

# Cr5M 钢支撑辊回火脆性及整体浸入式调质处理研究

李奇<sup>1</sup>, 赵士光<sup>2</sup>, 王成<sup>2</sup>, 高安阳<sup>2</sup>, 斯庭智<sup>1</sup>

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

**摘要:** 对 Cr5M 钢进行热处理实验, 分析 Cr5M 钢回火脆性与硬度的关系及其组织结构对回火脆性的影响; 据此提出满足辊面硬度要求的 Cr5M 钢支撑辊整体浸入式调质处理工艺, 探究 Cr5M 钢支撑辊的整体浸入式调质处理效果。结果表明: Cr5M 钢具有一定程度的回火脆性, 回火脆性温度范围为 300~500 °C, 400 °C 回火时 Cr5M 钢冲击吸收能量达到最低值 (7.6 J); 250 °C 附近回火, Cr5M 淬火钢中的残余奥氏体 (Ar) 开始发生分解, 分解结束温度约 400 °C, 软韧相 Ar 的分解是导致回火脆性发生的主要因素; 960 °C 淬火+615 °C 回火的整体浸入式调质处理可替代支撑辊的差温热处理或表面淬、回火热处理, 经整体浸入式调质处理的 Cr5M 支撑辊的综合力学性能优良, 表面硬度均匀, 最大与最小肖氏硬度差值仅 0.7 HSD, 平均肖氏硬度为 40.1 HSD, 支撑辊工作层 (淬硬层) 深大于 15 cm, 工作层组织为回火索氏体+少量的铁素体, 工作层硬度仅 2.1 HSD。

**关键词:** Cr5M 支撑辊; 回火脆性; 二次硬化; 显微组织; 淬硬层

**中图分类号:** TG 142.1+2 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23108



## A Study of Temper Brittleness and Overall Immersion Quenching and Tempering Treatment of Cr5M Back-up roll

LI Qi<sup>1</sup>, ZHAO Shiguang<sup>2</sup>, WANG Cheng<sup>2</sup>, GAO Anyang<sup>2</sup>, SI Tingzhi<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The heat treatment experiment was conducted on Cr5M steel to investigate the relationship between temper brittleness and hardness and the effect of microstructure on temper brittleness. Based on these investigations, an overall immersion treatment process meeting the hardness requirement of Cr5M back-up roll was proposed, and the overall immersion quenching and tempering treatment effect of Cr5M steel support rollers was explored. It is found that Cr5M steel exhibits a certain degree of temper brittleness characteristics at the temper temperature range of 300–500 °C. The lowest impact absorbed energy is ascertained to be 7.6 J for the sample tempered at 400 °C. The retained austenite (Ar) in the quenched Cr5M steel begins to decompose at the temper temperature of about 250 °C, and the decomposition end temperature is confirmed to be about 400 °C. The decomposition of soft phase Ar plays a key role on the temper brittleness of Cr5M steel. The overall immersion treatment (quenching at 960 °C and tempering at 615 °C) can replace the differential heat treatment or surface quenching and tempering treatment. The

收稿日期: 2023-07-10

基金项目: 安徽省科技重大专项 (202103a05020036)

作者简介: 李奇 (2000—), 男, 安徽六安人, 硕士生, 主要研究方向为钢铁材料。

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: 李奇, 赵士光, 王成, 等. Cr5M 钢支撑辊回火脆性及整体浸入式调质处理研究 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(1):18-24.

excellent comprehensive properties are obtained for the overall immersion quenched and tempered Cr5M back-up roll. The uniform surface hardness is achieved for the roll, the value of maximum and minimum Shore hardness (HSD) difference is only 0.7 HSD, and the average hardness is 40.1 HSD. The working ling (quenching layer) depth of the roll is more than 15 cm. The microstructure of working ling is consisted of tempered sorbite and a small amount of ferrite, and its hardness drop is only 2.1 HSD.

