doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20259031

淬火-回火处理对激光熔覆高钒高速钢组织和硬度的影响

何曲波[1,2,3,4]，陈登华[2,3,4]，宋金辉[2,3,4]，张洁柯[1]

（1. 重庆大学 材料科学与工程学院，重庆 400044；2. 重庆材料研究院有限公司，重庆 400707；
3. 耐腐蚀合金重庆市重点实验室，重庆 400707；4. 国家仪表功能材料工程技术研究中心，重庆 400707）

摘 要：针对农机器具（如犁铧、旋耕刀）作业部件耐磨性能差问题，设计不同成分的高钒高速钢粉末材料，采用激光熔覆技术对60Si2Mn钢制犁铧、旋耕刀部件进行表面强化．研究淬火-回火工艺对熔覆层组织性能的影响规律．结果表明：不同成分熔覆层金属的淬火组织均为马氏体+未溶碳化物（VC，M_7C_3，$M_{23}C_6$，M_6C）+残余奥氏体；随着回火温度的升高，残余奥氏体转变、二次碳化物析出、回火马氏体分解等组织演变使熔覆层微观硬度呈逐渐降低的趋势．熔覆层微观硬度分布特征主要受碳化物颗粒尺寸、形状和位置的影响．基于随机森林算法，建立了考虑化学成分影响的熔覆层金属微观硬度预测模型．

关 键 词：激光表面处理；高钒高速钢；热处理；碳化物；微观硬度

中图分类号：TG 166 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026（2026）06-0155-10

Influence of Quenching-Tempering Treatment on Microstructure and Hardness of Laser-Cladded High-Vanadium High-Speed Steel

HE Qu-bo[1,2,3,4], *CHEN Deng-hua*[2,3,4], *SONG Jin-hui*[2,3,4], *ZHANG Jie-ke*[1]

（1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Materials Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400707, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Corrosion-Resistant Alloys, Chongqing 400707, China; 4. National Engineering Research Center for Instrument Functional Materials, Chongqing 400707, China. Corresponding author: HE Qu-bo, E-mail: qubohe@aliyun.com）

Abstract: To address the poor wear resistance of working components in agricultural machinery (such as plowshares and rotary blades), high-vanadium high-speed steel powder materials with different compositions were designed, and surface strengthening of 60Si2Mn steel plowshare and rotary blade components was performed using laser cladding technology. The influence of the quenching-tempering process on the microstructure and properties of the cladding layer was investigated. The results indicate that the quenched microstructures of cladding layer metals with different compositions all consist of martensite+undissolved carbides (VC, M_7C_3, $M_{23}C_6$, and M_6C)+retained austenite; with the increase in tempering temperature, the microhardness of the cladding layer shows a gradually decreasing trend caused by microstructural evolutions such as retained austenite transformation, secondary carbide precipitation, and tempered martensite decomposition. The microhardness distribution characteristics of the cladding layer are mainly influenced by the size, shape, and location of carbide particles. Based on the random forest algorithm, a microhardness prediction model for the cladding layer metal considering the influence of chemical composition is established.

Key words: laser surface treatment; high-vanadium high-speed steel; heat treatment; carbide; microhardness

收稿日期：2025-07-23
基金项目：中国机械工业集团有限公司青年科技基金资助项目（QNJJ-ZD-2022-19）.
作者简介：何曲波（1985—），男，重庆梁平人，重庆大学博士研究生，正高级工程师.
通信作者：何曲波，E-mail：qubohe@aliyun.com.

近年来,随着“中国制造2025”战略的深入推进,我国农业机械装备制造业迎来历史性发展机遇[1].中共中央、国务院印发的《加快建设农业强国规划(2024—2035年)》中明确指出,要推动农业机械装备的全面升级,加快实现国产农机装备对农业高质量、高效率发展的有力支撑[2].然而,对比德国CLAAS(CLAAS GmbH & Co. KGaA)、美国约翰迪尔等国际巨头,目前我国农机装备在核心技术指标上仍存在显著差异,特别是在关键零部件的耐磨性指标上[3].这一技术瓶颈在触土作业场景中尤为突出:犁铧铲尖、深松铲及旋耕刀等触土部件持续经受石英质土壤颗粒与农业固体废弃物的复合磨损作用,导致其服役周期显著缩短;频繁更换触土部件不仅严重影响农机作业效率,同时也造成了大量资源浪费[4-6].为了改善农业机械触土部件的耐磨性,表面强化技术是当前学术界重点关注的解决方法之一[7-8].该技术通过表面熔覆、表面堆焊、热喷涂等工艺,将基体材料与抗磨耐蚀性材料相结合,对耕作部件传统材质(如65Mn,60Si2Mn和30MnB5钢)进行表面结构化设计以制备出高硬度、耐磨、耐蚀涂层[9-10].因此,表面强化技术能够有效改善田间触土部件的耐蚀性、强度和耐磨性,减少部件磨损、修复和替换频率,降低农业生产成本,从而推动农业生产的可持续发展.

激光熔覆是一种典型的表面改性技术,它以高能激光束为能量源,将熔覆合金粉末与基体表面同时熔化,然后采用适当的冷却方法最终在样品表面形成具有冶金结合的高性能涂层.利用该技术可在触土部件表面制备出稀释率极低的熔覆层,从而有效提升基材的硬度和耐磨性,或实现对受损基材的修复[11-13].袁庆龙等[14]在Q235低碳钢表面通过激光熔覆制备了Ni60合金涂层,发现该熔覆层组织致密且晶粒细小,为典型的快速凝固组织,其显微硬度明显高于基材.Chen等[15]对表面熔覆FeMo复合涂层的65Mn钢进行了研究,发现该激光熔覆涂层能够显著提高犁铧的耐磨性能.闫勇等[16]对65Mn钢表面熔覆镍基合金工艺进行了研究,认为激光表面熔覆技术能够制备出高质量的熔覆层,并确定了最优工艺参数.吴兆坤等[17]采用CO_2激光器在304不锈钢表面熔覆制备了316L不锈钢粉末涂层,证明该熔覆粉末适用于304不锈钢基材的修复.

