

高硼铁基耐磨熔覆层研究进展

吴耀燊^{1,2}, 陈俊孚², 牛犇², 易江龙², 胡永俊¹, 曾邦兴^{1,2}

(1. 广东工业大学, 广州 510006; 2. 广东省科学院中乌焊接研究所, 广州 510650)

摘要: 高硼铁基合金是一种原位生成硼化物硬质相的铁基耐磨材料, 具有高硬度、良好的高温稳定性以及低成本的优势, 近年来受到了广泛的研究, 国内外大量研究通过对硼化物形态进行调控, 以达到抑制裂纹以及提高耐磨性能的目的。从材料体系和熔覆层制备技术 2 大方面系统地综述了高硼铁基耐磨熔覆层近年来的研究进展。首先重点介绍了 Fe-B-C、Fe-B-Cr-C、Fe-B-Cr-Mo-C 等 3 种常见的高硼铁基材料体系, 详细阐述了各体系合金成分与原位生成硼化物硬质相类型、形态、分布间的相互作用规律, 并给出各体系硼化物随成分含量变化的显微形貌图。归纳总结了成分设计及热处理工艺对合金组织演变及耐磨性能的影响, 并分析了其他元素对高硼铁基合金组织性能的影响。其次, 介绍了高硼铁基耐磨熔覆层制备技术, 包括等离子熔覆、激光熔覆、电子束熔覆与氩弧熔覆, 分析了如复合热源和外加磁场等可行的熔覆技术改进方法, 并讨论了制备工艺对熔覆层的影响。最后对高硼铁基材料未来的研究及应用方向进行了展望。

关键词: 高硼铁基合金; 硼化物; 熔覆层; 耐磨性; 熔覆工艺

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)06-0160-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.013

Research Progress of High Boron Fe-based Wear-resistant Cladding Layer

WU Yao-shen^{1,2}, CHEN Jun-fu², NIU Ben², YI Jiang-long², HU Yong-jun¹, ZENG Bang-xing^{1,2}

(1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Chinese-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

ABSTRACT: High boron Fe-based alloy is a Fe-based wear-resisting material with in-situ formation of boride. It has the advantages of high hardness, high temperature stability and low cost. In recent years, it has been widely studied. In this paper, the research progress of high boron Fe-based wear-resistant cladding coating in recent years was systematically reviewed from two aspects of material system and preparation technology of cladding layer. Firstly, three high boron Fe-based material system (Fe-B-C, Fe-B-Cr-C, Fe-B-Cr-Mo-C) were introduced. The interaction law between the alloy components and the type, morphology and distribution of in-situ boride hard phase was described. The micrograph of borides with the change of components content was given. The effects of components design and heat treatment process on the microstructure evolution and wear resistance of the alloy were summarized. At the same time, the influence of other elements on the microstructure and properties of high boron Fe-based alloy was analyzed. And then the preparation technology of high boron Fe-based wear-resistant cladding

收稿日期: 2021-04-21; 修订日期: 2021-10-11

Received: 2021-04-21; Revised: 2021-10-11

基金项目: 广东省科学院“千名博士(后)计划”引进专项(2021GDASYL-20210103081)

Fund: The GDAS' Project of "1000 Ph. D. Program"(2021GDASYL-20210103081)

作者简介: 吴耀燊(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为熔覆及增材制造。

Biography: WU Yao-shen (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: cladding and additive manufacturing.

通讯作者: 陈俊孚(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为增材制造用铁基材料。

Corresponding author: Chen Jun-fu (1983-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: iron based materials for additive manufacturing.

引文格式: 吴耀燊, 陈俊孚, 牛犇, 等. 高硼铁基耐磨熔覆层研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 160-169.

WU Yao-shen, CHEN Jun-fu, NIU Ben, et al. Research Progress of High Boron Fe-based Wear-resistant Cladding Layer[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 160-169.

was introduced, including plasma cladding, laser cladding, electron beam cladding and argon arc cladding. The feasible improvement methods of cladding technology were analyzed, such as compound heat source and applied magnetic field. The influence of the preparation technology on the cladding layer was discussed. In addition, the research direction and the application prospects of high boron Fe-based alloy cladding were forecasted.

KEY WORDS: high boron Fe-based alloy; boride; cladding; wear resisting; cladding technology

在冶金、机械、航空航天等领域, 高温、高冲击载荷条件下的工件磨损造成的经济损失巨大, 为满足实际应用中复杂的环境条件, 迫切需要开发出具有耐高温、耐腐蚀、高强韧等特殊性能的耐磨熔覆材料。目前常用的耐磨材料主要有铁基、钴基以及镍基材料, 钴、镍价格昂贵, 在实际生产应用中受限, 而铁基耐磨材料成本低廉, 更适合以低成本修复大尺寸、复杂形状的耐磨工件。铁基耐磨材料主要以碳化物作为硬质相, WC、TiC 等是目前常用的硬质相, 但碳化物硬质相在高温下容易软化。我国硼资源丰富且成本低廉, 硼与合金元素生成的各类硼化物硬质相具有比碳化物更高的硬度以及高温热稳定性, 不仅具有优异的常温耐磨性能, 还在高温耐磨领域有着广阔的应用前景^[1]。

目前以 B 为主要元素的高硼铁基耐磨合金已经得到广泛研究及应用, 但其脆性问题仍然存在。为了提高合金的韧性及耐磨性, 研究人员通过工艺优化、材料成分设计、热力学计算、凝固行为分析等方法, 对高硼铁基合金基体组织及硼碳化物硬质相形态进行调控^[2-4]。文中结合近年来硼化物复合铁基材料的研究成果, 介绍了高硼铁基耐磨熔覆层制备工艺、合金体系设计及其热处理工艺的研究进展, 为高硼铁基熔覆层的研究提供一定参考。

1 高硼铁基耐磨材料体系

高硼铁基耐磨合金材料的设计思想是以硼化物作为耐磨骨架, 硼化物主要有二元硼化物和三元硼化物, 而高硼铁基合金体系种类繁多, 相同体系不同含量的合金组织性能均有较大差异。

1.1 Fe-B-C 系

根据图 1^[5]的 Fe-B 相图可知, B 在铁素体与奥氏体中固溶度很小, B 主要用于形成硼化物, 有研究人员希望通过加入极少量甚至不加入其他合金元素, 获得以铁硼化物为硬质相的低成本 Fe-B-C 耐磨合金。

B 作为高硼铁基耐磨材料的主要元素, 其含量至关重要。由于 B 主要形成硼化物而不固溶于基体, 所以当碳含量不变时, 基体硬度不会随着硼含量的增加而上升, 且硼化物的高温热稳定性优异, 可以稳定发挥耐磨骨架的作用, 硼碳化物在基体的支撑下能表现出更好的耐磨性^[6]。随着 B 含量的上升, 硼化物的体积分数上升, 合金硬度增大, 且共晶硬质相的硬度高于基体硬度, 共晶组织的形态及体积分数与碳含量相关^[7-8]。

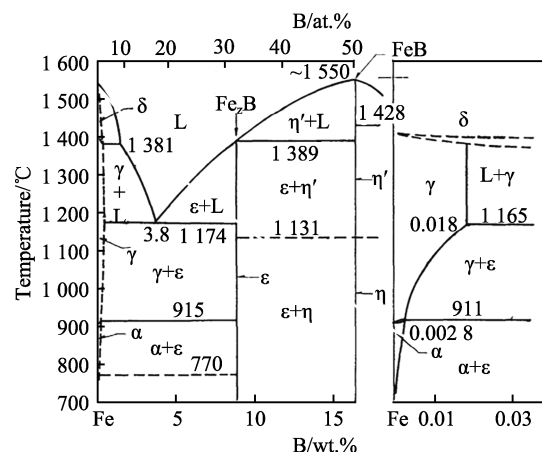


图 1 Fe-B 二元相图^[5]

