

Cr5 支撑辊材料过冷奥氏体连续冷却组织转变特征

赵士光¹, 张响响², 王 成¹, 高安阳¹, 斯庭智²

(1. 安徽马钢重型机械制造有限公司技术中心, 安徽 马鞍山 243000; 2. 安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 采用热模拟试验机测试 Cr5 系支撑辊材料的热膨胀曲线, 绘制支撑辊下限成分 Cr5L 和上限成分 Cr5U 试样的过冷奥氏体连续冷却组织转变 (CCT) 曲线, 研究材料的组织转变特征和硬度变化规律。结果表明: 与 Cr5L 试样相比, Cr5U 试样具有更低的马氏体形成起始温度 (M_s) 和结束温度 (M_f), 分别为 279, 153 °C; 上限成分提高了钢的淬透性, 马氏体 (M) 转变临界冷却速度由 Cr5L 试样的 1.00 °C/s 下降到 0.50 °C/s。Cr5L 和 Cr5U 试样过冷奥氏体 (A') 连续冷却均发生珠光体 (P)、贝氏体 (B) 和 M 转变, 且 P 和 B 转变 “C” 曲线发生分离, 具有双 “C” 曲线特征; Cr5L 和 Cr5U 试样 B 转变分别形成 B_1 (B_1) 和 B_2 (B_2), 且 Cr5U 试样 M 组织中含质量分数约 6% 的软韧相残余奥氏体 (A_r), 故以大于 B 临界冷却速度冷却的 Cr5U 试样硬度值小于 Cr5L 试样。

关键词: Cr5 支撑辊; 连续冷却转变; 显微组织; 相结构; 硬度

中图分类号: TG 142.1+2 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.22316



Microstructure Transformation Characteristics of Supercooled Austenite of Cr5 Back-up Rolls During Continuous Cooling

ZHAO Shiguang¹, ZHANG Xiangxiang², WANG Cheng¹, GAO Anyang¹, SI Tingzhi²

(1. Technology Center, Masteel Heavy Machinery Manufacturing Company of Anhui, Maanshan 243000, China;
2. School of Materials Science & Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: Thermal mechanical simulator was used to test the expansion curves of Cr5 series back-up rolls, and the continuous cooling transformation (CCT) curves of supercooled austenite were sketched for the Cr5L and Cr5U samples with lower and upper limit compositions, respectively. Furthermore, the characteristics of microstructural transformation and hardness evolutions were also investigated. The results show that compared with Cr5L sample, Cr5U sample has the lower initial temperature (M_s) and end temperature (M_f) of martensite formation, which are 279 and 153 °C respectively. The upper limit composition can improve hardenability of steel, and the critical cooling rate of martensite (M) transformation for Cr5L sample decreases from 1.00 °C/s to 0.50 °C/s. The supercooled austenite (A') of Cr5L and Cr5U samples undergoes pearlite (P), bainite (B) and M transformations during continuous cooling, and the “C” curves of P and B transformation are separated, with the characteristics of double “C” curves. The B transformation in Cr5L and Cr5U samples forms B_1 and B_2 respectively, and the M structure of Cr5U sample contains residual austenite (A_r) in the soft and ductile phase with a mass fraction of about 6%, so the Vickers

收稿日期: 2022-12-22

基金项目: 安徽省科技重大专项 (202103a05020036)

作者简介: 赵士光 (1987—), 男, 安徽阜南人, 工程师, 主要研究方向为大型锻件及热处理。

通信作者: 斯庭智 (1974—), 男, 安徽怀宁人, 博士, 教授, 主要研究方向为钢铁材料。

引文格式: 赵士光, 张响响, 王成, 等. Cr5 支撑辊材料过冷奥氏体连续冷却组织转变特征 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2023, 40(2): 133-138.

hardness value of Cr5U sample cooled at a critical cooling rate greater than B is less than that of Cr5L sample.

