高可加速组织转变过程,有利于更快更好地完全奥氏体化,为保温时间的缩短提供理论依据。

表3 车轴力学性能及显微组织

试样组号	R_{el}/MPa	$R_{\text{eff}}/\text{MPa}$	R_{m}/MPa	A (%)	Z (%)	屈强比 $R_{\text{el}}/R_{\text{m}}$	组织	铁素体含量 (体积分数, %)	晶粒度/级
NO.1	391.25	401.16	621.94	29.87	63.68	0.62	铁素体+珠 光体	43	8~9
NO.2	388.61	402.44	618.58	30.97	65.16	0.63		49	8~9
NO.3	393.09	400.35	620.18	29.79	63.21	0.63		45	8~9
NO.9	$R_{\text{p}0.2}=418.88$		630.29	22.54	52.90	0.66		—	—
EN 13261: 2020	≥ 330		560~660	≥ 22	—	—		—	≥ 5

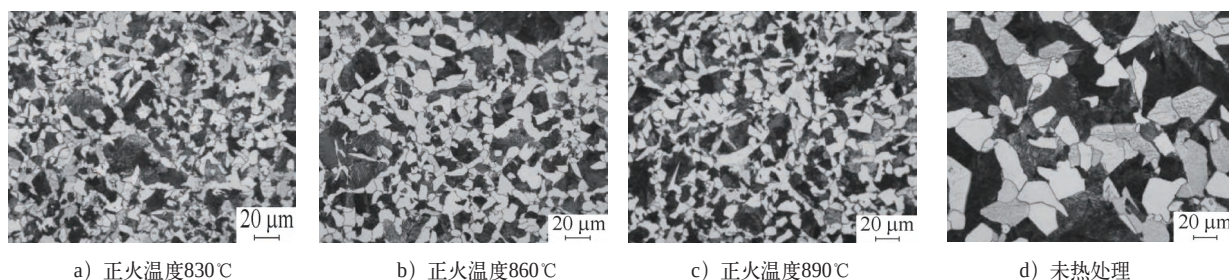


图4 EA1N车轴钢正火显微组织

(2) 保温时间的影响 采用不同正火保温时间处理后的EA1N车轴试样力学性能检测结果如图5所示。从图5可看出,不同保温时间下屈强比的变化不大,屈服强度、抗拉强度极差均 $<8\text{MPa}$ 。随着保温时间的延长,断后伸长率和断面收缩率略微有降低。

采用不同正火保温时间处理后的EA1N车轴组织形态无明显差别,均由细小的铁素体和珠光体组成,如图6、图7所示。铁素体定量分析和晶粒度评级结果如图8所示。从图6~图8可看出,保温时间对铁素体含量无明显影响,其含量在41%~49%,晶粒度在8~9级。随着正火保温时间的延长,晶粒有略微长大趋势。

试样经正火加热奥氏体化后形成较小晶粒的奥氏体,冷却后形成细小均匀的珠光体和铁素体组织。一般情况下,中碳钢在加热奥氏体化过程中晶粒尺寸的计算满足Beck方程^[10],即

$$D = (kt)^n, \quad k = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中 D ——奥氏体晶粒尺寸 (μm);

t ——保温时间 (min);

k ——与材料和温度有关的系数;

k_0 ——材料常数;

Q ——晶粒长大激活能 (kJ/mol);

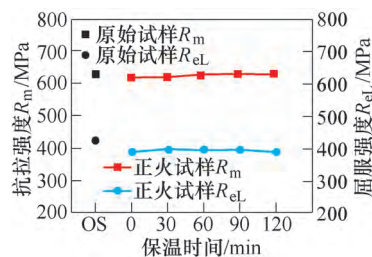
R ——气体常数;

T ——保温温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

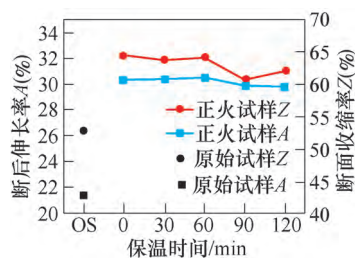
由式(1)可知,保温时间对奥氏体晶粒长大的影响符合Avrami法则,晶粒尺寸是时间的抛物线函数^[11, 12],因此延长保温时间对晶粒长大有一定的作用。

