铁素体区保温对钒微合金化 HRB500 显微组织和力学性能的影响

吕 远[1], 亓海全[1*], 眭文杰[1], 石代敏[1], 谢国庆[2]

(1. 桂林理工大学广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 广西柳州钢铁股份有限公司, 广西 柳州 545002)

摘 要: 通过 Gleeble3500 对 HRB500 进行了奥氏体区形变+铁素体区保温的热模拟压缩试验, 研究了铁素体区保温工艺对 HRB500 组织和性能的影响。结果表明, 试样加热到 980 ℃ 保温 15 min, 进行 80% 压下之后, 随着铁素体区保温温度的降低, 珠光体组织逐渐碎化, 铁素体出现少量针状结构, 但硬度未随之发生规律性改变; 在保温工艺中, 700 ℃×15 min 保温时获得了最高硬度(HV)300, 较直接冷却试样提高了 30, 这可归于碳化钒的析出强化, 进一步延长保温时间硬度显著降低, 可知保温过程中晶粒的粗化抵消了碳化钒的第二相强化效果。由试验数据可以推测, 常规热轧生产的 HRB500 并未充分利用 VC 的第二相强化, 在轧后冷床上进行 700 ℃×10 ~ 15 min 的保温作业, 可望实现该钢 10 MPa 以上的强度增量。

关键词: HRB500; 钒微合金化; 铁素体区; 保温; 热模拟压缩试验

中图分类号: TF76, TG156.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004−7638(2021)01−0160−04

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.01.026 **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID) :**

听语音 聊科研 与作者互动

Effect of ferrite thermal insulation on microstructure and mechanical properties of vanadium microalloyed HRB500 steel rebar

Lv Yuan[1], Qi Haiquan[1*], Sui Wenjie[1], Shi Daimin[1], Xie Guoqing[2]

(1. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guiling University of Technology, Guilin 541004, Guangxi ,China; 2. Guangxi Liuzhou Iron and Steel Co., Ltd., Liuzhou 545002, Guangxi, China)

Abstract: The thermal simulation compression experiment of austenite deformation and ferrite area insulation was carried out on HRB500 steel rebar by a Gleeble3500 simulator, and the effect of ferrite area insulation technology on microstructure and properties of HRB500 steel rebar was studied. The results show that after the sample was reheated at 980 ℃ × 15 min and then deformed by 80% reduction, as the temperature of the ferrite zone decreases, the pearlite structure gradually breaks down and a small amount of needle-like structure appears in the ferrite, but the hardness changing does not show a clear tendency. During the isothermal holding process, the highest hardness (HV) 300 was obtained after 700 ℃ × 15 min proccess, which was 30 higher than that of the directly cooled sample. This could be attributed to the precipitation strengthening of vanadium carbide, which would decrease when the holding time elongated. The coarsening of the grains counteracts the second phase strengthening effect of vanadium carbide. It can be inferred from the test data that the HRB500 steel rebar produced by conventional hot

收稿日期: 2020−05−06

基金项目: 有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室开放基金资助(2019KF-13); 广西建筑新能源与节能重点实验室(桂科能 19-J-21-13)。

作者简介: 吕远(1994—), 男, 硕士, 主要从事金属材料研究, E-mail: lvyuan328@qq.com; *通讯作者: 亓海全(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事材料成形与热处理研究, E-mail: 22664798@qq.com。

rolling does not fully take advantage of the second phase strengthening of VC. Insulation at 700 ℃ × 10 ~ 15 min on the workbench after rolling is expected to achieve a strength increment of more than 10 MPa.
Key words: HRB500, vanadium microalloyed, ferrite zone, insulation, thermal simulation compression experiment

0　引言

随着建筑轻量化的发展及其对高强度钢铁的需求, HRB500 由于其具有优异的综合力学性能, 可望成为未来重要的工程材料[1−3]。研究表明, HRB500 中的 V 起到细化晶粒和沉淀强化的作用 , 考虑到钢筋新标准 GB 1499.2—2018 对组织和性能的规定, HRB500 钢筋普遍采用 Nb、V 进行微合金化以获得细晶强化和第二相强化[4−7]。由于强化机制的叠加复杂性以及准确量化强度增量存在难度, 目前对铁素体区的第二相强化是否已经充分利用尚未可知, 故笔者对 V 微合金化的 HRB500 进行变形后铁素体区保温, 分析保温制度对其组织和性能的影响。

1　试验

1.1　试验材料

试验材料为直径 16 mm 的钒微合金化 HRB500 钢筋(化学成分见表 1)。

表 1　钢的化学成分与轧态硬度(HV)
Table 1　Chemical compositions and hardness of as-hot rolled steel

