

回火温度对航空用中碳低合金钢显微组织及力学性能的影响

刘敬伟¹, 周世同², 武宏伟¹, 曾敏¹, 张守银²

1. 江西洪都国际机电有限责任公司 江西南昌 330063

2. 南昌航空大学材料科学与工程学院 江西南昌 330063

摘要: 中碳低合金钢因其具有较高的强度和良好的淬透性而广泛应用于飞机结构件。采用拉伸、硬度、冲击试验以及金相和扫描电子显微镜研究了回火温度(200~650℃)对某锁座零部件用中碳低合金钢显微组织及力学性能的影响。试验钢淬火后获得板条马氏体组织, 200℃和400℃回火后分别获得回火马氏体和回火屈氏体, 550~650℃回火后均获得回火索氏体组织; 随回火温度的升高, 试验钢的强度、硬度不断降低, 200℃、400℃和550℃回火后, 试验钢均呈现明显沿晶脆裂, 提高回火温度至600℃以上时, 试验钢呈现韧性断裂, 塑性、韧性得到显著改善, 但650℃回火后的强度和塑性均低于600℃回火; 试验钢600℃回火后获得良好的强韧性匹配, 抗拉强度达1000MPa级、屈服强度达900MPa、硬度达290HBW, 断后伸长率达13%以上、断面收缩率达21%以上、冲击吸收能量达到40J, 满足该零件的力学性能要求。

关键词: 中碳低合金钢; 回火温度; 显微组织; 力学性能

Effect of tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of a medium carbon low alloy steel for aviation applications

LIU Jingwei¹, ZHOU Shitong², WU Hongwei¹, ZENG Min¹, ZHANG Shouyin²

1. Jiangxi Hongdu International Electromechanical Co., Ltd., Nanchang 330063, Jiangxi, China

2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China

Abstract: Medium carbon low alloy steel is widely used in aircraft structural components due to its high strength and good hardenability. In this study, the effects of tempering temperature (200~650℃) on the microstructure and mechanical properties of a medium carbon low alloy steel for lock seat components were investigated by tensile, hardness, impact tests, metallographic and scanning electron microscopy. The lath martensite was formed in the studied steel after quenching. After tempering at 200℃ and 400℃, tempered martensite and tempered troostite were formed respectively. After tempering at 550~650℃, tempered sorbite was formed. With the increase of tempering temperature, the strength and hardness of the studied steel decreased continuously. After tempering at 200℃, 400℃ and 550℃, the studied steel showed obvious intergranular brittle fracture. When the tempering temperature was increased to 600℃ and above, the studied steel showed ductile fracture, and the tensile plasticity and impact toughness were significantly improved. However, the tensile strength and plasticity after tempering at 650℃ were

lower than those after tempering at 600℃. After tempering at 600℃, the studied steel obtained a good combination of strength and toughness, with tensile strength reaching 1000MPa level, yield strength reaching 900MPa, hardness reaching 290HBW, elongation after fracture reaching more than 13%, reduction of area reaching more than 21%, and impact absorbed energy reaching 40J. These mechanical properties meet the requirements of the component.

Keywords: medium carbon low alloy steel; tempering temperature; microstructure; mechanical properties

1 序言

钢是应用最广的工程结构材料，马氏体是钢中的强化相，淬火是获得马氏体的主要热处理工艺。碳含量决定了淬火马氏体的硬度，而合金元素主要影响钢的淬透性。淬火钢的强度、硬度很高，但内应力较大，塑性、韧性较差，回火可以消除淬火钢的内应力，提高塑性和韧性，因而淬火后需通过回火来进一步调控钢的组织 and 性能^[1-5]。机械制造、航空航天等领域的关键零部件需具备较高的强度和良好的韧性，从合金设计的角度来考虑，中碳含量能保证高强度的同时不显著损害韧性，添加少量Mn、Cr、Mo和Ni等合金元素可以显著提高淬透性^[6, 7]，同时不会大幅提高生产成本。因此，中碳低合金钢往往作为上述零部件的首选材料之一。

