

Cr含量对500 MPa级高强抗震钢筋奥氏体化的影响

王闻涛¹, 刘星¹, 曹建春^{1*}, 陈伟², 阴树标³

(1. 昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 宝武钢铁集团昆明钢铁股份有限公司, 云南 昆明 650302; 3. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:应用光学显微镜、扫描电镜等手段观察显微组织,研究了不同Cr含量钢筋在不同铸坯再加热温度和保温时间下奥氏体晶粒的变化,探讨了Cr含量对500 MPa级高强抗震钢筋奥氏体化的影响。结果表明,不同再加热温度范围内,Cr含量对试验钢奥氏体晶粒的影响规律不同。在950~1 050℃温度区间时,含Cr钢奥氏体晶粒的生长速率慢,随钢中Cr含量的增加,奥氏体晶粒尺寸减小;高于1 050℃时,奥氏体晶粒生长速率加快,随钢中Cr含量的增加,奥氏体晶粒尺寸增大。相同再加热温度下,随保温时间的延长,奥氏体晶粒长大。当Cr含量较高时,随着再加热温度的升高或保温时间的延长,Cr元素在晶界处偏聚减弱,导致奥氏体晶粒更容易长大和粗化。在再加热温度为1 050℃、保温时间为30 min条件下含Cr试验钢可得到细小均匀的奥氏体组织。

关键词:含Cr钢筋;奥氏体化;铸坯;再加热温度;生长速度

中图分类号:TF76,TG151

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2023)05-0151-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.05.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of Cr content on the austenitization of 500 MPa class high-strength seismic rebars

Wang Wentao¹, Liu Xing¹, Cao Jianchun^{1*}, Chen Wei², Yin Shubiao³

(1. School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2. Baowu Iron & Steel Group Kunming Iron & Steel Co., Ltd., Kunming 650302, Yunnan, China; 3. School of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: The microstructure was observed by means of optical microscope, scanning electron microscope, etc. The change of austenite grains of the steels with different Cr contents under different reheating temperature and holding time of the casting billet was studied. The effect of Cr content on austenitization of 500 MPa high-strength seismic-resistant rebar was discussed. The results show that the effect of Cr content on austenite grain is different in different reheating temperature range. In the temperature range of 950 ~ 1 150 °C, the growth rate of austenite grain in Cr-containing steel is slow when the reheating temperature is lower than 1 050 °C, and the size of austenite grain decreases with the increase of Cr content. When the temperature is higher than 1 050 °C, the growth rate of austenite grain increases, and the size of austenite grain increases with the increase of Cr content. At the same reheating temperat-

收稿日期:2022-03-30

作者简介:王闻涛,1994年出生,男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事先进钢铁材料的研究,E-mail: 2467816642

@qq.com; *通讯作者:曹建春,1971年出生,女,内蒙古包头人,博士,教授,研究方向:先进钢铁材料,E-mail: nmcjc@163.com。

ure, austenite grains grow up with the extension of holding time. When the content of Cr is high, with the increase of the reheating temperature or the extension of the holding time, the segregation of Cr at the grain boundary is weakened, leading to the growth and coarsening of austenite grains more easily. Fine and uniform austenite structure can be obtained under the condition of 1 050 °C and 30 min reheating temperature.

Key words: Cr-containing rebars, austenitization, slab, reheating temperature, growth rate

0 引言

高强抗震钢筋在建筑结构用钢中需要具备良好的综合性能,这些良好的综合性能包括高强度、良好的抗震性能和耐腐蚀性能等。要提高钢筋的综合性能,除了需要加入一些微合金化元素外,还需要加入 Cr, Cr 能够提高钢筋的耐腐蚀性能。在低碳钢中加入 Cr 可以影响其它合金元素的固溶和析出。牛延龙^[1]等人在研究 Cr 含量对钢再结晶的影响时,发现 Cr 元素的添加会显著增加 VC 的固溶度,增加 VC 在奥氏体中的饱和度,从而减少 VC 的析出,提高 VC 的饱和度,延迟再结晶。在一定温度下,随着 Cr 含量的提高,会延迟奥氏体再结晶,使用 V-Cr 复合微合金化技术生产的钢筋显著提高了应力应变,其力学性能(强度、塑性和抗震性)与 V 微合金化钢筋相比,均有所提高。Cr 在钢中的强化作用主要是通过细化晶粒、铬钒复合析出提高钢的强度,有研究人员^[2]认为,采用钒微合金化结合控轧控冷技术可使钢的屈服强度提高到 500 MPa 级以上,组织中 ferrite 的晶粒尺寸在 5 μm 左右。由于钒的价格昂贵且容易波动,一些企业开始采用铬钒复合微合金化技术配合控轧控冷工艺,开发出 500 MPa 级高强度抗震钢筋的技术^[3],降低钒铁合金的用量,产品质量满足国家标准 GB/T1499.2-2018 的要求。采用 Cr-V 复合微合金化技术生产的钢筋比单 V 或者单 Cr 微合金化钢筋的组织均匀性更好和晶粒度更小^[4]。在铬钒微合金化的基础上,陈伟^[5]等人研究出高氮量的铬钒微合金化技术试制 600 MPa 高强抗震钢筋,该钢筋综合性能优异。但总体来看,目前对 Nb-V 复合微合金化高强抗震钢筋的研究比较广泛,而对 V-Cr 复合微合金化高强抗震钢筋的研究还不够深入。