Fig.1 Fe-B binary phase diagram^[5]

Zhuang 等^[9]采取粉/丝复合电弧堆焊对 Fe-B-C 系合金进行系统研究, 通过调整硼、碳的含量与配比控制堆焊合金中各显微组织的体积分数, 分析不同硼碳含量配比的凝固组织及其相变过程, 图 2 为 Fe-xB-xC 显微组织图谱^[9]。研究表明, 以棒状 Fe₂B 为硬质相的过共晶成分合金耐磨性能优于以共晶硼化物为硬质相的亚共晶成分合金, 并通过堆焊工艺优化, 获得了垂直堆焊层表面生长的棒状 Fe₂B 相, 耐磨性可提高 20%~35%。

Fe-B-C 合金经过热处理后组织性能得到改善, 退火和正火对共晶硼化物影响不大, 正火、淬火、回火均能提高材料硬度及冲击韧性, 且淬火态综合性能最好^[10]。将 Fe-B-C 堆焊合金在 800 °C 下保温 24 h, 初生 Fe₂B 硬质相形态未改变, 鱼骨状 Fe₂B 共晶发生断裂变为不连续的细棒状, 菊花状 Fe₃(B,C)组织消失^[11]。适当的冷却速率能提升合金性能, Fe-B 合金的最佳冷却速率为 0.5 K/s^[12], 当冷却速率过低时, 铁素体和珠光体等软质相体积分数增大, 当冷却速率过高时, 较大残余应力会导致 Fe₂B 等脆性铁硼化物发生断裂。

上述研究表明, Fe-B-C 系合金主要以初生 Fe₂B、共晶 Fe₂(B,C)、共晶 Fe₃(B,C)为增强相。B 含量主要影响棒状初生 Fe₂B 的形成, 即使 B 的质量分数低于 3.8%, 由于铁基体对 B 的排斥, 奥氏体周围 B 浓度将大幅升高。当 w(B)>2.5%时, 随 B 含量升高, 初生 Fe₂B 数量增大; 当 w(B)<2.5%时, 硼化物由共晶硼化物组成。共晶硼化物主要受 C 含量影响, 随 C 含量升高, 鱼骨状共晶 Fe₂B 逐渐转化为菊花状共晶 Fe₃B, 硼化物形态如图 2 所示。合金耐磨性由基体以及硼化

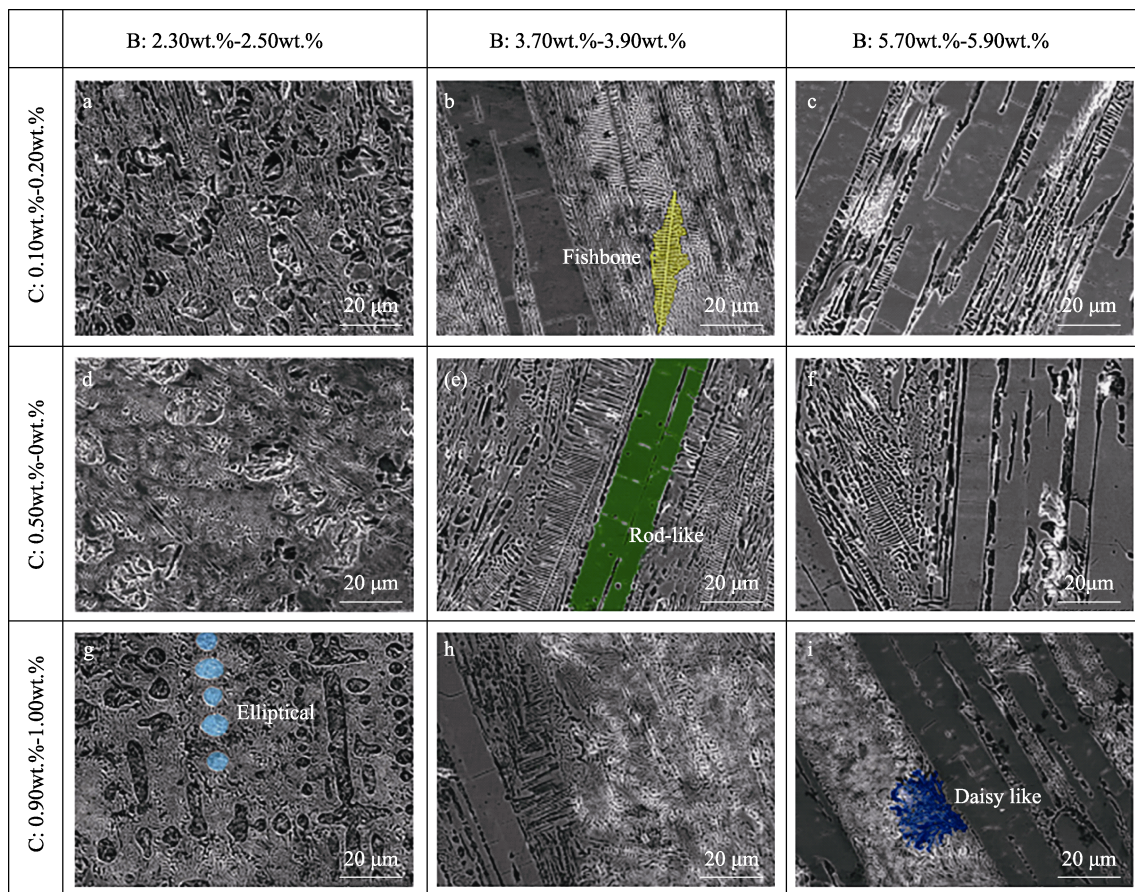


图2 Fe-xB-xC 显微组织形貌^[9]
Fig.2 Fe-xB-xC microstructure morphology^[9]

物共同决定,过高的C含量将导致基体韧性下降,过多的初生 Fe_2B 易产生裂纹,因此应避免过高的B、C添加量。由于合金元素含量低,Fe-B-C系合金具有制备成本较低的优势,同时初生 Fe_2B 硬质相还能有效提升合金的耐磨性,但粗大的初生 Fe_2B 脆裂倾向较严重,通过工艺优化对组织性能的改善幅度有限,因此除了对B、C含量进行调整,添加适量合金元素可改善 Fe_2B 形貌,优化组织性能。

1.2 Fe-B-Cr-C系

B元素在铁基体中的固溶度较低,当高硼铁基合金中加入合金元素的原子半径大于铁原子时,B的固溶度上升^[13]。Cr元素为铁素体形成元素,在基体中具有高固溶度,能增加合金的淬透性,在高温加热下具有抗氧化脱碳的作用,在高硼铁基合金中反应形成结构复杂的硼碳化物。同时,Cr进入硼化物使空间结构改变,断裂韧性增强^[14]。苑振涛^[15]采用ThermoCalc软件分析凝固过程中硼碳化物的析出规律,得到各冷却温度下的相变反应及反应产物,计算得到高硼高速钢平衡相图如图3所示,其中M代表Fe、Cr。