高钒高速钢是对传统高速钢进行成分调整后形成的新钢种,相较于传统高速钢,降低了W元素含量,提高了V元素含量,同时适量添加了Mo,Cr,Nb等元素[18].大量V作为合金元素添加在高速钢中,形成了高硬度、高强度的MC型碳化物,显著提高了材料的冲击性能和耐磨性[19].通常来说,硬度是衡量材料耐磨性能的核心指标之一.材料的硬度不仅取决于其本身的组织形态,还受到硬质相含量和性质的影响.研究表明,当高钒高速钢中的V,C质量比接近3∶1时,VC碳化物析出比例最优,其硬度可达峰值(HRC 63~67 MPa).此时,VC弥散强化效应最强,显著提升了基体的硬度和耐磨性[20].因此,本文通过激光熔覆技术将不同W,V,Mo含量的高钒高速钢粉末熔覆于60Si2Mn钢表面,并结合淬火+回火热处理工艺对熔覆层中硬质相进行调控,以改善犁铧作业部件耐磨性能差等问题.在此基础上,探讨了熔覆层金属的显微硬度与硬质相分布特征的联系,建立了基于随机森林算法的淬火态熔覆层金属微观硬度的预测模型,为利用表面强化技术提高农业机械触土部件耐磨性能提供了理论基础和实验参考.

1 实验材料与方法

本研究基于前期探索获得的真空熔炼工艺,成功制备了杂质含量较低的高纯净、高碳、高钒母合金锭,然后通过雾化制粉法等技术得到了3种不同合金成分的高钒高速钢粉末样品,其化学成分如表1所示.将不同成分的粉末样品在60Si2Mn钢表面进行激光熔覆强化处理,形成具有优异耐磨性能的微观组织.实验选用LFR-M-II型激光熔覆设备,激光功率为1 200 W,扫描速度为0.01 m/s,光斑直径为2 mm.烘干后的合金粉末通过同轴送粉喷嘴进入激光熔池,送粉速率为8 g/min.为减少熔覆层缺陷,采用流量为400 L/h的氩气作为保护气体.

表1 3种熔覆焊接粉末材料成分(质量分数)
Table 1 Composition of three cladding welding powder materials (mass fraction) %

试样	C	Si	Cr	Mo	V	W	Fe
1#	2.00	0.62	5.05	0.95	6.10	3.05	余量
2#	1.98	0.68	5.13	2.94	6.27	1.16	余量
3#	2.47	0.60	5.20	1.62	6.30	1.58	余量

为了方便进行后续热处理,通过线切割设备将熔覆后的样品制备成尺寸为10 mm×3 mm×6 mm的试样.将获得的3种不同成分的熔覆金属分别在840,870和890 ℃下进行油淬处理,随后在选

定的5个温度(200,300,400,500和600 ℃)下进行回火处理,具体热处理工艺如表2所示.

表2　不同成分熔覆层金属的热处理制度

Table 2　Heat treatment regime for cladding layer metals with different compositions

试样	热处理类别	热处理制度	备注
1#	淬火(Q)	860~880 ℃,油冷	Ac_3≈832 ℃
	回火(T)	200,300,400,500,600 ℃,空冷	
2#	淬火(Q)	880~900 ℃,油冷	Ac_3≈850 ℃
	回火(T)	200,300,400,500,600 ℃,空冷	
3#	淬火(Q)	835~855 ℃,油冷	Ac_3≈805 ℃
	回火(T)	200,300,400,500,600 ℃,空冷	

注:Ac_3为加热时奥氏体转变的终了温度.

不同状态的熔覆层样品经4%硝酸酒精溶液腐蚀后,采用OLYMPUS−GX51金相显微镜及配备X射线能谱仪的JEOL JSM−7800F场发射扫描电子显微镜(SEM)进行微观组织和微区成分分析.将平行于母材表面的薄片样品减薄至70 μm左右,然后冲裁成ϕ3 mm的薄圆片,并通过电解双喷对其进行减薄.电解液为体积比7∶3的甲醇−硝酸溶液,双喷时电解液温度保持在−30 ℃左右,电压为20 V.随后使用Talos F200型透射电子显微镜(TEM)对上述样品的位错亚结构进行观察.熔覆层金属的物相分析采用Empyrean多功能高分辨X射线衍射仪(XRD).采用FALCON 500型显微维氏硬度计进行样品的硬度测试,测试参数如下:载荷100 g,保持时间15 s.为减小偶然误差,每个样品测试6次后取平均值作为最终硬度值.

2　实验结果与讨论

2.1　淬火态熔覆层金属的微观组织

图1为不同熔覆层金属淬火后的SEM图像,1#试样870 ℃淬火、2#试样890 ℃淬火、3#试样840 ℃淬火分别命名为1#−870Q,2#890Q和3#−840Q.如图1所示,淬火温度与原始奥氏体晶粒尺寸呈现一定的相关性,表现为淬火温度升高时,原始奥氏体晶粒尺寸小幅增加.熔覆层金属的淬火组织为马氏体+未溶碳化物(VC,M_7C_3,$M_{23}C_6$,M_6C)+残余奥氏体.块状VC沿原始奥氏体晶界断续分布,其尺寸最大可达1~2 μm.微米级VC附近还伴生有少量Cr,Mo,W复合碳化物,其中M_7C_3和$M_{23}C_6$为以Cr,Mo元素为主的复合碳化物,而M_6C则为以W元素为主的复合碳化物.