笔者以 Cr 含量不同的 500 MPa 级高强抗震钢筋为研究对象,重点研究不同 Cr 含量试验钢在不同铸坯再加热温度、不同保温时间条件下奥氏体晶粒的长大行为,分别获得三种含 Cr 钢筋原始奥氏体组

织形貌、平均奥氏体晶粒尺寸大小和晶粒尺度分布情况,结合 Cr 元素在试验钢中的固溶情况,得出 Cr 元素对奥氏体转变及晶粒长大过程的影响规律,为 V-Cr 复合微合金化高强抗震钢筋铸坯再加热阶段工艺参数优化提供试验依据。

1 试验材料及方法

按照 500 MPa 级高强抗震钢筋的要求,设计了三种不同 Cr 含量的试验用钢,在某钢厂进行生产,其具体化学成分如表 1 所示。V 为强碳氮化物形成元素,故试验钢中含有的碳化物和氮化物有 VC 和 VN,根据相关公式(1)、(2)^[6-7]可计算出其全固溶温度,并结合 A_{c3} 温度选定热处理试验的加热温度。

$$\lg\{w[V]v[C]\} = 6.72 - 9500/T \quad (1)$$

$$\lg\{w[V]w[N]\} = 3.63 - 8700/T \quad (2)$$

式中, $w[V]$ 、 $w[N]$ 、 $w[C]$ 分别表示 V、N、C 在试验钢中的固溶量(质量分数, %), T 表示加热温度(°C)。通过计算,三种钢筋中 VC 的全固溶温度分别为 855、859、851 °C, VN 的全固溶温度分别为 1 067、1 065、1 080 °C。同时采用 Thermo-Calc 软件计算得到不同 Cr 含量的试验钢的 A_{c3} 温度分别为 890、900、910 °C。为了确保 VC 和 VN 能全部固溶到基体中,并考虑到实际生产中加热炉设备所能达到的实际温度,奥氏体化热处理试验选用五个再加热温度分别设置为 950、1 000、1 050、1 100 °C 和 1 150 °C。

热处理保温时间因受加热试验钢样厚度大小、传热介质因素、试验钢中合金元素、具体加热方式和具体装炉方式等因素的影响,根据试验情况确定。工件的加热时间可通过公式(3)进行计算。

$$t = \alpha \cdot \kappa \cdot D \quad (3)$$

式中, t 表示工件加热的时间(min); D 表示试验钢棒状试样的直径(mm); α 表示加热系数(mm/min); κ 表示装炉系数。将试验钢试样加工成直径 Φ 为 12 mm 的棒,采用箱式电阻炉进行加热。故加热系数 α 取 1.3 mm/min; 装炉系数 κ 值取 1.4, 带入公式(3)计算得到保温时间大约为 22 min。

为尽可能避免试验误差, 将保温时间适当延长, 设置保温时间为 30 min。为探索保温时间对于奥氏体均匀化的影响, 所以再增加 60、90 min 两个保温时间。

将试样放入箱式加热炉内以 10 °C/s 的加热速度从室温分别加热至预设温度 950、1 000、1 050、1 100、1 150 °C, 分别保温 30、60、90 min 后, 迅速

取出并立即放入 10% 冰盐水中淬火。热处理后的试样经磨制、抛光、苦味酸溶液侵蚀后, 再在光学显微镜下观察原始奥氏体晶粒形貌。采用软件 Nano measurer.exe 对热处理后试样的原始奥氏体晶粒尺寸进行测量。利用扫描电子显微镜结合能谱仪观察分析试验钢奥氏体晶界处含 Cr 量的分布。

表 1 不同 Cr 含量试验钢的化学成分
Table 1 Compositions of experimental steels with different Cr contents