熔覆层耐磨性不仅受硼化物总量影响,还与硼化物类型及其相对含量、分布形态和尺寸有关,在Fe-B合金基础上,通过添加Cr元素,进一步分析Fe-B-Cr

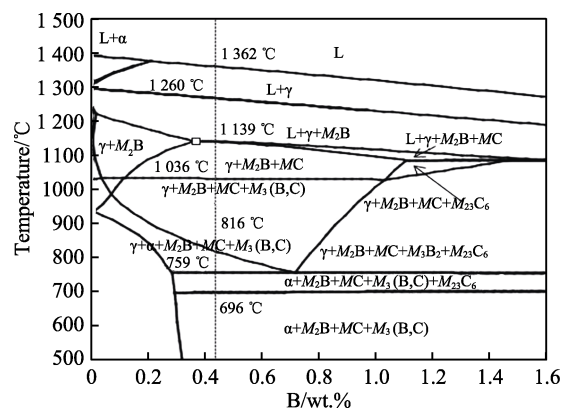


图3 高硼高速钢平衡相图^[15]
Fig.3 Equilibrium phase diagram of high boron HSS^[15]

系合金组织变化规律。随着Fe-Cr-B合金中Cr含量的上升,硼碳化物中的部分Fe元素被Cr元素取代,部分基体组织由珠光体和铁素体转变为马氏体,硬度及耐磨性上升,淬火处理有利于Fe-4Cr-B合金硼化物的孤立分布,随淬火温度升高,硬度及耐磨性呈先增大后减小的趋势^[16-17]。龚建勋等^[18]采用埋弧堆焊制备Fe-Cr-B-C堆焊层,基体组织由大量铁素体、少量奥氏体与马氏体组成,硼化物 $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ 、 $(\text{Fe,Cr})_3\text{B}$ 、 $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{B}_6$ 等呈不同形态分布。刘政军等^[19-20]的研究结果表明,Fe-Cr-C-B堆焊层中硼化物呈现鱼骨状、

蜂窝状、菊花状、层片状等形态,并解释了层片状、菊花状等不同形态硼化物的形成机理。王智慧等^[21]采用药芯焊丝气体保护堆焊方法制备 Fe-Cr-B-C 堆焊合金,不同 B 含量显微组织形貌如图 4 所示,堆焊层硬度随 B 含量的增加而增加,耐磨性呈先提高后降低的趋势,当硼的质量分数为 4% 时,合金耐磨性能可提高 6.67 倍。

周烨等^[22]用 CO₂ 气体保护堆焊的方法在 Q235 钢基板上制备 Fe-Cr-B 系耐磨合金,随着 Cr 含量的增加, Cr 原子置换硼化物中 Fe 原子,发生 $\text{Fe}_2\text{B} \rightarrow (\text{Fe,Cr})_2\text{B} \rightarrow (\text{Cr,Fe})_2\text{B}$ 的转变,硼化物逐渐转变为长条状 $M_2\text{B}$,合金硬度及耐磨性逐渐提高,不同 Cr 含量的显微组织形貌如图 5 所示。

不同的热处理冷却方式对 Fe-Cr-B 合金基体组织未产生明显影响,但随冷却速度下降,析出相数量增多,尺寸增大,均匀性降低,合金韧性下降^[23]。杜忠泽等^[24]研究了淬火温度以及冷却方式对 Fe-Cr-B 合金组织的影响,不同淬火方式下均获得了马氏体组织而硼化物形态未发生改变,随淬火温度升高,硬度先升后降,硼化物有断网趋势,韧性增强。当淬火温

度高于 1 050 °C 时, Cr 和 B 在奥氏体中的固溶度增加,二次硼化物重新分解融入奥氏体,提升了高温奥氏体的稳定性并形成了残余奥氏体,随淬火温度的升高,断网趋势越明显,这有利于阻止裂纹扩展、提高韧性,合金硬度与耐磨性呈先升后降的趋势^[25]。高硼高速钢在回火温度超过 500 °C 时硬度下降,1 050 °C 油淬且回火温度为 500 °C 时耐磨性最佳^[26]。牟楠等^[27]总结了不同热处理工艺对高硼铁基合金组织和性能的影响,认为淬火温度在 1 000~1 050 °C 范围内得到的合金综合性能最佳。

相对于 Fe-B-C 系合金, Fe-B-Cr-C 系为国内外研究较广泛及成熟的合金体系, Cr 元素的加入主要有 3 点影响: (1) 替代硼化物中 Fe 原子形成初生 $M_2\text{B}$, 共晶 $M_2(\text{B,C})$ 、 $M_3(\text{B,C})$ 、 $M_{23}(\text{C,B})_6$ 等复合硼化物,同时引起的晶格畸变使硼化物力学性能增强; (2) 固溶进基体形成 Fe(Cr) 基体,提高强度以及增加奥氏体稳定性; (3) 降低 Fe-B 共晶点,硬质相数量增加,随 B 含量的上升,硼化物形貌发生变化,合金耐磨性先升后降。硼化物具有硬脆性,熔覆层中应避免形成粗大且不均匀的硼化物硬质相。Cr 元素的添加

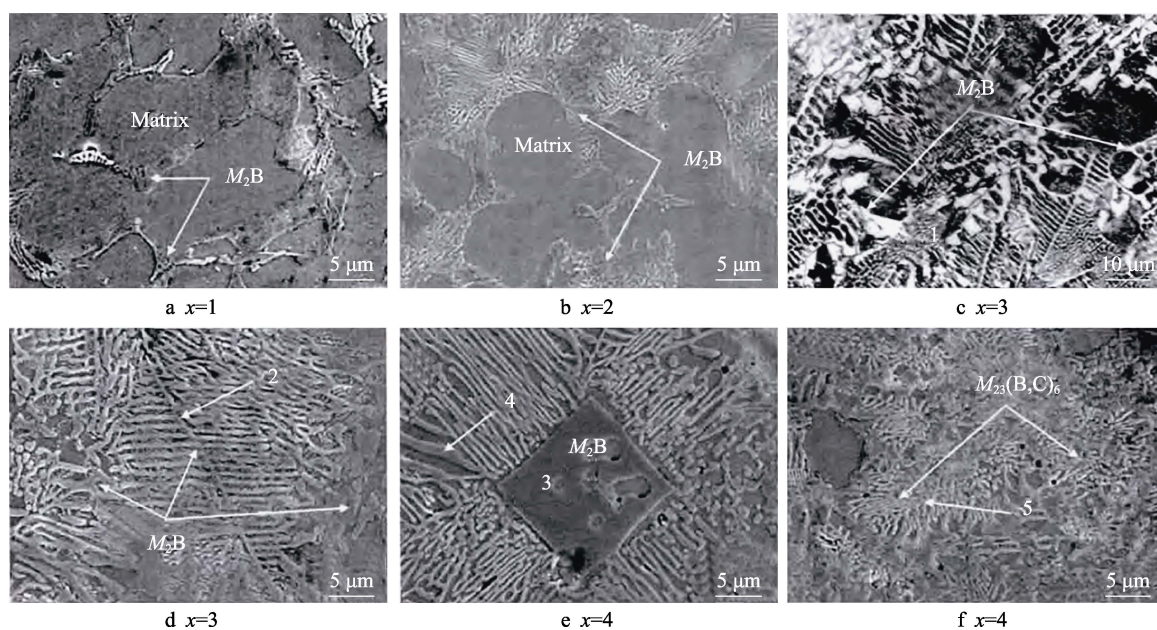


图 4 Fe-xB-12Cr-0.1C 显微组织^[21]
Fig.4 Fe-xB-12Cr-0.1C microstructure morphology^[21]