Keywords: Cr5 back-up roll; continuous cooling transformation; microstructure; phase structure; hardness

支撑辊用来支撑中间辊和工作辊,是保证工作辊刚度和产品轧制尺寸精度的关键部件,在材料轧制成型工艺中具有重要的地位^[1-2]。除支撑与传动作用外,支撑辊在工作过程中还承受较大的接触应力、冲击和冷热循环应力作用^[3-4]。由此要求支撑辊应具有优异的综合力学性能和抗热震性能等。为满足日益提高的支撑辊性能要求,我国支撑辊合金钢走过了一条降 C 增 Cr 的技术创新之路,从 Cr2 系支撑辊发展到目前普遍使用的 Cr5 系支撑辊^[5-6]。Cr 一方面固溶在奥氏体(A)中,提高 A 的稳定性、淬透性和淬硬性;另一方面,Cr 和 C 形成合金碳化物,起到增强基体、提高耐磨性的重要作用。因此,Cr 在支撑辊材料中具有显著的作用,对于高性能轧机,甚至发展使用 Cr7~8 系中碳合金钢支撑辊^[4,7]。然而,贵重合金 Cr 的大量使用导致材料成本显著增加。为控制 Cr5 系支撑辊合金钢的成分和性能,GB/T 15547—2012 明确规定了合金钢中 Cr 的成分范围^[8]。

安徽马钢重型机械制造有限公司是一家多年从事冶金装备制造的专业化公司,公司根据生产经验和市场反馈,进一步缩小了 Cr5 合金钢的成分范围,取得了良好的效果。但在支撑辊热加工过程中,Cr5 合金钢成分的波动依然会导致支撑辊加工性能和最终使用性能的较大变化。公司支撑辊 C 当量的上限和下限成分分别为 1.68 和 1.99,C 当量强烈影响钢材过冷奥氏体(A')的冷却组织转变。特别是合金元素 Cr 和 Ni 的增加,强烈影响材料 A' 的冷却转变(continuous cooling transformation, CCT) 曲线及组织转变和组成,进而对材料的力学性能产生重要影响。为探究 Cr5 合金钢成分对 A' 冷却组织转变的影响,为支撑辊成分优化和组织性能调控提供依据,熔炼接近公司内控成分上限和下限的 2 种 Cr5 钢,采用热模拟试验机测试并绘制其 CCT 曲线,对其组织转变特征进行分析。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为安徽马钢重型机械制造有限公司内控 Cr5 钢,将其内控成分上限和下限的 Cr5 钢分别命名为 Cr5L 和 Cr5U 钢,2 种钢的光谱测试合金成分结果如表 1。由表 1 可知,Cr5L 和 Cr5U 钢中合金含量接近成分范围的下限和上限。

表 1 Cr5 钢的合金设计成分与试样的合金成分

w/%

Tab. 1 Alloy design composition of Cr5 steel and alloy composition of samples

w/%

材料	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S
Cr5	0.50~0.58	0.30~0.70	0.30~0.70	5.00~5.60	0~0.50	0.50~0.60	0.05~0.15	≤0.015	≤0.010
Cr5L	0.51	0.32	0.31	5.02	0	0.51	0.06	0.014	0.005
Cr5U	0.57	0.68	0.69	5.58	0.49	0.62	0.15	0.013	0.008

1.2 试验方法

对 Cr5L 和 Cr5U 锻态支撑辊坯进行取样,试样尺寸如图 1。经分析 Cr5L 和 Cr5U 钢试样的实际晶粒度为 8 级,采用 Gleeble-3500 热模拟试验机对试样进行热模拟试验。加热温度为 900 °C、保温时间为 5 min,选取的冷却速度为 0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.50, 1.00, 3.00, 5.00, 10.00 °C/s。将 2 根热电偶丝焊接在试样的均温感应加热区,两焊点相距约 1 mm,随后将样品夹持于试样台,按设置参数进行试验。试验过程中计算机自动记录温度、时间、试样的膨胀量等物理参数的变化情况,试验结束停止记录,导出数据。通过切线法^[9]分析导出的数据,得到如马氏体转变起始温度 M_s 和结束温度 M_f 等相变转变温度点;在温度-时间对数坐标上绘制相变温度曲线和冷却速率曲线,获得 CCT 曲线。

