



H13 热作模具钢回火组织演变与力学性能调控

陈锦鹏¹, 王豪杰¹, 陈 彬², 田俊羽³, 李建立¹, 李光强¹, 王 强¹

(1 武汉科技大学, 钢铁冶金及资源利用教育部重点实验室, 武汉 430081; 2 大冶特殊钢有限公司, 黄石 435001;

3 武汉科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430081)

摘 要:以铸态 H13 热作模具钢为研究对象, 采用 1 100 °C 保温 20 min 油冷淬火后, 分别在 560、620、650 °C 下进行不同回火时间和回火次数的回火处理, 利用 OM、SEM、EPMA、XRD、EBSD 及硬度、夏比冲击试验研究回火工艺对其组织演变和力学性能的影响。结果表明: 回火温度是影响 H13 钢组织演变的主导因素。随着回火温度升高以及回火时间、次数增加, 马氏体板条特征逐渐弱化, 碳化物由细小弥散析出向聚集、球化和粗化转变, 残余奥氏体含量和马氏体固溶碳含量总体降低, 组织由回火马氏体向高温回火组织演变。560 °C 回火有利于保持较高硬度, 其中, 560 °C 回火 65 min+回火三次组的硬度最高, 为 54.6 HRC, 但冲击吸收功较低; 650 °C 回火可促进基体回复和碳化物球化, 其中, 650 °C 回火 65 min+回火两次组的冲击吸收功最高, 达到 15.39 J, 表现出了较好的冲击韧性。断口形貌由低温回火下的解理/准解理断裂逐渐向高温回火下的微孔聚集型韧性断裂转变。合理控制回火温度、回火时间和回火次数, 可实现 H13 钢硬度与韧性的协同调控。

关键词: H13 钢; 热作模具钢; 回火工艺; 组织演变; 残余奥氏体; 力学性能

DOI:10.20057/j.1003-8620.N260083 **中图分类号:** TG156.5

Microstructure Evolution and Mechanical Property Control of H13 Hot-work Die Steel during Tempering

Chen Jinpeng¹, Wang Haojie¹, Chen Cheng², Tian Junyu³, Li Jianli¹, Li Guangqiang¹, Wang Qiang¹

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2 Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China; 3 School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract : Taking as-cast H13 hot-work die steel as the research material, specimens were austenitized at 1 100 °C for 20 min followed by oil quenching, and subsequently subjected to tempering treatments at 560 °C, 620 °C and 650 °C with varying tempering durations and cycles. Optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), electron probe microanalysis (EPMA), X-ray diffraction (XRD), electron backscatter diffraction (EBSD), hardness measurements and Charpy impact tests were employed to investigate the effects of tempering parameters on microstructure evolution and mechanical properties of the steel. The results reveal that tempering temperature dominates the microstructure evolution of H13 steel. With increasing tempering temperature, time and number of cycles, the lath feature of martensite gradually weakens; precipitated fine dispersed carbides undergo aggregation, spheroidization and coarsening, while the retained austenite content and dissolved carbon content in martensite show an overall decrease, and the microstructure evolves from tempered martensite to high-temperature tempered microstructure. Tempering at 560 °C retains relatively high hardness, among which the group tempered at 560 °C for 65 min with three cycles achieves the maximum hardness of 54.6 HRC, yet a low impact absorbed energy. Tempering at 650 °C accelerates matrix recovery and carbide spheroidization, and the group tempered at 650 °C for 65 min with two cycles achieves the highest impact absorbed energy of 15.39 J with superior impact toughness. The fracture morphology gradually transforms from cleavage/quasi-cleavage fracture at low tempering temperature to dimple ductile fracture at high tempering temperature. Optimized regulation of tempering temperature, time and number of cycles enables synergistic improvement in hardness and toughness of H13 steel.

Key Words : H13 Steel; Hot-Work Die Steel; Tempering Process; Microstructure Evolution; Retained Austenite; Mechanical Properties

H13 钢是一种典型的 Cr-Mo-V 系热作模具钢, 具有良好的淬透性、强韧性匹配、热稳定性和抗回

火软化能力, 广泛用于压铸模、热挤压模和热锻模等热作模具。随着新能源汽车轻量化与一体化压

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U22A20173)

作者简介: 陈锦鹏(2002—), 男, 硕士; **E-mail:** 2350069469@qq.com;; **收稿日期:** 2026-06-08

通信作者: 王 强(1989—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** wangqiangwust@wust.edu.cn;

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

铸技术迭代升级,大型压铸模具服役工况大幅严苛,长期处于 600~700 °C 高温铝液冲刷、冷热循环热冲击、高压摩擦磨损及粘铝腐蚀的复合载荷作用下,对模具钢的淬透性、高温热稳定性、韧性、耐磨性及抗热疲劳性能提出了更高的要求^[1-4]。H13 钢的综合性能并非仅由合金成分决定,热处理过程中的显微组织转变与合金碳化物析出行为也是性能调控的关键。钢材淬火后可获得高硬度马氏体基体组织,但 Cr、Mo、V 等合金元素会提升奥氏体热稳定性、降低马氏体转变终止温度,致使室温组织中不可避免残留一定量残余奥氏体^[5-7]。残余奥氏体与高内应力淬火马氏体共存的亚稳组织体系,会显著恶化材料的尺寸稳定性与韧性,诱发组织畸变,最终导致模具变形、开裂失效^[8-9]。因此,通过精准回火工艺调控马氏体分解、残余奥氏体相变及碳化物析出行为,是获得组织均匀、性能强韧匹配的 H13 钢的核心途径,对提升压铸模具服役寿命具有重要工程价值。

在 H13 钢热处理制度中,回火是连接淬火组织与最终服役性能的关键环节。回火不仅能够降低淬火应力,更能通过控制亚稳组织转变和第二相析出行为,实现硬度、强度、韧性和尺寸稳定性的协调匹配^[10-13]。目前,国内外针对 H13 钢及同类热作模具钢的研究,主要集中在热处理工艺优化、碳化物演变规律、组织与力学性能调控及微量元素改性等核心方向^[14-15]。在热处理工艺研究中,现有成果系统探究了奥氏体化温度、均匀化退火、淬回火制度及淬火介质等参数的影响规律^[16]。相关研究证实,热处理参数可直接调控钢材奥氏体晶粒度、基体组织,进而影响硬度与强韧性^[17];同时双淬回火等复合热处理工艺,能够有效优化新型电渣铸造型模具钢的综合力学性能,为工艺改良提供了依据^[18-20]。也有研究明确了 H13 钢在电渣铸锭、锻造、淬回火全过程的碳化物析出特征,探明了回火温度对高碳 H13 钢材料渗碳层组织、硬度及碳化物分布的影响,完善了包括 H13 钢在内等多类热作模具材料淬回火后碳化物与硬度的关联机制^[21-24]。除此之外,回火次数和回火时间也是影响 H13 钢最终组织与性能的重要工艺参数^[25-28]。由于 H13 钢合金含量较高,淬火后马氏体转变往往并不完全,单次回火难