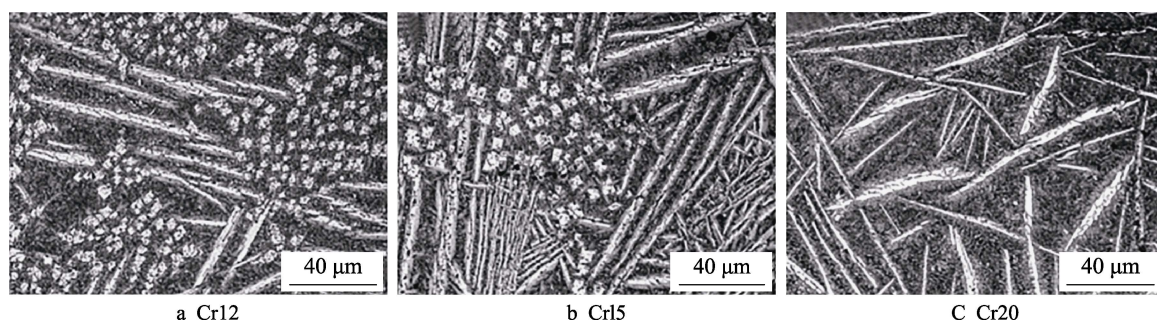


图 5 Fe-3.5B-xCr-0.1C 显微组织^[22]
Fig.5 Fe-3.5B-xCr-0.1C microstructure morphology^[22]

使 Fe-B-C 系合金中粗大的棒状 Fe_2B 形成细长条状的铁铬硼化物 M_2B , 并使熔覆层能表现出更优异的耐磨性及抗冲击韧性。随 Cr 含量升高, 更多的长条状初生 M_2B 以及残余奥氏体形成, 硼化物形态如图 4 和 5 所示。根据成分以及热处理工艺对硼化物的影响规律, 对 Cr、B、C 含量进行控制, 最终达到对熔覆层凝固组织及性能调控的目的。

1.3 Fe-B-Cr-Mo-C 系

Mo 为铁素体形成元素, 可改善抗氧化性能和高温耐磨性, Mo 元素的加入置换了硼化物中的铁原子, 促使硼化物种类发生改变, 熔池中的二元硼化物可能与其他合金元素反应形成以三元硼化物为硬质相的铁基合金。山东大学的王洪权^[28]和靳军^[29]通过 Mo-Fe-B 平衡相图 (见图 6) 以及熔池中各反应吉布斯自由能 ΔG 的计算, 在热力学条件下对 Mo-Cr-Fe-B 系堆焊层凝固的组织转变过程进行分析。

Mo 元素的添加促使富 Mo 和富 Cr 的 $\text{M}'_2\text{B}$ (其中 M' 代表 Fe、Cr、Mo) 生成, 其耐磨性比富 Fe 的 M_2B 高^[30]。Chen 等^[31]研究表明, 当高硼铸钢 Mo 的质量分数为 0%~3% 时, 随 Mo 含量上升, 鱼骨状富 Fe 和富 Cr 的 $\text{M}'_2\text{B}$ 硼化物转化为树枝状的富 Fe 的 $\text{M}'_2\text{B}$ 、块状和聚集状的富 Cr 的 $\text{M}'_2\text{B}$ 以及粒状富 Mo 的 $\text{M}'_2\text{B}$, 由于硼化物以及固溶强化的作用, 硬度随 Mo 含量上升而逐渐上升, 冲击韧性先升后降, 在 Mo 的质量分

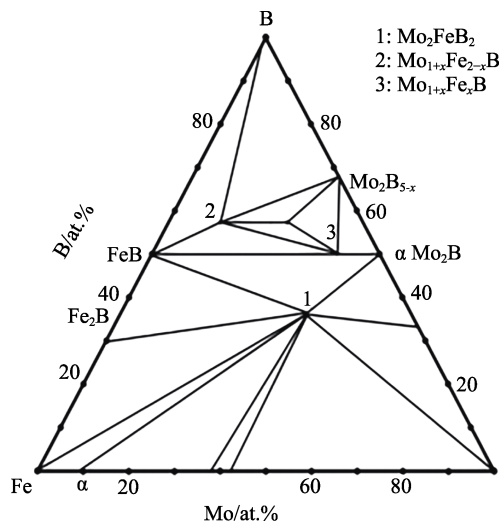


图 6 Mo-Fe-B 系在 1 050 °C 的等温截面相图^[28]

Fig.6 Isothermal section of Mo-Fe-B system at 1 050 °C^[28]

数为 2% 时达到最高值, 耐磨性提高。Jin 等^[32]制备了 Mo 的质量分数为 10%~30% 的 Fe-B-Cr-Mo 合金, 不同 Mo 含量熔覆层显微组织如图 7 所示, 研究结果表明, 当 Mo 的质量分数低于 20% 时, 几乎没有块状硬质相 Mo_2FeB_2 生成, 当 Mo 的质量分数高于 20% 时, 块状硬质相均匀分布在共晶组织上, Mo 元素主要富集于硬质相 Mo_2FeB_2 , Mo 的质量分数为 30% 和 25% 时具有最佳的耐磨性能。

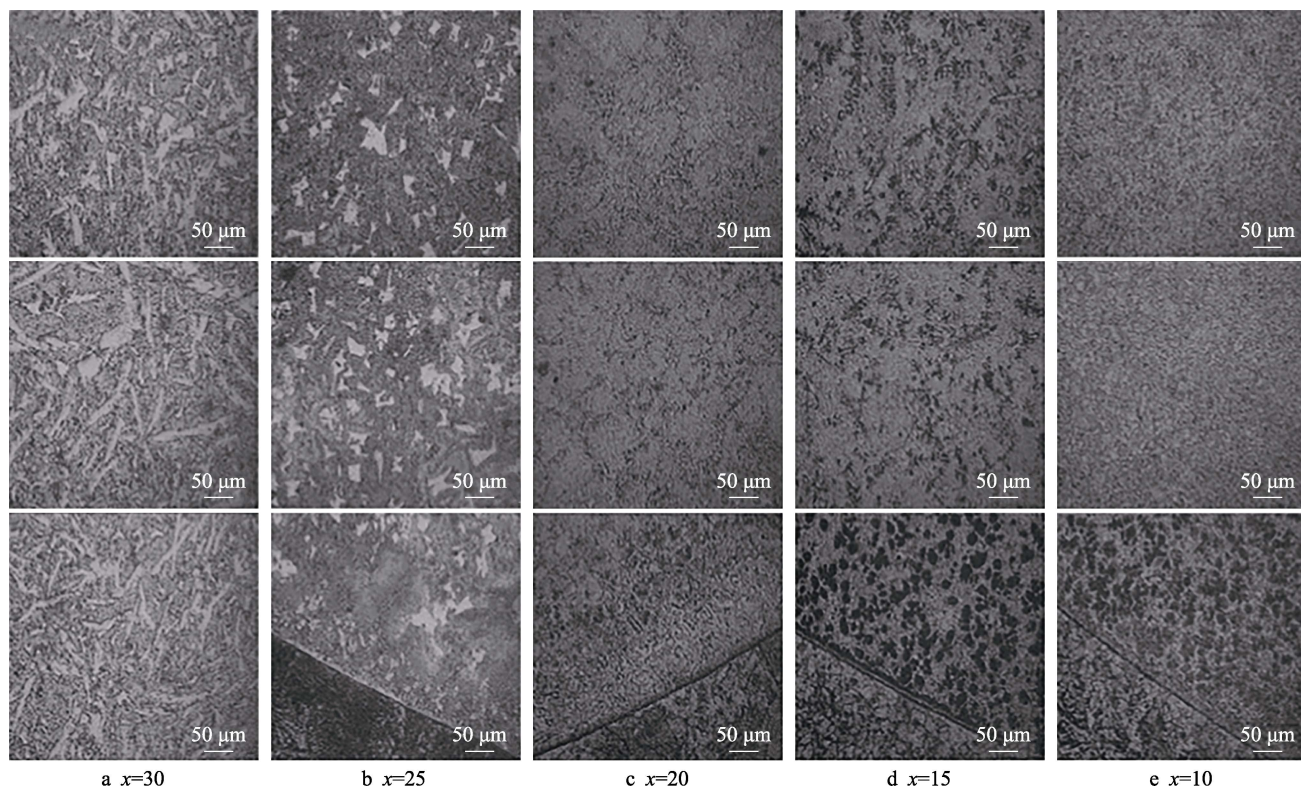


图 7 Fe-13Cr-xMo-4B 显微组织^[32]