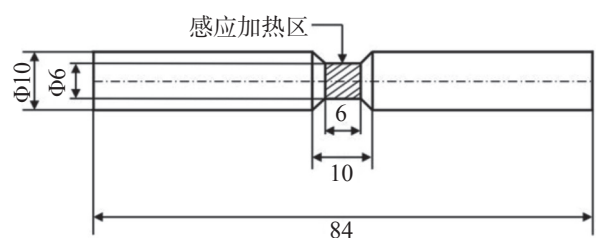


图1 热模拟试样尺寸

单位:mm

Fig. 1 Size of thermal simulation sample

Unit: mm

采用线切割取下图 1 所示热模拟试验结束后的试样中间部分, 为 $\Phi 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的圆柱形试样。取下的试样为加热和冷却转变部位, 能够反映组织转变及性能。采用 4%(体积分数) 的硝酸酒精溶液对试样的抛光面进行腐蚀后, 分别采用 MJ31 型金相显微镜和 MIRA3 扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM, TESCAN, Czech) 对其进行组织形貌观察, SEM 的加速电压为 20 kV。采用 HV-1 000 硬度计测量试样的维氏硬度 (Vickers hardness, HV) 值, 加载载荷为 200 g、加载时间为 15 s, 每个试样取 8 次测量值的平均值; 将测试结果绘制于 CCT 图中, 通过 CCT 图建立冷却速度、组织结构和性能之间的关系。

2 结果与讨论

2.1 CCT 曲线特征

图 2 为 Cr5L 和 Cr5U 试样的热模拟膨胀及 CCT 曲线。由图 2 可知: Cr5U 钢中含较多的铁素体形成元素 Cr, 导致其 A_{c1} 和 A_{c3} 温度高 Cr5L 约 $10 \text{ }^\circ\text{C}$; 合金元素的增加导致 Cr5U 钢过冷奥氏体更稳定, 与 Cr5L 钢相比, Cr5U 钢的 P(珠光体)、B(贝氏体) 和 M(马氏体) 转变整体有一定的下移, 具更低的马氏体相变起始温度 (M_s) 和结束温度 (M_f), 分别为 $279, 153 \text{ }^\circ\text{C}$; Cr5L 和 Cr5A 钢的 M 临界冷却速度分别为 $1.00, 0.50 \text{ }^\circ\text{C/s}$, Cr5U 钢的淬透性明显得到改善; 由于过冷奥氏体稳定性较高, P 和 B 转变动力学缓慢, 这与文献 [10] 的研究结果一致 (P 孕育期约 2 800 s), 未测出 P 和 B 转变结束线, 表明在小于 M 临界冷却速度的冷速下, 钢中组织是混合组织; Cr5L 和 Cr5U 均具有 P 和 B 转变曲线的分离现象, 形成双 “C” 曲线, 表明该类钢可通过高温回火实现 “二次淬火” [11], 进一步提升材料的性能。由以上分析可得出, Cr5 钢成分在上下限之间少量波动也会导致锻造、热处理等热加工时过冷奥氏体转变特征的不同, 进而影响支撑辊的性能。

