

碳化物分布对 NM500 级耐磨钢 组织与性能影响

李正涛^{1,2}, 熊进成^{1,2}, 张洪博^{1,2*}, 周 春^{1,2}, 李栖轶^{1,2}

(1. 湖南华菱涟源钢铁有限公司, 湖南 娄底 417009; 2. 湖南华菱涟源特种新材料有限公司, 湖南 娄底 417009)

摘 要: 马氏体耐磨钢因其优异的耐磨性能在冶金、建材等领域得到广泛应用, 但其韧性不足, 限制了材料的使用寿命。为改善该钢种的韧性不足, 对试验钢采用淬火后分段回火热处理, 以促进碳化物在马氏体板条内部析出。结果表明, 分段回火使碳化物在晶界上的占比由 45% 降至 25%, 试样的冲击韧性与耐磨性均优于常规回火工艺。通过正交试验及方差分析发现, 第一段回火温度和时间分别对冲击韧性和硬度具有显著性影响。获得的最佳分段回火工艺为 130 °C 保温 45 min 后再经 200 °C 保温 45 min, 与常规 200 °C 回火相比, 其冲击功和耐磨性分别提高了 20% 和 42%。

关键词: 碳化物; 马氏体耐磨钢; 韧性; 正交试验

中图分类号: TF76, TG156.5 文献标志码: A

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.014

文章编号: 1004-7638(2026)04-0117-08

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 carbide distribution on microstructure and properties of NM500 grade wear-resistant steel

LI Zhengtao^{1,2}, XIONG Jincheng^{1,2}, ZHANG Hongbo^{1,2*}, ZHOU Chun^{1,2}, LI Qiyuan^{1,2}

(1. Hunan Valin Lianyuan Iron and Steel Co., Ltd., Loudi 417009, Hunan, China; 2. Hunan Valin Lianyuan Steel Special New Material Co., Ltd., Loudi 417009, Hunan, China)

Abstract: Martensitic wear-resistant steel is widely used in metallurgy, building materials due to its excellent wear resistance. However, its insufficient toughness limits the service life of the material. To address this issue, a two-step tempering heat treatment after quenching was adopted to promote the precipitation of carbides within the martensitic laths. The results show that the two-step tempering reduces the proportion of carbides at grain boundaries from 45% after conventional tempering to 25%, leading to superior impact toughness and wear resistance compared to conventional tempering. Orthogonal experimental analysis and variance analysis reveal that the temperature and duration of the first tempering step exert significant effects on impact toughness and hardness, respectively. The optimal two-step tempering process is identified as tempering at 130 °C for 45 minutes followed by 200 °C for 45 minutes. Compared with conventional tempering at 200 °C, this process improves impact energy and wear resistance by 20% and 42%, respectively.

Key words: carbides; martensitic wear-resistant steel; toughness; orthogonal experiment

收稿日期: 2026-03-03; 修回日期: 2026-03-30; 接受日期: 2026-04-03

基金项目: 湖南省示范性科技成果转化项目(2025CK1015)。

作者简介: 李正涛, 1987 年出生, 男, 湖北松滋人, 本科, 工程师, 长期从事钢铁材料热处理工艺与装备研究工作, E-mail: ghost1587@163.com; * 通信作者: 张洪博, 1991 年出生, 男, 湖南湘乡人, 博士, 工程师, 长期从事金属材料制备与加工研究工作, E-mail: zhanghb1201@163.com。

0 引言

低合金马氏体耐磨钢因其优异的耐磨性能,被广泛应用于冶金、矿山和机械等领域^[1]。为提高钢的耐磨性,通常采取提高碳含量或引入硬质第二相(如TiC、VC、WC等)的方法^[2-4],但这些方法会降低材料的塑性和韧性,使其在使用时发生脆性断裂失效,限制了耐磨钢更广泛的推广应用。此外韧性的提升也有助于改善耐磨性能^[5],随着耐磨钢品质要求的不断提高,对韧性的要求也日益提高。因此,如何提升冲击韧性已成为耐磨钢发展的关键问题。

低温回火是最常用的改善马氏体耐磨钢韧性的方式,然而韧性提升有限,难以满足实际的应用需求,且升高回火温度会分解马氏体组织,降低钢的耐磨性能^[6]。刘国亮等^[7]的研究结果发现,随回火温度升高和回火时间延长,组织中碳化物由针状转变为球状,马氏体板条增宽,板条界面逐渐消失。此外,回火时钢中碳化物析出也对韧性和耐磨性有重要影响,细小弥散的碳化物有利于韧性与耐磨性的提高,而粗大的碳化物则会导致材料的脆性和裂纹产生^[8]。在200℃及以上温度回火,碳化物容易在晶界上析出^[9],形成沿着晶界分布的碳化物群,对冲击韧性有害^[10];这种分布的碳化物在钢的微切削磨损中易剥落,降低了钢的耐磨性^[11]。因此针对此点,先将钢在较低温度进行等温,促进碳化物在马氏体板条内形核,经过已经优化的200℃回火,获得所需要的强韧性,即进行分段式回火热处理,采用正交试验优选出最佳的分段回火热处理工艺,研究试验钢中碳化物分布及其对冲击韧性的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试样制备