化学成分/%						平均硬度
C	Si	Mn	S	P	V	
0.20 ~ 0.25	0.35 ~ 0.80	1.46 ~ 1.60	≤0.04	≤0.04	0.08 ~ 0.02	280

1.2　试验方法

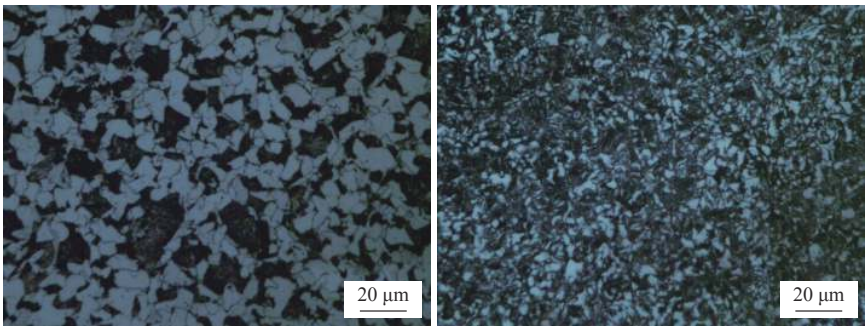
试样切段后车削加工成 Gleeble3500 热模拟压缩试样: φ8 mm×12 mm。考虑到钒微合金化的固溶度积较高, 且试样尺寸较小, 试样热处理工艺均采用加热至 980 ℃ 保温 15 min, 压下制度为: 80%, 1/s 制得压缩试样, 压缩试样以 20 ℃/s 分别加热至 400 、500、550、600、650 、700 ℃ 和 750 ℃, 保温时间分别为: 5、15 min 和 30 min, 然后以 20 ℃/s 冷却至室温。所有试样采用统一的加热制度和压下制度, 压后试样沿轴向切断并对断面进行金相观察和维氏硬度测试, 所有硬度均取三点硬度的平均值。

2　结果与讨论

2.1　保温制度对显微组织的影响

2.1.1　热模拟压缩前、后显微组织对比

钒微合金化 HRB500 钢筋原始显微组织以及热模拟压缩后直接冷却至室温的试样显微组织如图 1(a)和图 1(b)所示, 钒微合金化 HRB500 钢筋原始组织为铁素体和珠光体组织, 试样经 980 ℃× 15 min 加热并进行 80% 压下之后晶粒沿着热压缩方向受到的压缩较大。



(a) 原始组织　　(b) 热压缩后

图 1　试样原始组织和热压缩后显微组织
Fig. 1　Microstructure of as-cast and after heat compression samples

采用控制变量法分析保温温度对显微组织的影响, 在保温时间一定时, 随着保温温度的降低, 珠光体组织逐渐碎化, 珠光体晶粒变小, 在铁素体区随着保温温度的降低铁素体出现少量针状结构, 由于微

合金元素 V 的作用也起到晶粒细化的作用。

2.1.2　保温制度对显微组织的影响

图 2 为钒微合金化 HRB500 钢筋热模拟压缩后保温温度为 750 ℃ 时，在不同保温时间（5、15、30 min）下的显微组织。当保温时间由 5 min 提高至 15 min 时内部组织均匀化程度提高，当保温时间为 30 min 时，晶粒组织明显变得粗大，随着时间的增加珠光体由层片状向小块状聚集分布。

图 3 为钒微合金化 HRB500 钢筋热模拟压缩后保温温度为 700 ℃ 时，在不同保温时间（5、15、30 min）下的显微组织。值得注意的是在保温时间由 5 min 增加至 15 min 时，显微组织内部珠光体呈块状聚集，铁素体细小均匀，又由于微合金元素 V 的增强淬透性和碳化物的作用，使晶粒细化并稳定组织结构，当保温时间增加至 30 min 时，晶粒发生粗化现象。

图 4 为钒微合金化 HRB500 钢筋热模拟压缩后保温温度为 650 ℃ 时，在不同保温时间（5、15、30 min）下的显微组织。随着保温时间的增加晶粒变得较为粗大。

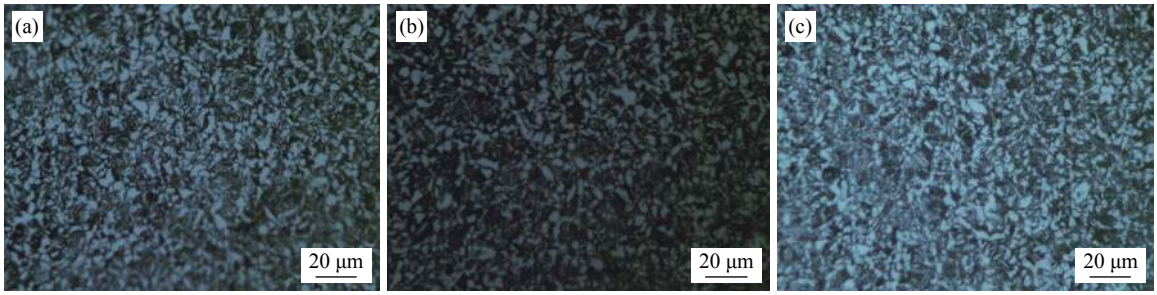


图 2　试样在 750 ℃ 保温的显微组织：(a) 5 min；(b) 15 min；(c) 30 min

Fig. 2　Microstructure of the sample held at 750 ℃：(a) 5 min，(b) 15 min，(c) 30 min