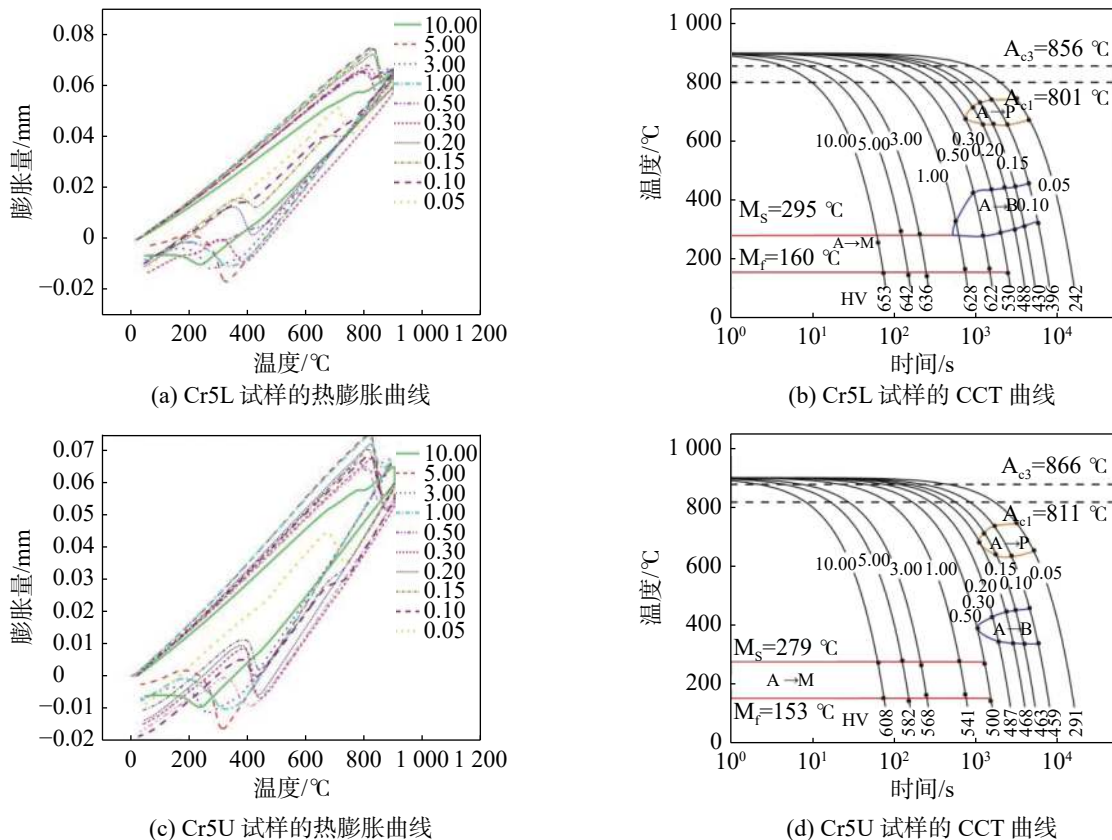


图 2 Cr5L 和 Cr5U 试样的热膨胀和 CCT 曲线

Fig. 2 Thermal expansion and CCT curves of Cr5L and Cr5U samples

2.2 组织转变和硬度变化规律

热模拟试样的金相组织和扫描电镜组织观察结果如表 2。由表 2 可知: 总体上 Cr5L 和 Cr5U 钢随冷却速度的增加依次发生 P, B 和 M 转变; 但 Cr5L 和 Cr5U 钢的 B 转变分别形成 $B_{下}$ 和 $B_{粒}$ 。图 3 为 $0.10, 0.30, 3.00 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 冷却速度 Cr5L 试样与 $0.10, 0.20, 3.00 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 冷却速度 Cr5U 试样的金相组织照片。Cr5U 试样过冷奥

