

车削非调质钢 SG4201 奥氏体晶粒的长大行为

赵文贵^{1,2} 周旭¹ 俞杰¹ 翟启杰² 张立文³

(1 江苏苏钢集团苏州苏信特钢有限公司技术中心, 苏州 215151; 2 上海大学冶金工程博士后流动站, 上海 200444;
3 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024)

摘要 采用 Gleeble 3500 热模拟试验机试验研究了直接车削用非调质钢 SG4201 (C: 0.42%, Si: 0.50%, Mn: 1.40%, P: 0.009%, S: 0.005%, Nb: 0.02%, V: 0.06%, N: 0.015%) 在 1 000 ~ 1 250 °C 加热 0 ~ 300 s 的奥氏体晶粒长大行为, 并建立了该钢奥氏体晶粒长大模型。试验结果表明, 加热时间 30 s 时, 奥氏体晶粒粗化温度和铌迅速大量固溶的温度为 1 100 °C 左右; 奥氏体晶粒长大激活能约为 110.8 kJ; 确立 SG4201 钢铸坯均热不宜超过 1 150 °C。工业生产结果表明, 当铸坯均热温度 ≤ 1 150 °C, 终轧温度 800 ~ 850 °C, 轧后冷却速度 30 ~ 35 °C/s 时, SG4201 钢的力学性能为抗拉强度 927 MPa, 屈服强度 687 MPa, 延伸率 23.5%, 断面收缩率 57%, U-冲击功 48 J, HBW 硬度值 265。

关键词 车削非调质钢 SG4201 奥氏体 晶粒长大 粗化温度 激活能

Growth Behavior of Austenite Grain of Non-Quenching-Tempering Steel SG4201 for Turning-Cutting

Zhao Wengui^{1,2}, Zhou Xu¹, Yu Jie¹, Zhai Qijie² and Zhang Liwen³

(1 Technical Center, Suxin Special Steel Co Ltd, Jiangsu Su-Steel Group, Suzhou 215151;
2 Post-Doctoral Research Center of Metallurgical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444;
3 College of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract The growth behavior of austenite grain of non-quenching-tempering steel SG4201 for direct turning-cutting (C: 0.42%, Si: 0.50%, Mn: 1.40%, P: 0.009%, S: 0.005%, Nb: 0.02%, V: 0.06%, N: 0.015%) heating at 1 000 ~ 1 250 °C for 0 ~ 300 s has been tested and studied by using Gleeble 3500 thermal simulation test machine, and the growth model of austenite grain of steel has been established. Test results show that with heating for 30 s, the coarsening temperature of austenite grains with large amount niobium solving is about 1 100 °C; the activation energy of austenite grain growth is about 110.8 kJ; and the soaking temperature of steel SG4201 casting billet being no-more than 1 150 °C is defined. The commercial production results show that with casting billet soaking heating at ≤ 1 150 °C, finished rolled at 800 ~ 850 °C, cooling speed after rolling 30 ~ 35 °C/s, the mechanical properties of steel SG4201 are tensile strength 927 MPa, yield strength 687 MPa, elongation 23.5%, reduction of area 57%, U-impact energy 48 J and HBW hardness value 265.

Material Index Non-Quenching-Tempering Steel SG4201 for Turning-Cutting, Austenite, Grain Growth, Coarsening Temperature, Activation Energy

近年来,由于减重、降耗节能和性价比最优化等要求使微合金非调质钢在国内外工程机械和汽车等行业得到越来越广泛的应用^[1-4]。非调质钢从用途上分为锻造和直接车削用非调钢。目前,除汽车制造业已在大量应用锻造非调质钢外,注塑机行业、油缸行业、工程机械等行业的杆、轴类件生产制造商都愿意去接受并试用车削非调质钢,从而达到降本增效的目的。鉴于此,一种新型、稳定和制造成本相对低廉、环境友好型用于油缸与工程机械(尤其轴类、杆类)等领域的高性能车削非调质钢逐渐引起人们的关注。

加热温度的高低和保温时间的长短直接影响着钢材的奥氏体晶粒尺寸^[5]。研究奥氏体晶粒长大的规律对提高钢材的综合力学性能具有重要意义。这主要是由于钢铁材料显微组织和综合力学性能与

奥氏体晶粒大小密切相关。当前,人们对不同钢种(如锻造用非调质钢)在加热过程中奥氏体晶粒长大行为进行了大量研究^[6-9],并得到了一些奥氏体晶粒长大的数学模型。而直接切削非调质钢是近年来才引起人们的关注,故对其铸坯轧制前加热过程中奥氏体晶粒长大的行为报道较少。