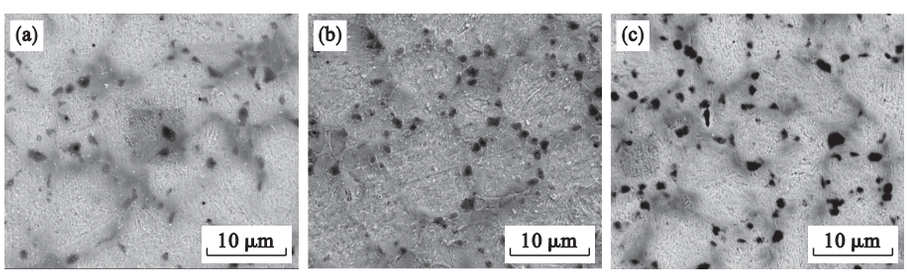


图1　不同熔覆层金属淬火后的SEM图像

Fig. 1　SEM images of different cladding layer metals after quenching

(a)—1#−870Q; (b)—2#−890Q; (c)—3#−840Q.

利用JMatPro热力学模拟软件计算得到了1#熔覆层金属的凝固平衡相图,如图2所示.由图可知,V元素主要存在于数量最多的MC型碳化物中;Cr元素是形成M_7C_3和$M_{23}C_6$型碳化物的主要合金元素,其中后者还含有一定量的Mo元素;W元素主要存在于数量最少的M_6C型碳化物中,而MC型碳化物中也含有少量W元素.随着保温温度的升高,碳化物中主要合金元素Cr,Mo,W的含量均呈现降低趋势.

图3显示了不同熔覆层金属淬火后的TEM明场像,主要包括马氏体与残余奥氏体的混合基体,以及少量弥散分布的纳米析出相(如红色圆圈所示).板条马氏体呈近似平行排列的细长条状结构,其宽度通常在100~300 nm,板条间以小角度晶界分隔.板条束由多个取向相近的板条组成,板条束之间以大角度晶界分隔.板条内部可以观察到高密度的位错缠结,导致淬火态熔覆层金属具有较高的强度和硬度.残余奥氏体通常以薄膜状或岛状分布于板条马氏体之间,尤其在板条边界或三叉交界处富集(如红色箭头所示).残余奥氏体厚度较薄,约20~30 nm,与马氏体界面存在K−S或N−W取向关系.

不同熔覆层金属淬火后微观组织中主要合金元素分布如图4所示,在原始奥氏体晶界附近

能够观察到V,Cr,Mo和W元素的富集,其中V元素最为明显.随着熔覆层金属中V和Cr元素含量的增加,淬火后未溶碳化物的尺寸显著增大.在热处理过程中,M_6C型碳化物在原始铸态组织中展现出明显的溶解行为.这类碳化物在淬火加热时大量溶入奥氏体基体,并在随后冷却阶段保持固溶状态,不发生二次析出.相比而言,MC碳化物在高温环境下仅发生部分溶解,这种有限的溶解过程导致其形貌发生明显改变,从不连续的网状结构转变为离散的颗粒状分布.上述组织结构的演变对材料性能具有重要影响;M_6C的完全溶解有利于C元素和其他合金元素的均匀分布,为后续淬火形成高碳高合金马氏体组织提供了有利条件;而MC的形貌由网状逐渐转变为颗粒状,其分布特征得到优化,能够有效提高金属材料的冲击韧性[21].

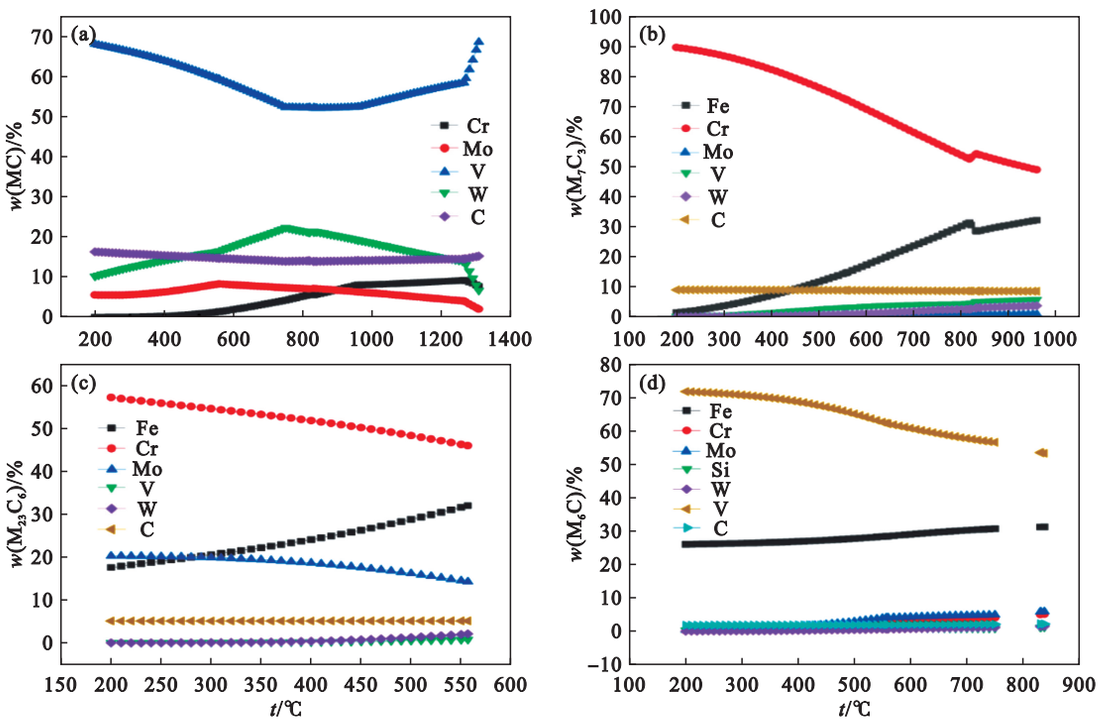


图2 1#熔覆层金属主要碳化物的合金元素组成与温度的关系

Fig. 2 Relationship between alloy element composition of main carbides in 1# cladding metal and temperature

(a)—MC;(b)—M_7C_3;(c)—$M_{23}C_6$;(d)—M_6C.