**Keywords:** Cr5M back-up roll; temper brittleness; secondary hardening; microstructure; quenching layer

Cr5 钢因含有较高的合金含量而拥有良好的淬硬性、耐磨性和抗断裂性, 在强度较高的同时具有较好的韧性<sup>[1-2]</sup>, 被广泛用于各种冷热作模具<sup>[3]</sup>、连轧机支承辊<sup>[4-5]</sup>和有色轧机工作辊<sup>[6]</sup>的制造。Cr5 钢在应用的过程中, 需经淬火、回火处理, 其中采用的回火温度范围较宽 (250~650 °C)。研究<sup>[7-9]</sup>表明, Cr 合金钢在回火时会产生一定的回火脆性, 导致材料的延性、韧性下降和氢脆敏感性的增强。Cr5 钢是 Cr 合金钢的一种, 同样具有回火脆性行为。林国标等<sup>[10]</sup>研究回火温度对 4Cr5MoSiV1Nb 合金钢组织和性能的影响, 发现 300~550 °C 回火产生二次硬化现象, 并伴随韧性的下降。相似地, 研究<sup>[11-12]</sup>发现 4Cr5MoSiV1 和 4Cr5Mo2V 合金钢也有回火脆性现象, 其中 4Cr5Mo2V 钢的回火脆性温度范围为 480~550 °C, 且 550 °C 回火试样的冲击性能最差<sup>[12]</sup>。本课题组<sup>[13]</sup>在常规 5Cr5MoV 钢的基础上, 通过适当调整 C 和适量提高 C 和 Mo 的含量开发 Cr5M 钢 (M 为 modulation 的缩写), 一方面可提高淬透性, 增加淬硬层的深度; 另一方面, 回火时 Cr5M 钢中析出的含 Mo 碳化物更多, 利于提高淬硬层硬度, 增强支撑辊的耐磨性能, 从而较大提高支撑辊的使用寿命。然而, 合金成分的调整对回火脆性的影响尚不清楚, 进一步探明回火脆性温度区间, 利于 Cr5M 支撑辊热处理工艺制度的进一步优化。

调质处理 Cr5 支撑辊可获得高强高韧的优良综合性能, 但支撑辊构件庞大, 辊径往往超过 1 500 mm, 支撑辊整体调质处理要求高 (热处理设备占地面积大、一次性投入大), 辊体整体淬透困难。目前普遍采用差温热处理或表面淬火等工艺制造 Cr5 支撑辊, 存在热处理工艺复杂、精确温控困难和奥氏体化层深较浅等不足, 导致支撑辊的硬度均匀性差、工作层 (淬硬层) 深度浅 ( $\leq 8$  cm) 和产品稳定性不足<sup>[14-15]</sup>。整体浸入式淬火在加热时工件整体温度一致, 可大大减小由工件截面温度梯度造成的热应力, 更重要的是淬火加热和冷却时, 工件表面温度均匀, 能获得均匀的组织 and 性能, 对于尺寸较小的 Cr5 钢模具工件采用整体浸入式油淬已取得良好效果<sup>[16-18]</sup>。尽管大型支撑辊采用整体浸入式淬火不普及, 但市场对

冶金支撑辊性能提了新要求: 辊面肖氏硬度 (HSD) 40~50 HSD、辊面硬度均匀性  $\leq 2$  HSD, 工作层深  $\geq 12$  cm、工作层硬度降  $\leq 5$  HSD, 加大整体浸入式调质处理设备投入及开发相应热处理工艺势在必行。鉴于此, 研究 Cr5M 钢的回火脆性, 探讨满足辊面 40~45 HSD 硬度要求的 Cr5M 钢支撑辊整体浸入式调质处理工艺, 以期提高 Cr5M 支撑辊的综合使用性能。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

为安徽马钢重型机械制造有限公司自主开发的 Cr5M 钢, 经电炉熔炼浇铸为直径约 800 mm 的铸锭, 其合金成分如表 1。

表 1 Cr5M 钢的合金成分								w/%
Tab. 1 Alloy compositions of Cr5M steel								w/%
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S
0.57	0.68	0.69	5.58	0.49	0.62	0.15	0.001 3	0.008

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 热处理

经 8 000 t 油压机将 Cr5M 钢锭锻造成直径约 1 500 mm、长 5 500 mm 的锻坯, 经锻后退火, 截取一段长约 500 mm 的锻圆。在锻圆上制取回火脆性测试试样, 试样粗加工尺寸 57 mm  $\times$  11 mm  $\times$  11 mm。粗加工试样的淬回火实验步骤: 经 960 °C  $\times$  2 h 加热后在含 17% (体积分数) 的 PAG (聚烷撑乙二醇) 淬火液中淬火; 对淬火试样进行 200~675 °C 的回火 (温度间隔 25 °C), 回火 2 h 后空冷待用。

参考回火脆性的研究结果 (Cr5M 钢未发现高温回火脆性现象) 以及回火硬度值, 选择满足辊面 40~45 HSD 要求的 Cr5M 钢支撑辊整体浸入式调质处理工艺, 工艺流程如图 1。淬火液为含体积分数为 17% 的 PAG, 支撑辊粗加工尺寸为  $\Phi 1 500$  mm  $\times$  5 000 mm; 淬火和回火温度分别为 960, 615 °C; 为减小大型支撑辊加热过程产生热应力而导致热裂纹的风险, 淬火加热时采取 400, 670 °C 分段均温处理, 在回火加热时采用 300 °C 均温处理。