以彻底消除残余奥氏体。多次回火可使前一次回火后形成的新生马氏体在后续回火过程中继续分解,并进一步促进残余奥氏体转变和碳化物析出,从而提高组织稳定性和性能一致性。适当延长回火时间也有利于残余应力释放和碳化物均匀析出;但回火时间过长或回火次数过多时,碳化物粗化和基体过度回复会导致材料软化,使硬度和耐磨性下降。因此,回火温度、回火时间和回火次数之间存在耦合作用,需要根据 H13 钢的成分特点、模具尺寸和服役条件进行综合优化。

关于 H13 钢回火行为的研究已取得一定进展,但在不同回火温度、回火时间和回火次数共同作用^[29-30]下,残余奥氏体转变、马氏体分解、碳化物析出与粗化以及力学性能变化之间的对应关系仍需进一步明确。基于此,以 H13 钢为研究对象,系统研究不同回火温度、回火时间和回火次数条件下 H13 钢的显微组织演变与力学性能变化规律,揭示回火工艺对 H13 钢组织与性能的调控机制,以及为 H13 钢热处理工艺优化、组织稳定性提升以及高寿命热作模具制造提供理论依据和试验支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用材料为某特钢厂生产的铸态 H13 钢,其化学成分见表 1。

根据图 1 所示热膨胀曲线可知,试验钢的奥氏体化临界点为 $Ac_1 = 881\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $Ac_3 = 938\text{ }^{\circ}\text{C}$,便于后续设置热处理温度。

1.2 试验方法

采用线切割方法将铸态 H13 钢板加工成尺寸为 85 mm × 18 mm × 15 mm 的块状试样,随后将试样分批置于箱式电阻炉中进行淬火及多次回火处理。为分解残余奥氏体、促进合金碳化物均匀球化、彻底释放内应力,获得组织稳定、强韧性优异、尺寸精度良好的试样,故进行表 2 具体工艺方案。试样淬火时分别在 360、750 °C 下梯度保温 30 min,经 1 100 °C 保温 20 min 奥氏体化后进行油冷淬火;多次回火过程中,各次回火保温时间保持一致,回火后均采用空冷方式冷却。

表 1 H13 钢的化学成分 (质量分数)
Table 1 Chemical composition of H13 steel

元素	Cr	Mo	Mn	Al	V	C	Si	S	P	N	O	Fe
成分	4.96	1.32	0.34	0.04	0.91	0.38	1.18	0.012	0.022	0.010 6	0.005 59	bal.

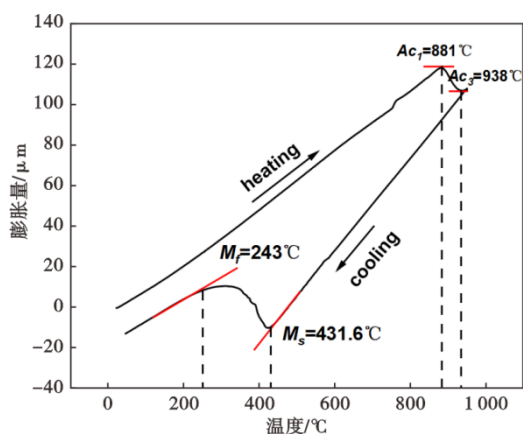


图1 H13钢热膨胀曲线

Fig. 1 Thermal expansion curve of H13 steel

表2 H13钢热处理试验方案

Table 2 Heat treatment schedule for H13 steel

试样号	淬火温度/°C	淬火保温时间/min	回火温度/°C	回火时间/min	回火次数/次
1	1 100	20	560	60	2
2	1 100	20	560	65	3
3	1 100	20	560	70	4
4	1 100	20	620	60	3
5	1 100	20	620	65	4
6	1 100	20	620	70	2
7	1 100	20	650	60	4
8	1 100	20	650	65	2
9	1 100	20	650	70	3

热处理完成后,将块状试样加工成金相试样。采用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)观察试样显微组织,并结合能谱仪(EDS)进行微区元素分析;采用电子背散射衍射技术(EBSD)表征回火马氏体、残余奥氏体及碳化物等组织特征;采用X射线衍射仪(XRD)分析试样物相组成;采用电子探针显微分析仪(EPMA)对试样微区元素组成及元素分布进行定性和定量分析。采用洛氏硬度计测定试样表面硬度,每个试样选取5个不同位置进行测试,并取平均值作为最终硬度值。按照GB/T 229—2020制备冲击试样,采用摆锤冲击试验机进行冲击性能测试,并作断口形貌观察。

2 试验结果及讨论

2.1 组织演变

图2和图3分别为不同热处理工艺后H13钢的光学显微组织和SEM形貌。可以看出,560 °C回火样品仍以回火马氏体为主,板条状或针状形貌较为清晰,碳化物主要呈细小弥散析出状态。回火温度

升至620 °C后,马氏体板条边界逐渐模糊,基体发生明显回复,碳化物数量增加并向板条边界和亚结构处聚集,组织表现出由回火马氏体向高温回火组织过渡的特征。650 °C回火时,基体方向性进一步减弱,组织更加均匀,碳化物进一步球化和粗化,呈现较明显的高温回火组织特征。可以看出,不同温度下的组织存在显著的差异,而相同温度下,不同时间、次数的组织变化仅表现在如碳化物分布、板条清晰度的轻微变化,没有发生组织类型的改变,其变化远小于不同温度之间的差异。总体来看,回火温度是控制组织类型转变的主导因素;回火时间延长和回火次数增加可促进碳化物析出、球化和组织均匀化,但其影响弱于回火温度。