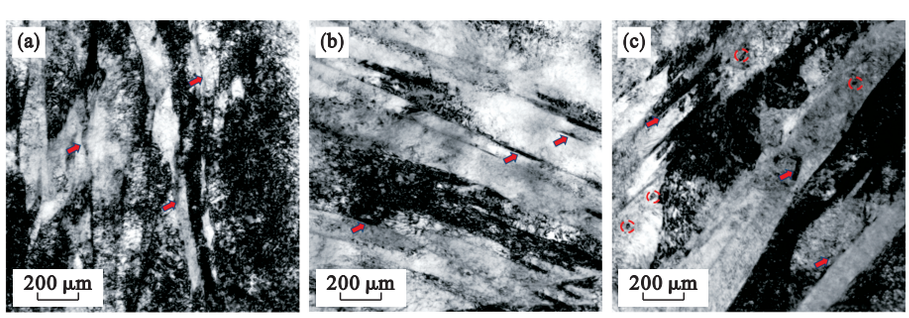


图3 不同熔覆层金属淬火后的TEM图像

Fig. 3 TEM images of different cladding layer metals after quenching

(a)—1#-870Q;(b)—2#-890Q;(c)—3#-840Q.

2.2 回火态熔覆层金属的微观组织

如图5所示,回火处理后熔覆层金属的典型显微组织由回火马氏体、碳化物和少量残余奥氏体共同构成.如图6所示,EDS元素面扫描显示块状VC均匀分布在回火马氏体基体中,伴随有少量的Cr,Mo复合碳化物.白色纳米颗粒VC主要为回火时从马氏体基体中析出的二次碳化物.高钒高速钢中残余奥氏体含量过高会显著降低其力学性能和耐磨性[22-23].采用适当的回火工艺可有效调控残余奥氏体含量,进而优化材料性能.

在回火处理时,二次碳化物从残余奥氏体中析出是诱发其向马氏体转变的主要机制.这种析出过程会减少奥氏体中碳及合金元素的含量,从而提高马氏体转变温度,降低残余奥氏体的稳定性,最终加速其向马氏体的相变过程[24].

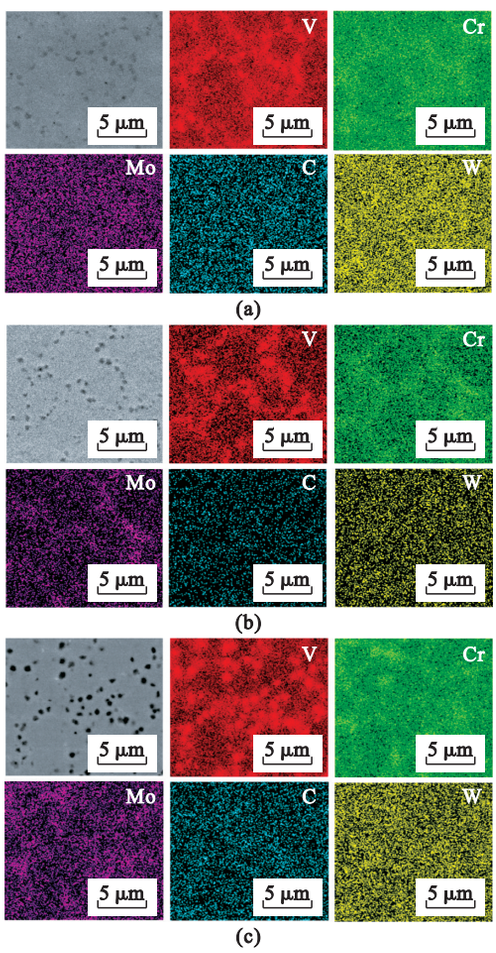


图4　不同熔覆层金属淬火后微观组织中主要合金元素的分布

Fig. 4　Distribution of main alloy elements in microstructure of different cladding layer metals after quenching

(a)—1#-870Q;(b)—2#-890Q;(c)—3#-840Q.

在高钒高速钢中,残余奥氏体中析出的二次碳化物主要为VC,因此VC的析出对促进残余奥氏体向马氏体的转变具有决定性作用.研究发现,当回火温度未达到临界值时,残余奥氏体含量基本保持稳定;随着回火温度的逐步提高,残余奥氏体含量呈现缓慢下降趋势.然而,一旦回火温度超过该临界值,残余奥氏体含量将随温度升高而急剧减少.在200和400 ℃回火条件下,较低的回火温度使得马氏体的分解程度较轻,仍能在微观组织中观察到典型的板条马氏体形态;而在600 ℃回火时,马氏体迅速分解,其特征形貌基本消失.如图7所示,XRD物相分析结果显示,不同回火温度下均有$M_{23}C_6$等二次碳化物析出.随着回火温度的升高,部分二次碳化物发生粗化.图7的试样中200T,300T,400T,600T分别表示在200,300,400,600 ℃回火.

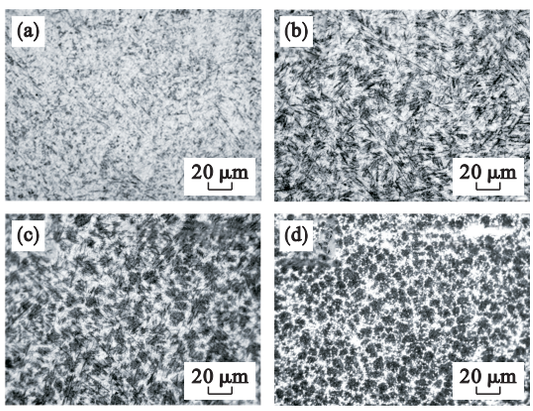


图5　3#熔覆层金属淬火+回火后的金相组织

Fig. 5　Metallographic structure of 3# cladding layer metal after quenching+tempering

(a)—3#-840Q;(b)—3#-840Q+200 ℃回火;(c)—3#-840Q+400 ℃回火;(d)—3#-840Q+600 ℃回火.