试验材料为低合金耐磨钢热轧板,其化学成分(质量分数)如表1所示,其中加入的Mn最多,为1.49%。锰元素可以提高钢的淬透性,降低临界冷却速度,促进马氏体组织的形成。加入Ni含量次之,为1.25%,Ni元素可改善低温韧性和提高钢的淬透性和淬硬性,也有固溶强化的作用。加入的Cr含量为1.17%,Cr与Ni等合金配合,可获得更好的淬透性,此外Cr可以形成多种碳化物,使材料的耐磨性得以提高。

表1 试验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of the experimental steel %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	P	S	Fe
0.27	0.28	1.49	1.17	1.25	0.025	0.02	0.02	Bal.

朱震宇^[12]的研究结果表明,试验钢在900℃下保温40 min油淬和200℃回火90 min热处理工艺下综合性能优异,但是该工艺下马氏体析出物的尺寸调控仍存在优化空间,因此,在此基础上对试验钢进行分段回火工艺,研究其对马氏体尺寸析出物及其钢性能的影响。试验钢经900℃保温40 min并淬火后,先在80、100、130℃或160℃温度下(T_1)等温45 min,然后在180、200℃或者220℃温度下(T_2)回火45 min,最后空冷至室温获得分段回火样品。

1.2 试验方法

将钢热处理后经研磨和抛光制备成金相样,用体积分数为4%的硝酸酒精溶液腐蚀其金相面,借助HAL 100型金相显微镜(Optical microscope, OM)和FEI Nova 400型场发射扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)对其进行分析,其中拉伸断口和磨损形貌均在SEM视场下观察。

试样的硬度采用HB-3000型布氏硬度计测试,测量值取10次的平均值。按GB/T229—2020要求将其加工成V型缺口试样,冲击温度为-20℃(JBW-300B型摆锤式冲击试验机),测量值取3次的平均值。

在M-2000型磨损试验机(图1)进行耐磨试验,其试样尺寸为6 mm×7 mm×15 mm,对磨件为淬火+低温回火的GCr15钢环,其硬度(HRC)为60~65,试验参数为:试验载荷300 N,对磨件转速200 r/min,磨损总时间5 h,在FA2004B电子天平上称重,并记录磨损损失重量。

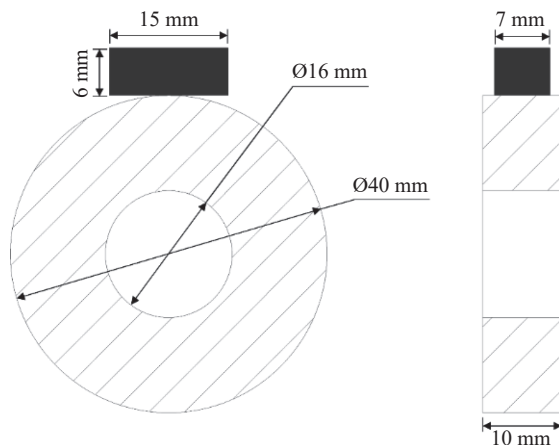


图1 滑动磨损接触示意

Fig. 1 Schematic diagram of sliding wear

2 试验结果与讨论

2.1 正交试验及其统计分析结果

分段式回火中关键性参数有第一段回火的温度

与时间以及第二段回火温度,考虑生产周期,回火总时间设定为已经优化的 90 min。通过正交试验可在繁多的试验组中选择最恰当的试验组,提高试验效率并初步优化回火工艺参数。以试验钢的-20 ℃冲击功为正交试验的主要指标,硬度和耐磨性为次要指标。选用三因素三水平 $L_9(3^3)$ 正交表进行试验,A 代表第一段回火温度,分别设定为 100、130 ℃和 160 ℃;B 代表第一段回火时间,分别设定为 15、30 min 和 45 min;C 代表第二段回火温度,分别设定为 180、200 ℃和 220 ℃,如表 2 所示。第二段回火的时间等于 90 min 减去第一段回火的时间。

表 2 分段回火的三因素三水平 $L_9(3^3)$ 正交试验表
Table 2 Factors and levels of the two-step tempering

Levels	A/℃	B/min	C/℃
1	100	15	180
2	130	30	200
3	160	45	220

正交试验结果见表 3,试样的编号为 1[#]~9[#],并列举了它们的-20 ℃冲击韧性、硬度和磨损测试结果。试验钢的冲击韧性在 26~35 J,其中试样 4[#](130 ℃保温 15 min 随后 200 ℃保温 75 min)的冲击韧性最高,为 35 J。硬度(HBW)的变化不大,在 481~528,其中试样 3[#](100 ℃保温 45 min 随后