结合组织分析,EA1N车轴钢正火且缩短正火

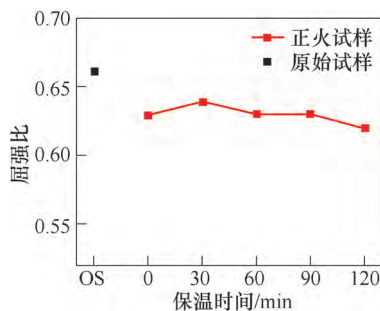
保温时间甚至零保温时,可得到更细小的铁素体和珠光体组织,而保温在0~120min内,其晶粒度级别差较小(<1 级),由Hall-petch关系^[13]可知,屈服强度与晶粒大小的平方根成反比,因此试验时间内材料的屈服强度差异不大。细晶粒的多晶体往往能够表现出良好的塑韧性,由于晶粒越细,不同位向的晶粒数目越多,则在同样的受力变形条件下,



a) 抗拉强度和屈服强度

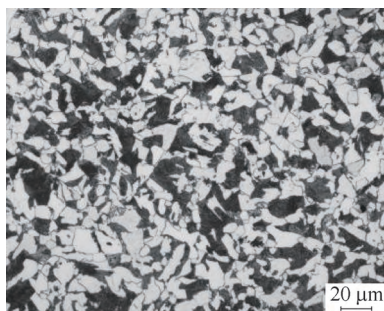


b) 断后伸长率和断面收缩率

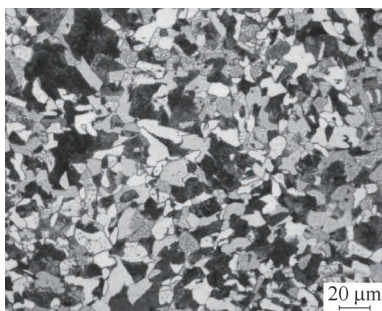


c) 屈强比

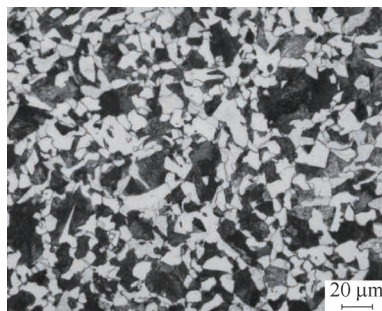
图5 车轴力学性能检测结果



a) 860℃正火时间0min



b) 860℃正火时间60min



c) 860℃正火时间120min

图6 EA1N车轴显微组织

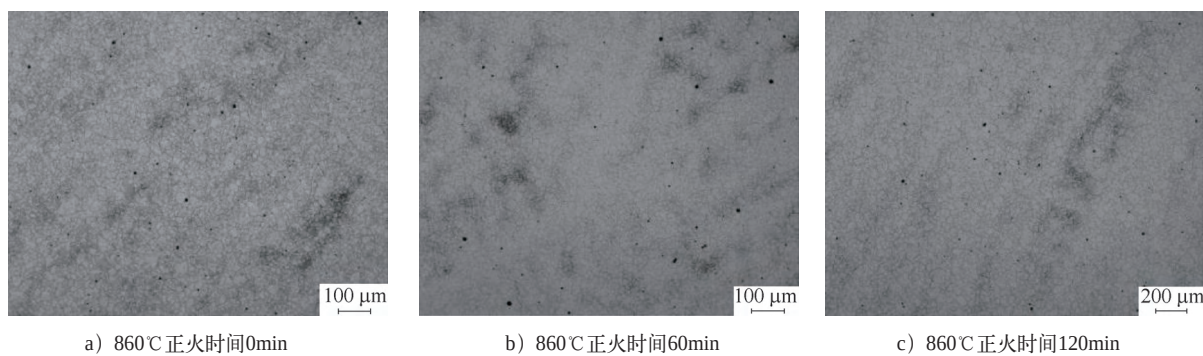


图7 EA1N车轴奥氏体晶粒度

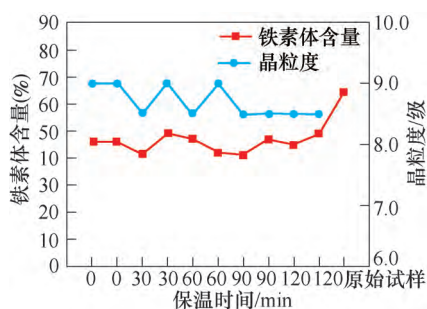


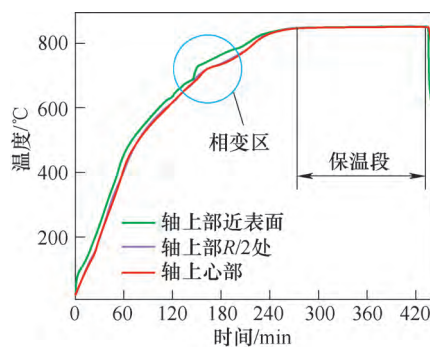
图8 铁素体含量与晶粒度评级

变形可分散在更多的晶粒内进行,变形较均匀,且晶界处塞积的位错少,不至于因应力集中而导致过早萌生裂纹而开裂,能够承受较大的变形量,从而表现出较高的塑性。

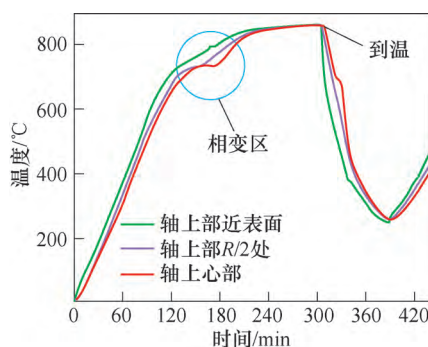
3.2 生产试验结果与分析