回火温度对中碳低合金钢的显微组织变化及相应的力学性能具有显著影响^[1, 3, 4, 8]。回火处理可以使淬火马氏体分解，转变为更加稳定的相，回火温度的高低直接决定了淬火马氏体中残余应力释放程度、相变速度和相变所形成的新显微组织，这些变化会导致力学性能显著改变。一般来说，较低的回火温度可以保持较高的强度，但可能导致韧性不足，较高的回火温度可以有效改善塑性和韧性，获得优异的强度-韧性权衡，而过高的回火温度又可能造成强度下降明显，不满足材料的性能要求。同时，回火过程中也可能出现塑性、韧性突然降低的现象，即出现回火脆性^[9-12]。因此，如何选择回火温度以获得理想的综合力学性能至关重要。

飞机锁座零部件在服役过程中承受较大静载荷与一般动载荷^[13]，需具备较高的强度和良好的冲击韧度，该类零部件多采用中碳低合金钢进行制备。本文旨在系统研究回火温度对某锁座用中碳低合金钢的显微组织和力学性能的影响。该类结构件的力学性能需要满足HB 5001—1992《结构钢熔模铸件

技术标准》中的要求，其中抗拉强度 $\geq 980\text{MPa}$ 、屈服强度 $\geq 835\text{MPa}$ 、硬度达277~331HBW，断后伸长率 $\geq 7.0\%$ 、断面收缩率 $\geq 15\%$ 、室温冲击吸收能量 $KU_2 \geq 16\text{J}$ 。通过检测强度、塑性和韧性，以及分析不同回火温度下的显微组织特征，揭示组织与性能的关系。本研究可为优化中碳低合金钢的热处理工艺、提高其力学性能提供理论和试验依据。

2 试验材料与方法

试验用钢的主要化学成分见表1。采用中频感应炉冶炼及熔模铸造工艺制得梅花形试棒（按HB 5001—1992执行），对铸态试样进行如下热处理：900℃保温2h，随炉冷却至600℃以下出炉空冷（退火），再900℃保温1h，出炉后油冷至200℃以下（淬火），再分别在200℃、400℃、550℃、600℃、650℃保温2h，出炉后空冷（回火）。采用HB 3000C电子布氏硬度计检测淬火态及回火态试样的硬度，采用WE-300型电子万能试验机对回火后的试样进行室温拉伸（ $\phi 5\text{mm}$ 、标距25mm的拉伸试样，变形速率为0.5mm/min）试验，检测试验钢的抗拉强度和塑性，采用JBN-300B冲击试验机检测试验钢的室温冲击吸收能量（ KU_2 ），拉伸和冲击试验每种状态各检测两个样品；采用金相显微镜（OLYMPUS GX51）和扫描电子显微镜（Zeiss EVO25）观察试验钢的显微组织，采用扫描电镜（FEI Quanta 650FEG）对冲击试样的断口进行分析。

表1 试验用钢的主要化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	M	S	P
0.40~0.45	0.6~1.0	0.7~1.0	0.7~1.0	0.1~0.2	≤ 0.025	≤ 0.025

3 试验结果及讨论

3.1 力学性能

图1所示为试验钢淬火态及淬火+回火态试样的布氏硬度。从图1可看出, 淬火后试验钢获得接近600HBW的高硬度, 随着回火温度的升高, 硬度不断降低。200℃回火后, 试验钢仍保持550HBW左右的高硬度, 而提高回火温度至400℃以上时, 试验钢的硬度下降明显, 经400℃、550℃、600℃和650℃回火后, 硬度分别约为450HBW、350HBW、300HBW和250HBW。