220 ℃保温 45 min)的硬度最高,为 528.1。磨损量在 131~217 mg,试样 4[#]的耐磨性最好,磨损量仅为 131 mg。

表 3 正交试验的设计及结果
Table 3 Design and results of orthogonal experiment

NO.	A/℃	B/min	C/℃	Impact toughness of -20 ℃/J	Hardness (HBW)	Wear amount/mg
1	100	15	180	26	490.4	172
2	100	30	200	29	505.5	176
3	100	45	220	32	528.1	217
4	130	15	200	35	494.9	131
5	130	30	220	33	504.1	181
6	130	45	180	32	525.0	146
7	160	15	220	34	481.2	149
8	160	30	180	30	502	166
9	160	45	200	35	519	162

对表 3 中冲击功、硬度和磨损量 3 个因素进行极差分析,如表 4 所示。其中 k_1 、 k_2 和 k_3 分别代表 A、B 和 C 这三个因素在 1、2 和 3 对应水平力学性能的平均值, R 表示极差, R 的值越大表明因素对力学性能影响越大。根据表 4 中试样的极差分析结果,确定各因素对力学性能的影响程度和力学性能的最优组合。冲击韧性为 A2B3C2 或 A2B3C3;硬度为 A1B2C3 或 A2B2C3;耐磨性能为 A2B1C2。

表 4 试验钢的极差分析
Table 4 Range analysis table of experimental steel

Factor	Impact toughness of -20 ℃/J				Hardness(HBW)				Wear amount/mg			
	k_1	k_2	k_3	R	k_1	k_2	k_3	R	k_1	k_2	k_3	R
A	29	33.3	33	4.3	508	508	500.3	7.27	188.3	152.7	159	35.7
B	31.7	30.7	33	2.3	488.8	506.5	504.5	35.2	150.7	174.3	175	24.3
C	29.3	33	33	3.7	504.5	503.9	508.3	2	161.3	156.3	182.3	26
Influence degree	A>C>B				B>A>C				A>C>B			
Optimal combination	A2B3C2 or A2B3C3				A1B2C3 or A2B2C3				A2B1C2			

表 5 为-20 ℃冲击功、布氏硬度和滑动磨损失重量的方差分析结果,其中 S 为偏差平方, f 为自由度,MS 为均方差, F 值体现均值差异是否显著。若置信度为 95% 时, $F_{表}$ 值=19, F 值> $F_{表}$ 表明该因素对

力学性能有显著性影响^[13]。结果表明第一段回火温度对冲击韧性具有显著性影响,其 F 值为 22.4;第一段回火时间对硬度具有显著性影响,其 F 值为 53.93;耐磨性无显著性影响因素。

表 5 试验钢的冲击韧性方差分析
Table 5 Analysis of variance of impact toughness of experimental steel

Factors	Impact toughness				Hardness				Wear amount			
	S	f	MS	F	S	f	MS	F	S	f	MS	F
A	34.89	2	17.44	22.4	105.61	2	52.81	3.04	2 172.67	2	1 086.33	5.16
B	8.22	2	4.11	5.29	1 871.77	2	935.87	53.93	1 152.67	2	576.33	2.74
C	26.89	2	13.44	17.3	6.22	2	3.11	0.18	1 142	2	571	2.71

极差分析(表 4)和方差分析(表 5)均明确指出,第一段回火温度(因素 A)是对冲击韧性具有显著性影响的核心因素。A2 水平(130 ℃)的冲击韧性均值(33.3 J)远高于 A1 水平(100 ℃)的均值 29 J。A2 水平的磨损量均值(152.7 mg)也显著优于 A1 水

平(188.3 mg)。这表明 A2(130 ℃)在实现高韧性的同时,也带来了更优的耐磨性能。对于第一段回火时间(因素 B),极差分析(表 4)表明,其对冲击韧性的影响程度($R=2.3$)小于第一段回火温度($R=4.3$)和第二段回火温度($R=3.7$)。从冲击韧性的均值

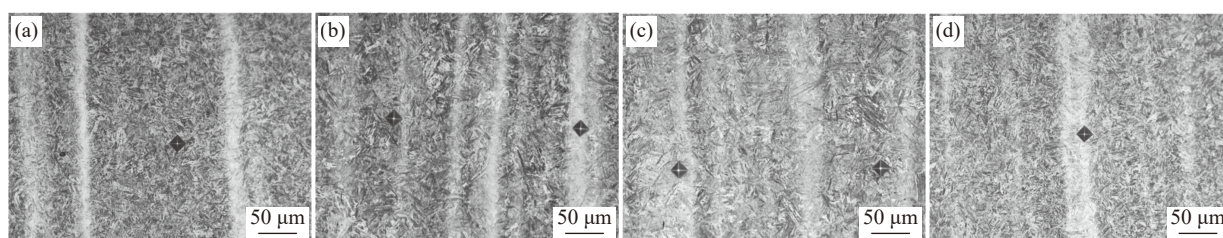
来看, B3 水平(45 min)的冲击功均值最高(33 J), 高于 B1(31.7 J)和 B2(30.7 J)。同样, 方差分析结果表明, 第二段回火温度(因素 C)对冲击韧性的 F 值为 17.3, 已接近 90% 置信度下的显著性水平, 这表明第二段回火温度对冲击韧性有不容忽视的影响趋势。C2(200 °C)与 C3(220 °C)相比, 可以规避性能波动风险, 因为更高的回火温度(C3, 220 °C)更接近碳化物开始在马氏体板条界明显析出的温度区间, 可能对韧性产生不利影响。同时, C2 水平对应的试样(如性能最佳的 4[#]试样: A2B1C2)展现出了最优的耐磨性(磨损量 131 mg)。在冲击韧性均值相同的条件下, 选择能同时带来更优异耐磨性的