Fig.7 Fe-13Cr-xMo-4B microstructure morphology^[32]

李子豪等^[33]自制了 Mo 的质量分数为 25% 的 Mo-Cr-Fe-B 系药芯焊丝, 通过堆焊法在 Q235 钢基体表面制备覆层, 覆层的主要组成为 Fe(Mo,Cr) 基体, 块状三元硼化物 Mo_2FeB_2 、 $M'_3\text{B}_2$, 以及网状二元硼化物 Fe_2B 、 CrB 、 MoB , 覆层显微硬度最高可达 980HV0.5, 约为 Q235 钢基体相应值的 5 倍, 耐磨性良好。Yu 等^[34-35]发现当碳的质量分数为 0.5% 时, 制备的 Mo_2FeB_2 金属基陶瓷硬度最高, 而不含碳时, 强度及韧性最高, 并且随 Mo/B 原子数比值从 0.8 升至 1.1, 硬度下降, 当 Mo/B 原子数比值为 0.9 时强度最高。王洪权^[28]进一步研究了 Mo/B 原子数比值在 0.34~1.1 范围的合金系, 发现当 Mo/B 原子数比值为 0.34 时生成的 $M_3\text{B}_2$ 硬质相含量最高, 并且均匀分布在共晶基体上, 熔覆层耐磨性最佳。此外, Cr 元素会替代 Mo_2FeB_2 的 Mo 原子, 发生晶格畸变, 降低各向异性而发生等轴晶转变, Ni 元素会使硬质相部分团聚长大^[36], 因此在合金元素的影响下, $M'_3\text{B}_2$ 在生成过程中会出现分布不均及形态各异的现象。 Mo_2FeB_2 陶瓷金属经过正火及 910 °C 淬火处理后可获得马氏体基体以及更细小的组织^[37]。张恒等^[38]认为堆焊过程反应时间过短, 导致熔池中未完全反应生成 Mo_2FeB_2 , 剩余 B 在晶界形核生成网状 $M'_2\text{B}$ 共晶组织, Mo-Cr-Fe-B 堆焊试样在经 950 °C 保温 30 min 淬火或退火处理后, 硬质相三元硼化物 Mo_2FeB_2 增多, 组织中网状硼化物消失。

综上所述, Mo、Cr 的加入会替换硼化物中的原子 Fe, 形成多元素复合硼化物如 $M'_2(\text{B,C})$ 等, 其中 M' 代表的 Fe、Cr、Mo 原子占比的变化将导致硼化物形态发生改变。同时合金元素固溶进基体形成的 Fe(Cr,Mo) 有固溶强化作用。当 $w(\text{Mo}) > 20\%$ 时, Mo 将参与反应生成三元硼化硬质相 Mo_2FeB_2 , 将大幅提升合金耐磨性。通过降低 C 含量增强韧性, 调整 Ni、Cr、Mo、B 各元素含量形成高硬度均匀分布的 $M'_3\text{B}_2$ 硬质相复合强韧基体的耐磨熔覆层。由于三元硼化物 Mo_2FeB_2 呈细小块状分布, 且热稳定性要高于 Fe_2B , 有利于熔覆层在高温环境下保持良好的耐磨性能, 但目前国内对三元硼化物研究仍然较少, Mo_2FeB_2 的生长形态、数量及分布不稳定, 熔覆层制备工艺重现性不足, 需要对 Mo_2FeB_2 的生长机理做进一步研究。

1.4 其他元素影响

其他元素如 Ni、Ti、RE 等元素对高硼铁基合金主要起细化组织、改善硼碳化物形态分布等作用。Ni 为 $\gamma\text{-Fe}$ 形成元素, Ni 能提高熔覆层韧性, 改善熔覆层组织和力学性能, 随着 Ni 含量的上升, 有效降低了 Fe-Cr-Ni-B-Si 熔覆层的裂纹敏感性, 使熔覆层裂纹逐渐消失^[39]。在 Fe-B-C 系堆焊层中加入 Ti 元素, 对过共晶高碳高硼堆焊合金初生硼化物有明显的细化作用, 对共晶硼化物的形态、大小也有很大影响^[40]。Ca 和 Ti 可以细化和球化硼碳化物 $M_2(\text{B,C})$,

使硼碳化物减少聚集分布进而更加稳定, Ca-Ti 由于具有较好的抗氧化性且其基体及增强相具有良好的力学性能, 可有效改善高硼高速钢高温耐磨性能^[41]。随着锰含量的升高, 高硼铁基合金淬透性及奥氏体稳定性增加, 合金硬度呈现先上升后下降的趋势, 硼化物含量无明显变化, 并且高锰含量促使菊花状 $\text{Fe}_3(\text{C,B})$ 形成^[42]。Fe-Cr-B-Al 铸态合金中 Al 的加入能够细化晶粒并使元素分布均匀, 促使生成连续致密的氧化膜, Fe-Cr-B-Al 耐高温氧化明显增强^[43]。RE 可提高形核率并大幅细化 Mo_2FeB_2 硬质相, 碳弧堆焊制备原位生成 Mo_2FeB_2 堆焊层获得的 Mo_2FeB_2 平均尺寸仅为 4.78 μm , 耐磨性显著提升^[44]。三元硼化物性能优于二元硼化物, 多元材料体系表现出更优异的性能, Ni、Ti、RE 等元素复合硼化物均有利于高硼铁基合金性能的提高, 但合金成分、热处理工艺以及制备技术的经济性有待进一步研究。

2 高硼铁基熔覆层制备技术

表面熔覆技术是以氩弧、等离子弧、激光等作为加热热源, 根据熔覆层的性能需求, 选取合理的高硼铁基熔覆合金材料, 使熔覆材料与母材熔化结合形成熔覆层, 获得良好的高温耐磨、抗氧化、耐腐蚀等性能。

2.1 激光熔覆

激光熔覆技术是利用高能量密度的激光束作为热源, 快速加热熔覆材料并冷却凝固形成具有特殊性能熔覆层的工艺过程, 与其他表面熔覆技术相比, 高冷却速率有利于组织细化, 并具有稀释率低、热影响区及工件形变小的优势。Li 等^[45]利用激光熔覆技术制备 Fe-Cr-B-Al-C 熔覆层, 获得与母材形成良好冶金结合的致密熔覆层, 组织由铁基体与硼碳化物组成, 硬度比 2Cr13 钢基体提高 3.3 倍, 具有优异耐磨性能。Feng 等^[46]利用激光涂覆技术在 42CrMo 钢表面制备了含硼高速钢涂层, 凝固析出的硼碳化物能有效提高涂层的硬度及耐磨性能。段明伟等^[47]利用激光涂覆技术在 H13 钢表面获得致密均匀的铁基涂层, 随着温度从 400 °C 升至 600 °C, 高温下涂层的磨损失重明显低于 H13 钢的磨损失重, 高温耐磨性显著提高。为了解决传统激光熔覆存在的熔覆效率低的问题, 德国研究人员研发出超高速激光熔覆技术, 不仅极大提高了生产效率, 还具有高粉末利用率和极低的稀释率。

