



34CrNi3MoV钢奥氏体晶粒长大模型验证与应用

郑冰^{1,4}, 徐东^{2,3}, 王怡群², 王学玺², 赵红阳¹, 巨东英¹

(1 辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051; 2 河南中原特钢装备制造有限公司技术中心, 济源 459008; 3 河北工程大学, 河北省高品质冷锻钢技术创新中心, 邯郸 056038; 4 河北普阳钢铁集团, 河北省高塑性韧性耐磨钢板技术创新中心, 邯郸 056305)

摘要:通过热处理试验并采用金相法分析研究了加热温度和保温时间对34CrNi3MoV钢奥氏体晶粒长大行为的影响。结果表明,加热温度对34CrNi3MoV钢奥氏体晶粒尺寸的影响尤为显著,随加热温度(900~1200℃)的升高,晶粒尺寸逐步增大。在初始晶粒尺寸情况下,900℃保温30 min(12.1 μm)和950℃保温10 min(15.1 μm)都与原始晶粒尺寸级别相差不大,1050℃保温30 min(37.8 μm)时,晶粒尺寸达到原始晶粒尺寸的3.35倍,得到34CrNi3MoV钢晶粒长大的激活能 $Q=176.6$ kJ/mol。随保温时间的延长,加热温度对奥氏体晶粒尺寸的影响越来越弱。950℃保温时,晶粒长大的临界保温时间大约为90 min左右。1050℃保温时,其临界保温时间大约为30 min。加热温度越高,达到临界保温时间后,晶粒长大就越缓慢。加热温度为850~950℃,保温时间60~180 min,可使34CrNi3MoV钢平均晶粒尺寸控制在22.5~44.9 μm(国标8.0~6.0级)而满足要求。

关键词:34CrNi3MoV钢;奥氏体晶粒度;激活能;晶粒尺寸

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00024 **中图分类号:**TG156.1

Verification and Application of Austenite Grain Growth Model in 34CrNi3MoV Steel

Zheng Bing^{1,4}, Xu Dong^{2,3}, Wang Yiqun², Wang Xuexi², Zhao Hongyang¹, Ju Dongying¹

(1 School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China; 2 Technology center, Henan Zhongyuan Special Steel Equipment Manufacturing Co., Ltd., Jiyuan 459008, China; 3 Technology Innovation Center for High Quality Cold Heading Steel of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 4 Technology Innovation Center for Wear Resistant Steel Plate of High plasticity and High Toughness of Hebei Province, Hebei Puyang Iron and Steel Corp.Ltd., Handan 056305, China)

Abstract: The effects of heating temperature and holding time on austenitic grain growth behavior of 34CrNi3MoV steel were studied by heat treatment test and metallography. The results show that the effect of heating temperature on austenitic grain size of 34CrNi3MoV steel is particularly significant, and the grain size increases gradually with the increase of heating temperature (900-1200 °C). In the case of initial grain size, both 900 °C holding for 30 min (12.1 μm) and 950 °C holding for 10 min (15.1 μm) have little difference with the original grain size level, and 1050 °C holding for 30 min (37.8 μm), The activation energy Q of grain growth of 34CrNi3MoV steel is 176.6 kJ/mol when the grain size is 3.35 times of the original grain size. With the extension of holding time, the influence of heating temperature on austenite grain size becomes weaker and weaker. At 950 °C, the critical holding time for grain growth is about 90 min. At 1050 °C, the critical holding time is about 30 min. The higher the heating temperature, the slower the grain growth after reaching the critical holding time. The heating temperature is 850-950 °C and the holding time is 60-180 min, which can make the average grain size of 34CrNi3MoV steel controlled in 22.5-44.9 μm(national standard 8.0-6.0) and meet the requirements.

