

奥氏体化温度对氮微合金化螺纹钢微观组织及强度的影响

毛昀愜, 李阳*, 姜周华, 孙萌, 马帅, 王举, 王禹程

东北大学冶金学院, 沈阳 110819

Effect of austenitizing temperature on microstructure and strength of nitrogen micro-alloyed rebar steel

Mao Yunqie, Li Yang*, Jiang Zhouhua, Sun Meng, Ma Shuai, Wang Jun, Wang Yucheng

School of Metallurgy, Northeastern University, Shengyang, 110819, China

1. 前言

螺纹钢在房屋、桥梁、道路等重大工程建设有着广泛的应用。作为一种结构材料,强韧性是反映螺纹钢冶金质量的主要指标之一^[1]。氮是一种廉价的钢材强化元素,它不仅可以实现固溶强化,还可以同钢中的氮化物形成元素(V、Nb)形成氮化物,进而通过析出强化改善钢材性能。奥氏体化温度是钢的热轧工艺的关键参数,对显微组织和强韧性具有重要影响。有必要选择合理的奥氏体化温度,在生产中既要防止奥氏体晶粒的过分长大而影响最终组织,又要保证合金元素充分溶解而发挥作用^[2]。因此,开展微合金钢奥氏体化温度的试验研究,确定奥氏体化温度、奥氏体晶粒尺寸、合金元素的溶解、析出及再结晶之间的关系有重要的意义。许多学者针对螺纹钢的氮微合金化工艺^[3]以及元素配比^[4-6]展开研究。但针对奥氏体化温度对氮微合金化螺纹钢强度的影响的研究工作较少。由于锻造与轧制本质上都是破坏钢锭的铸造组织,并消除显微组织的缺陷,从而使钢组织密实,改善力学性能,故本研究拟采用实验室锻造工艺模拟工业生产中热轧环节,采用锻造前的保温过程模拟工业生产中奥氏体化环节,针对不同奥氏体化温度对氮微合金化螺纹钢微观组织及强度的影响展开研究,本研究可以为含氮螺纹钢热加工工艺的制定提供参考。

2. 实验材料和步骤

2.1. 实验材料

本研究选用的实验钢为某钢厂生产的牌号 A 螺纹钢,具体成分如表 1 所示。

表 1 牌号 A 螺纹钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Composition of Grade A rebar (mass fraction, %)

C	Si	Mn	N	Nb	V	
含量	0.26	0.31	1.24	0.012	0.005	0.020

2.2. 实验步骤

根据该钢厂实际生产中采用的轧制工艺，本研究设立三组对照组，编号为 1#，2#，3#，如图 1 所示，分别于 1150°C，1100°C，1050°C 下保温 1.5h，初锻温度为 950°C，终锻温度 900°C，之后空冷至室温。

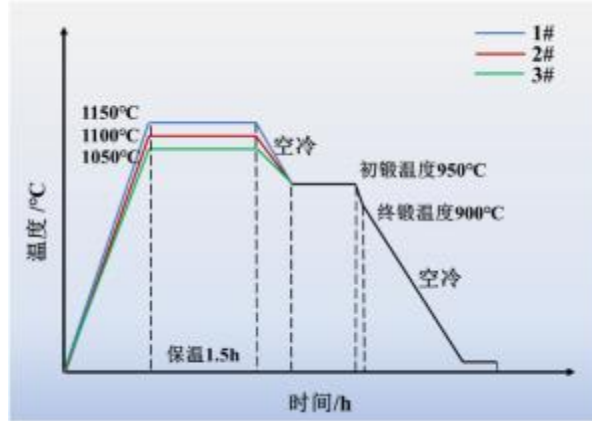


图 1 热处理过程中的总体操作方案

Fig. 1 The general operation scheme in Heat treatment process

锻造后，在实验钢中切取标准拉伸试样，在岛津 AGS-X 电子拉伸试验机上进行室温拉伸实验，并比较三组样品屈服强度与抗拉强度，使用扫描电子显微镜观察断口情况，取金相样经机械打磨抛光后，于 4% 硝酸酒精溶液中浸泡腐蚀，观察微观组织情况。

3. 结果与分析

3.1. 微观组织与断口形貌

三组实验样品微观组织形貌如图 2 所示。可知三组实验样品的组织均为铁素体+珠光体，随着奥氏体化温度的提升，铁素体与珠光体团的尺寸不断增大，同时，铁素体的比例降低，珠光体团比例上升。奥氏体化温度提升，奥氏体晶粒长大，晶界逐渐减少，铁素体形核点减少，其相变起始温度下降，相变迟滞，铁素体减少，奥氏体趋向珠光体相变，并且大尺寸奥氏体相变后的铁素体和珠光体团尺寸也相应较大^[7]。