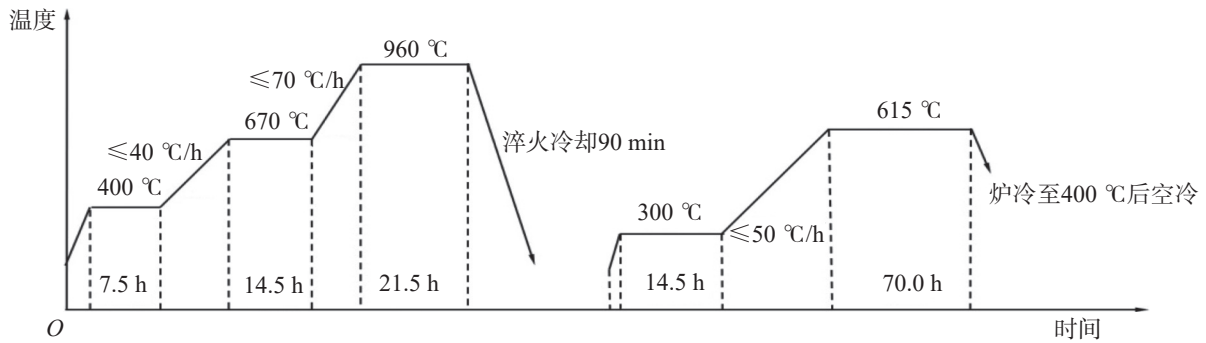


图1 Cr5M 支撑辊调质处理工艺曲线

Fig. 1 Quenching and tempering treatment curves of Cr5M back-up roll

### 1.2.2 力学性能测试及结构表征

为研究 Cr5M 钢回火脆性与硬度之间的关系,参照 GB/T 229—2020 将回火试样加工成 V 型缺口(缺口深 2 mm)冲击试样,按 GB/T 229—2020 规定对试样进行冲击吸收能量的测试,测试温度为室温;采用 TQC LD0551 型便携式肖氏硬度计测量冲击测试完成试样的肖氏硬度,沿每个试样长度方向测试 5 个点,取平均值为回火试样的硬度值。对测试完成的试样制取金相和断口观察试样,采用 Tescan MIRA3 XMU 型扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察回火试样的显微组织和断口形貌,其中显微组织试样经砂纸打平、抛光后由 4% (体积分数) 的硝酸酒精腐蚀显示组织特征。

为分析回火试样相结构对脆性的影响,采用 Rigaku MiniFlex 600 日本理学 X 射线衍射仪测定样品的 X 射线衍射 (X ray diffraction, XRD) 图谱,采用 Cu-K $\alpha$  辐射,工作电压 50 kV,工作电流为 50 mA,扫描步长、速度和角度分别为 0.01 $^{\circ}$ , 5.0 $^{\circ}$ /min 和 30 $^{\circ}$ ~90 $^{\circ}$ 。测试完成,采用基于 Rietveld 法的 RIETAN-2000 程序<sup>[19]</sup>对 XRD 谱图进行拟合。

试样经整体浸入式调质处理后,截取一段长约 500 mm 的辊圆,采用 TQC LD0551 型便携式肖氏硬度计测试锯断圆面的肖氏硬度,由表面沿径向每隔 1 cm 的圆周线上测试 5 个点,取其平均值为最终结果,测试范围为距表面深 15 cm。在辊圆半径 1/3 处制取拉伸试样,按 GB/T 228.1—2021 进行拉伸测试。且对表面、距表面深 7 和 15 cm 处的金相试样进行金相和 SEM 组织观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 回火脆性特征

#### 2.1.1 回火硬度与冲击吸收能量

图 2 为 Cr5M 试样回火硬度和冲击吸收能量随回火温度升高的变化曲线。由图 2 可发现:淬火试

样的冲击吸收能量仅 4.0 J, 硬度达 73.9 HSD, 表明淬火试样的脆性大、硬度高,冷热模具或支撑辊需经适当温度回火才能满足精加工及应用要求;200~250 $^{\circ}$ C, 随回火温度的升高, Cr5M 的冲击韧性有所改善, 250 $^{\circ}$ C 回火冲击吸收能量达到阶段高值, 为 14.5 J, 这主要归因于低温回火导致试样淬火应力松弛及回火马氏体固溶强化减弱等对韧性的贡献;回火温度为 300 $^{\circ}$ C 时, 试样韧性开始下降, 400 $^{\circ}$ C 时达最低值 (7.6 J); 随后随回火温度的升高呈线性快速升高。由此表明: Cr5M 钢具有一定程度的回火脆性特征, 回火脆性温度范围 300~500 $^{\circ}$ C; 特别的 500 $^{\circ}$ C 以上显示良好的韧性, 这为调质处理在 Cr5M 支撑辊中的应用提供了坚实基础。

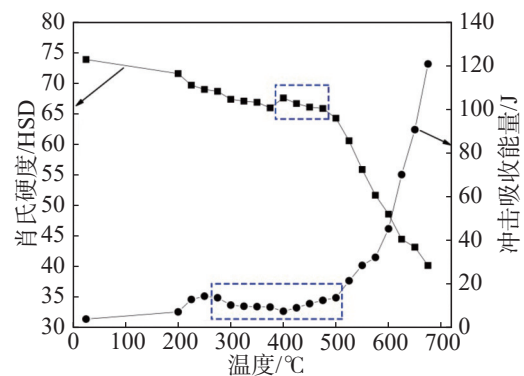


图2 回火温度与 Cr5M 钢冲击功和与肖氏硬度的关系曲线  
Fig. 2 Relationship curves of temper temperature vs impact energy and Shore hardness (HSD) of Cr5M steel