Key Words: 34CrNi3MoV Steel; Austenite Grain Size; Activation Energy; Grain Size

34CrNi3MoV钢是一种优质合金结构钢,由于其具有良好的综合机械性能^[1-3],用于制造炮身管 and 高压釜等压力容器。因为奥氏体晶粒的大小对钢的性能影响很大^[4-7],所以研究钢的奥氏体晶粒长大行

为非常必要。加热温度和保温时间是影响奥氏体晶粒尺寸大小的重要因素^[8-13],人们研究了不同钢种的奥氏体晶粒长大规律,得到能描述其奥氏体晶粒长大规律的模型^[14-19],但对34CrNi3MoV钢的奥氏

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(NSFC)(U20A20272);河北省自然科学基金重点研发计划项目军民科技协同创新专项(22351001D);邯郸市科学研究计划重点项目(21122015004);河北省高等学校科学技术研究项目资助(CXY2023004)

作者简介: 郑冰(1981—),女,博士研究生; **E-mail:**zhengbing1881@163.com; **收稿日期:**2023-02-24

通信作者: 徐东(1984—),男,博士,教授,博士生导师; **E-mail:**xudong_xyz@163.com

体晶粒长大规律未见有相关研究报道。因此,对该钢种数学模型的验证,为确定合理的加热、锻造、热处理工艺提供重要的理论依据。

1 实验材料和方法

实验材料采用工业热轧的 34CrNi3MoV 钢,生产工艺流程为:电弧炉冶炼→真空精炼→浇注电极坯→电渣重熔→热送→加热→油压机两锻两拔→锻造成型→正火回火→检测→机加工→检测→调质→检测→包装→交货。

本文研究的部分为油压机两锻两拔-锻造成型部分,厂家交货状态为锻造后直接交货。锻件去头尾后,在直径 1/4 处取样。取 22 个 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 圆柱试样。

化学成分(质量分数)主要为:C 0.28%~0.35%,Mn 0.5%~0.8%,Si 0.15%~0.4%,Cr 1.2%~1.5%,Ni 3.0%~3.3%,Mo 0.35%~0.45%,V 0.1%~0.2%, $P \leq 0.015\%$, $S \leq 0.01\%$ 。

为了获得相同的初始晶粒尺寸,所有试样在 850 °C 保温 30 min 后,再进行相关实验。共设计了两种实验方案。

实验 1:将试样放入加热炉中,加热温度分别为 900、950、1 000、1 050、1 100、1 150、1 200 °C,保温 30 min 后,立即水淬至室温以保留高温奥氏体晶界。

实验 2:将试样放入加热炉,加热温度设定为 950、1 100 °C,保温时间分别设定为 10、20、30、40、60、90、120、150 min,之后立即水淬至室温以保留高温奥氏体晶界。

试样淬火后经磨平、抛光后,用蒸馏水、饱和苦味酸水溶液和十二烷基苯磺酸钠等专用混合溶液腐蚀,通过加热、保温腐蚀出清晰的奥氏体晶界,然

后在奥林巴斯光学显微镜下观察显微组织,并通过智能视觉算法对照片进行适当的处理,利用 Image-plus 软件测定其晶粒度。晶粒尺寸通过式(1)进行计算。

$$\bar{d} = \sqrt{\left(\frac{S}{N}\right)} \quad (1)$$

式中: \bar{d} 为金相照片中所有完整晶粒的平均晶粒尺寸(本文中晶粒的平均尺寸均为 \bar{d}), μm ;S为金相照片中所有完整晶粒的总面积(除去边缘晶界不完整的晶粒), μm^2 ;N为金相照片中所有完整晶粒的个数。

2 实验结果与分析

2.1 晶粒尺寸的统计

通过 850 °C 保温 30 min 后的原始奥氏体晶粒尺寸金相照片如图 1(a)所示,图 1(b)为用智能视觉算法对图 1(a)处理后的图片,图 1(c)为计算完整晶粒尺寸的区域图,通过 Image-plus 软件测量得到总面积为 23 498 μm^2 ,完整晶粒一共 184 个,通过式(1)计算得到原始奥氏体晶粒尺寸(\bar{d})为 11.3 μm (国标晶粒度 10.0 级,以下晶粒度均为国标标准)。