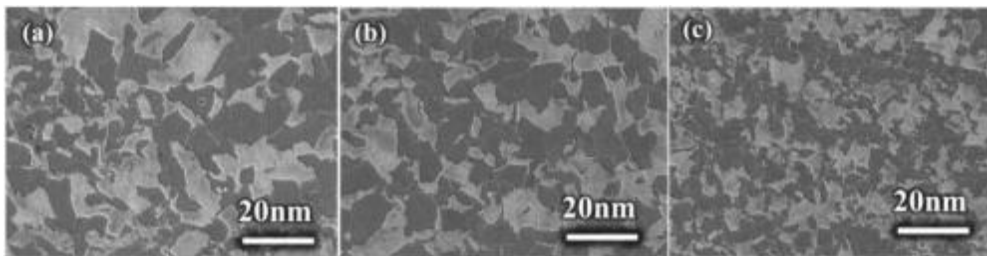


图 2 样品微观组织形貌 (a)1#;(b)2#;(c)3#

Fig. 2 Microstructure morphology of the samples (a)1#; (b)2#;(c)3#

拉伸试样断口形貌如图 3 所示，不难看出，三组试样均为韧性断裂，随着奥氏体化温度的升高，韧窝逐渐由大而深向小而密转变，可见随着温度升高，实验钢的韧性逐渐降低。同时，可以在 3# 试样断口处观察到几个大尺寸深坑，并且在深坑底部观察到大尺寸第二相粒子，1#、2# 试样断口中只有细小、弥散的第二相粒子。

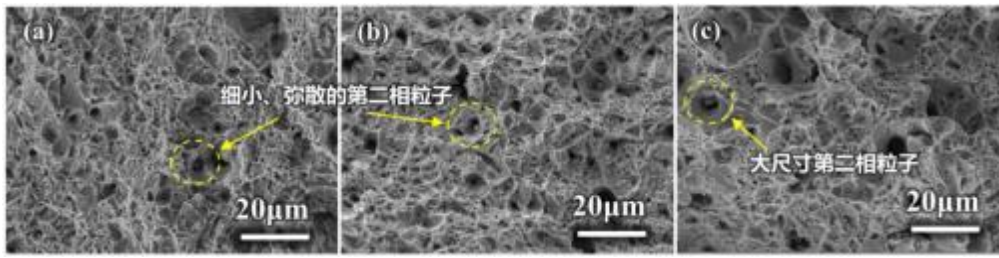


图 3 样品断口形貌 (a)1#;(b)2#;(c)3#

Fig. 3 Fracture morphology of samples (a)1#;(b)2#;(c)3#

使用 Thermo-Calc 热力学计算软件计算随着实验温度的变化，钢中各组元含量的变化。计算结果如图 4 所示，由图可得，碳氮化铌析出温度为 1070°C，碳氮化钒析出温度为 880°C。计算结果解释了在 3#拉伸断口中看到大尺寸第二相粒子的原因，3#实验奥氏体化温度低于碳氮化铌析出温度，实验钢中析出相无法充分回溶，并且由于高温且保持了足够长的时间，第二相粒子发生粗化长大^[8]。而 2#，3#由于较高的奥氏体化温度，钢中析出相充分回溶，所以只存在锻造过程中析出的细小、弥散的析出相。

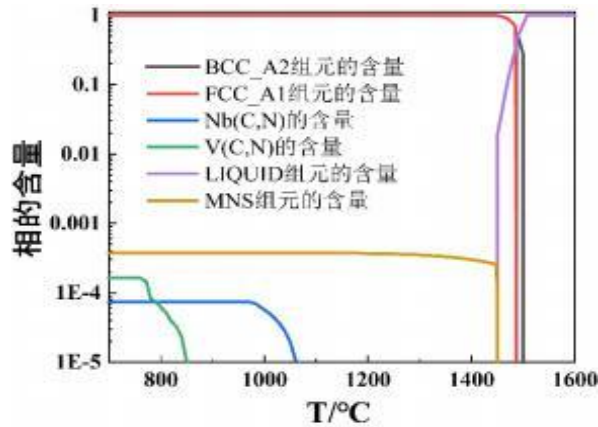


图 4 各相含量随温度的变化

Fig. 4 The content of each phase changes with temperature

综上，实验钢中组织情况如图 5 所示，随着奥氏体化温度的增加，钢中奥氏体晶粒逐渐长大。同时，随着温度的升高，钢中第二相粒子逐渐回溶，但是由于 3#奥氏体化温度较低，其中的第二相粒子未能完全回溶，并且由于高温，3#钢中的第二相粒子粗化长大，而 1#与 2#中第二相粒子充分回溶，在锻造过程中重新析出细小、弥散的第二相粒子。