图4-6为不同热处理工艺后H13钢的EPMA二次电子图像及C、Mn、V元素面分布图。由于Cr元素分布在检测表征时并无明显区别,故此处未作展示。560 °C回火时,组织仍保留明显马氏体板条特征,C和V等元素富集信号较弱,说明析出相尺寸较小且分布较为弥散。回火温度升至620 °C后,元素富集信号增强,局部区域尤其是板条边界和亚结构处出现较明显的C、V富集,表明碳化物析出和长大过程逐渐加剧。当回火温度达到650 °C时,点状或颗粒状富集区明显增多,合金元素向碳化物中扩散和偏聚的趋势更加显著,说明碳化物发生了进一步球化和粗化。Mn元素整体分布相对均匀,仅局部可见少量MnS夹杂。总体而言,随回火温度升高及回火时间、次数增加,合金元素由基体固溶状态逐渐向碳化物中富集,碳化物由细小弥散析出向聚集、长大和球化粗化转变。

图7为H13钢在不同热处理工艺后的XRD图谱、残余奥氏体体积分数及马氏体固溶碳含量。结果表明,随着回火温度升高、回火时间延长和回火次数增加,残余奥氏体含量和固溶碳含量总体呈下降趋势,其中回火温度的影响最为显著。这说明回火过程中残余奥氏体逐渐分解或在冷却过程中发生转变,同时过饱和马氏体中的碳不断向碳化物中扩散并析出,使基体固溶碳含量降低,组织稳定性提高。

图8为H13钢在不同热处理工艺后的EBSD相图(放大倍数5000倍,步长0.04 μm)。其中,蓝色区域为残余奥氏体,红色区域为α-Fe基体(回火马氏体或铁素体),绿色区域为碳化物相。受限于步长与信号灵敏度,基体中纳米级碳化物难以被EBSD有效识别,故相分数分析未包含该部分细小析出

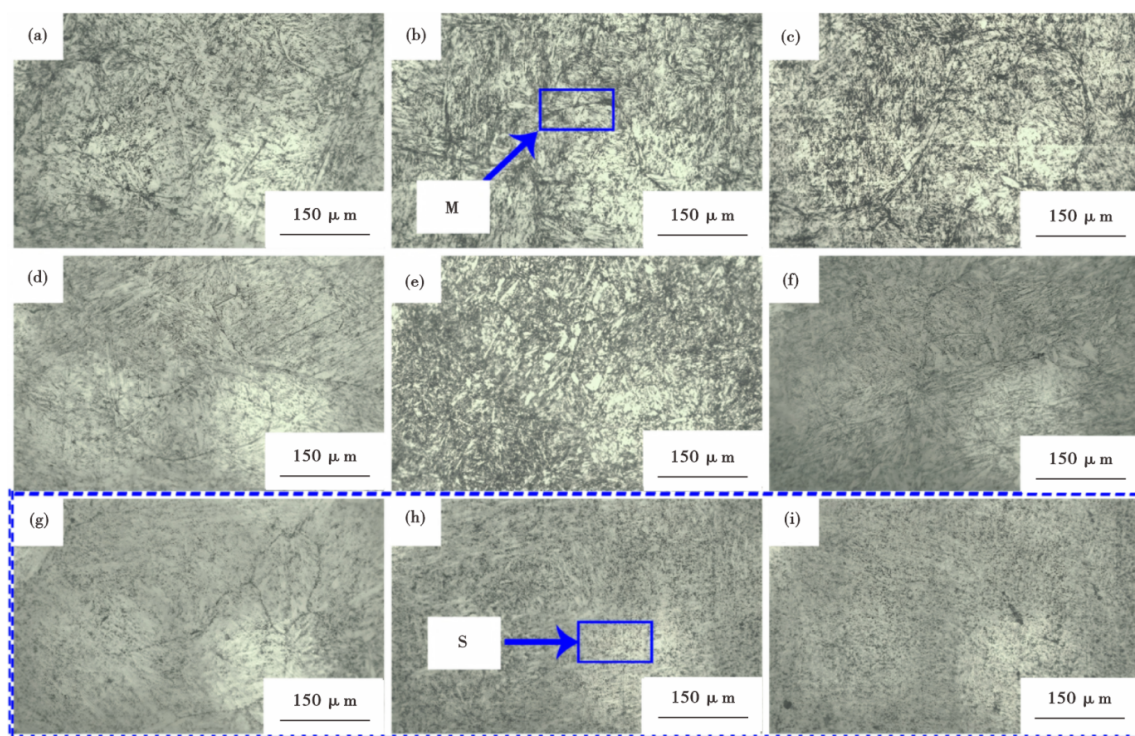


图2 不同热处理工艺下H13钢的光学显微组织:(a)–(i)对应1–9号样(M代表马氏体,S代表索氏体)

Fig. 2 Optical microstructures of H13 steel under different heat treatment processes: (a)–(i) correspond to Sample 1–9 (M = Martensite, S = Sorbite)