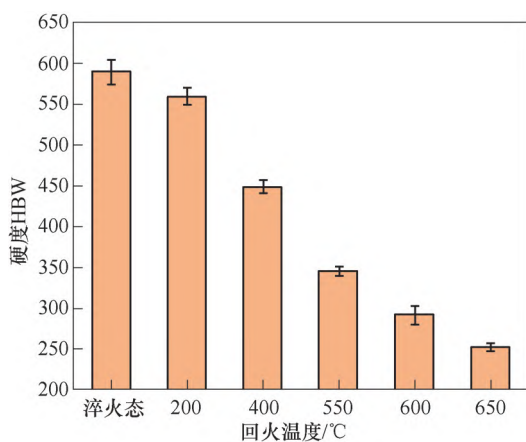


图1 试验钢淬火态及淬火+回火态的硬度

图2~图4所示为试验钢抗拉强度及塑性随回火温度的变化规律。从图2~图4可看出, 强度变化的总体趋势与硬度基本一致, 随着回火温度的升高, 试验钢的强度不断降低。200℃和400℃回火后, 试验钢均发生了明显脆性断裂（试样均断于标距之外），断后伸长率和断面收缩率均<5%，所测强度为断裂强度且数值波动较大。550℃和600℃回火后, 试验钢的强度有所降低, 但仍能达到900MPa级

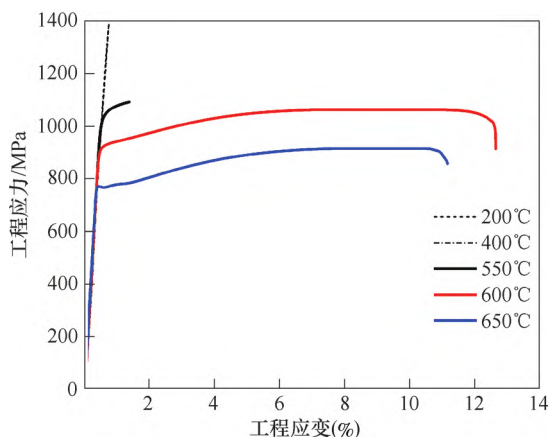


图2 不同回火温度试验钢的工程应力-应变曲线

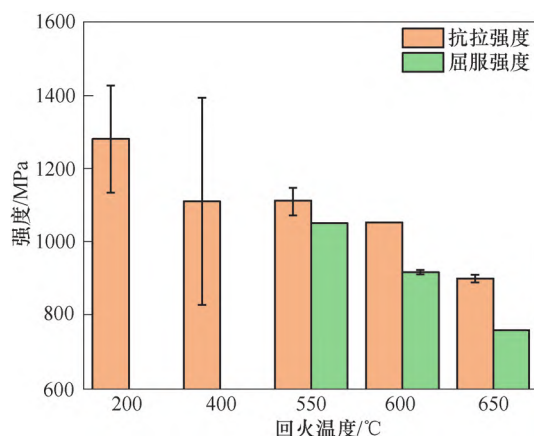


图3 回火温度对试验钢的屈服强度及抗拉强度的影响（200℃和400℃均为断裂强度）

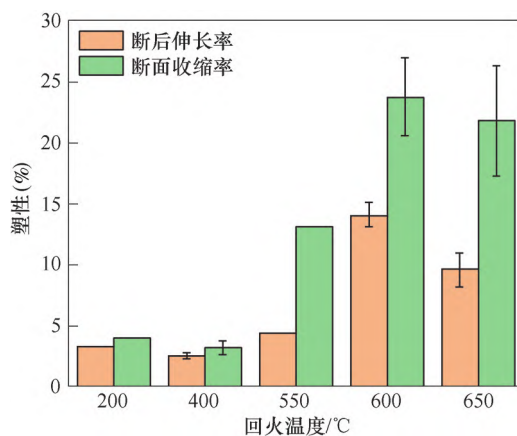


图4 回火温度对试验钢的断后伸长率及断面收缩率的影响

的屈服强度和1000MPa级的抗拉强度, 而650℃回火后, 强度下降明显。但550℃回火后的试验钢仍表现出脆性断裂, 断面收缩率较200℃和400℃回火后有所提高, 但断后伸长率仍<5%。提高回火温度至600℃以上时, 试验钢的塑性得到显著改善, 600℃回火后的断后伸长率和断面收缩率分别达到14%和24%, 但650℃回火后的拉伸塑性较600℃回火又有所降低。