根据奥氏体连续冷却组织转变图(见图2)和上述正火试验研究结果,为保证车轴性能一致性,设计正火过程车轴不同部位的目标温度为 $(860 \pm 10)^\circ\text{C}$ 。利用钢中传统热处理正火保温时间的计算公式^[6],获得保温时间。通过缩短正火保温时间甚至零保温来对生产工艺进行优化。EA1N车轴热处理生产采用正火+回火方式。

(1) 正火过程车轴温度变化与相变规律 正火工艺优化前后关键部位温度变化曲线如图9所示。在轴径方向上,温升速率和保温时间存在差异。由于表面直接与高温炉气接触,因此车轴近表面温升速率较快,而轮座心部最晚达到目标温度。相变过程发生吸热反应,温度变化曲线存在拐点,通过观察拐点的位置可大致判断相变开始及结束的温度与时间。从图9可看出,EA1N车轴正火加热至目标温度,自轴近表面到温至轮座心部到温透热后,缩短保温时间至零保温仍可以充分完成奥氏体化转变。该结果验证了缩短正火保温时间的可行性。



a) 工艺优化前



b) 工艺优化后

图9 车轴正火过程温度曲线

EA1N车轴钢平衡组织加热奥氏体化过程可分为奥氏体形核与长大、残留渗碳体溶解、奥氏体均匀化3个阶段,则正火加热保温时间随之可分为3个部分^[14]:①相变完成时间 $t_{A化}$ 。②碳化物溶解时间 $t_{C溶}$ 。③奥氏体均匀化时间 $t_{均}$ 。其中, $t_{A化}$ 取决于奥氏体形成速度,在诸多的影响因素中,温度的作用最为显著,较高的加热温度保证了奥氏体的快速孕育与转变。EA1N车轴钢正火温度比 A_{C3} 高 75°C ,在加热到 860°C 的过程中足以完成奥氏体的转变,并实现短时保温。当保温时间较短时,其中部分碳化物来不及溶解,为过冷奥氏体转变提供成分起伏,将有利于晶粒的细化,因而碳化物的全溶并不必要。