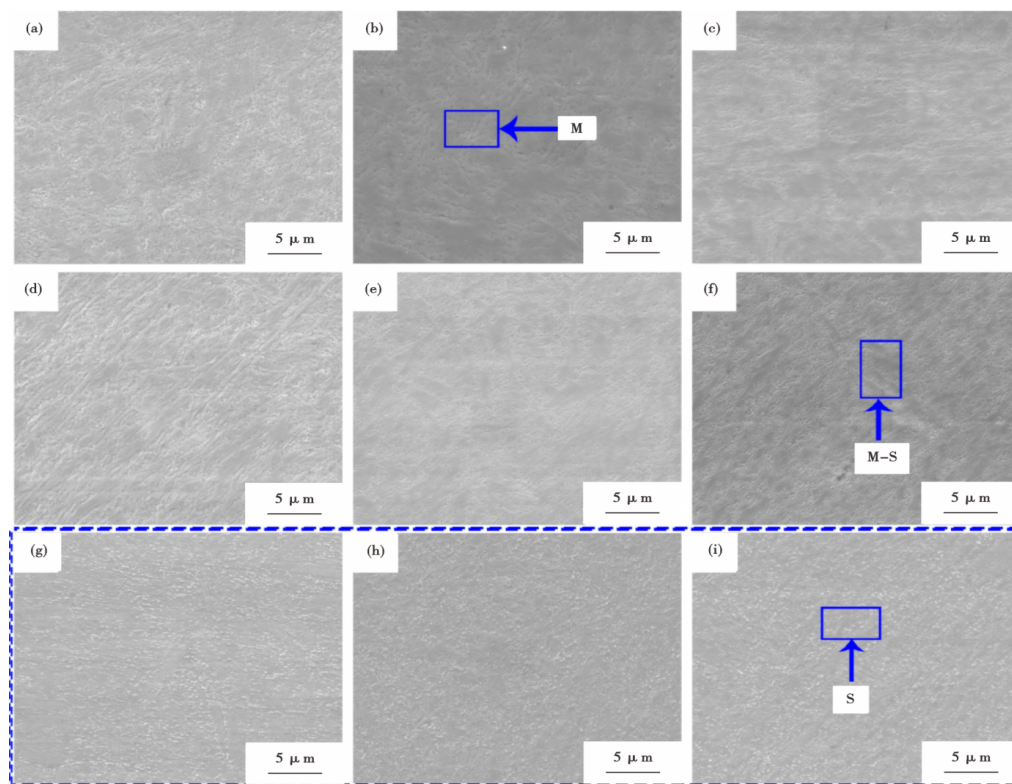


图3 不同热处理工艺下H13钢的SEM组织形貌:(a)–(i)对应1–9号样(M代表马氏体,S代表索氏体,M-S代表马氏体-索氏体过渡态)

Fig. 3 SEM morphologies of H13 steel under different heat treatment processes: (a)–(i) correspond to Sample 1–9 (M = Martensite, S = Sorbite, M-S = Martensite–Sorbite transitional structure)

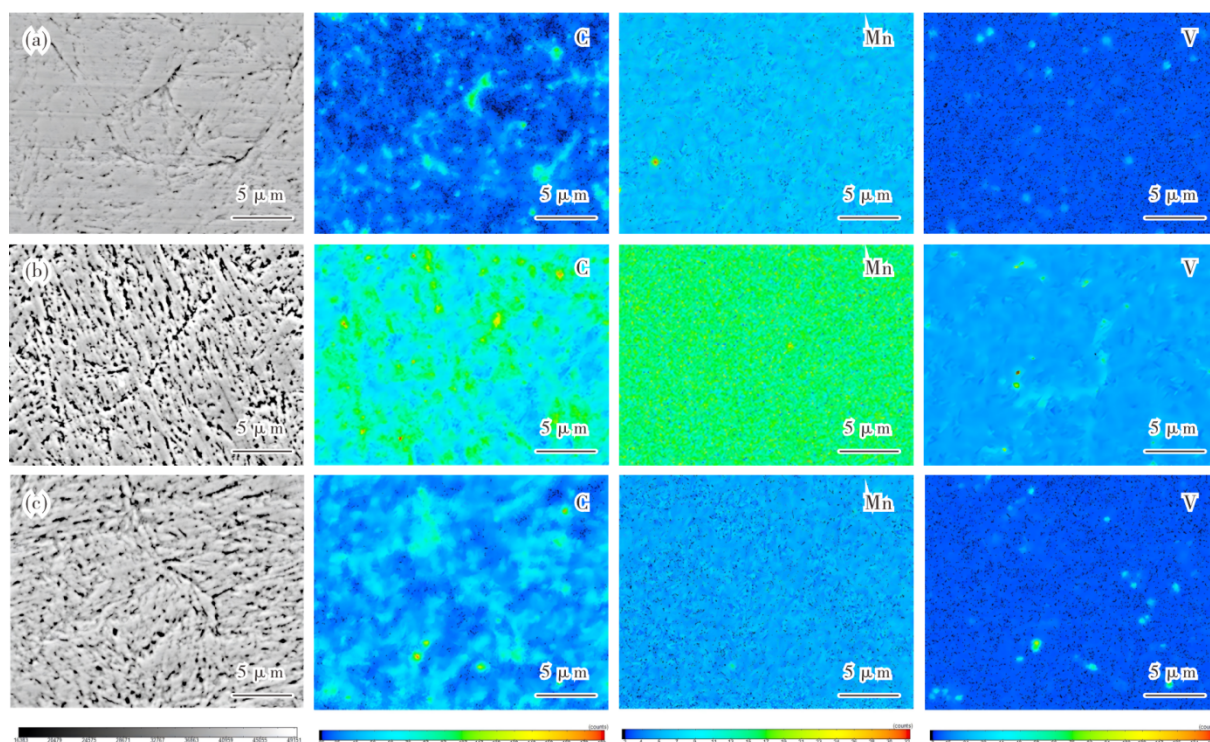


图4 1-3号样EPMA元素面分布图:(a)-(c)对应1-3号样

Fig. 4 EPMA elemental distribution maps of Sample 1-3: (a)-(c) correspond to Sample 1-3