图5所示为试验钢的冲击吸收能量随回火温度的变化规律。从图5可看出, 随回火温度的升高, 试验钢的冲击吸收能量不断提高。200℃和400℃回火后的冲击吸收能量均<5J, 而600℃和650℃回火后的冲击吸收能量分别达到39.5J和49J, 较中低温回火得到明显改善。

3.2 显微组织

试验钢淬火态与淬火+回火态金相组织和扫描电镜照片如图6、图7所示。从图6a、7a可看出, 试

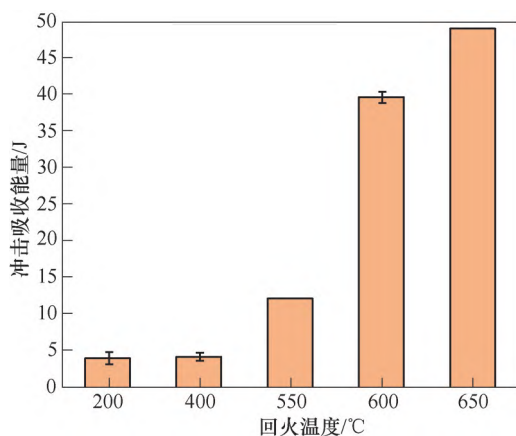


图5 回火温度对试验钢冲击性能的影响

试验钢淬火后获得板条马氏体组织；从图6b、7b可看出，200℃回火后分别获得回火马氏体；从图6c、7c可看出，400℃回火后分别获得回火屈氏体组织；从图6d~f、图7d~f可看出，550~650℃回火后均获得回火索氏体组织。

上述中碳低合金钢在回火时的组织转变主要包括：马氏体分解、渗碳体析出、 α 相回复及再结晶、渗碳体球化及粗化（淬火后残留奥氏体含量很少）^[1]。力学性能的变化趋势一般为，随着回火温度的升高，强度、硬度降低，塑性、韧性提高。试验钢在200℃回火后，淬火马氏体中析出细小的过渡碳化物^[1]，组织中的板条特征与淬火态相似（见

图6a、b，图7a、b），但此时马氏体的过饱和度和缺陷密度仍然较高，碳的固溶强化和位错强化显著影响塑韧性，因此试验钢的强度、硬度很高，而塑性、韧性较差，呈现脆性断裂。400℃回火后，试验钢的强度、硬度有所降低，但塑性、韧性未有改善，强度、硬度的降低来自马氏体的进一步分解及 α 相的回复，该温度回火后的组织仍保留板条特征（见6c、7c），但与淬火态和200℃回火态相比有所粗化；塑性、韧性仍较差的原因是由于该温度回火发生了第一类回火脆性（即回火马氏体脆性，Tempered-martensite Embrittlement）^[10, 11]，渗碳体可在板条界和原奥氏体晶界呈条状、片状析出（回火屈氏体中的细小渗碳体仍需通过透射电镜观察），导致脆性增大。550℃回火后，组织仍有一定的板条特征，渗碳体颗粒多沿界面分布（见图7d），而600℃和650℃回火后，组织中的板条特征已不明显，渗碳体有聚集和粗化倾向（见图7e、f）。550℃回火试样虽有较高的强度、硬度，但塑性、韧性明显低于600℃和650℃回火试样，其原因可能是该温度回火发生了第二类回火脆性（Temper Embrittlement）^[9, 12]，杂质元素特别是P容易偏聚于原奥氏体晶界，导致沿晶断裂，这可通过断口进一步证实。而650℃回火试样的强度、硬度不足，其主