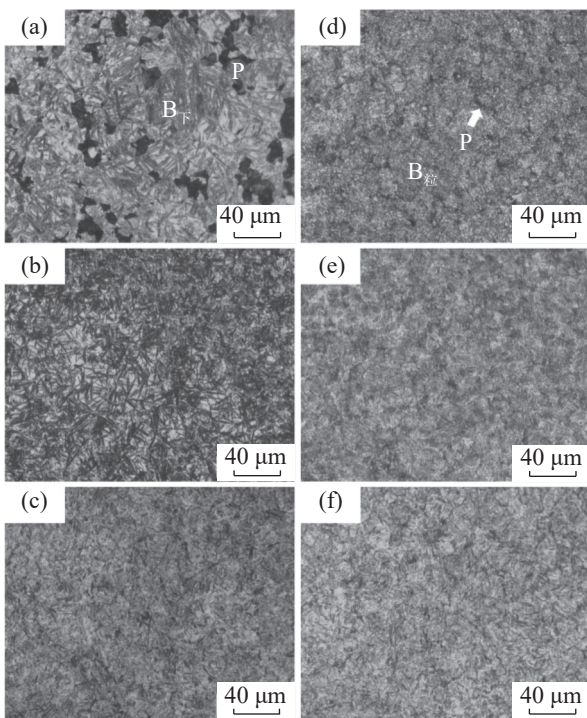
氏体更稳定,因此推迟了 P, B 和 M 转变,导致在 0.10 °C/s 下比 Cr5L 试样含更少的 P(图 3(a), (d)); Cr5L 和 Cr5U 钢 P 转变的最小冷却速度分别为 0.30, 0.20 °C/s, 如图 3(b) 和 (e), 0.30 °C/s 下 Cr5L 和 0.20 °C/s 下 Cr5U 试样的组织分别由 $B_{\text{下}}+M$ 和 $B_{\text{粒}}+M$ 组成。 $B_{\text{下}}$ 和 $B_{\text{粒}}$ 具有较好的综合力学性能,根据 Cr5 钢的组织转变特征,开发了贝氏体支撑辊,并取得良好的应用效果^[3,12]。3.00 °C/s 的冷却速度超过试样的 M 形成临界冷却速度,如图 3(c) 和 (f), 2 种钢的组织均为隐针 M。

表 2 不同冷却速度下 Cr5 钢的显微组织

Tab. 2 Microstructures of Cr5 steel at different cooling rates

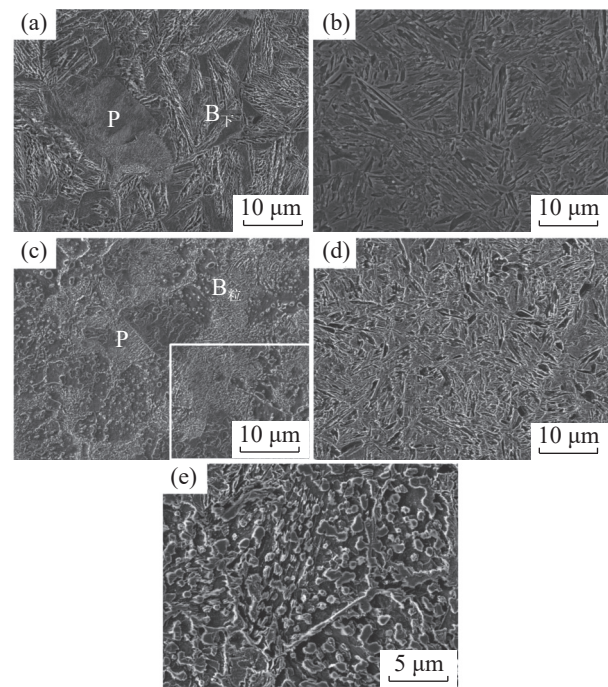
试样	冷却速度/(°C/s)									
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.50	1.00	3.00	5.00	10.00
Cr5L	$B_{\text{下}}+P$	$B_{\text{下}}+P$	$B_{\text{下}}+P$	$B_{\text{下}}+P$	$B_{\text{下}}+M$	$B_{\text{下}}+M$	M	M	M	M
Cr5U	$B_{\text{粒}}+P$	$B_{\text{粒}}+P$	$B_{\text{粒}}+P$	$B_{\text{粒}}+M$	$B_{\text{粒}}+M$	M	M	M	M	M