图 2 为保温 30 min,900~1 150 °C 时奥氏体晶粒的形貌。实验结果表明,加热温度对奥氏体晶粒尺寸的影响很大,通过显微镜测量,Image-Pro 软件统计计算后可知,加热温度 900 °C 时奥氏体平均晶界尺寸为 12.1 μm (9.8 级),1 000 °C 时为 22.2 μm (8.0 级),1 100 °C 时为 49.3 μm (5.7 级),1 200 °C 时为 101.4 μm (3.7 级)。保温 30 min,1 200 °C 与 900 °C 时的晶粒平均尺寸相比,增长了 8.4 倍。

不同的加热温度与保温时间时,奥氏体晶粒根据式(1)计算出的尺寸如图 3 所示。可以看出,晶粒

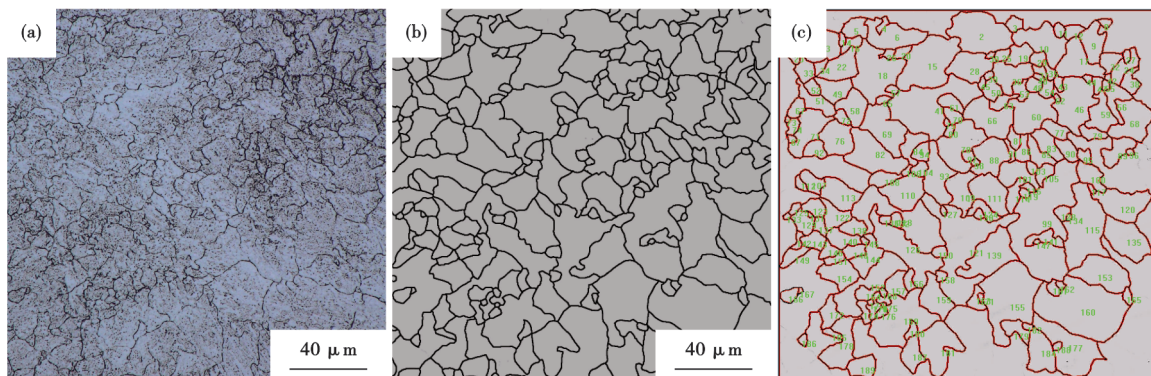


图 1 原始奥氏体的晶粒尺寸:(a)原始金相照片,(b)适当处理的金相照片,(c)完整晶粒的统计区域

Fig. 1 Grain size of the original austenite : (a) Original metallographic photograph , (b) Properly processed metallographic photographs , (c) Statistical region of intact grains



图2 保温30 min时不同加热温度奥氏体晶粒金相图:(a)900 °C, (b)950 °C, (c)1 000 °C, (d)1 050 °C, (e)1 100 °C, (f)1 150 °C
Fig. 2 Microstructure of austenite grains at different heating temperatures for 30 min: (a) 900 °C, (b) 950 °C, (c) 1 000 °C, (d) 1 050 °C, (e) 1 100 °C, (f) 1 150 °C

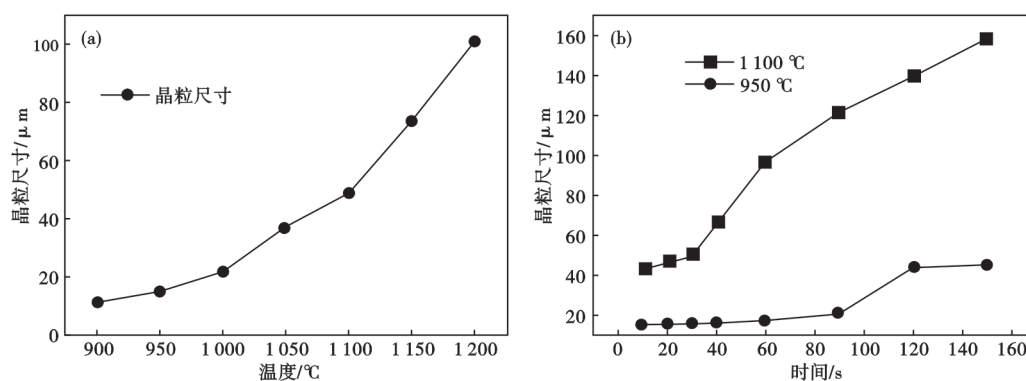


图3 不同的加热温度、保温时间与晶粒尺寸的关系:(a)不同温度保温30 min, (b)1 100 °C、950 °C不同保温时间
Fig. 3 The relationship between different heating temperature, holding time and grain size: (a) Holding for 30 min at different temperatures, (b) Different holding times of 1 100 °C and 950 °C