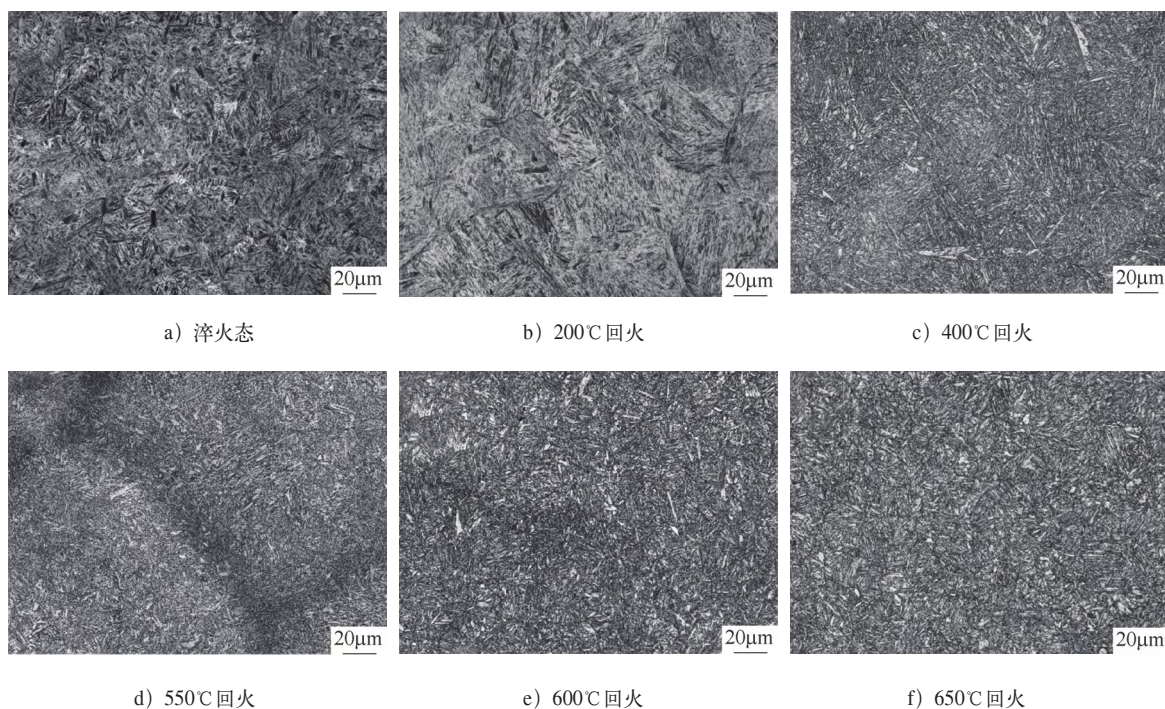


图6 试验钢淬火态及淬火+回火态金相组织

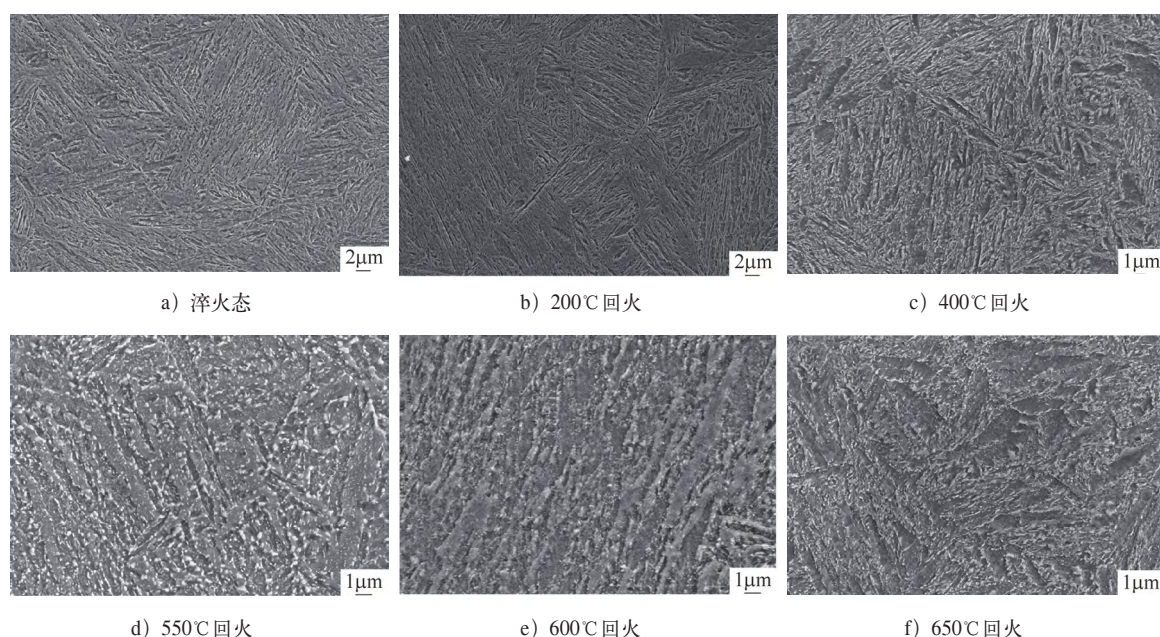


图7 试验钢淬火态及淬火+回火态组织的扫描电镜照片

要原因是由于温度的提高导致渗碳体进一步聚集和粗化。

3.3 断口分析

上述回火态冲击试样的断口形貌如图8所示。从

图8可看出,试验钢200℃和400℃回火后均呈现沿晶断裂,550℃回火后仍以沿晶断裂为主,而600℃和650℃回火后呈韧性断裂。断口观察结果进一步佐证了上述力学性能及显微组织的变化规律。