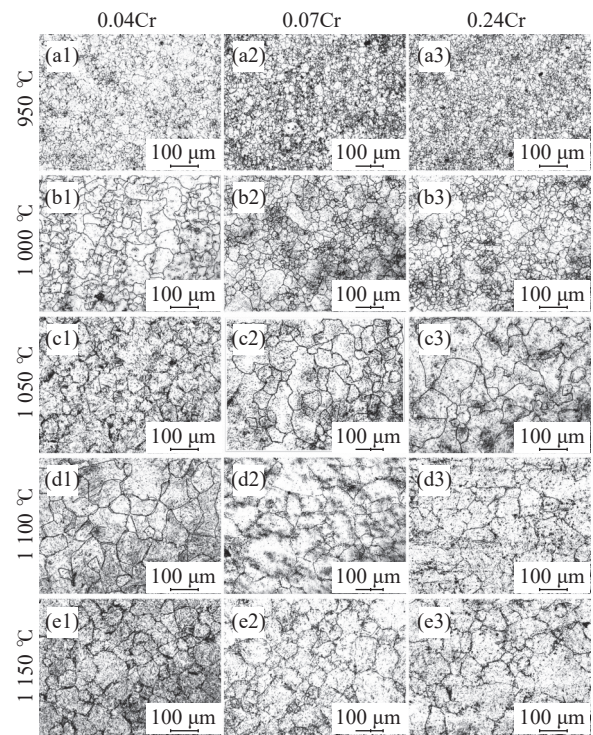
编号	C	Si	Mn	S	P	Cr	N	V	Fe
0.04Cr	0.22	0.53	1.57	0.044	0.021	0.043	0.015	0.091	余量
0.07Cr	0.24	0.42	1.50	0.035	0.021	0.069	0.015	0.090	余量
0.24Cr	0.21	0.44	1.35	0.025	0.015	0.238	0.018	0.089	余量

2 结果与讨论

2.1 铸坯再加热温度和保温时间对三种含 Cr 试验钢的原始奥氏体晶粒的影响

分别在 950、1 000、1 050、1 100 °C 和 1 150 °C 下保温 30 min 后试验钢的原始奥氏体晶粒形貌如图 1 所示。随再加热温度的升高, 试验钢奥氏体晶粒尺寸增大。当再加热温度为 950、1 000 °C 时, 三种含 Cr 钢的奥氏体晶粒尺寸分布不均匀, 存在很多极细小的晶粒, 说明奥氏体没有完全均匀化。当铸坯再加热温度为 1 000 °C 时, 0.24Cr 钢的平均奥氏体晶粒尺寸最小, 为 21.52 μm, 但奥氏体晶粒均匀性最差; 在三种不同含 Cr 量试验钢中, 0.04Cr 钢的原始奥氏体晶粒尺寸分布是最均匀的, 但晶粒尺寸最大, 为 30.58 μm。在较低的再加热温度下, 随着 Cr 含量的增大, 明显细化了奥氏体晶粒。

当再加热温度从 1 000 °C 达到 1 050 °C 时, 0.04Cr、0.24Cr 钢的奥氏体晶粒尺寸增加, 奥氏体平均晶粒尺寸分别为 55.83 μm 和 56.77 μm, 奥氏体均匀性明显提高。而 Cr 含量为 0.07% 的试验钢, 奥氏体平均晶粒尺寸为 58.81 μm, 此时基体中还有较多小尺寸奥氏体晶粒, 说明奥氏体还没完全均匀化。当再加热温度为 1 100 °C 和 1 150 °C 时, 0.04Cr 钢和 0.24Cr 钢的奥氏体晶粒尺寸明显增大。0.07Cr 钢在 1 100 °C 时的奥氏体晶粒均匀性较好, 奥氏体平均晶粒尺寸为 71.66 μm, 虽比在 1 050 °C 时的奥氏体均匀性提高很多, 但有个别奥氏体晶粒已开始粗化, 即可推测其最佳再加热温度在 1 050 ~ 1 100 °C。



再加热温度分别为 (a) 950 °C; (b) 1 000 °C; (c) 1 050 °C; (d) 1 100 °C; (e) 1 150 °C; 1、2、3 分别表示 0.04Cr、0.07Cr、0.24Cr 钢筋

图 1 三种含 Cr 钢筋在不同铸坯再加热温度下的奥氏体晶界形貌

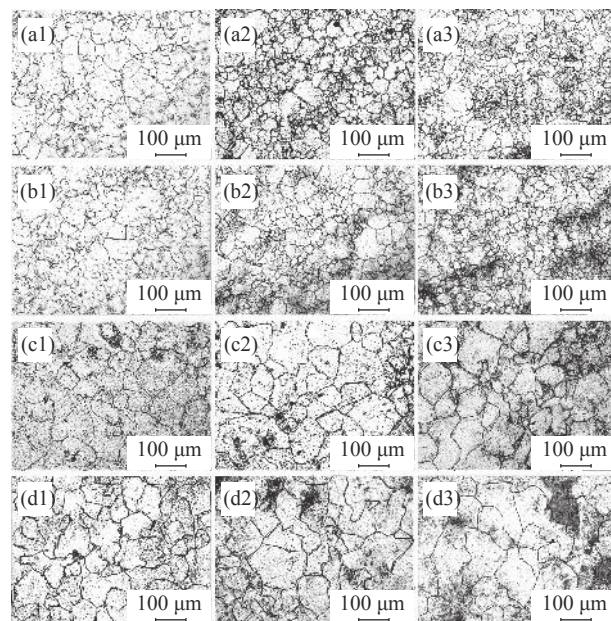
Fig. 1 Austenitic grain boundary morphologies of different Cr-containing steels at different soaking temperatures