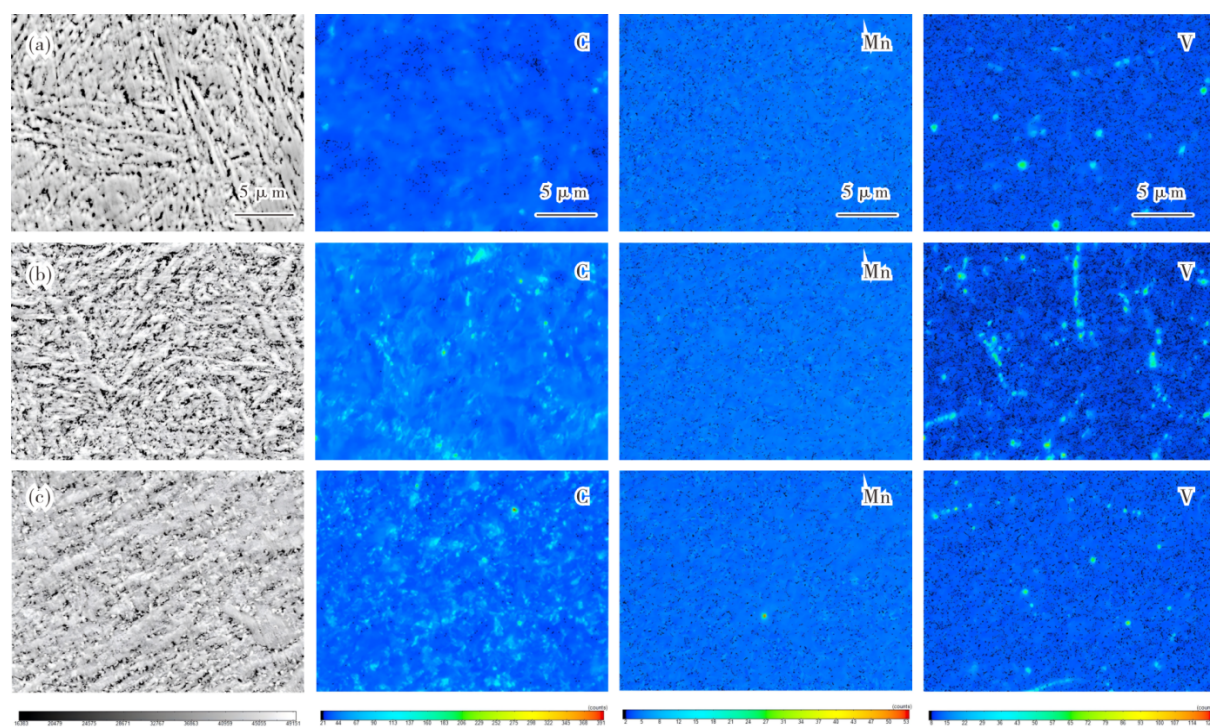


图5 4-6号样EPMA元素面分布图:(a)-(c)对应4-6号样

Fig. 5 EPMA elemental distribution maps of Sample 4-6: (a)-(c) correspond to Sample 4-6

相,相关工艺对纳米碳化物析出行为的影响,可通过硬度、冲击韧性等力学性能以及XRD分析结果间接反映。可以看出,560℃回火样品中基体仍保留

较完整的马氏体板条形态;随着回火温度升至620、650℃,板条边界逐渐模糊,组织方向性减弱,基体回复程度提高。碳化物相含量随回火温度升高及

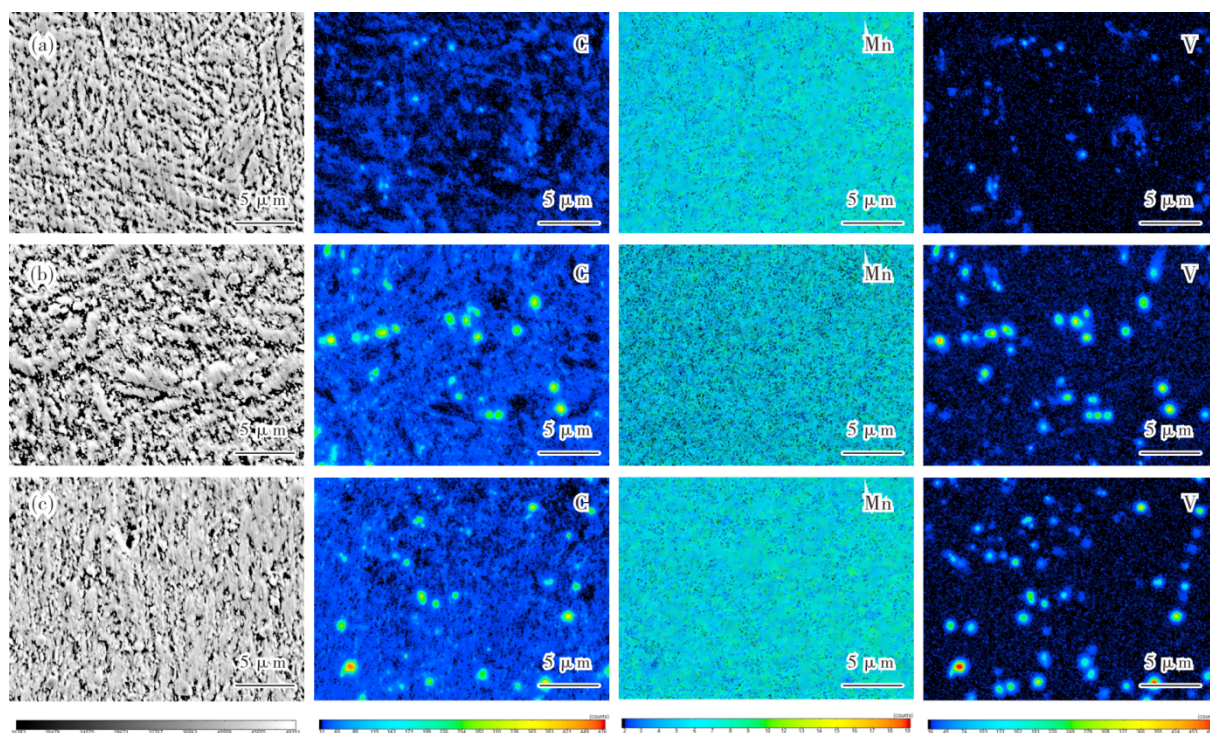


图6 7-9号样EPMA元素面分布图:(a)-(c)对应7-9号样

Fig. 6 EPMA elemental distribution maps of Sample 7-9; (a)-(c) correspond to Sample 7-9