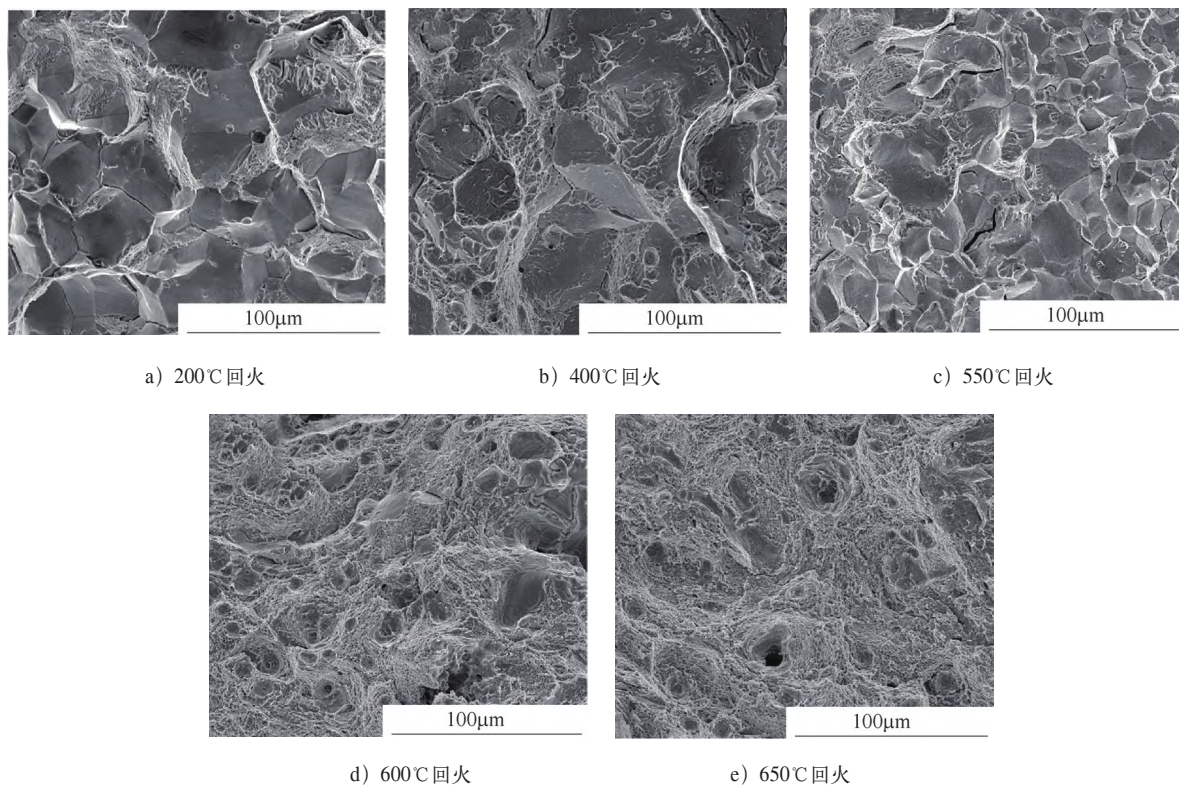


图8 试验钢冲击断口形貌

4 结束语

1) 本文所研究的中碳低合金钢淬火后经不同

温度回火,随回火温度的升高,强度、硬度不断降低,塑性、韧性得到改善。

2) 试验钢淬火后获得板条马氏体组织, 200℃和400℃回火后分别获得回火马氏体和回火屈氏体, 但均呈现明显脆性断裂, 因此中低温回火不利于上述中碳钢的组织及性能调控。

3) 试验钢550~650℃回火后均获得回火索氏体组织, 但550℃回火产生第二类回火脆性, 导致塑性、韧性较低, 而650℃回火后的强度、硬度不足; 600℃回火后具有良好的强韧性匹配, 抗拉强度达1000MPa级、屈服强度达900MPa、硬度达290HBW, 断后伸长率达13%以上、断面收缩率达21%以上、冲击吸收能量达到40J。

参考文献:

- [1] KRAUSS G. Tempering of lath martensite in low and medium carbon steels: assessment and challenges[J]. Steel Research International, 2017, 88 (10) : 1700038.
- [2] KRAUSS G. Martensite in steel: strength and structure[J]. Materials science and engineering: A, 1999, 273: 40-57.
- [3] SPEICH G, LESLIE W. Tempering of steel[J]. Metallurgical Transactions, 1972, 3: 1043-1054.
- [4] SAMUELS L. Tempering of martensite[J]. Springer, 2014.
- [5] HUTCHINSON B, HAGSTRÖM J, KARLSSO O, et al. Microstructures and hardness of as-quenched martensites (0.1-0.5%C)[J]. Acta Materialia, 2011, 59 (14) : 5845-5858.
- [6] KRAUSS G. Steels: processing, structure, and performance[M]. Holland: Asm International, 2005.