进一步给出 0.10, 3.00 °C/s 冷却速度下 Cr5L 和 Cr5U 试样的 SEM 组织照片,如图 4。图 4(a) 显示:0.10 °C/s 冷却速度下 Cr5L 试样组织由 $B_{\text{下}}$ 和 P 组成,其中 $B_{\text{下}}$ 由一定过饱和的 α -Fe 及与其有共格关系的碳化物组成^[9];碳化物沿 $B_{\text{下}}$ 中轴线分布,并与中轴线呈一定位相关系。Cr, Mo, V 等合金强烈推迟 P 转变^[12],故连续冷却时 P 转变滞后于低温区发生,形成片间距十分细小的索氏体(S)或屈氏体(T)。0.10 °C/s 冷却速度下 Cr5U 试样由 $B_{\text{粒}}$ 和少量 P 组成(图 4(c)),由图 4(e) 可看出 $B_{\text{粒}}$ 中马氏体-奥氏体岛(M-A 岛)的形态。ISIJ(国际钢铁协会)贝氏体委员会明确描述粒状贝氏体是由小角度铁素体(F)晶粒和分布其上的近似等轴状的 M-A 岛组成, F 中含高密度的位错, M-A 岛中富集 A 形成元素^[13-14]。 $B_{\text{下}}$ 的硬度高于 $B_{\text{粒}}$, 而塑性低于 $B_{\text{粒}}$, 由此可预见 Cr5L 和 Cr5U 试样在较低的冷却速度下冷却(如退火、正火或锻造等),将具有不同的力学性能。比较图 4(b), (d) 可看出:3.00 °C/s 冷却速度下 Cr5U 比 Cr5L 试样的 M 更细小,这是由于 Cr5U 钢中高含量的合金元素、特别是强碳化物形成元素(Cr, Mo, V 等)阻碍加热时奥氏体长大造成的。因此,为使加热时 A 成分的均匀化, Cr5U 支撑辊可采取稍高的奥氏体化加热温度。



(a),(b),(c) 为 0.10, 0.30, 3.00 °C/s 冷却速度 Cr5L 试样;
(d),(e),(f) 为 0.10, 0.20, 3.00 °C/s 冷却速度 Cr5U 试样。

图3 试样的金相组织照片
Fig. 3 Metallographs of samples



(a),(b) 为 0.10, 3.00 °C/s 冷却速度 Cr5L 试样; (c),(d) 为 0.10, 3.00 °C/s 冷却速度 Cr5U 试样; (e) 为 (d) 中白框区域组织高倍图。

图4 试样的 SEM 组织照片
Fig. 4 SEM images of samples

为初步建立组织与性能的关系,对热模拟试样进行维氏硬度值测量,结果如图2(b), (d)。总体规律是, Cr5L 和 Cr5U 试样的 HV 值随冷却速度的升高而增加。B_下的硬度高于 B_粒,当进入贝氏体转变区间形成混合组织时, Cr5L 试样的 HV 值明显高于 Cr5U 试样。尽管 Cr5U 钢具有更高含量的 C 和合金,但发生 M 相变后, Cr5U 钢的 HV 却小于 Cr5L 试样。钢的性能与显微组织及相结构密切相关,这暗示着 Cr5L 和 Cr5U 试样不但具有不同的组织形貌,而且具有不同的相结构特征。

为进一步探索 2 种钢的相组成,对大于 M 形成临界冷却速度冷却的试样进行 X 射线衍射 (X ray diffraction, XRD) 测试,并采用 RIETAN-2000^[15] 软件对 XRD 测试结果进行 Rietveld 相含量计算,结果如图 5。图中: R_{wp} 表示拟合强度与实测强度的权重差; R_p 为最小 R_{wp} 的期望值; S 为拟合度因子,当 S 在 1 到 3 之间且 R_{wp} 小于 10% 时, Rietveld 拟合的结果为准确值^[15]。由图 5 可发现: 拟合结果准确; 3.00 °C/s 冷却速度 Cr5L 试样只有 α' -Fe (M) 的衍射峰; Cr5U 试样由 α' -Fe 和 γ -Fe(残余奥氏体 A_r) 两相组成, Rietveld 拟合得出 M 和 A_r 的质量分数分别为 94%, 6%。A_r 一般以几十纳米厚薄膜的形式分布在片状 M 的边界上,金相和 SEM 组织观察基本不能分辨,故金相和 SEM 显示为全 M 的组织^[16]。一方面,大于 M 形成临界冷却速度冷却的 Cr5U 钢中含质量分数为 6% 左右的软韧相 A_r, HV 值约 150^[17-18], 比 M 的 (HV 值在 600 左右^[9]) 大大下降; 另一方面, C 和其他合金元素富集在 A_r, 导致基体 M 中的过饱和度下降, 固溶强化效果降低^[13-14]。这也是以大于 B 临界冷却速度冷却 Cr5U 试样的 HV 值小于 Cr5L 试样的主要原因。