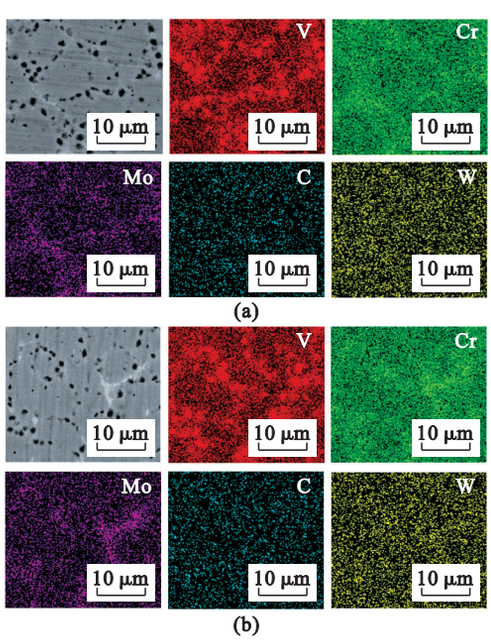


图6　不同熔覆层金属淬火+回火后微观组织中主要合金元素分布

Fig. 6　Distribution of main alloy elements in microstructure of different cladding layer metals after quenching+tempering

(a)—3#-840Q+400 ℃回火;(b)—3#-840Q+600 ℃回火.

2.3　不同热处理状态下熔覆层金属的微观硬度分析

熔覆层金属的硬度主要取决于C元素和V,Cr,Mo等合金元素含量.其淬火后的硬度值受马氏体中饱和C元素、合金元素以及未转变残余奥

氏体含量的影响.高的淬火温度会增加奥氏体中溶解的C元素和合金元素含量,增强奥氏体的稳定性,导致奥氏体无法在淬火冷却过程中完全及时转变为马氏体,而硬度较低的残余奥氏体增多必然使得合金的整体硬度值下降.如图8所示,在低温回火时,由于原子扩散系数增大,淬火形成的不稳定马氏体开始发生变化,过饱和的碳元素以碳化物形式析出,晶格畸变减轻,内应力释放,形成由铁素体和纳米级碳化物组成的回火马氏体结构,导致硬度下降[24].回火温度继续升高使基体中大量细小的MC,M_7C_3,$M_{23}C_6$等二次碳化物弥散析出,这些均匀分布的碳化物颗粒产生弥散强化效应,在一定程度上缓解了硬度的下降趋势.当回火温度进一步升高至600 ℃时,高温会诱导马氏体迅速分解,同时二次碳化物发生明显粗化,阻碍位错迁移的效果减弱,导致弥散强化效应降低,材料整体硬度水平明显下降[25].

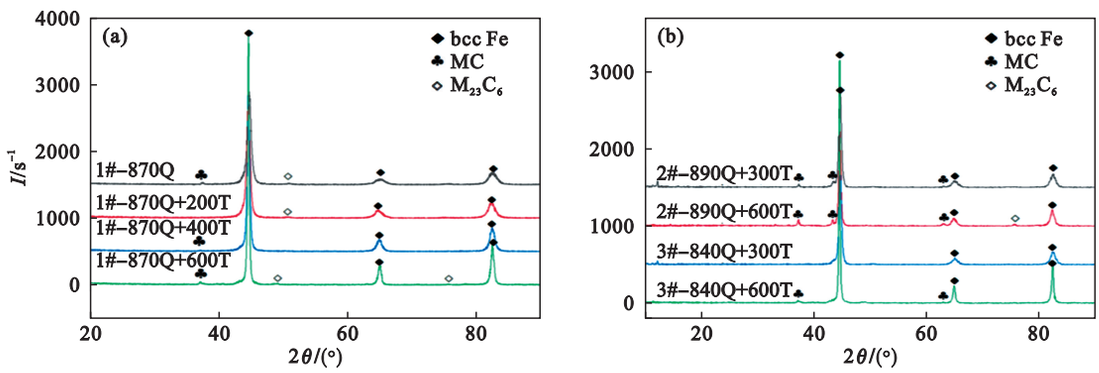


图7 不同熔覆层金属淬火+回火后的XRD物相分析

Fig. 7 XRD phase analysis of different cladding layer metals after quenching+tempering

(a)—1#试样;(b)—2#和3#试样.

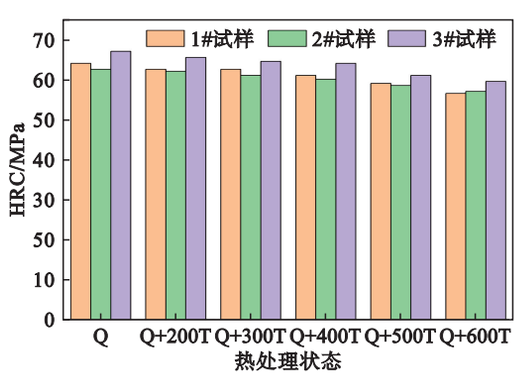


图8 不同热处理状态熔覆层金属的微观硬度平均值

Fig. 8 Average microhardness of cladding layer metals in different heat treatment states

在样品表面进行多点网格化测试,记录每个测点的微观硬度值与坐标位置,利用软件将数据转化为彩色等高线图,能够直观地呈现熔覆金属表面的硬度梯度变化.通过观察硬度分布的变化,可以推断出熔覆层中碳化物的析出情况、晶粒尺寸的变化以及可能存在的缺陷等.不同热处理状态下2#熔覆金属的微观硬度值分布如图9所示,淬火态熔覆金属的硬度值处于最高水平,硬度较高的区域对应一次碳化物VC颗粒的分布位置.这是因为VC具有极高硬度,能够有效提升周围基体的硬度.而硬度较低的区域则对应于未强化或强化效果较弱的基体区域.200 ℃的低温回火热处理后,由于残余奥氏体含量的影响,导致微观硬度的最大值和整体水平有所降低.当回火温度升高到400 ℃时,由于析出了弥散分布的纳米级二次碳化物,强化效果得到增强,微观硬度的最高值有所增大.VC颗粒的强化效果与其尺寸、形状和分布密度密切相关.一般来说,细小、均匀分布的VC颗粒能够提供更均匀的硬度分布和更高的整体硬度.随着回火温度的进一步提高,600 ℃高温回火热处理后马氏体基本完成转变,二次碳化物的尺寸也有显著增大,导致微观硬度值水平明显降低.