C2 水平, 是实现材料综合性能最优的合理选择。综上所述, 试验钢正交试验的最佳热处理工艺为 A2B3C2, 即 130 °C 保温 45 min 随后 200 °C 保温 45 min

2.2 第一段回火温度对试验钢组织与性能的影响

在上述基础上将第二段回火定为 200 °C 保温 45 min, 第一段回火时间定为 45 min, 研究第一段回火温度分别为 80、100、130 °C 和 160 °C 的微观组织变化和力学性能。

图 2 为第一段回火温度不同的试验钢显微组织, 其均为回火马氏体, 显微硬度(HV)约为 510, 组织中有由于合金元素偏析引起的带状组织^[14]。



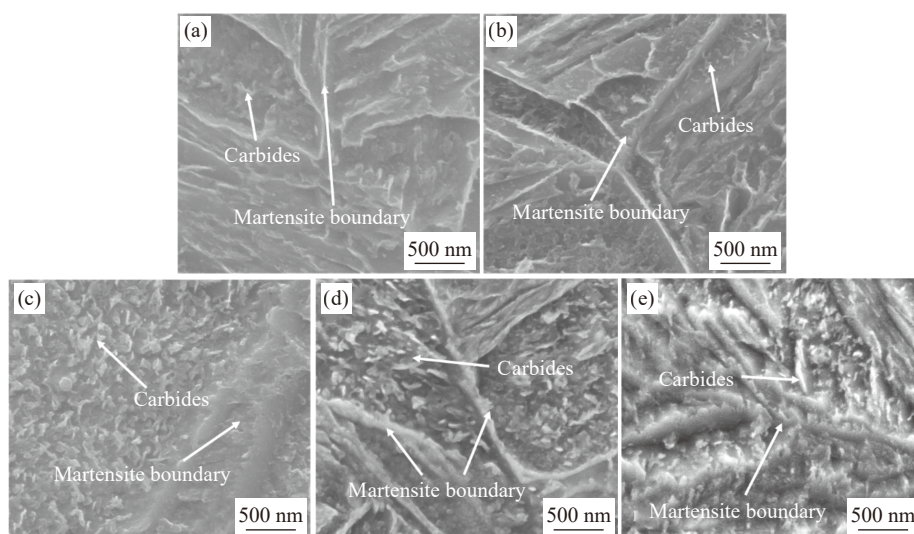
(a) 80 °C; (a) 100 °C; (c) 130 °C; (d) 160 °C

图 2 不同第一段回火温度的试验钢显微组织

Fig. 2 Microstructure of experimental steel at different one-step tempered temperatures

图 3 为试验钢经不同第一段回火温度热处理后采用 SEM 观察的组织, 回火马氏体中有大量碳化物。当第一段回火温度低于 100 °C 时(图 3(a)(b)), 薄片状 ϵ 型碳化物尺寸较小且数量较少, 主要分布在板条马氏体的内部; 温度升至 130 °C 时(图 3(c)), ϵ 型碳化物大量析出, 主要分布在板条

马氏体内。当温度提高至 160 °C 时(图 3(d)), 碳化物尺寸明显增大, 并开始在马氏体板条界面上出现。而常规 200 °C 保温 90 min 回火热处理试样(图 3(e)), 出现大量碳化物分布于马氏体板条界面上, 且有个别较大碳化物(长度达 270 nm, 宽度达 44 nm)。



(a) 80 °C; (a) 100 °C; (c) 130 °C; (d) 160 °C; (e) 200 °C

图 3 不同第一段回火温度和常规回火的试验钢 SEM 图

Fig. 3 The SEM images of microstructure of samples after the different first step tempering temperature of two-step tempering and the traditional tempering

对上述试样的碳化物平均尺寸及在马氏体板条界面上占比进行统计,如图4所示。随着第一段回火温度从80℃提高到160℃,碳化物的长度从80 nm增加到122 nm。第一段回火温度为130℃时试样的碳化物宽度最小,为11 nm,较常规200℃回火试样小21 nm。第一段回火温度 ≤ 130 ℃时,马氏体板条界面上碳化物占比约为25%,而常规200℃回火试样的比例高达45%。可见分段式回火可以抑制马氏体板条间的碳化物的析出。当第一段回火温度较低时(≤ 130 ℃),碳原子未有效扩散至晶界上,位错密度较高,位错可为碳化物提供更多形核位点,并在随后的200℃保温45 min回火中在马氏体内部形成细小的碳化物。而常规200℃回火,由于回火温度较高,晶界作为碳原子快速扩散的通道,成为碳化物形核与长大的主要位置。