### 2.2 回火温度对组织的影响

研究<sup>[13]</sup>发现, Cr5M 钢奥氏体化后在大的冷却速度下冷却, 导致组织中含少量的残余奥氏体 (Ar)。这与 C, Cr, Mn, Ni, Mo 等稳定奥氏体合金元素有关, 且随这些合金元素含量的增加, Cr5 钢淬火组织中的 Ar 含量增加<sup>[16-18]</sup>。图 3 为 Cr5M 钢淬火、回火试样的 XRD 测试结果及 Rietveld 拟合图谱。其中:  $R_{wp}$  为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,  $R_{wp}$  小于 10% 时, Rietveld 拟合的结果准确<sup>[19]</sup>。由图 3

可发现: 淬火试样由质量分数为 92% 的  $\alpha'$ -Fe 相 (马氏体 M) 和 8% 的  $\gamma$ -Fe 相 (Ar) 组成。回火时, 碳钢在 100~250 °C 发生 M 分解, 在 200~300 °C 发生 Ar 分解; 根据合金对回火抗力的贡献及钢中合金含量, 合金钢发生 M 和 Ar 分解的温度向高温发生不同程度的延后。Cr5M 试样中含较多的稳定奥氏体合金元素, 在 250 °C 回火时, Ar 含量略有下降 (7%, 质量分数), 暗示着 Ar 回火分解温度在 250 °C 附近。由图 3(a) 可进一步发现: 与 250 °C 回火试样相比,

375 °C 回火试样 XRD 图谱中  $\gamma$ -Fe 衍射峰有所减低, 且 400 °C 回火试样的组织由单相  $\alpha'$ -Fe 组成。由此判断 Cr5M 支撑辊 Ar 分解开始温度约 250 °C, 结束温度约 400 °C。综合分析图 2 可知: 200~400 °C 回火, Cr5M 的硬度下降有限, 表明合金元素推迟 M 的分解, M 的分解对材料韧性的改善有限; 250~400 °C 回火, 软韧相 Ar 的分解对韧性的影响占主导地位, 导致回火脆性现象的发生。