2.4 淬火态熔覆层金属微观硬度预测模型

高钒高速钢是一种以V为主要合金元素,辅以Cr,Mo,W等多种合金元素的高速钢,通过形成大量高硬度的VC颗粒实现对金属材料耐磨性能的增强.合金材料的力学性能主要取决于其微观组织特征,而微观组织又与合金元素的组成密切相关.为建立熔覆层金属的硬度预测模型,除考虑C和V含量对合金硬度的影响外,还需兼顾Cr,Mo,W等其他合金元素的强化作用.机器学习作为人工智能的关键技术,其本质是通过对现有数据、知识和经验的分析来构建计算模型,从而揭示数据内在规律.近年来,数据驱动的机器学习方法因其在处理复杂非线性问题上的卓越表现而

备受瞩目.这种方法通过建立输入与输出之间的映射关系,在材料科学领域取得了显著成效,特别是在新材料研发、小样本数据优化和材料机理研究等方面表现尤为突出.根据数据标注情况,机器学习通常可分为监督学习、半监督学习和无监督学习三大类.由于材料科学实验数据通常带有明确标签,因此该领域主要采用监督学习方法进行研究和应用[26].如图10所示,随机森林算法是建立在分类与回归树(classification and regression tree,CART)基础上的.对于普通决策树而言,在节点上的所有p个样本特征中选取一个最优特征,用于划分左右子树;而通过随机选择节点上一部分样本特征,假设为k(且$k<p$),然后在这k个随机选取的样本特征中,再选择一个最优特征来进行左右子树的划分.这两个随机性使得基本模型之间的相关性显著降低,方差下降,从而进一步增强了模型的泛化能力[27].

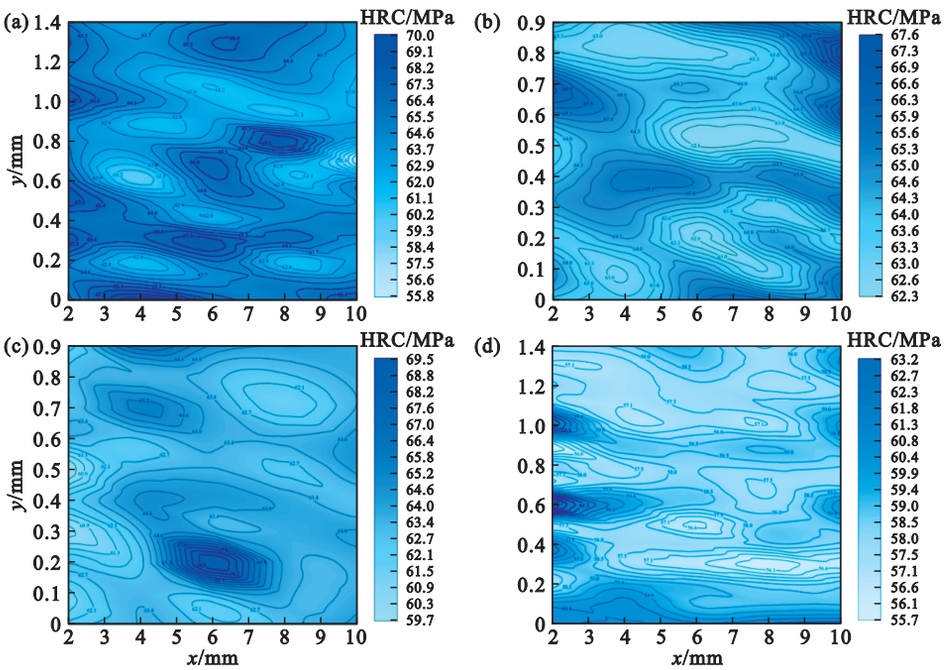


图9　不同热处理状态下2#熔覆金属的微观硬度值分布云图

Fig. 9　Microhardness value distribution contour maps of 2# cladding metal under different heat treatment conditions

(a)—890Q;(b)—890Q+200T;(c)—890Q+400T;(d)—890Q+600T.

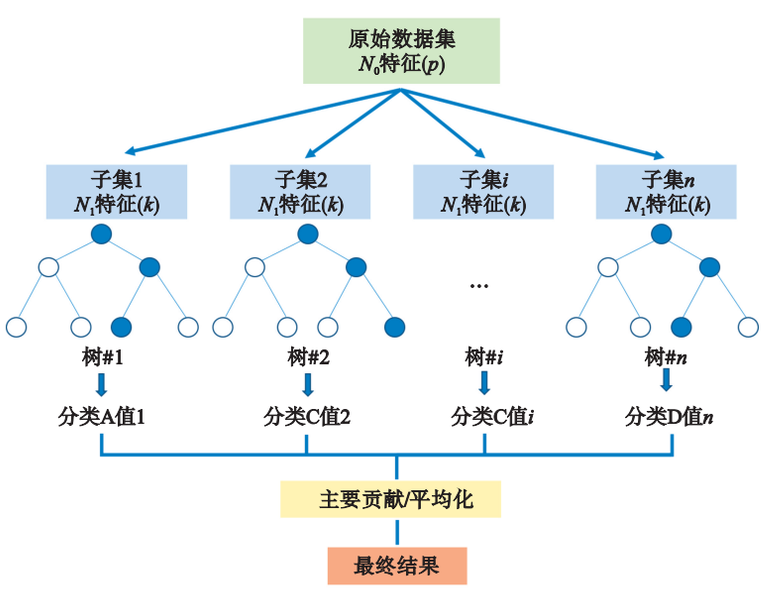


图10　随机森林算法的基本框架[26]

Fig. 10　Basic framework for random forest algorithm[26]

本研究旨在建立预测材料微观硬度(HRC)的模型,并对原始数据进行预处理以确保模型的准确性和鲁棒性.首先,从包含化学成分(C,V,Mo,W,Cr)和淬火态硬度(HRC)的数据集中提取特征,如表3所示,并去除了不必要的列[28].为了识别和处理异常值,计算了每个特征的Z分数,并将Z分数大于3的样本视为异常值并予以剔除.在此基础上,确保了数据的质量和一致性.在预处理后,将数据集分为训练集和测试集,并对特征进行了标准化处理.然后,训练了随机森林回归模型,以捕捉特征值与微观硬度之间的复杂非线性关系.模型评估结果显示,该模型的平均绝对误差为2.21,均方根误差为6.57,决定系数为0.30.