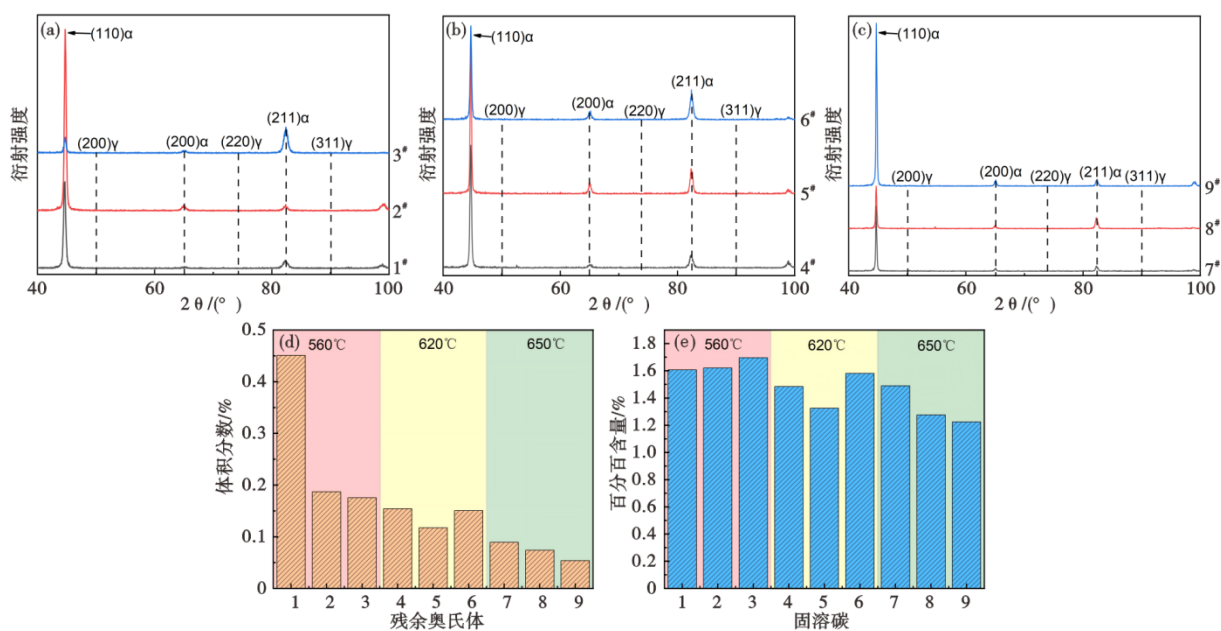


图7 H13钢不同热处理工艺下的(a-c)XRD图谱,(d)残余奥氏体体积分数,(e)固溶碳含量

Fig. 7 XRD patterns (a-c) of H13 steel under different heat treatment processes, (d) volume fraction of retained austenite, (e) dissolved carbon content

回火时间、次数增加由约1.7%增加至约3.4%,分布形态由零星点状弥散分布逐渐转变为沿板条边界或基体内部的粒状分布,反映出碳化物析出、聚集和粗化过程。EBSD结果中残余奥氏体含量始终较低,结合XRD结果可知,淬火后残余奥氏体在回火

过程中基本发生分解或转变。

2.2 力学性能

表3为H13钢在不同回火工艺下的力学性能测试结果。可以看出,回火参数对硬度和冲击吸收功具有显著影响,且二者总体呈反向变化趋势。

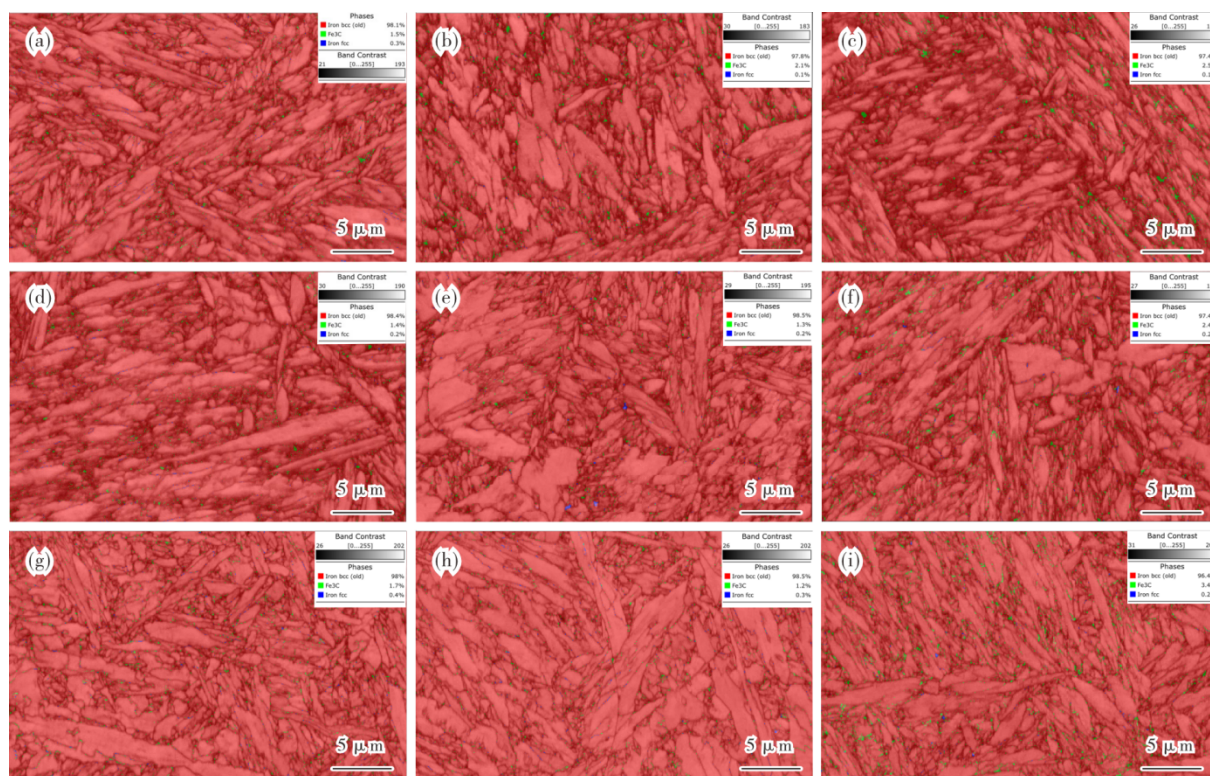


图 8 不同热处理工艺下 H13 钢的 EBSD 相图: (a)–(i) 对应 1–9 号样

Fig. 8 EBSD phase maps of H13 steel under different heat treatment processes: (a)–(i) correspond to Sample 1–9

560 °C 回火条件下, 2 号和 3 号样硬度分别达到 54.6、53.1 HRC, 说明较低回火温度有利于保持回火马氏体基体和弥散碳化物产生的强化作用, 但其冲击吸收功仅为 2.22 ~ 2.67 J, 韧性较低。620 °C 回火后, 试样硬度处于 41.1 ~ 48.4 HRC, 冲击吸收功为 2.43 ~ 5.03 J, 表明马氏体回复和碳化物聚集长大使内应力得到一定释放, 韧性有所改善。650 °C 回火条件下, 马氏体基体发生完全再结晶形成等轴铁素体, 位错强化与固溶强化效应显著减弱, 组织最终转变为硬度较低的回火索氏体, 因此, 8 号样和 9 号样硬度出现了明显的台阶式下降, 从 47.5 HRC 骤降至 26.4 ~ 28.7 HRC, 而冲击吸收功提高至 8.96 ~ 15.39 J, 其中 8 号样冲击吸收功最高, 表现出较好的抗冲击性能。相比于 8 号样, 回火时间更长、次数更多的 9 号样的硬度却反而变高, 吸收功下降, 是 8 号样中有残余奥氏体进一步转化为了马氏体, 以及合金碳化物的析出所导致的, 即二次硬化现象。7 号样仍保持较高硬度和较低吸收功, 说明回火温度、回火时间和回火次数之间存在明显耦合作用, 单一参数不足以完全决定最终性能。总体而言, 适当提高回火温度并优化回火时间和次数, 有利于改善 H13 钢的韧性; 而较低温度回火则更有利于保持高硬度。