2.2 等离子熔覆

等离子弧熔覆原理如图 8 所示, 采用等离子弧作为热源, 具有熔覆效率高、粉末利用率高、稀释率低、便于自动化的特点, 虽然成形质量及精度低于激光熔覆技术, 但具有设备成本低以及工作环境要求低的优势。刘政军等^[48]采用等离子弧熔覆技术在钢表面堆焊 Fe-Cr-B-C 系的铁基复合材料, 等离子熔覆熔池冷却

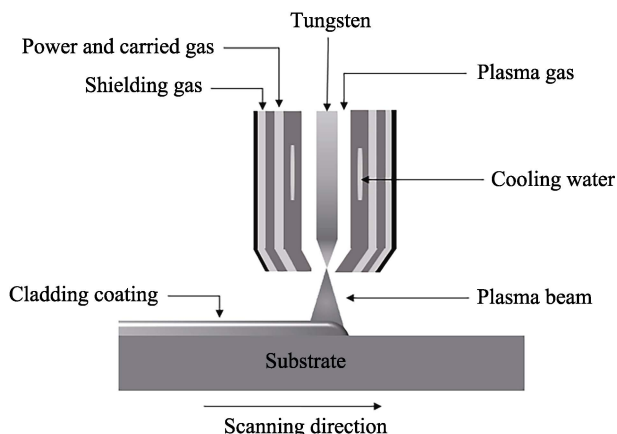


图8 等离子熔覆示意图

Fig.8 Schematic diagram of plasma surfacing

速度快,基体组织主要由马氏体组成,高熔点高硬度的硼碳化物有效提高了耐磨性。宗琳等^[49]采用等离子弧堆焊技术制备了硼化物强化铁基堆焊合金,堆焊层组织由硬质相和基体组成,随着硼含量的增加,硬质相增加,耐磨性先增大后下降。对于原位生成硬质相复合铁基材料,为了提升等离子熔覆层的性能,除了对熔覆材料成分进行优化外,还可采取电磁搅拌、超声振动等一些外力手段。在等离子熔覆过程中外加磁场,熔池液体在磁场作用下发生旋转作用,可以使熔池中形核率提高且各处形核概率相等以及过冷度提高,产生明显的晶粒细化作用,获得均匀细小的硬质相,提高耐磨性^[50]。

2.3 氩弧熔覆

传统氩弧熔覆技术采用电弧作为热源,熔覆过程热量集中,在氩气保护下熔覆层氧化烧损少,但熔覆飞溅较严重,成形质量相对略低。该技术设备成本低,操作便于观察,灵活性远高于激光和等离子熔覆,可在复杂工况下对大型工件进行熔覆,有利于大规模工业生产。Xu等^[51]发现采用氩弧熔覆制备的 Mo_2FeB_2 基金属陶瓷堆焊层耐磨性优于真空烧结制备的涂层,堆焊层与母材具有良好的冶金结合且没有明显的气孔,显微组织致密。赵迪等^[52]采用钨极氩弧制备原位自生铁基复合涂层,得到的涂层与基体结合良好且没有气孔等冶金缺陷,随着Cr元素的加入以及B含量的提高,硼化物形态由网状结构向块状转变,原位生成复合陶瓷增强相分布均匀,涂层硬度显著提高。上述介绍的等离子、激光、电弧为单一热源的熔覆技术,单一技术均存在各自的局限性,因此激光-等离子熔覆、激光-电弧熔覆、TIG-MIG熔覆等复合热源熔覆技术具有一定的开发应用前景。

2.4 电子束熔覆

电子束熔覆技术是一种新型表面熔覆技术,需先在基体上预置涂层,以加速电子为入射能量,在极短

的时间内使材料完成加热、熔化及凝固与基板熔合。与其他熔覆技术相比,电子束的能量和轨迹可控性强,加工速度快,还有具有绿色环保等优势,但由于价格昂贵,对加工环境要求高,需要在真空环境下进行,难以规模化生产。Santana等^[53]通过电子束熔覆在低碳钢表面制备具有良好冶金结合效应的Fe-Cr-Nb-B熔覆层,熔覆层稀释率较低,硼化物均匀分散在基体中,在摩擦磨损试验中,熔覆层在高低滑动速度条件下耐磨性均显著高于母材。

2.5 熔覆工艺优化

熔覆层制备的工艺优化也是高质量熔覆层的关键因素,根据不同的焊接材料和熔覆方法调节出合适的熔覆工艺,获得无冶金缺陷、低稀释率的熔覆层是保证其性能的重要前提。

熔覆材料与母材的冶金结合对熔覆层有一定的稀释作用,稀释率是影响熔覆层质量的重要因素,图9为熔覆层稀释率示意图,为方便计算可由式(1)表示熔覆层稀释率。

$$\eta = \frac{h}{H+h} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为稀释率; h 为熔覆层熔深; H 为熔覆层余高。

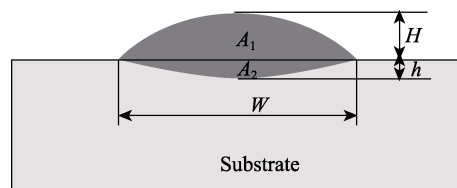


图9 熔覆层稀释率示意图

Fig.9 Schematic diagram of dilution rate of cladding layer

苏健晖等^[54]采用 CO_2/MAG 在Q235钢板上制备了Fe-Cr-B-C系高硼铁基堆焊层,随着热输入量的增大,熔池温度升高且冷却速率降低,母材熔化量增大并向熔覆层扩散,稀释作用增大,堆焊层中的 $(\text{Fe,Cr})_3(\text{C,B})$ 含量减少,初晶 (Fe,Cr) 和 $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ 含量增加,硬度降低。蔡春波等^[55]采用数值模拟对不同预热温度下的激光熔覆铁基涂层进行分析,在20~300℃范围内,随预热温度升高,熔覆层贝氏体含量逐渐增加,产生较大残余应力,预热温度升高至300℃以后,冷却速度显著降低,组织中铁素体含量逐渐增加,残余应力减小。熔覆层成形同时受到送丝/粉速率、熔覆速度、电流和预热温度等多个工艺参数的影响,因此工艺调控是改善熔覆层成形质量的关键手段。

多层多道熔覆过程中,随着熔覆层数的增加,母材对熔覆层的稀释作用减弱。Gramajo等^[56]采用半自动焊制备了Fe-(Cr,Mo,W)-(C,B)涂层,研究单层与双层熔覆对组织影响,结果表明,双层堆焊层表现出更

高的硬度,耐磨性比单层堆焊层高 20%~30%,但双层堆焊层裂纹较多。练国富等^[57]采用激光熔覆制备高速钢多道熔覆层,认为较低搭接率熔覆层具有较高表面平整度和熔覆效率,而高搭接率可减小气孔面积。多层熔覆时要控制好层间的温度,温度太低达不到预热效果,冷却速率过快会增大淬硬性,温度太高会造成热输入量大,冷却速率过慢会使晶粒粗化,多道熔覆时选择适当的搭接率才能获得成形良好的熔覆层。

3 总结与展望

硼化物增强铁基合金具有硬度高、成本低和高温稳定性良好的优势,国内外已有大量研究人员对其组织与性能做了深入研究,从以下 3 个方面对高硼铁基材料的研究进行总结与展望。

1) 自硼化物作为耐磨硬质相的研究方向提出以来,除 Fe_2B 外,已开发出各类二元硼化物及三元硼化物为硬质相的新型合金化体系,并在耐磨及增韧方面取得一定成果,但对于各物相的反应形成机理仍有待深入研究,未来可通过热力学、动力学等方法分析凝固过程中的相变反应以及各元素相互作用机理,有效优化合金体系。