为了构建更具解释性的模型,本研究采用线性回归方法对随机森林模型的预测结果进行拟合,从而建立了淬火态熔覆层金属微观硬度的计算公式:

$$\mathrm{HRC}=66.85+0.19\times w(\mathrm{C})-0.30\times w(\mathrm{V})-1.49\times w(\mathrm{Mo})+1.61\times w(\mathrm{W})-0.32\times w(\mathrm{Cr}). \quad (1)$$

式(1)简化了硬度预测的计算过程,并定量解释了各种化学成分对硬度的影响.如图11所示,硬度预测模型具有较高的预测精度,其平均绝对误差为3.236%,线性拟合的相关系数达0.998 7.通过数据清洗、特征标准化和模型训练,本研究成功构建了有效的硬度预测模型,并通过近似公式实现了模型的解释性分析.

表3 硬度模型所选用数据[28]

Table 3 Data selected for hardness model [28]

试样编号	质量分数/%					HRC
	C	V	Mo	W	Cr	MPa
1	2.00	6.10	0.95	3.05	5.05	63.5
2	1.98	6.27	2.94	1.16	5.13	62.5
3	2.47	6.30	1.62	1.58	5.20	67.0
4	1.31	5.94	4.98	5.18	4.93	67.9
5	1.78	5.98	5.07	5.03	4.98	67.5
6	2.32	6.01	4.95	5.21	5.03	65.5
7	2.94	6.05	5.10	4.97	4.92	65.5
8	1.29	3.59	5.02	5.15	4.97	63.1
9	1.81	3.48	4.94	5.09	5.09	65.8
10	2.27	3.53	5.17	4.99	5.12	68.8
11	2.96	3.56	5.06	5.03	4.95	66.1

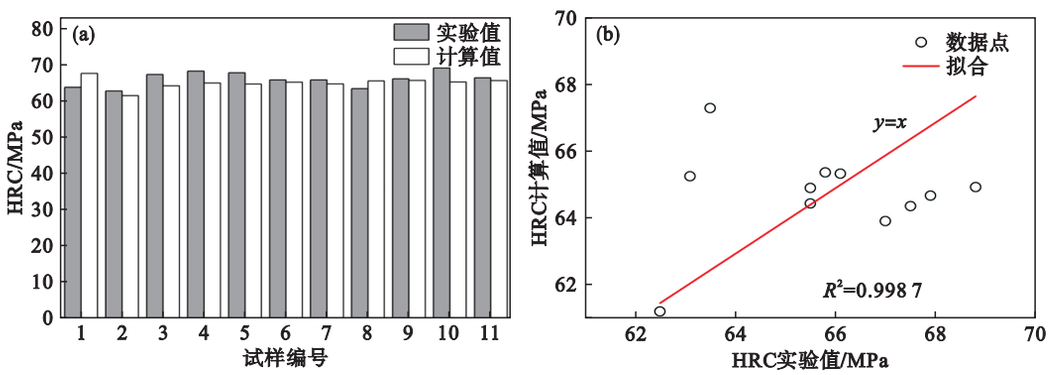


图11 微观硬度实验值与计算值的对比

Fig. 11 Comparison between experimental and calculated values of microhardness

(a)—HRC的实验值与计算值;(b)—HRC的实验值与计算值拟合.

3 结 论

1)高钒高速钢熔覆层淬火组织主要包括:马氏体、未溶碳化物(VC,M_7C_3,$M_{23}C_6$,M_6C)和少量残余奥氏体.原始奥氏体晶界附近出现V,Cr,Mo和W元素的富集.熔覆材料中V,Cr元素含量越高,未溶碳化物尺寸越大.

2)回火态熔覆层金属的典型组织由回火马氏体、碳化物和少量残余奥氏体组成.回火过程中析出了VC,M_7C_3,$M_{23}C_6$等二次碳化物.回火温度越高,部分二次碳化物的尺寸越粗大,残余奥氏体逐渐发生转变.在600 ℃回火时,马氏体迅速分解,其特征形貌基本消失.

3)熔覆层金属的微观硬度主要取决于C元素和V,Cr,Mo等合金元素含量.随着回火温度的升高,不同成分金属熔覆层的显微硬度呈现降低趋势.微观硬度值分布云图显示其主要受VC颗粒的尺寸、形状和分布密度的影响.建立的淬火态熔覆层金属微观硬度预测模型如下:$\mathrm{HRC}=66.85+0.19\times w(\mathrm{C})-0.30\times w(\mathrm{V})-1.49\times w(\mathrm{Mo})+1.61\times w(\mathrm{W})-0.32\times w(\mathrm{Cr})$.其预测结果的平均绝对误差

为3.236%,线性拟合的相关系数为0.998 7,具有较高的预测精度.

参考文献:

[1] 姚科艳, 刘传俊, 薛洲. 新质生产力视域下农机装备科技创新:逻辑理路、现实困境与推进策略[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2024(6): 61−73.
(Yao Ke-yan, Liu Chuan-jun, Xue Zhou. Agricultural equipment innovation from the perspective of new quality productive forces: logical framework, challenges and promotion strategy [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University* (*Social Sciences Edition*), 2024(6): 61−73.)