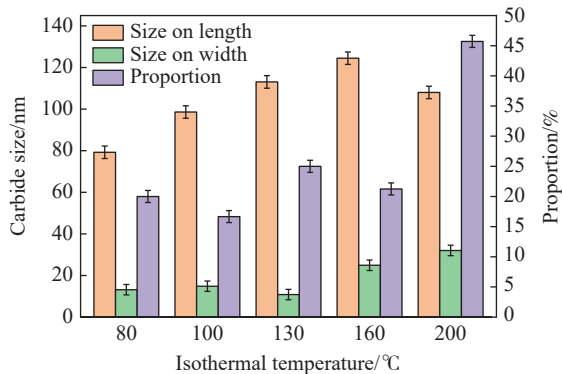


图4 碳化物平均尺寸及其在马氏体板条界面处占比

Fig. 4 Average size of carbides and their proportion at the martensite lath interfaces

图5为经过不同第一段温度的分段回火后试验钢的力学性能,所有的硬度变化不大,常规200℃保温90 min回火试样的硬度和冲击功最低为508 J和30 J。分段回火中第一段回火温度为80℃和100℃试样的硬度较高,分别为515.4和518.3,但冲击功较低,分别为31 J和32 J;130℃保温45 min随后200℃保温45 min试样的冲击功最高,为36 J,较常规200℃回火试样高6 J。

对于分段回火而言,当第一段回火 ≤ 100 ℃时,碳化物较少,碳原子主要以固溶形式存在,因此硬度和强度较高,冲击韧性较低;当温度为130℃时,大量细小碳化物在马氏体板条内部析出,固溶强化效果减弱和析出强化增强,故韧性和强度提升,硬度稍低;温度为160℃时,碳化物开始在马氏体界面上析出,增大了晶界脆性,固溶强化降低,因此冲击韧性下降。常规200℃保温90 min回火时,大量碳化物在马氏体界面上析出,晶界脆性增大,因此力学性能偏低。

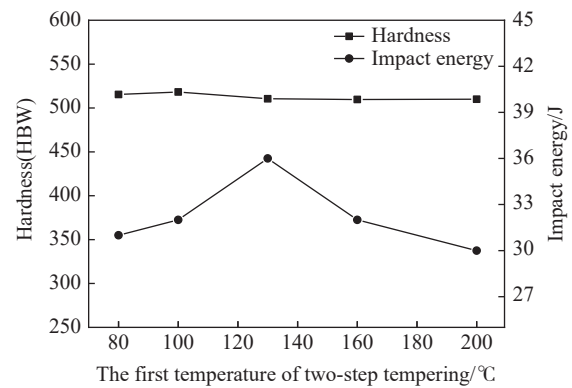


图5 不同第一段回火温度和常规回火后试验钢的力学性能
Fig. 5 The impact energy and hardness of the experimental steel treated at different first step tempering temperature of two-step tempering and the traditional tempering

图6显示了第一段回火温度对试验钢耐磨性能的影响。常规200℃回火试样磨损失重最高为200 mg;160℃保温45 min随后200℃保温45 min试样的耐磨性是分段回火试样中最差的,其磨损失重量为172 mg;130℃保温45 min随后200℃保温45 min试样的耐磨性最好,其磨损失重量最低为141 mg。

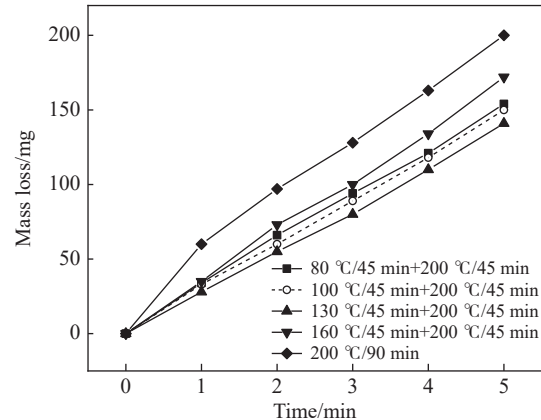
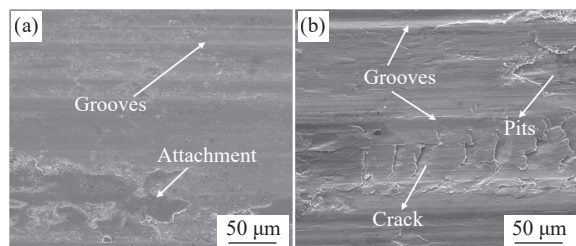


图6 不同第一段回火温度和常规回火后试验钢的磨损失重量
Fig. 6 Mass loss after sliding wear of experimental steel treated at different first step tempering temperature of two-step tempering and the traditional tempering