因此,本文通过研究在不同温度和保温时间条件下,直接车削非调质钢奥氏体晶粒的长大行为,确定其奥氏体晶粒粗化温度;揭示加热过程中其奥氏体晶粒长大规律,为工业化的加热工艺提供必要的理论依据。

1 试样制备与试验方法

试验选用钢厂自行开发设计的车削非调质钢(牌号为 SG4201),其化学成分见表 1。

表 1 试验车削非调质钢 SG4201 的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested non-quenching-tempering steel SG4201 for turning-cutting / %

C	Si	Mn	Nb	V	N	P	S
0.42	0.50	1.40	0.02	0.06	0.015	0.009	0.005

选用轧后 $\Phi 100$ mm 的棒材,加工成 $\Phi 8$ mm \times 12 mm 圆柱体试样在热模拟试验机 Gleeble 3500 上模拟铸坯在轧制前,加热过程中奥氏体的晶粒的长大行为。

将 $\Phi 8$ mm \times 12 mm 的圆柱体试样以 20 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速度在热模拟试验机上加热到指定的奥氏体化温度,奥氏体化温度 1 000, 1 100, 1 200, 1 250 $^{\circ}\text{C}$ 共 4 个温度;保持给定的时间后立即淬火,保温时间 0, 10, 30, 120, 300 s 共 5 个保温时间,以保留原始奥氏体形貌。然后制成金相试样,采用光学金相显微镜观察奥氏体晶粒,依据 GB/T6394-2002“金属平均晶粒度测定方法”,测定奥氏体晶粒平均尺寸。

采用拉伸和冲击试验(WE-300 型拉伸试验机和 JBN-300B 摆锤式冲击试验机),测量工业化试生产钢材在常温下的屈服强度、抗拉强度、延伸率、断

面收缩率和 U 型冲击功。

2 试验结果与讨论

2.1 加热温度对奥氏体晶粒长大行为的影响

奥氏体晶粒的长大是一种热激活、扩散型、界面反应控制的物理冶金过程,主要取决于加热温度和保温时间^[10]。

图 1 给出了不同温度下保温 30 s 后奥氏体晶粒组织。图 2 展示了不同加热温度下保温 30 s 后,奥氏体平均晶粒尺寸变化曲线。由图 1 和图 2 可以看出,随着加热温度的升高,奥氏体晶粒逐渐长大。这是由于钢在加热过程中发生奥氏体化转变后,在奥氏体晶界净驱动压力的作用下发生晶界迁移,导致晶粒长大。

本试验中,在相同的保温时间下,随着加热温度从 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 逐渐升高到 1 100 $^{\circ}\text{C}$,奥氏体平均晶粒尺寸从 35 μm 缓慢长大到 50 μm 。这主要是由于试验钢中的 Nb、V 等微合金元素是强碳氮化物形成元素,在钢中形成熔点高、稳定性强且不易聚集长大的碳化物、氮化物等,其颗粒微小,弥散分布,能够在晶