[2] 霍悦. 政策红利转化为创新动力农机装备全面升级[N]. 中国工业报, 2025−04−14 (10).
(Huo Yue. Policy dividends transformed into innovative driving force for comprehensive upgrading of agricultural machinery and equipment [N]. China Industry News, 2025−04−14(10).)

[3] 宋月鹏, 王伟, 高东升, 等. 基于表面工程技术制备农机刃具的研究现状[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(1): 27−31.
(Song Yue-peng, Wang Wei, Gao Dong-sheng, et al. Research status of agricultural machine cutting tools treated by surface engineering technology [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(1): 27−31.)

[4] Guan C S, Fu J J, Cui Z C, et al. Evaluation of the tribological and anti-adhesive properties of different materials coated rotary tillage blades [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: 104933.

[5] Niranatlumpong P, Sukhonket C, Nakngoenthong J. Wear resistant surface treatment of pulverizer blades [J]. *Wear*, 2013, 302(1/2): 878−881.

[6] 贾洪雷, 王万鹏, 陈志, 等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 1−13.
(Jia Hong-lei, Wang Wan-peng, Chen Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 1−13.)

[7] Zhang S, Yu H X, Li S, et al. Laser cladding strengthening test on the surface of flatness rollers [J]. *ISIJ International*, 2023, 63(1): 120−127.

[8] Tarasiuk W, Napiórkowski J, Ligier K, et al. Comparison of the wear resistance of Hardox 500 steel and 20MnCr_5 [J]. *Tribologia*, 2018, 273(3): 165−170.

[9] 陈登华, 于洪海, 刘海定, 等. 田间触土部件用60Si2Mn钢激光熔覆硬质相增强耐磨层的组织性能[J]. 金属热处理, 2023, 48(12): 213−221.
(Chen Deng-hua, Yu Hong-hai, Liu Hai-ding, et al. Microstructure and properties of hard-phase reinforced wear-resistant layer on 60Si2Mn steel for soil-engaging component deposited by laser cladding [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2023, 48(12): 213−221.)

[10] Jankauskas V, Antonov M, Varnauskas V, et al. Effect of WC grain size and content on low stress abrasive wear of manual arc welded hardfacings with low-carbon or stainless steel matrix [J]. *Wear*, 2015, 328/329: 378−390.

[11] 张津超, 石世宏, 龚燕琪, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1−11.
(Zhang Jin-chao, Shi Shi-hong, Gong Yan-qi, et al. Research progress of laser cladding technology [J]. *Surface Technology*, 2020, 49(10): 1−11.)

[12] 时运, 杜晓东, 庄鹏程, 等. 等离子熔覆技术的研究现状及展望[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 23−33.
(Shi Yun, Du Xiao-dong, Zhuang Peng-cheng, et al. Research and development trend of plasma cladding technology [J]. *Surface Technology*, 2019, 48(12): 23−33.)

[13] Van Acker K, Vanhoyweghen D, Persoons R, et al. Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings [J]. *Wear*, 2005, 258(1/2/3/4): 194−202.

[14] 袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆镍基合金涂层微观组织研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2116−2120.
(Yuan Qing-long, Feng Xu-dong, Cao Jing-jing, et al. Research on microstructure of Ni−based alloy coating by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8): 2116−2120.)

[15] Chen K Y, Yang X F, Li W Y, et al. Study on the wear and corrosion resistance of Fe−Mo coatings on 65Mn steel ploughshares by laser cladding [J]. *Applied Physics A*, 2022, 128(9): 795.

[16] 闫勇, 王宏立. 深松铲尖表面激光熔覆强化试验研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2020, 32(1): 78−82,108.
(Yan Yong, Wang Hong-li. Study on laser cladding strengthening technology for surface [J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2020, 32(1): 78−82,108.)

[17] 吴兆坤, 丘斌林, 周玉重, 等. 316L不锈钢激光熔覆层的组织及硬度分析[J]. 上海工程技术大学学报, 2014, 28(2): 106−110.
(Wu Zhao-kun, Qiu Bin-lin, Zhou Yu-chong, et al. Microstructure and hardness analysis of 316L stainless steel layer by laser cladding [J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2014, 28(2): 106−110.)

[18] Xu L J, Xing J D, Wei S Z, et al. Optimisation of chemical composition of high speed steel with high vanadium content for abrasive wear using an artificial neural network [J]. *Materials & Design*, 2007, 28(3): 1031−1037.

[19] Xu L J, Xing J D, Wei S Z, et al. Study on relative wear resistance and wear stability of high-speed steel with high vanadium content [J]. *Wear*, 2007, 262(3/4): 253−261.

[20] 魏世忠, 徐流杰, 朱金华, 等. 碳、钒含量对高钒高速钢组织和力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2005, 17(5): 66−71.
(Wei Shi-zhong, Xu Liu-jie, Zhu Jin-hua, et al. Effect of carbon and vanadium content on microstructure and mechanical properties of high vanadium high speed steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2005, 17(5): 66−71.)

[21] Wei S Z, Zhu J H, Xu L J. Effects of vanadium and carbon on microstructures and abrasive wear resistance of high speed steel [J]. *Tribology International*, 2006, 39(7): 641−648.

[22] Liu J L, Shi G Q, Ding P D. Study of residual austenite in the surface layer of (M2) high speed steel hardened by laser [J]. *Lasers in Engineering*, 1999, 9: 77−83.

[23] Xu L J, Xing J D, Wei S Z, et al. Artificial neural network prediction of retained austenite content and impact toughness of high-vanadium high-speed steel (HVHSS) [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 433(1/2): 251−256.

[24] Yuan W Y, Li R F, Chen Z H, et al. A comparative study on microstructure and properties of traditional laser cladding and high-speed laser cladding of Ni45 alloy coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126582.

[25] Xu L J, Wei S Z, Xiao F N, et al. Effects of carbides on abrasive wear properties and failure behaviours of high speed steels with different alloy element content [J]. *Wear*, 2017, 376/377: 968−974.

(下转第 172 页)