由前面试验结论推测得到 1 050 ~ 1 100 °C 是最佳加热温度, 为了使试验规律更加明显, 选择了 1 000、1 100 °C 的再加热温度做了三个不同保温时间的对比。图 2 为三种含 Cr 试验钢在 1 000、

1 100 ℃ 下保温 60 min 和 90 min 后的奥氏体晶粒形貌。对比在 1 000 ℃ 保温 60 min 后三种试验钢奥氏体晶粒可知, 0.04Cr 钢的奥氏体晶粒尺寸最大, 平均晶粒尺寸为 28.5 μm ; 0.24Cr 钢的奥氏体晶粒尺寸最小, 平均晶粒尺寸为 24.5 μm , 但奥氏体晶粒分布不均匀。将保温时间延长至 90 min 时, 与 60 min 相比, 三种含 Cr 试验钢的奥氏体晶粒尺寸都有所增大, 平均晶粒尺寸分别为 29.06、28.76 μm 和 27.80 μm 。当再加热温度升至 1 100 ℃ 时, 保温 60 min 和保温 90 min 的条件下都是 0.24Cr 钢的奥氏体晶粒尺寸最大, 0.04Cr 钢的奥氏体晶粒尺寸最小, 晶粒尺寸分布较均匀, 但是晶粒粗大。

图 3 为在 1 000、1 100 ℃ 保温不同时间下试验钢奥氏体平均晶粒尺寸变化。在 1 000 ℃ 时, 随着保温时间从 30 min 增加到 90 min, 试验钢奥氏体平均晶粒尺寸增大。在三种试验钢中, 0.24Cr 钢奥氏体晶粒尺寸增长得最快, 从平均晶粒尺寸为 21.5 μm 长大到 26.2 μm , 0.04Cr 和 0.07Cr 钢奥氏体晶粒尺寸增长得较慢, 但 0.24Cr 钢的晶粒尺寸最小。在 1 100 ℃ 时, 随着保温时间从 30 min 增加到 90 min, 0.24Cr 钢的奥氏体平均晶粒尺寸明显比 0.04Cr、0.07Cr 钢的大, 随钢中 Cr 含量增加, 奥氏体平均晶粒尺寸增大。可见, 在 1 000 ℃ 加热保温条

件下, Cr 含量增加可以降低奥氏体晶粒尺寸; 而在 1 100 ℃ 加热保温条件下, Cr 含量增加会促进奥氏体晶粒长大。



(a) 1 000 ℃ 下保温 60 min; (b) 1 000 ℃ 下保温 90 min;
(c) 1 100 ℃ 下保温 60 min; (d) 1 100 ℃ 下保温 90 min;
1、2、3 分别表示 0.04Cr、0.07Cr、0.24Cr 钢筋

图 2 在 1 000、1 100 ℃ 时保温时间为 60 min 和 90 min 的三种含 Cr 钢筋的奥氏体晶界形貌

Fig. 2 Austenitic grain boundary morphology of different Cr-containing steel bars under different holding time at 1 000 and 1 100 ℃

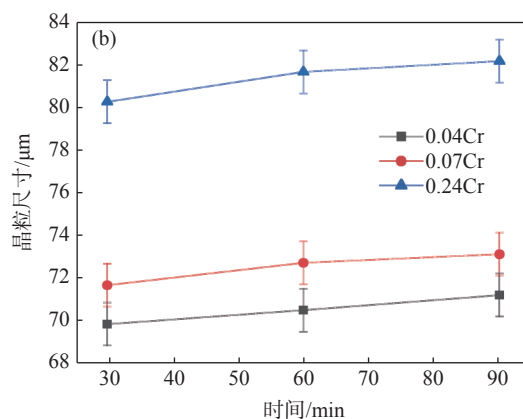
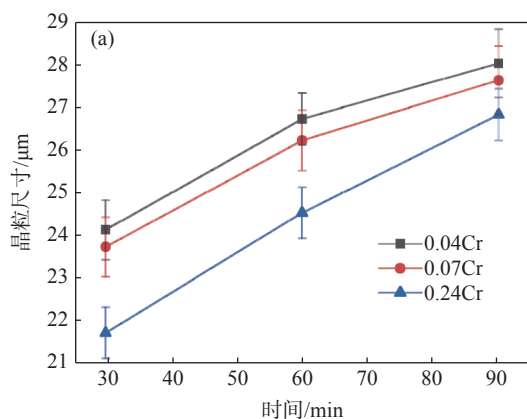