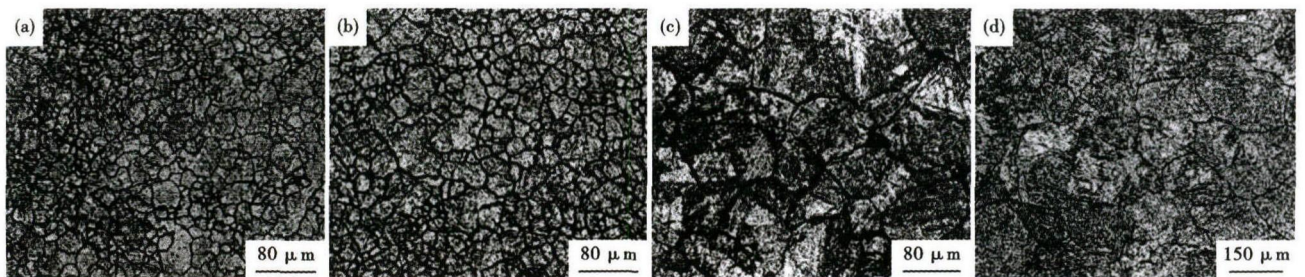
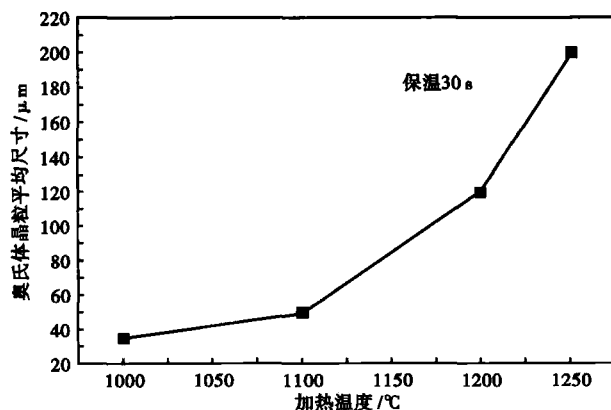
图 1 SG4201 钢奥氏体晶粒形貌,加热温度:(a) 1 000 $^{\circ}\text{C}$;(b) 1 100 $^{\circ}\text{C}$;(c) 1 200 $^{\circ}\text{C}$;(d) 1 250 $^{\circ}\text{C}$,保温 30 sFig. 1 Morphology of austenite grains of steel SG4201, heating for 30 s: at 1 000 $^{\circ}\text{C}$ (a); 1 100 $^{\circ}\text{C}$ (b); 1 200 $^{\circ}\text{C}$ (c) and 1 250 $^{\circ}\text{C}$ (d)

图 2 加热温度对 SG4201 钢奥氏体晶粒平均尺寸的影响,保温 30 s

Fig. 2 Effect of heating temperature on average austenite grains size of steel SG4201, heating for 30 s

界起钉扎作用,能有效抑制奥氏体晶界的迁移,从而抑制奥氏体晶粒的粗化和长大。同时发现,随着加热温度继续升高,晶粒长大速度明显加快,晶粒开始急剧粗化;当温度为 1 250 $^{\circ}\text{C}$ 时,奥氏体平均晶粒尺寸增加到 200 μm ,曲线在 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 时出现拐点。由此可知,本试验中 Nb 的碳氮化物大量固溶温度约为 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 保温时间对奥氏体晶粒长大行为的影响

图 3 给出了不同保温时间下,加热温度分别为 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 和 1 200 $^{\circ}\text{C}$ 时奥氏体晶粒组织,其粗化曲线如图 4 所示。可以看出,相同的加热温度下,随着加热时间的增加,奥氏体晶粒平均尺寸逐渐长大,但长大的趋势逐渐变得缓慢。不同加热温度下,保温时

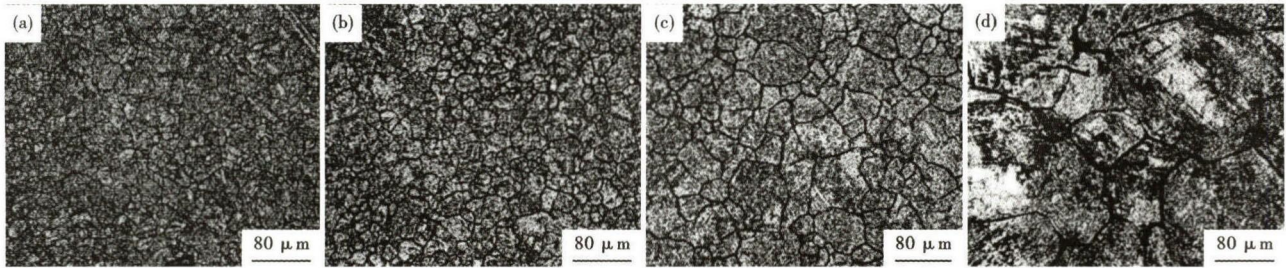


图 3 SG4201 钢奥氏体晶粒形貌,加热温度-保温时间:(a)1 000 °C-0 s;(b)1 000 °C-300 s;(c)1 200 °C-0 s;(d)1 200 °C-300 s
Fig. 3 Morphology of austenite grains of steel SG4201, heating temperature-time: (a) 1 000 °C-0 s; (b) 1 000 °C-300 s; (c) 1 200 °C-0 s; (d) 1 200 °C-300 s