尺寸基本随加热温度的升高与保温时间的延长而增大。950 °C保温时,保温时间由10 min增加到90 min,保温时间增加了80 min,晶粒尺寸增加了5.7 μm,增长缓慢;保温时间由90 min增加到150 min,保温时间增加了60 min,晶粒尺寸增加了24.7 μm,增加了1.63倍。因此,950 °C保温时,存在一个晶粒长大的临界保温时间,大约为90 min。

由图3(b)可知,1 100 °C保温时,保温时间由10 min增加到40 min,保温时间增加了30 min,晶粒尺寸增加了22.6 μm;保温时间由40 min增加到150 min,保温时间增加了110 min,晶粒尺寸增加了92.9 μm,增加了1.4倍。因此1 100 °C保温时,其临界保温时间大约为40 min。

图4为950 °C时不同保温时间对奥氏体晶粒长大的影响,通过显微镜测量,Image-Pro软件统计计算后可知,保温10 min时,34CrNi3MoV钢的平均晶粒尺寸为15.1 μm(9.2级)。保温60 min时,晶粒尺寸为17.1 μm(8.8级)。保温120 min时,晶粒尺寸为43.8 μm(6.1级),保温150 min时,晶粒尺寸增加到45.5 μm(6.0级),与保温10 min相比,晶粒尺寸增加了2.9倍。图5为1 100 °C时不同保温时间对奥氏体晶粒长大的影响,相比较加热温度950 °C时,1 100 °C时保温时间的延长对晶粒尺寸变化的影响较大。

2.2 奥氏体晶粒长大的Sellers模型

奥氏体晶粒长大规律的研究多采用Sellers模

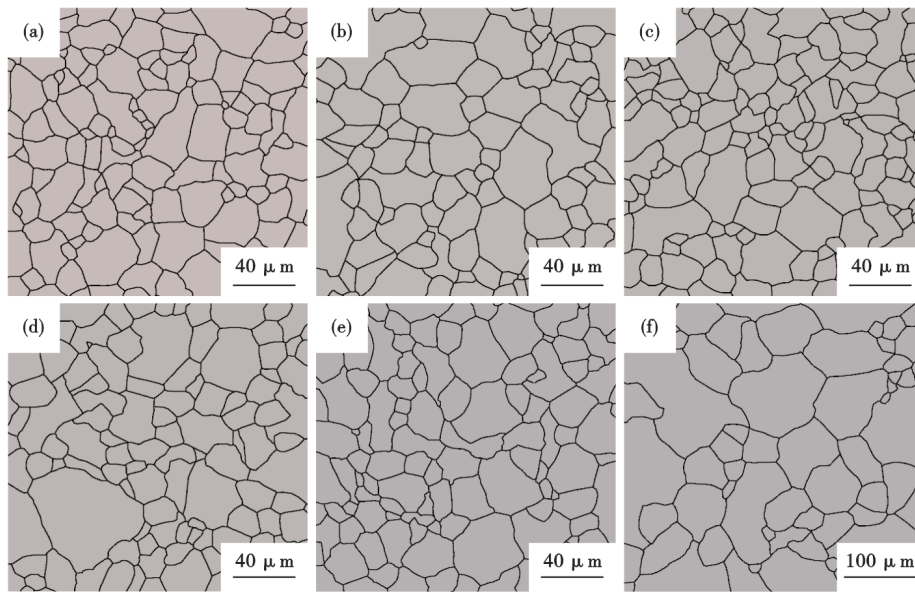


图4 950 °C时不同保温时间晶粒形貌:(a)10 min,(b)20 min,(c)40 min,(d)60 min,(e)90 min,(f)150 min