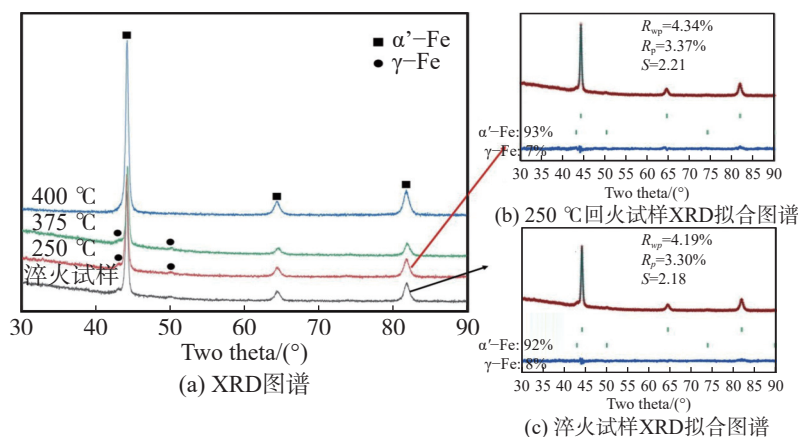


图3 Cr5M 试样 XRD 图谱及淬火与 250 °C 回火试样 XRD 的 Rietveld 拟合图谱

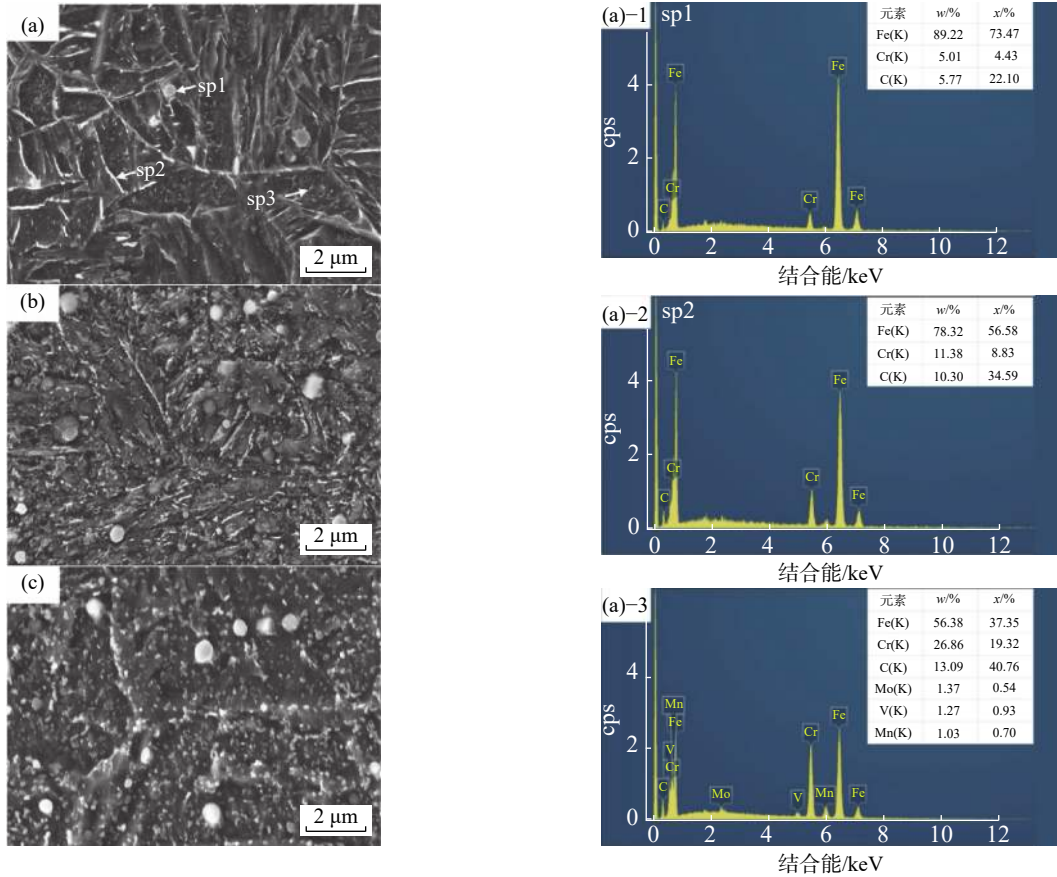
Fig. 3 XRD patterns of Cr5M samples and Rietveld fitting patterns of XRD for quenched and tempered at 250 °C samples

图 4 为 Cr5M 钢 400, 600, 675 °C 回火试样的 SEM 照片。由图 4(a) 可发现: 400 °C 回火试样基体存在 3 种形貌的碳化物, 即球状、薄片状和细小颗粒状, 对其进行 EDX 点扫描, 扫描点 (scan point) 在图 4(a) 中分别标记为 sp1, sp2 和 sp3 (sp 为 scan point 的缩写), 由对应的能谱图可判断, 球状碳化物的成分更接近于  $(Fe, Cr)_{23}C_6$  (图 4(a)-1), 薄片状碳化物的成分更接近于  $(Fe, Cr)_{24}C$  (图 4(a)-2)。研究<sup>[20]</sup>表明, 大的球状  $(Fe, Cr)_{23}C_6$  为淬火加热未熔碳化物, 能阻碍加热过程中奥氏体晶粒的长大, 利于获得细晶组织。根据热处理原理, 合金钢在低温回火时首先析出薄片状  $\epsilon$  碳化物 ( $Fe_{24}C$ ), 随回火温度的升高, 碳化物发生重熔和重新析出, 析出物为颗粒状碳化物  $(Fe, M)_3C$  (M 为合金元素) 或其他特殊合金碳化物, 由图 4(a)-3 可证明细小颗粒状碳化物中含 Cr, Mo, V 等合金元素, 合金元素的弥散析出利于材料综合力学性能的改善。含较高含量 Cr, Mo, V 等合金的钢回火时, 会在 400~600 °C 间发生二次硬化<sup>[11, 17]</sup>。二次硬化的原因: 合金减缓碳的扩散, 推迟马氏体分解 (图 4(a) 中基体依然保持淬火片状 M 的形态); 合金提高残余 A 转变的温度范围, 残余 A 在回火时分解成硬脆的 M, Cr, Mo, V 等在 500~600 °C 范围沉淀析出特殊碳化物。由图 2 可知: Cr5M 钢在 400~475 °C 范围回火出现轻微的二次硬化, 400 °C 回火硬度升

到阶段新高, 为 67.6 HSD, 得益于上述 3 个方面。由图 4(b)(c) 可看出: 600 °C 回火薄片状碳化物明显减少, 细小颗粒状碳化物显著增多; 升温到 675 °C, 颗粒状碳化物球化并聚集长大, 协同基体的完全再结晶, Cr5M 支撑辊的冲击吸收能量显著提高到 120.9 J, 硬度下降到 38 HSD。根据支撑辊辊面硬度 40~45 HSD 的要求, 结合图 2 所示的回火温度对硬度的影响规律, 考虑长时间加热工件表面脱碳对硬度的影响, 选择 Cr5M 支撑辊的高温回火温度为 615 °C。