图 3 在 (a) 1 000、(b) 1 100 ℃ 下保温 30、60、90 min 时不同含 Cr 钢筋的奥氏体晶粒尺寸

Fig. 3 Austenitic grain size of different Cr-containing steel bars at 1 000, 1 100 ℃ for 30, 60, 90 min

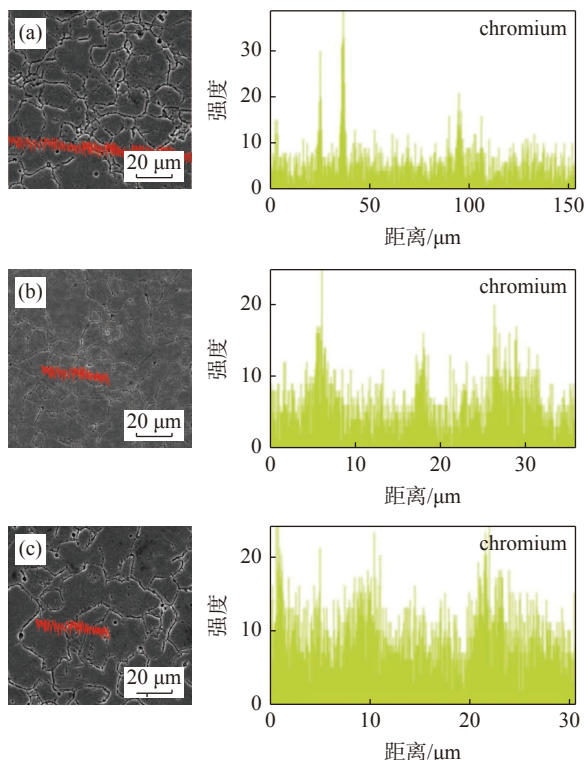
2.2 固溶 Cr 原子的偏聚对奥氏体化的影响

图 4 是三种含 Cr 钢在不同再加热温度下保温 30 min 时的线扫描图和能谱, 0.04Cr 钢奥氏体晶界处的 Cr 含量比 0.07Cr 钢更加聚集。由图 4 (c) 可知, 再加热温度为 1 100 ℃ 时, 0.24Cr 钢中 Cr 在奥氏体晶界处的聚集较少。由图 2 可知, 延长保温时间, 三种试验钢的奥氏体晶粒都在长大, 但三种含

Cr 钢的增长都不大。随着保温时间的延长, 含 Cr 量高的试验钢晶粒尺寸生长的速率较快, 和 Cr 元素在晶界处的聚集有一定的关系。

赵宇新^[8]等人研究可知 Cr 钢中 Cr 原子发生聚集会对奥氏体晶粒的增长产生阻碍作用, 而这种阻碍作用和铸坯再加热温度有一定的关系。相关研究^[9-10]也表明 Cr 对奥氏体晶粒有抑制长大的作用。

笔者研究发现当 Cr 含量高,加热温度较低时,Cr 对奥氏体晶粒有抑制长大的作用,当加热温度在 1 050 ℃ 以上时,固溶 Cr 原子在晶界处会解开钉扎,奥氏体晶粒生长速率加快。根据 Cr 和 C 的相互作用系数公式^[5](如公式(4)),可以算出不同再加热温度下 Cr 和 C 的相互作用系数分别为-10.87、-10.17、-9.52、-8.92、-8.36。不同再加热温度下 Cr 和 C 的相互作用系数均为负数,说明 Cr 可以降低 C 的活度,Cr 与 C 的相互作用能延迟试验钢的奥氏体化。



(a) 0.04Cr 钢 950 ℃ 保温 30 min; (b) 0.07Cr 钢 950 ℃ 保温 30 min; (c) 0.24Cr 钢 1 100 ℃ 保温 30 min

图 4 不同条件下试验钢中 Cr 元素分布的线扫描和能谱
Fig. 4 Line scan and energy spectrum of Cr element distribution in the test steel under different conditions

$$e_{\text{C}}^{\text{Cr}} = 7.02 - 21\,880/T \quad (4)$$

当再加热温度低时,Cr 钉扎在奥氏体晶界,使晶界的迁移速率减慢,所以随钢中 Cr 含量增加,奥氏体晶粒的生长速率减慢,奥氏体晶粒细化;当再加热温度高时,由于原子扩散能力增大,Cr 在晶界偏聚程度减弱甚至消除,晶界脱钉,这样反而导致晶粒更容易长大^[11-12]。综上所述,固溶 Cr 原子低温下易在晶界处偏聚,降低奥氏体晶界迁移速率,从而细化晶粒;高温下,固溶 Cr 原子分布均匀,晶界解钉,晶界移动速率增大,奥氏体晶粒长大快,使奥氏体晶粒