Fig. 4 Grain morphology at 950 °C with different holding times:(a) 10 min ,(b) 20 min ,(c) 40 min ,(d) 60 min ,(e) 90 min ,(f) 150 min

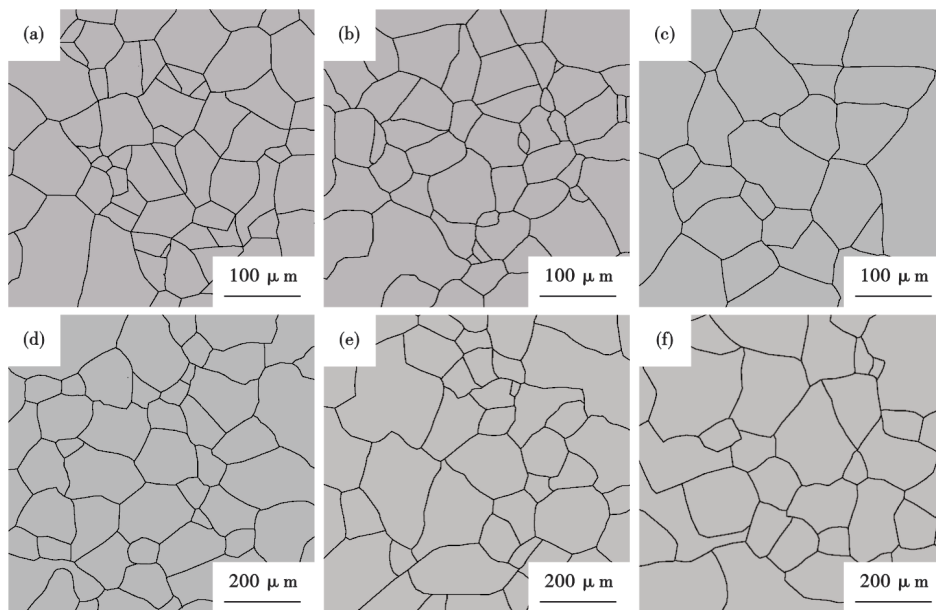


图5 1100 °C时不同保温时间晶粒形貌:(a)10 min,(b)20 min,(c)40 min,(d)60 min,(e)120 min,(f)150 min

Fig. 5 Grain morphology at 1100 °C with different holding times : (a) 10 min ,(b) 20 min ,(c) 40 min ,(d) 60 min ,(e) 120 min ,(f) 150 min

型:在温度 T ,保温时间 t ,最终的奥氏体晶粒尺寸 \bar{d} 由式(2)得。

$$\bar{d}^n - \bar{d}_0^n = A \cdot t \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中: \bar{d} 为最终的奥氏体晶粒尺寸, μm ; \bar{d}_0 为原始奥氏体晶粒尺寸, μm ; T 为加热温度, K ; Q 为晶粒长大激活能, J/mol ; t 为保温时间, min ; R 为气体常数,

$8.31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; A, n 均为试验常数。

对于不同的金属,模型中的常数 A, n 及晶粒长大激活能 Q 均有不同的值。对式(2)用相关的拟合软件进行多参数多变量的非线性回归,可确定 n, A, Q 的最优化取值, $n=1.341, A=3.2335 \times 10^7, Q=176.6 \text{ kJ/mol}$,其相关系数 R 为 0.986。得到 34CrNi3MoV 钢的奥氏体晶粒长大模型。

$$\bar{d} = \left[25.83 + 3.2335 \times 10^7 \cdot t \cdot \exp\left(\frac{-21252}{273 + T}\right) \right]^{0.75} \quad (3)$$

图6为晶粒长大实测值与Sellars模型计算值对比图,从图6可以看出,晶粒长大趋势基本一致,高温区有一定的误差,主要是奥氏体晶粒的异常粗大,奥氏体晶粒统计略有误差,低温区奥氏体晶粒计算值和实验值偏差较小,这些研究对34CrNi3MoV钢奥氏体晶粒的长大规律、晶粒大小的控制、材料性能的改善都具有一定的指导作用,也对制定合理的锻造、热处理、加热等工艺提供理论基础。该模型也可用于热加工过程晶粒长大的模拟研究。