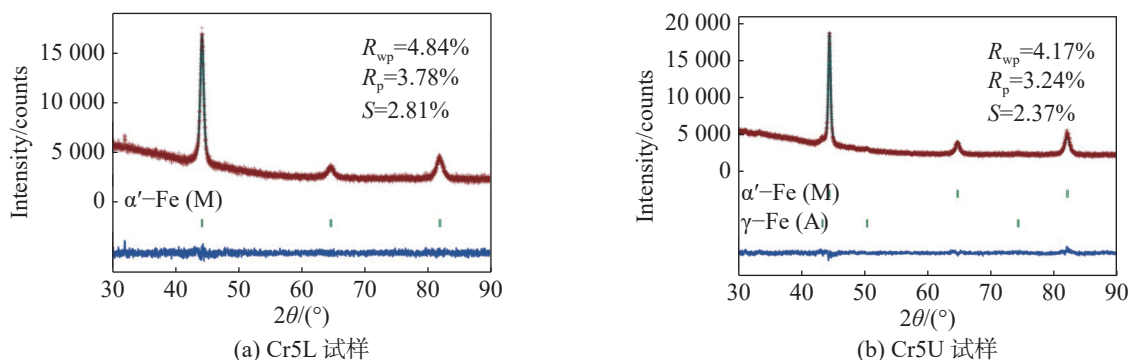


图5 Cr5L 和 Cr5U 试样 XRD 的 Rietveld 拟合图谱

Fig. 5 Rietveld refinement pattern for XRD of Cr5L and Cr5U samples

3 结 论

采用热模拟试验机测试 Cr5 系支撑辊成分下限和上限试样 (分别记为 Cr5L 和 Cr5U) 的热膨胀曲线, 结合组织观察和硬度测试结果, 绘制 2 种试样的 CCT 曲线, 分析 A' 连续冷却转变特征, 建立材料组织、相结构与硬度之间的联系, 所得主要结论如下:

1) Cr5U 试样的 A_{C1} 和 A_{C3} 温度高 Cr5L 约 10 °C, 但其具有更低的 M_s 和 M_f 点, 分别为 279, 153 °C。Cr5L 和 Cr5U 试样 A' 连续冷却均发生 P, B 和 M 转变, 且 P 和 B 转变 “C” 曲线发生分离, 具有双 “C” 曲线特征。

2) Cr5L 和 Cr5U 试样 B 转变分别形成 B_下 和 B_粒, Cr5U 试样具有更高的淬透性, M 转变临界冷却速度由 Cr5L 试样的 1.00 °C/s 下降到 0.50 °C/s。

3) Cr5L 和 Cr5U 试样的 HV 随冷却速度的升高而增加。B_下 的硬度高于 B_粒, 且 Cr5U 试样 M 组织中含质量分数约 6% 的软韧相 A_r, 故以大于 B 临界冷却速度冷却的 Cr5U 试样 HV 值小于 Cr5L 试样。

Cr5 上限和下限成分对过冷奥氏体冷却转变有重要的影响, 同时组织和相结构的不同又导致材料性能差异较大。因此, 本文研究可为 Cr5 的成分控制提供理论依据, 也可为后续的热处理组织调控和性能优化提供较好的理论支撑。

参考文献:

- [1] 元亚莎, 王文焱. 淬火温度对 Cr5 支撑辊用钢组织和摩擦磨损性能影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(7):69-73.