短时保温下的奥氏体大小并不完全均匀,存在浓度起伏,但有利于组织的细化,当过分追求均匀化而延长保温时间,将导致晶粒粗大,并耗费大量的能源。

(2) 车轴实物质量 EA1N试制车轴性能检测结果见表4。车轴组织与各项性能均满足EN

13261:2020要求,与原工艺相比无明显差异,说明EA1N车轴优化工艺可行、可靠。由于正火保温时间大幅缩短,生产效率提高,热处理设备能耗大幅降低,起到了提高生产效率、降低设备能耗的作用。据生产现场不完全统计,该工艺可实现降低能耗100元/t以上。

表4 EA1N车轴性能检测结果

试样组号	R_{eh}/MPa	R_m/MPa	A (%)	显微组织	晶粒度/级
NO.1	383	633	27.0	铁素体+珠光体	8.5
NO.2	382	634	29.5		8.0
NO.3	384	639	28.5		8.0
原工艺	378	637	26.0		8.0
EN 13261:2020	≥ 320	550~650	≥ 20		≥ 5

4 结束语

1) 与锻态EA1N车轴相比,经正火后的组织晶粒细化,铁素体含量减少,而屈服强度和抗拉强度略降低,塑性提高。

2) EA1N车轴在830~890℃之间正火保温60min时,正火温度对车轴组织及性能的影响较小;在860℃正火保温0~120min时,保温时间对EA1N车轴组织及性能的影响较小。

3) EA1N车轴正火过程采用缩短保温时间甚至零保温工艺,车轴组织、性能均满足标准要求,与原工艺下的车轴相比无明显差别。该工艺大幅缩短了热处理时间,实现了节能增效。

参考文献:

- [1] 赵雷,刘青山,姜英,等.国内外铁道车辆车轴标准分析[J].铁道车辆,2015,53(7):9-14.
- [2] 袁元豪.日本和欧洲铁路车轴标准的比较[J].铁道技术监督,2013(9):4.
- [3] 付祥,焦辉,武永亮,等.EA1N材质城轨车轴的热处理工艺方法:中国,201410566631.X[P].2014-12-15.
- [4] 黄俏梅,牛迎春,李泉,等.一种EA1N车轴钢热处理工艺:CN107937676B[P].2019-12-24.
- [5] 黄俏梅,牛迎春,苏立武,等.热处理工艺对EA1N车轴性能影响的研究[J].金属加工(热加工),2020(7):76-78.

- [6] 包耳,田绍洁,王华琪.热处理加热保温时间的369法则[J].热处理技术与装备,2008,29(2):53-55.
- [7] 曾霖,胡诗超,朱松鹤,等.正火工艺对E级厚船板钢组织和性能的影响[J].上海金属,2009,31(6):6-10.
- [8] 杨艳华,柳浩.正火对EH36船板钢组织和力学性能的影响规律研究[J].热加工工艺,2016,45(6):230-235.
- [9] 李文辉,马进,冯周荣,等.大型铸钢件正火保温时间的研究[J].中国铸造装备与技术,2020,55(1):4.
- [10] BURKE J E, TURNBULL D. Recrystallization and grain growth[J]. Progress Metal Physics, 1952, 3(IN11-IN15):220-292.
- [11] 高振英,孙福玉.中碳钢奥氏体晶粒生长动力学研究[J].金属热处理,1989(4):10-13.
- [12] 刘文月,任毅,王爽,等.钢中奥氏体晶粒长大规律[J].上海金属,2019,41(4):88-93.
- [13] 邹章雄,项金钟,许思勇.Hall-Petch关系的理论推导及其适用范围讨论[J].物理测试,2012,30(6):13-17.
- [14] 朱凤艳,李春风.结构钢淬(正)火热处理零保温探讨[J].沈阳工业大学学报,2003,25(3):203-205.

MW 20240221