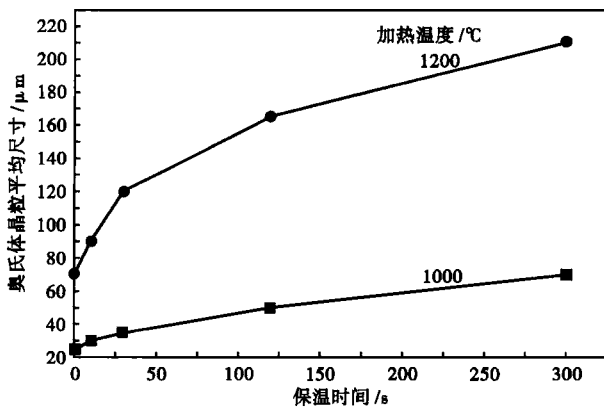


图 4 加热温度1 000 °C和1 200 °C时保温时间对 SG4201 钢奥氏体晶粒平均尺寸的影响

Fig. 4 Effect of heating time on average austenite grains size of steel SG4201, heating at 1 000 °C and 1 200 °C

间对晶粒大小的影响不同,1 200 °C时晶粒长大的速率明显大于1 000 °C时速率。此外,对比图 2 和图 4 可以看出,对奥氏体晶粒长大的影响程度:加热温度 > 保温时间。

可见,根据加热温度和保温时间对奥氏体晶粒平均尺寸的影响,并结合钢厂实际工装设备条件,工业化生产时铸坯轧制成棒材前的均热温度拟定不超过1 150 °C。

2.3 奥氏体晶粒长大模型建立

奥氏体晶粒长大规律的模型多采用 Arrhenius 模型^[9],如式(1)所示。

$$D = At^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中: D -晶粒尺寸/ μm ; t -时间/ s ; T -绝对温度/ K ; Q -激活能/ J ; R -气体常数, $8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; A 、 n -常数。采用本实验中的数据,根据式(1)拟合 $\ln D$ - $1/T$ 关系曲线,如图 5 所示,可以得到非调质钢 SG4201 奥氏体晶粒长大激活能为 110.8 kJ 。

2.4 工业化试生产结果

结合上述加热温度和保温时间对奥氏体晶粒长

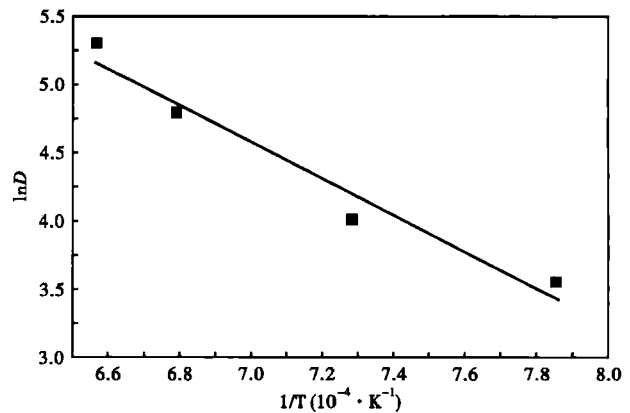


图 5 SG4201 钢奥氏体晶粒长大模型
Fig. 5 Model of growth of steel SG4201 austenite grain

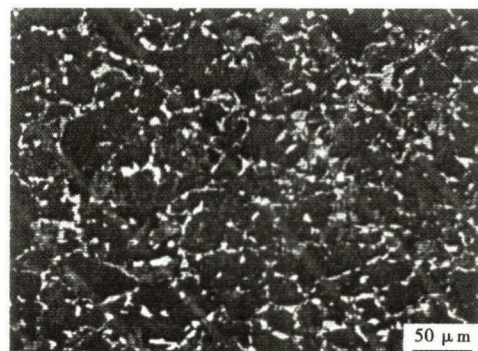


图 6 工业化试生产的 $\Phi 100 \text{ mm}$ 车削非调质钢 SG4201 的组织形貌

Fig. 6 Morphology of structure of commercial-produced $\Phi 100 \text{ mm}$ non-quenching-tempering steel SG4201 for turning-cutting

大的影响,以及钢厂自身工装设备条件,铸坯采用拟定的不高于 $1 150 \text{ °C}$ 的均热温度,并辅以合适的轧制工艺参数对车削非调质钢 SG4201 铸坯进行工业试生产;该钢种终轧温度 $800 \sim 850 \text{ °C}$,轧后采用钢厂自主设计的冷却装备进行水冷,冷却速率 $30 \sim 35 \text{ °C/s}$ 。试生产的 SG4201 棒材的显微组织如图 6 所示。

表 2 给出了非调质钢 SG4201 (具体化学成分见

表 2 调质钢 42CrMo 与非调质钢 SG4201 力学性能比较(取样 Φ100 mm 材的1/2半径处)