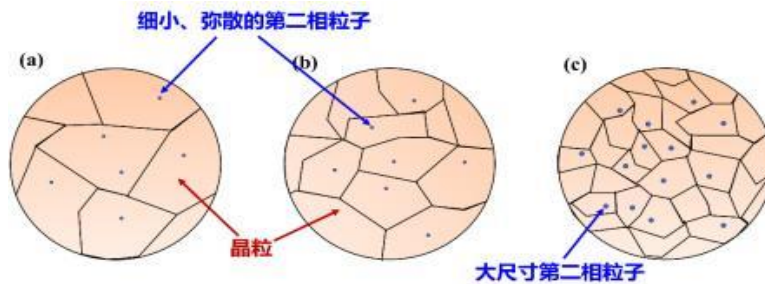


图 5 实验钢组织示意图 (a)1#;(b)2#;(c)3#

Fig. 5 Schematic diagram of experimental steel structure (a)1#;(b)2#;(c)3#

3.2. 力学性能

不同奥氏体化温度处理后实验钢拉伸试样力学性能如图 6 所示，可以看出，随着温度的升高，实验钢的力学性能先上升后下降，2#的抗拉强度和屈服强度均优于 1#与 3#。因为 2#钢中的析出相在 1100℃下得到了充分回溶，而 3#样品中仍存在未能回溶的析出相，由于高温这些未回溶的析出相粗化长大，当粒子粗化长大尺寸超过其临界尺寸时，由此将减弱或甚至丧失第二相粒子在高温下的相关强化作用^{[8]-[9]}，并且由于析出相未能全部回溶，3#锻造过程中只能重新析出较少的细小、弥散析出相，使得钢中微合金元素对组织及性能的强化作用减弱；同时，随着温度升高，引起了奥氏体晶粒长大，影响钢的强度，所以 2#力学性能最优。

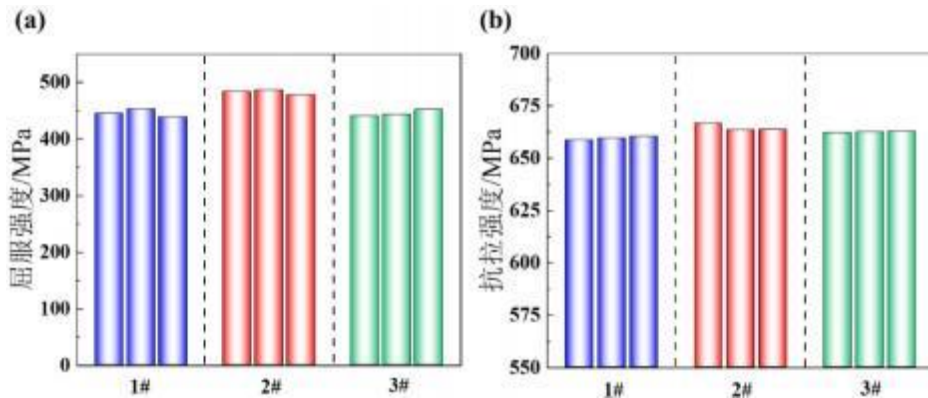


图 6 拉伸试样力学性能 (a)屈服强度；(b)抗拉强度

Fig. 6 Mechanical properties of tensile specimens (a) Yield strength; (b) Tensile strength

4. 结论

本文选取不同的奥氏体化温度对实验钢进行锻造前保温处理，经过同样的锻造处理后，通过对比几组实验钢的组织、拉伸断口及力学性能，得出如下结论：随着奥氏体化温度的提高，铁素体与珠光体晶粒尺寸增大，韧窝由大而深向小而密转变。当奥氏体化温度低于析出相析出温度时，析出相无法充分回溶，由于高温这些未回溶的析出相粗化长大，当尺寸超过其临界尺寸时，将减弱或甚至丧失第二相粒子在高温下的相关强化作用。故当奥氏体化温度适当超过各析出相析出温度时，氮微合金化螺纹钢的微观组织与力学性能最优。

致谢

感谢国家自然科学基金项目(项目号：52074075)的支持。

参考文献

- [1] 闫洞旭. HRB400 螺纹钢奥氏体晶粒细化的实验研究[D]. 苏州大学, 2021.
- [2] 杨景红, 刘清友, 孙冬柏, 李向阳. 加热温度对微合金高强度钢奥氏体组织及其再结晶的影响[J]. 钢铁研究学报, 2009,21(03): 37-41.
- [3] 戴雨翔. 氮含量对螺纹钢夹杂物、组织及性能的影响[J]. 江西冶金, 2021, 41(06): 39-49.
- [4] 马昱, 李京社, 刘威, 孙丽媛, 杨树峰, 赵明. HRB400 钢中钒铌合金对氮溶解度影响的热力学研究[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(S1): 6-9.
- [5] Liu Shuang, Ai Songyuan, Long Mujun, Feng Yi, Zhao Jingjun, Zhao Yan, Gao Xiang, Chen Dengfu, Ma Mingtu. Evolution of Microstructures and Mechanical Properties of Nb-V Alloyed Ultra-High Strength Hot Stamping Steel in Austenitizing Process[J]. Materials, 2022, 15(22).
- [6] Prediction of Phase Composition and Nitrogen Concentration During the Nitriding Process in Low-Alloy Steel[J]. Materials Research, 2016, 19(2).
- [7] 杨晓伟, 陈焕德, 周云, 张宇. 轧制工艺对 V-Nb 微合金化 HRB600E 钢筋组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2021,46(08): 150- 155.
- [8] 王国承, 王铁明, 尚德礼, 方克明. 超细第二相粒子强化钢铁材料的研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2007(06): 5-8.
- [9] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 冶金工业出版社: 2006.