130℃保温45 min随后200℃保温45 min的分段回火和常规200℃保温90 min回火试样的硬度差别不大(分别为510和508),而耐磨性出现较大差异,应该与冲击性能有关。Lindroos等^[6]的研究表明,在多冲磨损条件下,韧性不足的材料表面容易产生疲劳裂纹,导致剥落失效。130℃分段回火试样的冲击功最高(36 J),其耐磨性最好,磨损失重量较常规200℃回火试样少59 mg。图7为试验

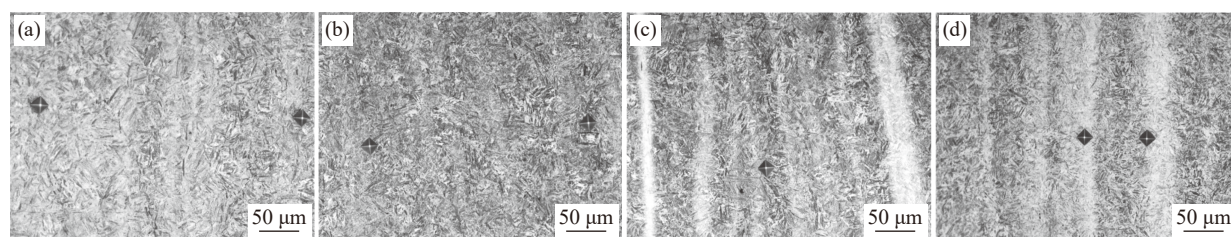
钢经 130 ℃ 分段回火和常规 200 ℃ 回火试样的磨损形貌图,其中 130 ℃ 分段回火试样表面较为光亮,仅存在较少附着物和较浅的犁沟,如图 7(a)所示;常规 200 ℃ 回火试样出现较大的剥落坑和较深的犁沟,并存在垂直于滑动磨损方向的裂纹,如图 7(b)所示。这与其碳化物分布有关,马氏体板条界面处的碳化物在冲击或磨损下容易剥落并形成微裂纹,造成韧性和耐磨性的降低^[14]。



(a) 130 ℃ 保温 45 min 随后 200 ℃ 保温 45 min; (b) 常规 200 ℃ 保温 90 min

图 7 试验钢经分段回火和常规回火的磨损形貌

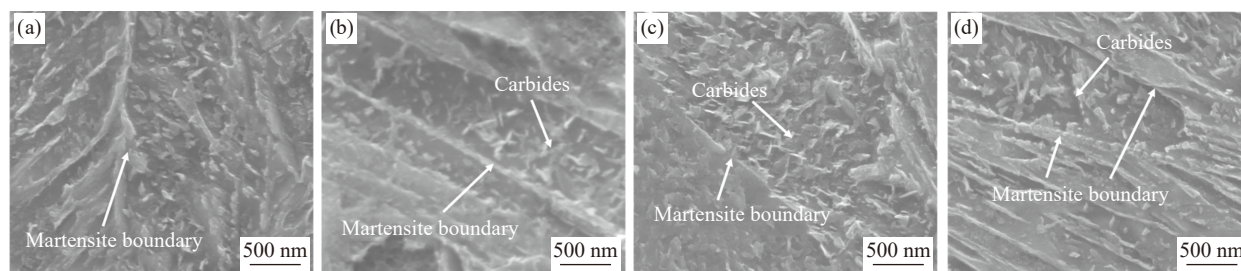
Fig. 7 The morphologies of the samples treated by two-step tempering and the traditional tempering



(a) 15 min; (b) 30 min; (c) 45 min; (d) 60 min

图 8 不同第一段回火时间的试验钢显微组织

Fig. 8 Microstructures of the samples treated by two-step tempering with different time of the first-step tempering



(a) 15 min; (b) 30 min; (c) 45 min; (d) 60 min

图 9 不同第一段回火时间的试验钢 SEM 图

Fig. 9 SEM images showing microstructure of samples treated by two-step tempering with the different time of the first-step tempering

图 10 展示了第一段回火保温时间对试验钢力学性能影响结果,随着该时间增加,硬度先降低后增大,130 ℃ 保温 15 min 随后 200 ℃ 保温 75 min 试样的硬度值最高为 533.5,130 ℃ 保温 30 min 随后 200 ℃ 保温 60 min 试样的硬度值最低为 504.1;随

2.3 第一段回火时间对试验钢组织与性能的影响

将第一、二段回火温度分别定为 130 ℃ 和 200 ℃,研究第一段回火时间分别为 15、30、45 min 和 60 min 的试验钢组织及其性能的影响,此工艺中第二段回火时间对应为 75、60、45 min 或 30 min 的分段回火热处理。图 8 为试验钢经不同一段回火时间处理后的显微组织,均为带状的回火马氏体组织,显微硬度(HV)在 500 ~ 520,并存在由合金元素偏析引起的带状组织。