### 2.3 断口形貌分析

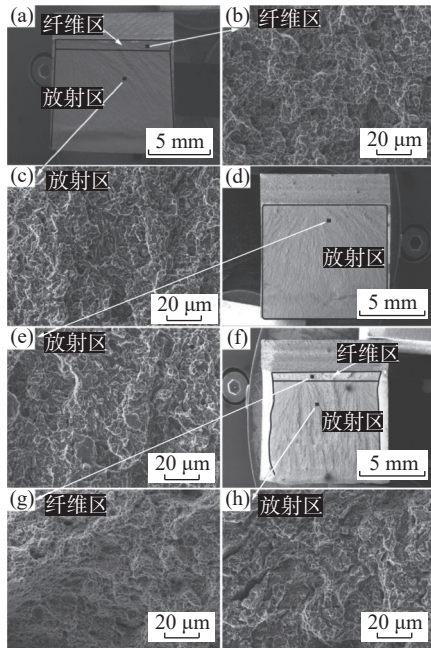
图 5 为 Cr5M 钢 250, 400, 600 °C 回火试样冲击断口形貌。由图 5 可知: 250 °C 回火试样断口由放射区和少量纤维区组成; 纤维区断口起伏较大, 表明 250 °C 回火试样的韧性有所改善, 但整体依然为脆性断口特征, 表明低温回火对韧性的改善有限; 值得关注的是, 400 °C 回火试样冲击断口由全放射区组成, 放射区断口平整, 为沿晶解理断裂。这与冲击测试结果一致, 表明 400 °C 回火试样脆性较大, Cr5M 钢有一定的低中温 (300~500 °C) 回火脆性特征。由图 2 可知: 高于 500 °C 回火试样的硬度快速下降, 韧性快速升高, 这与回火组织转变有关; 与 250 °C 回火试样相比, 600 °C 回火试样的纤维区面积增大, 纤维区显示韧窝和撕裂岭等韧性断裂微观断口特征, 其结果与性能测试结果一致。



(a) 400 °C 回火试样; (b) 600 °C 回火试样; (c) 675 °C 回火试样; (a)-1, (a)-2, (a)-3 分别为图 (a) 中对对应碳化物的 EDX 图谱。

图4 Cr5M 回火试样的 SEM 组织照片及对应碳化物的 EDX 图谱

Fig. 4 SEM images of microstructures of the tempered Cr5M samples and the corresponding EDX results



(a)~(c) 为 250 °C 回火试样; (d)~(e) 为 400 °C 回火试样; (f)~(h) 为 600 °C 回火试样。

图5 Cr5M 回火试样 SEM 断口形貌

Fig. 5 SEM images of fractures of the tempered Cr5M samples

#### 2.4 整体浸入式调质处理效果

整体浸入式调质处理的 Cr5M 支撑辊硬度测试结果如图 6(a)。由图 6(a) 可知: Cr5M 支撑辊调质处理后表面硬度均匀, 最大与最小硬度之间的差值仅 0.7 HSD, 平均硬度为 40.1 HSD, 满足支撑辊对硬度的要求。与差温热处理和表面淬火处理支撑辊<sup>[14-15]</sup>相比, 整体浸入式调质处理 Cr5M 支撑辊的硬度均匀性得到明显改善。由图 6(a) 还可发现: 支撑辊次表面的硬度大于表面, 初步判断与长时间淬火、回火加热导致表面产生脱碳有关; 除表面层硬度外, 试样的肖氏硬度总体随距表面深度的增加而减小, 距表面深 15 cm 处的硬度降低, 仅 2.1 HSD, 满足支撑辊对“淬硬层深度(按硬度突变进行评估) ≥ 120 mm, 且辊身工作层硬度降 5 HSD”的要求。由于支撑辊整体淬火加热到奥氏体化温度以上, 相较于差温和表面加热的奥氏体化层<sup>[14-15]</sup>, 整体浸入式调质处理 Cr5M 支撑辊的工作层深度显著增加, 利于支撑辊整体性能的改善, 显著提高支撑辊的使用寿命。由图 6(b) 可知: 整体浸入式调质处理支撑辊辊颈 1/3 半径处纵向屈服强度和抗拉强度分别为 750,