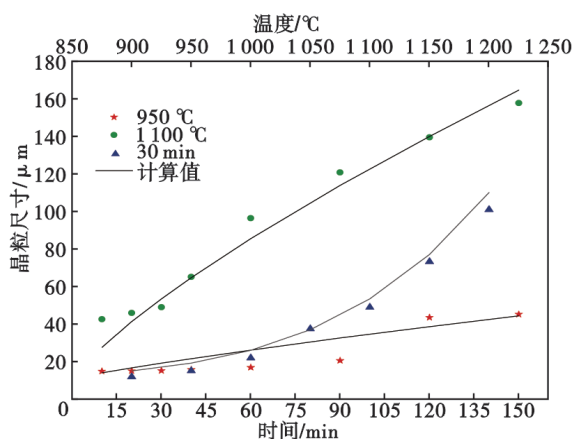


图6 晶粒尺寸实测值与Sellars模型计算值的对比图

Fig. 6 Comparison diagram between measured grain size and calculated value of Sellars model

34CrNi3MoV优质合金钢,用于制作炮身管时要求热处理后的平均晶粒尺寸控制在22.5~44.9 μm(国标8.0~6.0级),这就要求热处理的过程中保持合适的温度与时间。根据式(3)可以计算得到本次实验的34CrNi3MoV钢的奥氏体晶粒尺寸。

不同的热处理步骤具有不同加热温度与保温时间,由于该钢种含有Ni、Cr、Mo元素,一般加热温度在850~950 °C,保温时间一般在60~180 min。根据式(3)可得加热工艺中晶粒尺寸分布图如图7所示。

根据图7,如果初始晶粒尺寸11.3 μm时,加热温度达到900 °C,保温时间100 min时,奥氏体晶粒尺寸达到22.5 μm,保温180 min时晶粒尺寸也仅仅长到30 μm左右。根据图7可以预测热处理的工

艺选取区间。锻造过程中,存在返炉时,要结合后续锻造过程的再结晶细化情况,确定合适的加热温度与保温时间。

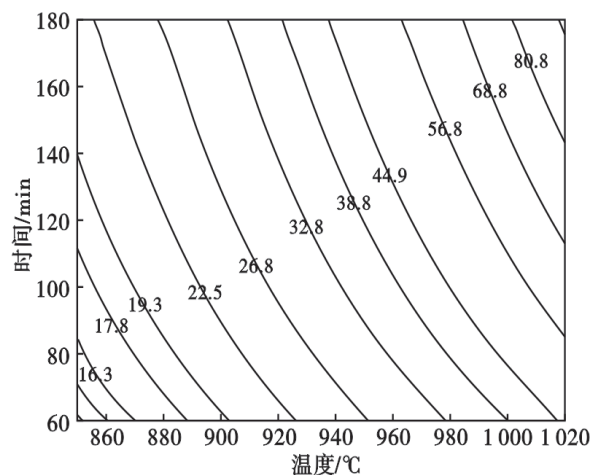


图7 加热工艺中晶粒尺寸(μm)分布图

Fig. 7 Grain size (μm) distribution diagram in heating process

3 结论

本实验使用加热炉测试了加热温度及保温时间对34CrNi3MoV钢的奥氏体晶粒长大过程的影响,结果如下。

(1) 在初始晶粒尺寸情况下,900 °C保温30 min(12.1 μm)和950 °C保温10 min(15.1 μm)都与原始尺寸级别相差不大,1050 °C保温30 min(37.8 μm)时,晶粒尺寸达到原始晶粒尺寸的3.35倍。采用GB/T 6394—2017测试原始奥氏体晶粒度时,不同的钢种应采用合适的加热温度与保温时间,以避免测试误差过大。