图 9 为用 SEM 所观察的不同第一段回火时间热处理后的显微组织,其均为板条马氏体组织,在板条马氏体内部出现了大量薄片状的 ϵ -碳化物。第一段回火保温时间 ≤ 30 min 时,出现大量长条状或薄片状碳化物,如图 9(a)(b)所示;随着第一段等温时间 ≥ 45 min 时,如图 9(c)(d)所示,碳化物的形态逐渐变为多边形的块状或椭圆状。随着第一段分段回火保温时间增大,碳化物的分布几乎不变,但碳化物逐渐从长条状变为块状和椭圆状。

着保温时间增加,冲击功也呈现出先增大后降低的趋势,130 ℃ 保温 45 min 随后 200 ℃ 保温 45 min 试样的冲击韧性最好,其冲击功为 36 J,130 ℃ 保温 60 min 随后 200 ℃ 保温 30 min 试样的冲击功最低为 31 J。

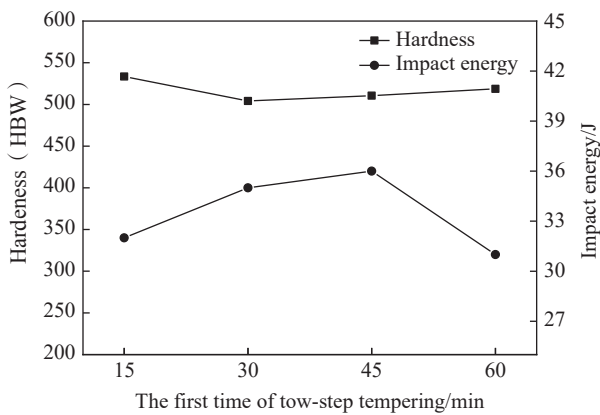


图10 不同第一段回火时间和常规回火的试验钢力学性能
Fig. 10 The impact energy and hardness of the samples treated by two-step tempering with different time of the first-step tempering

试验钢第一段回火的保温时间为15、30、45 min和60 min的磨损失重量见图11。在磨损5 h时,常规200℃回火试样的耐磨性能最差,其滑动磨损失重量为200 mg。对于分段回火试样而言,130℃保温30 min的试样是耐磨性能最差的,其磨损失重量为173 mg;130℃保温45 min的试样耐磨性能最好,其磨损失重量为141 mg;130℃保温15 min的试样和130℃保温60 min的试样耐磨性能次之,其磨损失重量分别为152 mg和150 mg。值得注意的是130℃保温15 min的试样硬度最高(533.5),然而其耐磨性能并非最好,而

130℃保温45 min随后200℃保温45 min试样的冲击韧性最高(36 J),其耐磨性最佳。

图12展示了试验钢经过不同第一段回火时间后滑动磨损的形貌图。当第一段回火时间为15 min时(图12(a)),剥落坑较小;当该时间为30 min时,其耐磨性最差(图12(b)),表面出现了较多附着物剥落坑,表明此试样以黏着磨损为主;当时间为45 min时(图12(c)),表面相对平滑,犁沟较浅,附着物较少,基本没有剥落坑;当时间为60 min时(图12(d)),犁沟较浅,出现较多小的附着物。

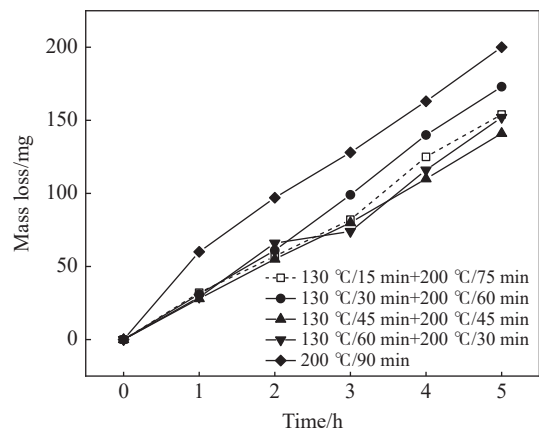
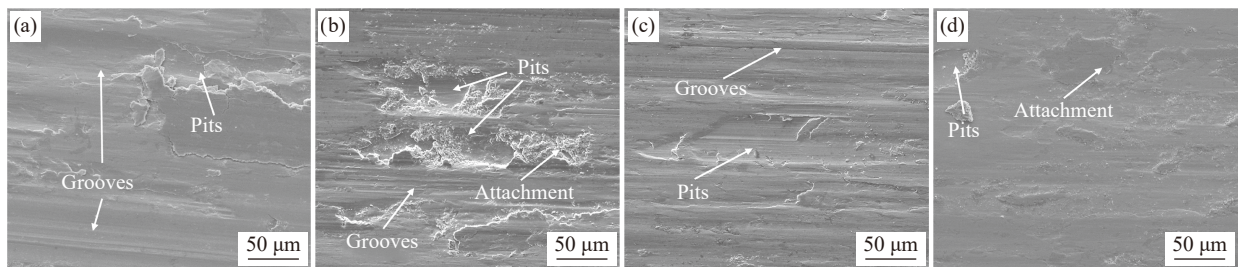