903 MPa, 延伸率和断面收缩率分别为 15%, 38%。表明支撑辊具有良好的综合力学性能, 完全满足支

撑辊“辊颈 1/3 半径处纵向屈服强度  $\geq 650$  MPa, 抗拉强度  $\geq 850$  MPa”的要求。

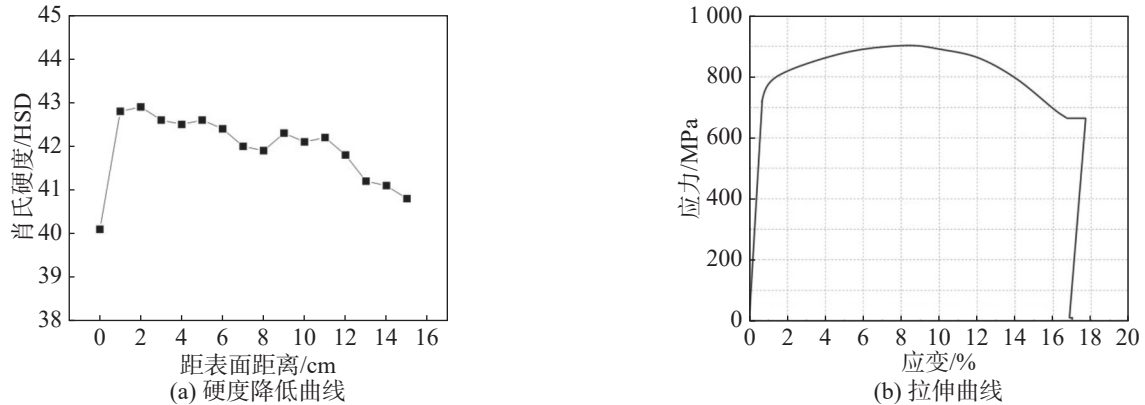
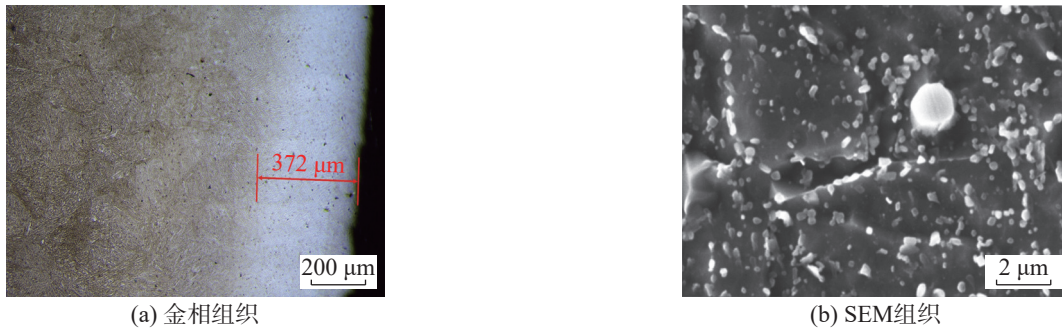


图6 整体浸入式调质处理 Cr5M 支撑辊的硬度降低曲线及拉伸曲线

Fig. 6 Hardness drop and stress-strain curves of the overall immersion quenched and tempered Cr5M back-up roller

图 7 为整体浸入式调质处理 Cr5M 支撑辊表面试样脱碳层金相和 SEM 组织照片。由图 7 可发现: 表面脱碳层厚度为 372  $\mu\text{m}$ , 表明长时间的淬火、回火等加热过程导致支撑辊表面产生一定的脱碳; 表

面组织回火充分, 再结晶等轴状  $\alpha'$ -Fe 基体上均匀弥散地分布着尺寸约 200 nm 的颗粒状碳化物, 此组织为回火索氏体 ( $S_{回}$ )。由此表明, 表面的脱碳和高温回火充分是表面层硬度低于次表面的主要原因。



(a) 金相组织

(b) SEM组织

图7 整体浸入式调质处理 Cr5M 支撑辊表面脱碳层组织照片

Fig. 7 Photos of the decarbonizing layer on surface of Cr5M back-up roller treated with overall immersion quenching and tempering

通常以淬火组织半马氏体的深度作为淬透层深度, 淬火支撑辊回火时马氏体转变为回火组织, 其他淬火组织一般不发生回火转变。因此, 可通过观察回火组织确定淬透层深度; 也可根据硬度沿截面深度的变化判断淬透层深度, 即硬度的突变深度。由图 6(a) 可知, 距表面深度 15 cm 内, 硬度未发生突变, 表明淬透性好, 淬硬层深度大于 15 cm。图 8 为距

表面深 7, 15 cm 处试样的金相组织。由图 8 可知: 支撑辊组织均由  $S_{回}$ +少量铁素体 (F) 组成, 与 7 cm 处相比, 深 15 cm 处试样组织中 F 有所增加, 但远少于 50%。进一步证明 Cr5M 钢淬透性好, 支撑辊淬硬层深度大于 15 cm。综上, 整体浸入式调质处理可替代支撑辊的差温热处理或表面淬、回火热处理, 经整体浸入式调质处理的支撑辊综合性能优良。



(a) 深 7 cm 处金相组织

(b) 深 15 cm 处金相组织

图8 整体浸入式调质处理 Cr5M 支撑辊截面金相组织照片

Fig. 8 Photos of cross section of Cr5M back-up roller treated with overall immersion quenching and tempering

### 3 结论

研究回火温度与 Cr5M 钢冲击性能及硬度的关系, 据此制定 Cr5M 支撑辊整体浸入式调质处理工艺, 对调质处理支撑辊的组织 and 性能进行分析, 得到以下主要结论:

1) Cr5M 钢在 300~500 °C 表现出一定的回火脆性特征, 并且 400 °C 回火试样冲击吸收能量达到最低值 (7.6 J), 随后随回火温度的升高冲击吸收能量快速升高, 高温回火 Cr5M 钢具有较好的韧性; Cr5M 钢在 400~475 °C 回火出现轻微的二次硬化现象, 400 °C 回火硬度升到阶段新高, 为 67.6 HSD。

2) 淬火 Cr5M 钢中含质量分数为 8% 的 Ar, Ar 回火分解温度在 250 °C 附近, 结束温度约 400 °C; 在 250~400 °C 回火, 软韧相 Ar 的分解对韧性的影响占主导地位, 导致回火脆性现象的发生。

3) 采用 960 °C 淬火+615 °C 高温回火的整体浸入式调质处理可替代支撑辊的差温热处理或表面淬火、回火热处理, 经整体浸入式调质处理支撑辊的综合性能更优良, Cr5M 支撑辊表面硬度均匀, 最大与最小硬度之间的差值仅为 0.7 HSD, 平均硬度为 40.1 HSD, 工作层 (淬硬层) 深大于 15 cm, 工作层组织为 S<sub>回</sub>+少量的 F, 工作层硬度降为 2.1 HSD。

#### 参考文献:

- [1] ORTIZ MARISCAL A, SAUCEDO MUNOZ M L, NAVEENA KOMAZAKI 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.
- [2] QIN X, XIE L, WU Q. Hardening mechanism of Cr5 backup roll material induced by rolling contact fatigue[J]. *Materials Science & Engineering:A*, 2014, 600:195-199.
- [3] 杨礼林, 徐祺昊, 赵莉萍. 稀土 Ce 对 4Cr5MoSiV1 钢组织的影响[J]. *金属热处理*, 2023, 48(3):242-247.
- [4] 沈俞涛, 左鹏鹏, 吴晓春. Mo 对 4Cr5Mo2V 型热作模具钢热稳定性的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(12):168-174.
- [5] 白兴红, 赵席春, 郭峰, 等. 热处理温度对高碳 Cr5 轧辊钢显微组织与性能的影响[J]. *大型铸锻件*, 2022(2):24-27.
- [6] 白兴红, 赵席春, 赵德利, 等. 冷却速度对支撑辊用 Cr5 钢显微组织与力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(6):69-72.
- [7] CHENG X, ZHANG X. Effect of tempering temperature on stress-assisted hydrogen diffusion and hydrogen-induced embrittlement in a high strength low alloy steel[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2023, 873:144948.
- [8] JIANG Z, LI Y, YANG Z, et al. The tempering behavior of martensite/austenite islands on the mechanical properties of a low alloy Mn-Ni-Mo steel with granular bainite[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 26:102166.
- [9] SHI L, RAN X, ZHAI Y, et al. Influence of isothermal tempering on microstructures and hydrogen-environmentally embrittlement susceptibility of laser additively manufactured ultra-high strength AerMet100 steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 876:145167.
- [10] 林国标, 赵攀, 敖伟. 回火温度对中碳合金钢 4Cr5MoSiV1Nb 组织和性能的影响[J]. *钢铁*, 2019, 54(5):73-77.
- [11] 李娜, 白政民, 葛新峰. 锻造及热处理对 4Cr5MoSiV1 模具钢组织与性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(15):87-89.
- [12] 周百航, 左鹏鹏, 吴晓春. 淬火温度和回火工艺对 4Cr5Mo2V 钢高温耐磨性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2023, 47(4):67-73.
- [13] 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.
- [14] 南玉静, 王大鹏, 白兴红. 大型 Cr5 锻钢支承辊无硬度降制造技术开发[J]. *大型铸锻件*, 2019(6):28-30,33.
- [15] 陈先毅, 李勇. Cr5 支承辊表淬过程数值模拟参数优化及应用[J]. *大型铸锻件*, 2022(4):47-50,55.
- [16] 王世凯, 王睿, 康燕, 等. 淬火温度对 Cr5MoVNi 钢组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(9):125-130.
- [17] 殷军伟, 周健, 蒋业华, 等. 热处理工艺对 5Cr5Mo2V 钢组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2021, 46(2):55-60.
- [18] 饶楚楚, 张新星. 深冷处理对 4Cr5MoSiV1 热作模具钢磨损性能的影响[J]. *锻压技术*, 2022, 47(8):235-240.
- [19] IZUMI F, IKEDA T. A rietveld-analysis program RIETAN-98 and its applications to zeolites[J]. *Materials Science Forum*, 2000, 321/324:198-203.
- [20] 孙立国, 周健, 殷军伟, 等. 碳含量对 4Cr5Mo2V 热作模具钢显微组织及热稳定性的影响[J]. *机械工程材料*, 2020, 44(8):38-43.

责任编辑: 何莉