表 3 H13 钢在不同热处理工艺下的力学性能

Table 3 Mechanical properties of H13 steel under different heat treatments

试样编号	吸收功/J	硬度(HRC)
1	7.35	38.5
2	2.22	54.6
3	2.67	53.1
4	2.43	48.4
5	4.42	41.1
6	5.03	42.7
7	4.19	47.5
8	15.39	26.4
9	8.96	28.7

图 9 为 H13 钢经不同热处理工艺后夏比冲击断口的 SEM 形貌。560 °C 回火样品断口以解理和准解理断裂特征为主, 可见解理台阶、河流花样及局部沿晶断裂痕迹, 韧窝较少, 表明材料在冲击载荷下以脆性断裂为主。620 °C 回火样品断口中解理面比例降低, 局部出现细小浅韧窝, 断裂方式由脆性断裂向韧脆混合断裂转变, 说明基体回复、内应力释放及碳化物分布变化提高了材料塑性变形能力。650 °C 回火样品尤其是 8 号和 9 号样断口中可见较多韧窝, 部分韧窝底部存在碳化物或夹杂颗粒, 呈

现微孔形核、长大和聚合的韧性断裂特征,表明裂纹扩展阻力显著提高。这与前述组织演变和冲击吸收功变化规律相一致。

3 结论

研究了回火温度、回火时间和回火次数对 H13 热作模具钢的组织演变及力学性能的影响规律。通过 OM、SEM、EPMA、XRD、EBSD 等表征手段,并结合硬度和冲击性能测试,得到以下结论:

1) 回火温度是调控 H13 钢组织演变的主导工艺因素。560 °C 回火时,基体以保留板条特征的回火马氏体为主,碳化物细小弥散;620 °C 回火时,马氏体基体发生明显回复,碳化物逐渐向板条边界和亚结构处聚集,组织呈过渡特征;650 °C 回火时,基体方向性进一步减弱,碳化物发生球化和粗化,组织均匀性提高。回火时间延长和回火次数增加可

进一步促进碳化物析出、长大及合金元素扩散。

2) XRD 和 EBSD 结果表明,随回火温度升高及回火时间、次数增加,残余奥氏体含量和马氏体固溶碳含量总体降低,碳化物相含量增加。EPMA 试验表明,C、V 等元素逐渐由基体向碳化物富集,说明回火过程促进了马氏体分解、残余奥氏体转变和碳化物析出粗化。

3) 力学性能与组织演变密切相关。560 °C 回火 65 ~ 70 min 并进行 3 ~ 4 次回火时,试样硬度较高,最高达 54.6 HRC,但冲击吸收功较低;650 °C 回火 65 min 并进行 2 次回火时,650 °C 回火 65 min+ 回火两次组的冲击吸收功最高,为 15.39 J,硬度为 26.4 HRC,表现出较好的韧性。说明低温回火有利于保持硬度,高温回火有利于改善冲击韧性。

4) 低温回火样品以解理/准解理断裂为主;中温回火样品呈韧脆混合断裂;高温回火样品韧窝数量

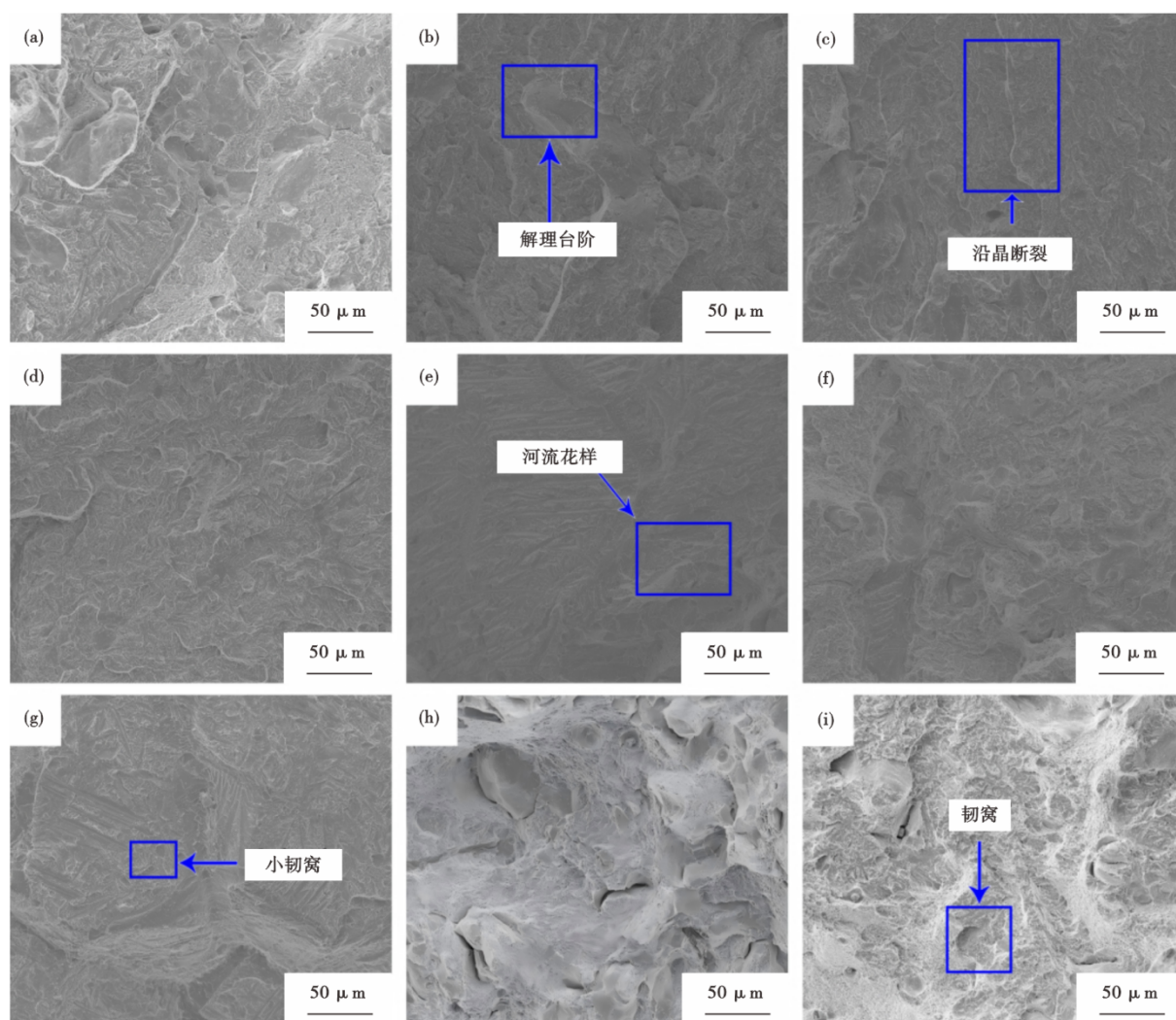


图9 不同热处理工艺下 H13 钢冲击断口 SEM 形貌:(a)~(i) 对应 1~9 号样

Fig. 9 SEM fractographs of impact fractures of H13 steel under different heat treatment processes: (a)~(i) correspond to Sample 1~9