粗大化。

对比图 1 和图 2 中相同钢在 1 100 ℃ 下保温不同时间后的晶粒尺寸,可以看出在 1 100 ℃ 下保温时间 60 min 的晶粒尺寸明显比在 1 100 ℃ 下保温时间 30 min 的大。廖书全^[9]等人认为,保温时间的增加,会影响固溶元素溶解速率,使奥氏体晶粒尺寸改变。因为试验钢中 Cr、V 含量越多,固溶 Cr、V 原子越来越多,固溶 Cr、V 原子会聚集在奥氏体的晶界,抑制奥氏体晶粒长大,随着保温时间从 30 min 延长到 60 min 或 90 min 时,Cr、V 含量大量溶解,抑制作用减小,奥氏体晶粒迅速长大。

2.3 试验钢最佳再加热温度的确定

原始奥氏体组织的大小和均匀性对钢筋最终组织和性能有显著的影响。而原始奥氏体晶粒的大小和均匀性又与铸坯再加热温度、合金化元素等因素有直接联系。根据不同铸坯再加热温度下不同 Cr 含量对奥氏体晶粒大小的影响,以及 Cr 含量对奥氏体晶粒分布的影响来确定试验钢的最佳再加热温度。要保持奥氏体晶粒是均匀且细小的才能说明奥氏体化效果好,则要优化不同含 Cr 钢筋的再加热温度,选择符合正态分布的晶粒尺寸分布图。对比图 1 与图 2 可知,在保温时间为 30 min 时,三种含 Cr 钢的原始奥氏体晶粒总是最小的。图 5 为试验钢在保温时间为 30 min 时的奥氏体晶粒平均尺寸随再加热温度的变化,结合图 1、2、5 可知,随着温度的增加,三种钢的奥氏体晶粒尺寸都是增大的,而奥氏体是由不均匀逐渐变得均匀,在 1 050 ℃ 时,三种钢的原始奥氏体晶粒是符合均匀且相对细小的晶粒。

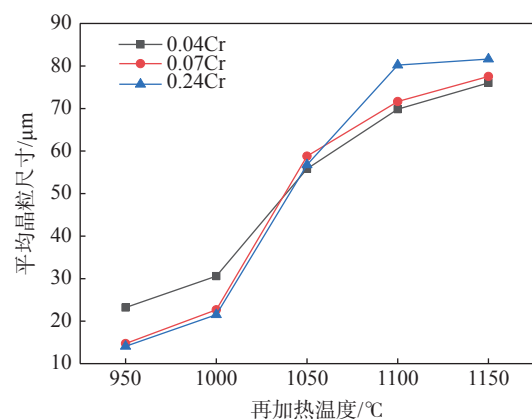


图 5 奥氏体平均晶粒尺寸随铸坯再加热温度的变化规律
Fig. 5 Variation of average austenitic grain size with re-heating temperature of the slab

图 6 为不同再加热温度下保温 30 min 的试验钢奥氏体晶粒尺寸分布。从图 6 可以看出,0.04Cr

钢和 0.24Cr 钢加热温度为 1 050 ℃ 时晶粒分布更均匀, 0.07Cr 钢在 1 050、1 100 ℃ 时的晶粒尺寸分布都不好, 1 050 ℃ 时晶粒尺寸分布混乱, 1 100 ℃ 时晶粒太过粗大, 推测再加热温度为 1 050 ~ 1 100 ℃

的某一个温度晶粒分布最为均匀。所以, 含 Cr 量为 0.04 %、0.24 % 时, 最佳铸坯再加热温度为 1 050 ℃, Cr 含量为 0.07% 时, 最佳铸坯再加热温度在 1 050 ~ 1 100 ℃。