- [2] 王葛, 王亚杰, 李磊, 等. Cr5钢马氏体的相变塑性和应力对其相变动力学的影响[J]. 材料研究学报, 2018, 32(7):481-486.
- [3] QIN X F, SUN D L, XIE L Y, et al. Hardening mechanism of Cr5 backup roll material induced by rolling contact fatigue[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 600:195-199.
- [4] 岳慎伟. Cr5大型支撑辊用钢点状偏析与预备热处理研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014:1-2.
- [5] 刘宗昌, 计云萍. Cr5型热作模具钢的C-曲线及退火新工艺[J]. 热处理技术与装备, 2017, 38(6):1-6.
- [6] ORTIZ-MARISCAL A, SAUCEDO-MUNOZ M L, KOMAZAKI N S. Application of small punch creep testing for evaluation of creep properties of as-received and artificially aged 5Cr-0.5Mo steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 709:322-329.
- [7] 韩瑞敏. 大型锻钢支承辊生产状况及最终热处理工艺[J]. 热处理, 2011, 26(5):19-23.
- [8] 徐咏梅, 杨昱东, 姚书典, 等. 锻钢冷轧辊辊坯: GB/T15547—2012[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2013:3-4.
- [9] 沈慧, 刘云鹏, 斯庭智. 4330M钢连续冷却过程中的组织转变特征[J]. 金属热处理, 2022, 47(7):190-196.
- [10] 张雪姣, 宋肖阳, 李萌藜, 等. 50Cr5NiMoV钢奥氏体分解动力学模型建立与应用[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(6):177-184.
- [11] 赵乃勤. 热处理原理与工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011:126-127.
- [12] MOHAPATRA J N, BANDYOPADHYAY N R, GUNJAN M K, et al. Study of high-temperature ageing and creep on bainitic 5Cr-0.5Mo steel by magnetic NDE techniques[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2010, 322:589-595.
- [13] SHIM D H, LEE T, LEE J, et al. Increased resistance to hydrogen embrittlement in high-strength steels composed of granular bainite[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 700:473-480.
- [14] DE-CASTRO D, ERES-CASTELLANOS A, VIVAS J, et al. Morphological and crystallographic features of granular and lath-like bainite in a low carbon microalloyed steel[J]. Materials Characterization, 2022, 184:111703-111718.
- [15] IZUMI F, IKEDA T. A rietveld-analysis program RIETAN-98 and its applications to zeolites[J]. Materials Science Forum, 2000, 321/324:198-203.
- [16] 王鑫, 索忠源, 王文革, 等. 热处理对ZGCr17Ni2马氏体不锈钢组织及硬度影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(9):940-942.
- [17] CHEN L, MA Z X, SHI R J, et al. Comprehensive effect of hydrostatic compressive stress in retained austenite on mechanical properties and hydrogen embrittlement of martensitic steels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45:22102-22112.
- [18] MALITCHI E, YAGODZINSKY Y, VILACA P. Role of retained austenite in hydrogen trapping and hydrogen-assisted fatigue fracture of high-strength steels[J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 760:68-75.

责任编辑: 何莉

(上接第 125 页)

- [19] PAAR A, SCHNEIDER R, ZELLER P, et al. Influence of the polarity on the cleanliness level and the inclusion types in the ESR process[C]//Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting. Switzerland: Springer, Cham, 2013:29-36.
- [20] CHOUDHURY A, 刘树模. 大型低铝钢锭的低频电渣重熔[J]. 兵器材料科学与工程, 1987(9):69-73.
- [21] SIBAKI E K, KHARICHA A, WU M, et al. A numerical study on the influence of the frequency of the applied ac current on the electroslag remelting process[C]//Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting. Cham: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2013:13-19.
- [22] WANG H, ZHONG Y B, LI Q, et al. Influences of the transverse static magnetic field on the droplet evolution behaviors during the low frequency electroslag remelting process[J]. ISIJ International, 2017, 57(12):2157-2164.
- [23] 常立忠, 施晓芳, 从俊强, 等. 电渣冶金过程中结晶器旋转对铸锭致密度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(12):1247-1249.
- [24] 李志超, 刘家鼎. 低频电源在矿热炉运行中的优势[J]. 铁合金, 1998(6):21-24.
- [25] 郭培民, 张家雯, 李正邦. 电渣重熔体系影响渣池运动因素的解析[J]. 钢铁研究学报, 2000(6):7-10.

责任编辑: 何莉