图11 不同第一段回火时间和常规回火的试验钢磨损失重量
Fig. 11 The mass loss due to sliding wear of the samples treated by two-step tempering with different time of the first-step tempering and traditional tempering



(a)15 min; (b)30 min; (c)45 min; (d)60 min

图12 不同的第一段回火保温时间试验钢的磨损形貌

Fig. 12 The morphologies of the samples treated by two-step tempering with different time of the first-step tempering

总之,随着第一段回火时间增大,碳化物的形态从长条状变为椭圆状或块状。其中以130℃保温45 min随后200℃保温45 min分段回火试样的综合性能最佳。虽然其硬度稍低(510),但其冲击功(36 J)和耐磨性(失重量141 mg)均优于其它试样。

3 结论

1)正交试验结果表明,第一段回火温度对冲击韧性具有显著影响,第一段回火时间对硬度影响显

著,而对耐磨性未表现出显著性影响。优化得到的最佳分段回火工艺为130℃保温45 min后再经200℃保温45 min。

2)分段回火试样的冲击韧性与耐磨性均优于常规200℃保温90 min回火试样。随着第一段回火温度从80℃升至160℃,冲击功先升高后降低,在130℃时达到最高值(36 J)。

3)与常规回火相比,最佳分段回火工艺(130℃×45 min+200℃×45 min)显著细化了碳化物尺寸,

并促进其在马氏体板条内部均匀析出,使晶界处碳化物的占比由 45% 降至 25%,冲击功提高了 6 J, 磨损量降低了 59 mg,表现出更优异的综合力学性能。

参考文献

- [1] 李忠波, 胡海江, 何平, 等. 淬火和回火温度对 Cr-Mo 系耐磨钢组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(1): 88-97.
Li Zhongbo, Hu Haijiang, He Ping, et al. Effects of quenching and tempering temperature on microstructure and mechanical properties of Cr-Mo wear-resistant steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(1): 88-97.
- [2] Galindo-Nava E I, Rivera-Díaz-del-Castillo P E J. Understanding the factors controlling the hardness in martensitic steels[J]. Scripta Materialia, 2016, 96-100.
- [3] 王凯凯, 马龙腾, 罗平, 等. 回火温度对贝氏体耐磨钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(3): 84-90.
Wang Kaikai, Ma Longteng, Luo Ping, et al. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of bainitic wear-resistant steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(3): 84-90.
- [4] 黄龙, 邓想涛, 王昭东. 回火温度对颗粒增强型低合金耐磨钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(3): 1-6.
Huang Long, Deng Xiangtao, Wang Zhaodong. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of particle reinforced low-alloyed wear resistant steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(3): 1-6.
- [5] 马玉喜, 宋新莉, 练容彪, 等. 回火温度与钛含量对低合金耐磨钢组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(5): 67-72.
Ma Yuxi, Song Xinli, Lian Rongbiao, et al. Effect of tempering temperature and titanium on content microstructure and mechanical properties of low alloy wear resistant steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(5): 67-72.
- [6] Lindroos M, Ratia V, Apostol M, et al. The effect of impact conditions on the wear and deformation behavior of wear resistant steels[J]. Wear, 2015, 328-329: 197-205.
- [7] 刘国亮, 唐梦兰, 李栋, 等. 42CrMo 钢回火组织演变及屈服强度预测[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(7): 144-150.
Liu Guoliang, Tang Menglan, Li Dong, et al. Microstructural evolution and yield strength prediction of quench-tempered 42CrMo steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(5): 67-72.
- [8] Speer J, Matlock D K, Cooman B, et al. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation[J]. Acta Mater, 2003, 51: 2611-2622.
- [9] Xiao Y, Li W, Zhao H S, et al. Investigation of carbon segregation during low temperature tempering in a medium carbon steel[J]. Materials Characterization, 2016, 117: 84-90.
- [10] Saha D C, Biro E, Gerlich A P, et al. Effects of tempering mode on the structural changes of martensite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 673: 467-475.
- [11] Lin H, Chang J Z. An investigation of the role of secondary carbide in martensitic steel during three-body abrasion wear[J]. Wear, 1994, 176: 103-109.
- [12] 朱震宇, 吴志方, 吴润. 回火温度对 NM500 耐磨钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47: 154-159.
Zhu Zhenyu, Wu Zhifang, Wu Run. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of NM500 wear-resistant steel, 2022, 47: 154-159.
- [13] 柳金甫, 张志刚. 概率论与数理统计[M]. 北京市: 北京大学出版社, 2023: 127-137.
Liu Jinpu, Zhang Zhigang. Probability and mathematical statistics[M]. Beijing: Peking University Press, 2023: 127-137.
- [14] Ruijie Z, Chunlei Z, Bo L, et al. Effect of non-uniform microstructure on rolling contact fatigue performance of bainitic rail steel[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 159: 106795.

编辑 邓淑惠