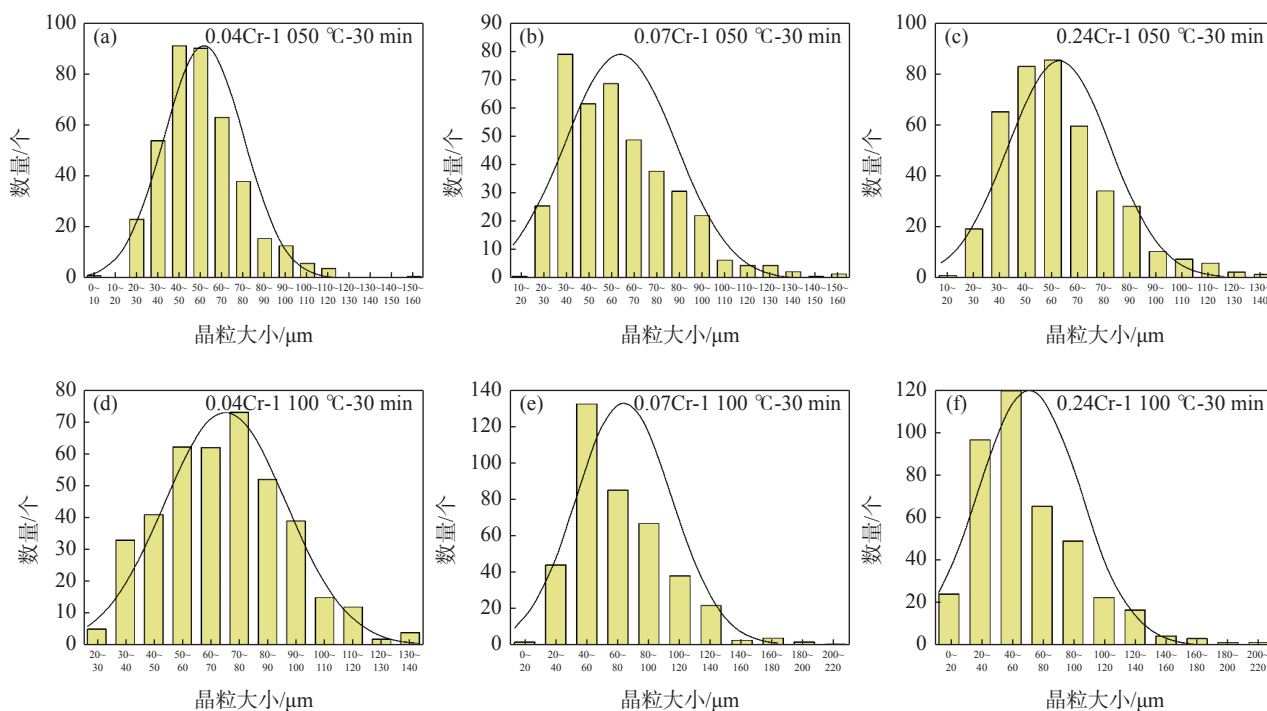


图 6 再加热温度为 1 050 ℃ 和 1 100 ℃ 下的三种不同含 Cr 钢的奥氏体晶粒尺寸正态分布
Fig. 6 Austenitic grain size distribution of three Cr-containing steels at 1 050 ℃ and 1 100 ℃ reheating temperature

综合对三种含 Cr 试验钢的铸坯再加热工艺分析可知, 三种含 Cr 试验钢可以分别采用再加热温度为 1 050 ℃、1 050 ~ 1 100 ℃、1 050 ℃, 保温时间为 30 min 得到均匀且细小的奥氏体晶粒。

3 结论

1) 不同再加热温度范围内, Cr 含量对试验钢奥氏体晶粒的影响规律不同。低于 1 050 ℃ 时, 随再加热温度升高, 钢中 Cr 含量增加, 奥氏体晶粒尺寸减小; 高于 1 050 ℃ 时, 随再加热温度升高, 钢中 Cr 含量增加, 奥氏体晶粒尺寸增大。

2) 相同再加热温度下, 随保温时间的延长, 奥氏体晶粒长大。当再加热温度低于 1 050 ℃ 时, 含 Cr 钢奥氏体晶粒的生长速率慢, 随 Cr 含量增加, 奥氏体晶粒细化; 当再加热温度高于 1 050 ℃ 时, 随钢中 Cr 含量增加, 奥氏体晶粒生长速率加快。当 Cr 含量较高时, 随着再加热温度的升高或保温时间的延长, Cr 元素在晶界处偏聚减弱, 导致奥氏体晶粒更容易长大和粗化。

3) 在再加热温度为 1 050 ℃、保温时间为 30 min 条件下, 含 Cr 试验钢可得到细小均匀的奥氏体组织。

参考文献

- [1] Niu Yanlong, Sun Xinjun, Liu Qingyou, *et al.* Effect of Cr on static recrystallization of low carbon and high niobium X80 pipeline steel[J]. *China Metallurgy*, 2009, 19(10): 25-29.
(牛延龙, 孙新军, 刘清友, 等. Cr 对低碳高铌 X80 管线钢静态再结晶的影响[J]. *中国冶金*, 2009, 19(10): 25-29.)
- [2] Hu Tiejun, Guo Fuxing, Han Chunliang. Research on the technology of vanadium-chromium microalloyed high-strength seismic steel bar [C]//Proceedings of the 2013 Vanadium-titanium High-strength Steel Development and Application Technology Exchange Conference. Beijing: The Strategic Alliance of the Vanadium and Titanium Resources Comprehensive