明显增加,表现出微孔聚集型韧性断裂特征。综合硬度与冲击性能结果,实际生产中应根据模具服役需求合理选择回火制度:以高硬度和耐磨性为目标

时,可采用560℃,65~70 min,3~4次回火工艺;以高韧性和抗冲击性能为目标时,可优先考虑650℃65 min 2次回火工艺。

参考文献

- [1] 余丽生,戴彬倩,陈虹颖,等. 建设模具产业发展新高地的实践探索[J]. 西部财会, 2024(1): 77-79.
- [2] 谢耀洲,董航宇. 常见工模具钢分类及热处理工艺[J]. 金属加工(热加工), 2024(6): 1-10.
- [3] 谢奕心,程晓农,鞠玉琳,等. H13及H13改进型热作模具钢热处理过程中碳化物析出演化行为研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(23): 173-180.
- [4] Zhou J, Ma D S, Chi H X, et al. Microstructure and properties of hot working die steel H13MOD[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2013, 20(9): 117-125.
- [5] 董加坤,朱祖昌,张宏康,等. 国外粉末冶金工模具钢的种类及特性[J]. 热处理, 2010, 25(2): 1-5.
- [6] Zhang C, Cao Y Q, Chen J Y, et al. Microstructure stabilities of newly developed hot-working die steel and H13 steel at elevated temperature [J]. Steel Research International, 2023, 94 (6) : 2200811.
- [7] 王从昆. 回火温度对挤压模具H13钢组织和性能影响[C]//中国铸造协会,《铸造工程》杂志社. 第十八届中国铸造协会年会论文集. 2022:461-464.
- [8] 蒋沁洋,丁恒楠,罗锐,等. 改进型H13钢的微观形貌及高温性能[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(11): 1411-1418.
- [9] Ning A G, Gao R, Yue S, et al. Effects of cooling rate on the mechanical properties and precipitation behavior of carbides in H13 steel during quenching process [J]. Materials Research Express, 2021, 8(1): 016503.
- [10] 刘文彬,伍玩秋,黄礼万,等. 冷处理及回火次数对刀剪用M390粉末钢组织和性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2023, 33(2): 57-64.
- [11] Dhokey N B, Maske S S, Ghosh P. Effect of tempering and cryogenic treatment on wear and mechanical properties of hot work tool steel (H13)[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 3006-3013.
- [12] 陈浩,雷佳乐. 压铸模具钢双重淬火工艺的晶粒细化机制[C]//中国机械工程学会,铸造行业生产力促进中心. 第十三届全国铸造年会暨2016中国铸造活动周论文集,2016:39.
- [13] 董丽丽,周健,迟宏宵,等. 改进型H13热作模具钢的热处理工艺优化[J]. 材料热处理学报, 2025, 46(9): 142-151.
- [14] 王立强,樊湘芳,赵健明. 双重淬火对轧管机芯棒用H13钢组织及高温耐磨性的影响[J]. 机械工程师, 2026(1): 73-77+81.
- [15] Li J Y, Chen Y L, Huo J H. Mechanism of improvement on strength and toughness of H13 die steel by nitrogen[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 640: 16-23.
- [16] 黄日清,任英,张立峰,等. 低碳马氏体不锈钢热处理过程中夹杂物转变动力学[J]. 中国冶金, 2024, 34(11): 44-52.
- [17] 杜思敏,陈文雄,王洪利,等. 奥氏体化温度对1.2367热作模具钢显微组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(11): 90-96.
- [18] 宁安刚,郭汉杰,陈希春,等. H13钢电渣锭、锻造及淬回火过程中碳化物析出行为[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(7): 895-902.
- [19] Liu J, Yu H, Zhou T, et al. Effect of double quenching and tempering heat treatment on the microstructure and mechanical properties of a novel 5Cr steel processed by electro-slag casting [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 619: 212-220.
- [20] 徐慧. H13钢高温淬回火后奥氏体晶粒度对强韧性的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(12): 226-229.
- [21] 王晓莉,张潇潇,常富强,等. 高温均匀化退火及淬火介质对H13钢组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(18): 116-118.
- [22] 贾寓真,吴懿萍,刘国跃. 新型粉末冶金高速钢ASP2051淬回火后的硬度及碳化物分析[J]. 金属热处理, 2019, 44(9): 79-84.
- [23] Luo T F, Wang W L, Luo S, et al. Influence mechanisms of Mg on solidification microstructure and primary carbides of H13 steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2025, 56(6): 6335-6347.
- [24] 郭浩,李志龙,王彪,等. 回火温度对高碳H13钢渗碳层组织及硬度的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(4): 277-282.
- [25] Wei M X, Wang S Q, Zhao Y T, et al. Wear behavior and mechanism of a Cr-Mo-V cast hot-working die steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(6): 1646-1656.
- [26] 马鹤. 热处理对优化H13钢组织和摩擦磨损性能的影响[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2025.
- [27] 彭艳,刘才溢,王宁宁,等. 一种新型热处理工艺对中碳钢组织性能影响[J]. 钢铁, 2021, 56(1): 85-90.
- [28] 焦帅杰,王国佛,陈波,等. 回火工艺对超级马氏体不锈钢熔敷金属组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2025, 46(6): 98-104.
- [29] 赵家萍. 淬硬钢回火时间效应和回火工艺的优化[C]//中国兵工学会金属材料学会兵器产品失效分析交流会. 太原机械学院, 1985: 16.
- [30] 王铁军,杨博,梁晨,等. 退火温度对热轧态M390组织与性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(12): 12122-12126.