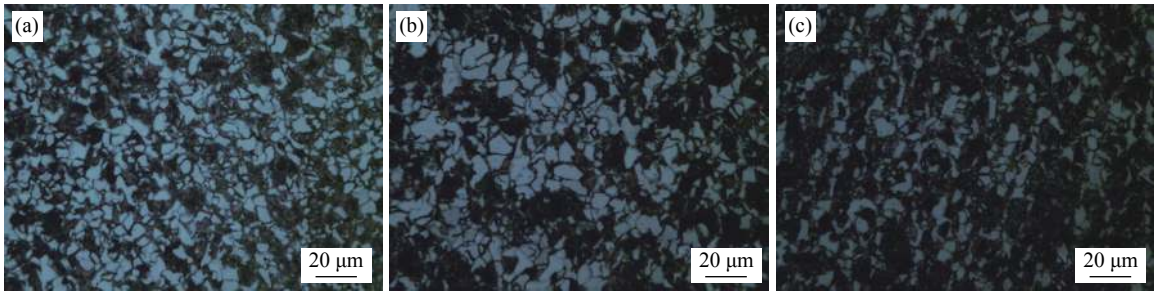


图 3　试样在 700 ℃ 保温的显微组织：(a) 5 min；(b) 15 min；(c) 30 min

Fig. 3　Microstructure of the sample held at 700 ℃：(a) 5 min，(b) 15 min，(c) 30 min

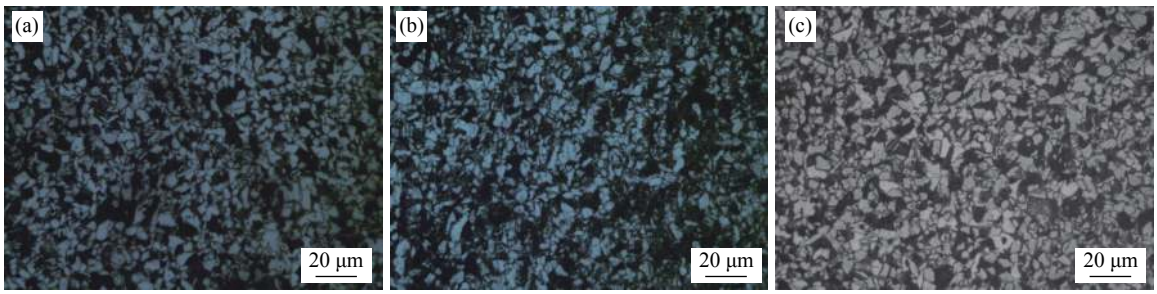


图 4　试样在 650 ℃ 保温的显微组织：(a) 5 min；(b) 15 min；(c) 30 min

Fig. 4　Microstructure of the sample held at 650 ℃：(a) 5 min，(b) 15 min；(c) 30 min

2.2　保温制度对材料硬度的影响

2.2.1　保温温度对材料硬度的影响

试样直接冷却至室温(类同于常规热轧 HRB500)，其硬度作为参照以分析其余试样受保温制度的影响。由图 5 可知，随着保温温度的升高硬度的均值出现先减小后增加的趋势，硬度下降趋势缓慢，主要是因为位错的存在阻碍了晶界的滑移；当温度升高至 650 ℃ 以上时，硬度上升得很快，这主要是因为在温度为 700 ~ 800 ℃ 的范围时，组织通过细晶强化以及第二相强化导致硬度的提高。