- Utilization and Industrial Technology Innovation, 2013.
(胡铁军, 国富兴, 韩春良. 钒铬微合金化高强抗震钢筋工艺研究[C]. 2013钒钛高强钢开发与应用技术交流会论文集. 北京: 钒钛资源综合利用产业技术创新战略联盟, 2013.)
- [3] Yang Yuqing, Wang Qingjuan, Du Zhongze. Research status of high-strength earthquake-resistant steel bars[J]. Materials Review, 2015, 29(19): 5.
(杨雨晴, 王庆娟, 杜忠泽. 高强抗震钢筋的研究现状[J]. 材料导报, 2015, 29(19): 5.)
- [4] Xu Bin. Experimental study on V-Cr composite microalloying of high-strength seismic steel bars[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2011.
(徐斌. 高强度抗震钢筋V-Cr复合微合金化的实验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011.)
- [5] Chen Wei, Wu Guangyao, Zhang Weiqiang. Trial production of 600 MPa high-strength seismic steel bars by high nitrogen vanadium-chromium microalloying process[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2016, 37(2): 66–72.
(陈伟, 吴光耀, 张卫强. 高氮钒铬微合金化工艺试制600 MPa高强抗震钢筋[J]. 钢铁钒钛, 2016, 37(2): 66–72.)
- [6] Yong Qilong. The second phase in steel materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
(雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.)
- [7] Liu Wensheng, Tang Fang, Ma Yunzhu, *et al.* Effect of Cr addition on the microstructure and properties of 93W-4.9Ni-2.1Fe alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, (7): 1237–1240.
(刘文胜, 唐芳, 马云柱, 等. 添加Cr元素对93W-4.9Ni-2.1Fe合金微观结构和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, (7): 1237–1240.)
- [8] Zhao Yuxin, Li Pengxing, Xu Zuyao. Effect of Cr on the segregation of phosphorus at grain boundaries in low alloy steel[J]. Chinese Journal of Metals, 1987, (5): 356–361.
(赵宇新, 李朋兴, 徐祖耀. 低合金钢中Cr对磷在晶界偏聚的影响[J]. 金属学报, 1987, (5): 356–361.)
- [9] Liao Shuquan, Zhang Rui, Sun Zhongwei, *et al.* Effect of Cr element on austenitization kinetics of high carbon wire rods[J]. Modern Metallurgy, 2021, 49(2): 1–3.
(廖书全, 张锐, 孙中伟, 等. Cr元素对高碳盘条奥氏体化动力学的影响[J]. 现代冶金, 2021, 49(2): 1–3.)
- [10] Wang Ge, Wang Dongran, Liu Ligang, *et al.* Grain growth law of austenite in Cr8 steel[J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2014, 35(2): 94–99.
(王葛, 王东冉, 刘利刚, 等. Cr8钢奥氏体晶粒长大规律[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(2): 94–99.)
- [11] Sellers C M, Whiteman J A. Recrystallization and grain growth in hot rolling[J]. Metal Sci, 1979, 13(3-4): 187.
- [12] Xiao Shaobin. Molecular dynamics study on segregation of C/Cr elements at Bcc-Fe grain boundary[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2019.
(肖少彬. Bcc-Fe晶界C/Cr元素偏聚的分子动力学研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.)

编辑 唐肖

攀钢研究院研发的眼镜框架用钛合金丝材取得突破性进展

(2023年9月19日消息)近日,攀钢研究院高端零部件研发中心承担的应用基础研究项目— β 相钛合金丝材冷变形断裂机制研究取得重要进展,厘清了TB13丝材冷拉拔及热处理工艺调控与组织及力学性能间的对应关系,揭示了工艺—组织—力学性能的内在联系,指导和优化了制备加工及热处理工艺全流程,实现了首批次15 kg眼镜框架用TB13钛合金丝材样品交付,客户反馈良好。

TB13钛合金丝作为中高档眼镜框架用材料目前在国内外市场上具有较大需求,而国内加工 β 钛合金丝材多采用固定模拉拔加碱爆酸洗,拉拔后丝材表面质量较差,无法满足眼镜框架生产用丝材要求。高端零部件研发中心丝材制备项目团队通过优化丝材制备过程中拉拔道次变形量、总变形量和拉拔速率等关键技术参数,改进后续热处理工艺,结合微观组织观察及力学性能分析,构建低成本、短流程、高效绿色 β 钛合金丝材制备创新技术体系,最终形成高精度眼镜框架用TB13钛合金丝材产品开发、制备及应用全流程工艺,TB13钛合金丝材样品综合性能满足YS/T 1077-2015行业标准。

摘自 <http://www.panyan.cn/morenews.aspx?tag=1>