- [7] 张显武, 丁雅莉, 杨卓越, 等. 35CrMnSi低合金钢淬火直径与微观组织的关系[J]. 金属热处理, 2022, 47 (11) : 165-167.
- [8] MALHEIROS L, RODRIGUEZ E, ARLAZAROV A. Mechanical behavior of tempered martensite: Characterization and modeling[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 706: 38-47.
- [9] OLEFJORD I. Temper embrittlement[J]. International Metals Reviews, 1978, 23 (1) : 149-163.
- [10] MATERKOWSKI J, KRAUSS G. Tempered martensite embrittlement in SAE 4340 steel[J]. Metallurgical Transactions A, 1979, 10: 1643-1651.
- [11] ZIA-EBRAHIMI F, KRAUSS G. Mechanisms of tempered martensite embrittlement in medium-carbon steels[J]. Acta Metallurgica, 1984, 32 (10) : 1767-1778.
- [12] ZABIL SKII V. Temper embrittlement of structural alloy steels[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1987, 29 (1) : 32-42.
- [13] 许盛发, 张守银, 刘敬伟, 等. 熔模铸造低合金钢热裂问题的分析及解决[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (2) : 261-264.

(收稿日期: 20250107)

《金属加工(热加工)》2025年第6期广告目次

单位名称	查询编号	位置
深圳市瑞凌实业股份有限公司	1254	封面
昆山京群焊材科技有限公司	5123	封二
伊达新技术电源(昆山)有限公司	1925	封三
北京金威焊材有限公司	1161	封底
盐城高周波热炼有限公司	5326	前彩 1

单位名称	查询编号	位置
南通振康焊接机电有限公司	1362	前彩 2
湖北天舒感应科技股份有限公司	1947	前彩 3
公益广告	8000	前彩 4
中国国际金属成形展览会	5699	V