(2) 随保温时间的延长,加热温度对奥氏体晶粒尺寸的影响越来越弱。950 °C保温时,晶粒长大的临界保温时间大约为90 min。加热温度1050 °C时,其临界保温时间大约为30 min。加热温度越高,达到临界保温时间后,晶粒长大就越缓慢。

(3) 得到34CrNi3MoV钢晶粒长大的激活能 $Q=176.6$ kJ/mol。

(4) 由于34CrNi3MoV钢含有Ni、Cr、Mo元素,为了满足制作炮身管,要求热处理后的平均晶粒尺寸控制在22.5~44.9 μm(国标8.0~6.0级),一般加热温度在850~950 °C,保温时间在60~180 min。并得到不同调质工艺时的晶粒尺寸分布图,根据该图可以预测热处理的工艺选取区间。

参考文献

[1] 赵勇桃, 刘宗昌, 王玉峰. 34CrNi3MoV 钢的混晶及消除措施[J]. 金属热处理, 2007, 32(5): 75-77.

[2] 杨正汉. 34CrNi3MoV 钢的热处理和性能[J]. 大型铸锻件, 1996(4): 31-35.

[3] 王雅静, 刘宗昌, 段宝玉. 34CrNi3MoV 钢组织细化工艺的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(1): 128-132.

[4] Han Z P, Sun W H, Li G B, et al. Austenite grain growth law of high-strength steel for offshore engineering[J]. Materials Science Forum, 2022, 1054: 57-62.

[5] 徐 东. 高强度螺栓用钢组织性能控制与研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.

[6] 李昌义, 王 行, 王爱琴, 等. 大型奥氏体不锈钢锻件的晶粒尺寸控制[J]. 锻压技术, 2022, 47(8): 22-28.

[7] 黄 镇. 终轧温度对热轧中碳含硼钢 40B 实际晶粒度的影响[J]. 特殊钢, 2020, 41(1): 58-60.

[8] Kvačák T, Bidulská J, Bidulský R. Overview of HSS steel grades development and study of reheating condition effects on austenite grain size changes[J]. Materials, 2021, 14(8): 1988.

[9] Härtel S, Awiszus B, Graf M, et al. Influence of austenite grain size on mechanical properties after quench and partitioning treatment of a 42SiCr steel[J]. Metals, 2019, 9(5): 577.

[10] Shi M H, Kannan R, Zhang J, et al. Effect of Zr microalloying on austenite grain size of low-carbon steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(6): 2574-2585.

[11] Zhao X, Chen L. Effect of heating temperature on austenite grain size of X80 steel slab[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 631(2): 022013.

[12] 韩怀宾, 宋建锋, 王清波, 等. 终轧温度和晶粒度对非调质钢 JGF45V 冲击功的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(3): 67-70.

[13] 苏 梁, 弓 硕, 王福明. 预热处理工艺对 SCr420H 齿轮钢高温渗碳奥氏体晶粒长大行为的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 74-83.

[14] Kukareko V A. Rules of austenitic grain growth in 18KhNVA steel[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1981, 23(9): 613-616.

[15] 杨少朋, 尉文超, 胡芳忠, 等. 低碳齿轮钢 18CrNiMo7-6 奥氏体晶粒度长大规律[J]. 材料导报, 2021, 35(8): 8179-8183.

[16] 张云飞, 樊明强, 白丽娟, 等. H13 钢锻材加热时的奥氏体晶粒长大规律[J]. 金属热处理, 2019, 44(6): 33-37.

[17] Ji H C, Li Y M, Ma C J, et al. Modeling of austenitic grain growth of 21-4N steel[J]. Metalurgija, 2019, 58(1-2): 83-86.

[18] 朱 英, 王 进, 王双双. 齿轮钢奥氏体晶粒长大规律研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(20): 108-110.

[19] Khalaj G, Yoozbashizadeh H, Khodabandeh A, et al. Austenite grain growth modelling in weld heat affected zone of Nb/Ti microalloyed linepipe steel[J]. Materials Science and Technology, 2014, 30(4): 424-433.

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
行业在《特殊钢》期刊上刊登工艺设备
和技术、产品研发宣传广告
联系人: 陈颖 电话: 13812128736**