Table 2 Comparison between mechanical properties of quenching-tempering steel 42CrMo and non-quenching-tempering steel SG4201, sampling at 1/2 radius of Φ100 mm bar

钢种	工艺	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	断面收缩率/%	U 型冲击(室温)/J	硬度值(HBW)
调质钢 42CrMo	850 °C 油淬,560 °C 回火,水冷	868	682	19	51	60	269
非调质钢 SG4201	终轧 800 ~ 850 °C,30 ~ 35 °C/s 冷却	927	687	23.5	57	48	265

试样制备部分)与行业上主流使用的调质钢 42CrMo (%: 0.42C, 0.23Si, 0.64Mn, 0.99Cr, 0.16Mo, 0.019Al,0.009P,0.005S;直径 100 mm 棒材整体采用调质处理,热处理制度:850 °C 油淬,560 °C 回火后水冷)的拉伸性能和硬度比较情况。

3 结论

(1)加热时间为 30 s 时,奥氏体晶粒粗化温度和氩迅速大量固溶的温度为1 100 °C 左右。

(2)车削用非调质钢 SG4201 奥氏体晶粒长大激活能为 110.8 kJ。

(3)通过热模拟试验和工业化试生产的结果,确立了实际生产过程中 SG4201 铸坯轧制前在加热炉中的均热温度,此温度不宜超过1 150 °C。

2015 年度“江苏省博士后科研资助计划项目”(1501137B)

参考文献

[1] David Mibourn. Vanadium Microalloyed Non-quench and Temper Forging Steels [R]. Chongqing: International Vanitec Technology Committee,2011:1-35.

[2] 马鸣图,吴宝榕. 双相钢-物理和力学冶金 [M]. 北京:冶金工业出版社(2 版),2009:1-12.

[3] Hyonsoo Park, Yong Sang K. Development of Fracture Split Steel Connecting Rods [N]. Innovation of Steel Bar and Steel Plant, SAE Technical Paper 2003-01-1309:91-95.

[4] 马鸣图. 先进汽车用钢 [M]. 北京:化学工业出版社,2007:375-399.

[5] 赵英利,时 捷,肖文全,等. 加热温度对含 Nb 中碳钢奥氏体晶粒长大的影响 [J]. 材料热处理学报,2010,3(4):67-70.

[6] 苗华军,王 岩,曾 莉. 高 Nb-X80 管线钢奥氏体晶粒长大规律 [J]. 金属热处理,2012,37(9):64-66.

[7] 万德成,蔡庆伍,余 伟,等. 含 Nb 中碳钢加热过程中的奥氏体晶粒长大规律 [J]. 金属热处理,2013,38(4):12-15.

[8] 李文竹,黄 磊,严平沅,等. 低碳微合金钢再加热奥氏体化后奥氏体晶粒长大行为 [J]. 金属热处理,2013,38(4):19-22.

[9] Zhang S S, Li M Q, Liu Y G, et al. The Growth Behavior of Austenite Grain in thg Heating Process of 300 M Steel [J]. Materials Science and Engineering A,2011,528(15):4967-4972.

[10] 张朝磊,杨 忠,孙景宏,等. 合金元素对曲轴用非调质钢奥氏体长大和组织细化的影响 [J]. 工程科学学报,2015,37(2):175-179.

赵文贵(1981-),男,博士(2009 年吉林大学),高级工程师,2004 年吉林大学(本科)毕业,管线钢、轴承钢等研发。

收稿日期:2016-04-18

下 期 要 目

热轧冷却工艺对含铜 Hi-B 钢抑制剂的影响..... 徐 永等

60 t LF-VD 精炼过程 18CrNiMo7-6 齿轮钢夹杂物的演变 刘金鑫等

高碳钢盘条马氏体形成临界冷却速率的数值模拟 纪 元等

Q345 钢宽展模型对中厚板轧制压力预算精度的影响..... 肖志余等

改善 QT20CrMo 含硫齿轮钢 A 类夹杂物中心偏析的工艺优化实践 周 力等

Q420B 铁塔角钢裂纹的成因分析和工艺优化 姚 娜等

DY105 高碳钢丝冷拔断裂分析和工艺改进实践 李 朋等

稀土元素 Ce 对 409L 不锈钢退火组织和热疲劳性能的影响 董 方等

化学成分对 DL05 电缆钢导电率的影响 黄红兵等