2) 现阶段高硼铁基材料在铸造和电弧堆焊领域研究应用较多,需要更全面开发应用于等离子熔覆、激光熔覆、复合熔覆等先进熔覆技术的高硼铁基合金材料,并探索该材料在不同熔覆技术下的最佳工艺参数。此外,目前对高硼铁基合金的常温耐磨性能研究较为普遍,由于硼化硬质相具有高温稳定性,其高温磨损性能具有广阔的研究应用前景。

3) 传统优化高硼铁基熔覆层的方法通常需进行大量实验对组织结构和反应过程进行分析。通过与现代计算科学技术结合,利用数值模拟对熔覆层温度场及应力场进行分析,利用神经网络通过已有数据生成模型,对新型材料成分、组织与性能之间规律进行预测,能够大幅提高研发效率并降低成本。

参考文献:

- [1] SHI Xiao-li, JIANG Ye-hua, LI Zu-lai, et al. The Wear Mechanism of High-Boron, Medium-Carbon Alloy at High Temperature[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2016, 69(10): 1801-1810.
- [2] YUAN Zhen-tao, CHONG Xiao-yu, SUI Yu-dong, et al. Precipitation Behavior of Boron-Carbide Hard Phase Comprising a New High-Boron High-Speed Steel[J]. Materials Research Express, 2019, 6(10): 106516.
- [3] 耿太. 材料热力学计算及其在合金制备中的应用[D]. 天津: 河北工业大学, 2005: 37-46.
GENG Tai. Application of Thermodynamic Calculations to the Development of Alloys[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2005: 37-46.
- [4] ENOKI M, TAKAHASHI K, MITOMI S, et al. Electron Theory Calculation of Thermodynamic Properties of Steels and Its Application to Theoretical Phase Diagram of the Fe-Mo-B Ternary System[J]. ISIJ International, 2020, 60(12): 2963-2972.
- [5] 庄明辉. 高硼铁基堆焊合金组织结构形成机理及耐磨性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 39-53.
ZHUANG Ming-hui. Microstructure Formation Mechanism and Wear Resistance of High Boron Iron-Based Surfacing Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 39-53.
- [6] YI Da-wei, XING Jian-dong, MA Sheng-qiang, et al. Investigations on Microstructures and Two-Body Abrasive Wear Behavior of Fe-B Cast Alloy[J]. Tribology Letters, 2012, 45(3): 427-435.
- [7] SANG P, FU H, QU Y, et al. Effect of Boron Concentration on Solidification Structure and Hardness of Fe-B-C Wear-Resistant Alloy[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2015, 46(9): 962-969.
- [8] MA Zhen, MU Li-ting, WANG Jun, et al. Study on Thermal Stability of Hypereutectic Surfacing Alloy Fe_2B Hard Phase[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 199(5): 52051.
- [9] ZHUANG Ming-hui, LI Mu-qin, WANG Jun, et al. Study on Composition, Microstructure and Wear Behavior of Fe-B-C Wear-Resistant Surfacing Alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(12): 6182-6192.
- [10] 何正员, 刘美红, 赵国荣, 等. 热处理对 Fe-0.44C-2.95B 合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(12): 103-106.
HE Zheng-yuan, LIU Mei-hong, ZHAO Guo-rong, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Fe-0.44C-2.95B Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(12): 103-106.
- [11] 何金宇, 徐艳升, 苏健晖. 热处理对高硼铁基堆焊合金材料组织与性能的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(12): 34-38.
HE Jin-yu, XU Yan-sheng, SU Jian-hui. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of High Boron Iron Based Surfacing Alloy Materials[J]. Materials Protection, 2020, 53(12): 34-38.
- [12] YI Y L, LI Q, XING J D, et al. Effects of Cooling Rate on Microstructure, Mechanical Properties, and Residual Stress of Fe-2.1B (wt%) Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 754: 129-139.
- [13] GUO Chang-qing, KELLY P M. Boron Solubility in Fe-Cr-B Cast Irons[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 352(1/2): 40-45.
- [14] MA S, XING J, LIU G, et al. Effect of Chromium Concentration on Microstructure and Properties of Fe-3.5B Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(26): 6800-6808.

- [15] 苑振涛. 高硼高速钢相平衡热力学设计及硼碳化物硬质相形成机制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018: 103-118.
YUAN Zhen-tao. Thermodynamic Design of Phase Equilibrium for High Boron HSS and Formation Mechanism of Boron Carbide Hard Phases[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018: 103-118.
- [16] TIAN Ye, JU Jiang, FU Han-guang, et al. Effect of Chromium Content on Microstructure, Hardness, and Wear Resistance of As-Cast Fe-Cr-B Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(10): 6428-6437.
- [17] TIAN Ye, FU Han-guang, LIN Jian, et al. Microstructure and Properties of Casting Fe-Cr-B Alloy after Quenching Treatment[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72(7): 1823-1835.
- [18] 龚建勋, 李丹, 肖逸锋, 等. Fe-Cr-B-C 堆焊合金的显微组织及耐磨性[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(3): 136-141.
GONG Jian-xun, LI Dan, XIAO Yi-feng, et al. Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-B-C Hardfacing Alloys[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(3): 136-141.
- [19] 刘政军, 勾健, 贾华, 等. Fe-Cr-C-B 系药芯焊丝的显微组织与耐磨性[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(6): 618-622.
LIU Zheng-jun, GOU Jian, JIA Hua, et al. Microstructures and Wear Resistance of Fe-Cr-C-B Series Flux-Cored Wire[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2016, 38(6): 618-622.
- [20] 贾华, 李萌, 刘政军. 药芯焊丝明弧堆焊 Fe-Cr-C-B 合金组织及耐磨性[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(1): 52-56.
JIA Hua, LI Meng, LIU Zheng-jun. Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C-B Alloy Prepared by Flux Cored Wire Arc Surfacing[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(1): 52-56.
- [21] 王智慧, 万国力, 贺定勇, 等. Fe-Cr-B-C 堆焊合金的组织与耐磨性[J]. 材料工程, 2014, 42(9): 57-62.
WANG Zhi-hui, WAN Guo-li, HE Ding-yong, et al. Microstructures and Wear Resistance of Fe-Cr-B-C Hardfacing Alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2014, 42(9): 57-62.
- [22] 周烨, 王国红, 贺定勇, 等. 铬含量对 Fe-Cr-B 堆焊合金显微组织及耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 88-92.
ZHOU Ye, WANG Guo-hong, HE Ding-yong, et al. Effects of Chromium Content on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-B Surfacing Alloys[J]. Surface Technology, 2017, 46(1): 88-92.
- [23] 花晓燕, 郭长庆, 韩继伟, 等. 冷却速度对 Fe-Cr-B 合金显微组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(S1): 47-51.
HUA Xiao-yan, GUO Chang-qing, HAN Ji-wei, et al. Effects of Cooling Rate on Microstructure of Fe-Cr-B Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(S1): 47-51.
- [24] 杜忠泽, 李颖, 符寒光, 等. 淬火工艺对 Fe-Cr-B 合金显微组织和硬度的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(S2): 50-54.
DU Zhong-ze, LI Ying, FU Han-guang, et al. Effects of Quenching Process on Microstructure and Hardness of Fe-Cr-B Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(S2): 50-54.
- [25] 梁耀, 于晓华, 种晓宇, 等. 淬火温度对轧辊用高硼铁基合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(8): 86-91.
LIANG Yao, YU Xiao-hua, ZHONG Xiao-yu, et al. Effect of Quenching Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of High-Boron Fe-Based Alloy for Roll[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(8): 86-91.
- [26] GUANG Fu-han, NI Liu-xiao, WEI Yang-yong, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of High Boron-High Speed Steel[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71(10): 2423-2432.
- [27] 牟楠, 卢静, 周海铭, 等. 铸造 Fe-C-B 耐磨合金增韧研究与进展[J]. 材料导报, 2017, 31(15): 68-74.
MU Nan, LU Jing, ZHOU Hai-ming, et al. Research and Development of the Toughening of Cast Fe-C-B Wear-Resistant Alloys[J]. Materials Review, 2017, 31(15): 68-74.
- [28] 王洪权. Mo-Cr-B-Fe 系堆焊合金组织与性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2016: 65-73.
WANG Hong-quan. Study on the Microstructure and Properties of Hard Facing Alloy with Mo-Cr-B-Fe System[D]. Jinan: Shandong University, 2016: 65-73.
- [29] 靳军. Mo₂FeB₂ 三元硼化物堆焊金属组织与性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2020: 28-32.
JIN Jun. Study on the Microstructure and Properties of Mo₂FeB₂ Ternary Boride Surfacing Metal[D]. Jinan: Shandong University, 2020: 28-32.
- [30] YI Yan-liang, XING Jian-dong, REN Xiang-yi, et al. Investigation on Abrasive Wear Behavior of FeB Alloys Containing Various Molybdenum Contents[J]. Tribology International, 2019, 135: 237-245.
- [31] CHEN Z, MIAO S, KONG L, et al. Effect of Mo Concentration on the Microstructure Evolution and Properties of High Boron Cast Steel[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(4): E975.
- [32] JIN Jun, SUN Jun-sheng, WANG Guang-le. Effect of Mo Content on Microstructure and Wear Resistance of Mo-Fe-B Claddings[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 81: 233-241.
- [33] 李子豪, 潘应君, 柯德庆, 等. 堆焊 Mo-Cr-Fe-B 合金覆层的组织及性能研究[J]. 武汉科技大学学报, 2018, 41(4): 252-256.
LI Zi-hao, PAN Ying-jun, KE De-qing, et al. Microstructure and Properties of Mo-Cr-Fe-B Alloy Coating by