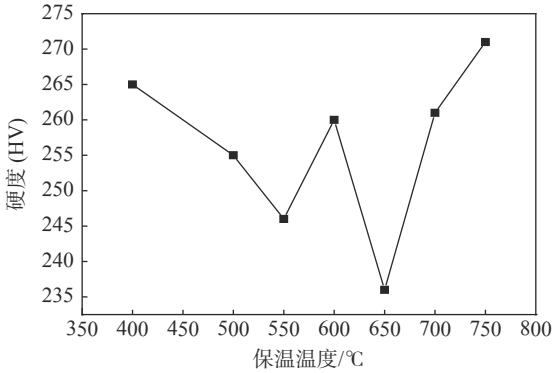


图 5　保温温度对材料硬度的影响

Fig. 5　Effect of holding temperature on material hardness

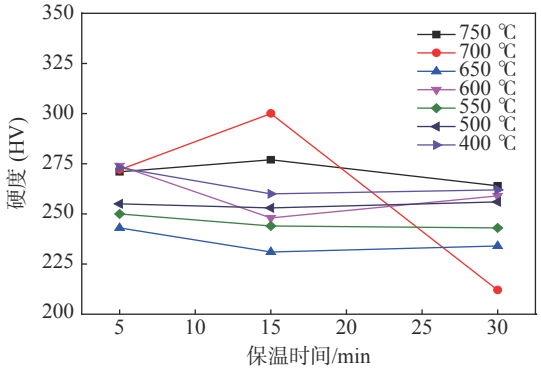


图 6　保温时间对材料硬度的影响

Fig. 6　Effect of holding time on material hardness

2.2.2　保温时间对材料硬度的影响

图 6 给出在不同温度下保温时间不同硬度的变化趋势, 可以看出在保温温度高于 650 ℃ 时, 随着保温时间的增加, 材料的硬度出现先增加后下降的趋势, 在进一步延长保温时间, 硬度显著降低是因为: ①保温时间延长致使晶粒较大, 使晶粒间结合力较弱; ②保温过程中晶粒的粗化抵消了碳化钒的第二相强化效果, 从而导致硬度的降低。值得注意的是, 在 700 ℃×15 min 保温时获得了最高硬度(HV)300, 较直接冷却试样提高了 30, 是由于析出强化使通过微合金元素 V 的碳氮化合物的钉扎作用, 阻止了晶界的进一步迁移, 阻碍了晶粒长大, 促进了位错强化和细晶强化, 这也使得材料的力学性能有了显著的提高。

3　结论

1)在铁素体区随着保温温度的降低, 珠光体组织逐渐碎化, 珠光体晶粒变小, 铁素体出现少量针状结构, 由于微合金元素 V 的作用也起到晶粒细化的作用。

2)随保温时间的增加, 显微组织内部珠光体呈块状聚集, 铁素体细小均匀, 又由于微合金元素 V 使晶粒细化并稳定组织结构, 当保温时间进一步增加时, 晶粒发生粗化现象。

3)在保温工艺中, 700 ℃×15 min 保温时获得了最高硬度(HV)300, 这可归于碳化钒的析出强化, 进一步延长保温时间, 硬度显著降低, 可知保温过程中晶粒的粗化抵消了碳化钒的第二相强化效果。

参考文献

[1] Zhou Dawei, Li Yuanting. Trial production of V-Nb micro-alloyed HRB500 reinforced bar[C]. Baosteel BAC 2006, 2006: 422−424.
(周大伟, 李元廷. V-Nb微合金化HRB500钢筋的试制[C]//第二届宝钢学术年会, 2006: 422−424.)

[2] Lin Bingsong. Analysis on rolling and process improvement of high-strength reinforced HRB500 steel with vanadium microalloying[J]. China High-Teach Enterprises, 2013, (8): 37−38.
(林炳松. 钒微合金化HRB500高强度钢筋轧制与工艺改进探析[J]. 中国高新技术企业, 2013, (8): 37−38.)

[3] Zhao Liang, Zhang Chaohui, Ju Jiantao, *et al*. Comparison experiment and research on HRB500 reinforced bars produced by adding V-N alloy and V-Fe alloy[J]. Materials & Heat Treatment, 2007, 36(8): 35−37.
(赵亮, 张朝晖, 巨建涛, 等. 钒铁与钒氮合金生产HRB500钢筋的对比试验研究[J]. 材料热处处理, 2007, 36(8): 35−37.)

[4] Yang Caifu, Zhang Yongquan, Liu Shuping. Strengthening mechanism in V-N micro-alloyed reinforcing bar steels[J]. Iron and Steel, 2001, 36(5): 55−57.
(杨才福, 张永权, 柳书平. 钒氮微合金化钢筋的强化机制[J]. 钢铁, 2001, 36(5): 55−57.)

[5] OHMORIA, O IK, KAWABATA F, *et al*. Effect of VN precipitates on formation of grain boundary and intragranular ferrite in a high N-V bearing steel[J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 1998, 84(7): 797−803.

[6] Wang Fangli. Study on precipitation behaviors of V and Nb in microalloyed steel bars[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
(王芳丽. 微合金化钢筋中V、Nb析出行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.)

[7] Wang Andong, Wang Junyu, Tian Linmao. Precipitation law of V (C, N) in austenite of vanadium microalloyed steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(8): 23−26.
(王安东, 王骏宇, 田林茂. V (C, N)在含钒微合金钢奥氏体中的析出规律[J]. 机械工程材料, 2016, 40(8): 23−26.)

编辑　邓淑惠