- Surfacing[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2018, 41(4): 252-256.
- [34] YU Hai-zhou, LIU Wen-jun, ZHENG Yong. Effect of Carbon Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Mo_2FeB_2 Based Cermets[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2011, 29(6): 724-728.
- [35] YU Hai-zhou, ZHENG Yong, LIU Wen-jun, et al. Effect of Mo/B Atomic Ratio on the Microstructure and Mechanical Properties of Mo_2FeB_2 Based Cermets[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009, 28(3): 338-342.
- [36] 严孟凯, 季根顺, 马文林, 等. 合金元素对 Mo_2FeB_2 基金属陶瓷组织及性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2014, 32(4): 243-247.
- YAN Meng-kai, JI Gen-shun, MA Wen-lin, et al. Effect of Elements on the Microstructure and Properties of Mo_2FeB_2 Based Cermets[J]. Powder Metallurgy Technology, 2014, 32(4): 243-247.
- [37] PENG Jun-song, PAN Ying-jun, ZHANG Heng. The Influence of Heat Treatment on the Interface and Properties of Mo_2FeB_2 Cermets-Steel Clad Material[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3072(541/542): 199-203.
- [38] 张恒, 潘应君, 柯德庆, 等. 热处理对 Fe-Mo-Cr-B 堆焊合金组织的影响[J]. 武汉科技大学学报, 2016, 39(3): 180-184.
- ZHANG Heng, PAN Ying-jun, KE De-qing, et al. Effect of Heat Treatment on the Microstructure of Fe-Mo-Cr-B Hardfacing Alloys[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2016, 39(3): 180-184.
- [39] SONG Wu-lin, ZHU Pei-di, CUI Kun. Effect of Ni Content on Cracking Susceptibility and Microstructure of Laser-Clad Fe-Cr-Ni-B-Si Alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 1996, 80(3): 279-282.
- [40] 云璐, 郝新. Ti 对 Fe-B-C-Ti 系堆焊层组织及耐磨性的影响[J]. 焊接技术, 2020, 49(4): 5-8.
- YUN Lu, HAO Xin. Effect of Ti Content on Microstructure and Wear Resistance of Fe-B-C-Ti Surfacing Layer[J]. Welding Technology, 2020, 49(4): 5-8.
- [41] REN Xiang-yi, FU Han-guang, XING Jian-dong, et al. Research on High-Temperature Dry Sliding Friction Wear Behavior of CaTi Modified High Boron High Speed Steel[J]. Tribology International, 2018, 132: 165-176.
- [42] 陈金, 吴润, 徐凯, 等. 锰在高硼钢凝固中的合金化作用[J]. 热加工工艺, 2020, 49(8): 26-29.
- CHEN Jin, WU Run, XU Kai, et al. Alloying Effect of Manganese in Solidification of High Boron Steel[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(8): 26-29.
- [43] JU Jiang, KANG Mao-dong, WANG Kai-ming, et al. Studies on As-Cast Microstructure and Oxidation Behavior of the FeCrBAl Alloys at 1073 K[J]. Vacuum, 2019, 164: 436-448.
- [44] JIN J, SUN J, WANG W, et al. Effect of Rare Earth on Microstructure and Wear Resistance of In-Situ-Synthesized Mo_2FeB_2 Ceramics-Reinforced Fe-Based Cladding[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(16): E3633.
- [45] LI Jing-jing, JU Jiang, CHANG Wei-wei, et al. Investigation on the Microstructure and Wear Behavior of Laser-Cladded High Aluminum and Chromium Fe-B-C Coating[J]. Materials, 2020, 13(11): 2443.
- [46] FENG Yu-lei, YAO Cheng-wu, SHEN Chen, et al. Influence of In-Situ Synthesized Carboroborides on Microstructure Evolution and the Wear Resistance of Laser Clad Fe-Base Composite Coatings[J]. Materials Characterization, 2020, 164: 110326.
- [47] 段明伟, 王志航, 黄英豪, 等. H13 钢激光涂覆层的高温磨损性能[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(3): 136-141.
- DUAN Ming-wei, WANG Zhi-hang, HUANG Ying-hao, et al. High Temperature Wear Performance of H13 Steel Laser Coating[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019, 40(3): 136-141.
- [48] 刘政军, 李乐成, 苏允海, 等. 硼对等离子熔覆高硼铁基金属组织性能的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(1): 45-48.
- LIU Zheng-jun, LI Le-chen, SU Yun-hai, et al. Effect of Boron on Microstructure and Properties of High-Boron Iron-Based Alloy by Plasma Transferred Arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(1): 45-48.
- [49] 宗琳, 宁建荣. 硼化物强化铁基堆焊合金显微组织与耐磨性[J]. 焊接技术, 2012, 41(8): 13-15.
- ZONG Lin, NING Jian-rong. Microstructure and Wear Resistance of Fe-Based Hardfacing Alloys Reinforced by Borides[J]. Welding Technology, 2012, 41(8): 13-15.
- [50] 时运, 胡荣祥, 马骏, 等. 外加磁场对等离子熔覆 Fe313 合金涂层组织性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(24): 24127-24131.
- SHI Yun, HU Rong-xiang, MA Jun, et al. Effect of External Magnetic Field on Microstructure and Properties of Plasma Cladding Fe313 Alloy Coating[J]. Materials Reports, 2020, 34(24): 24127-24131.
- [51] XU H, SUN J, JIN J, et al. Comparison of Structure and Properties of Mo_2FeB_2 -Based Cermets Prepared by Welding Metallurgy and Vacuum Sintering[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 14(1): E46.
- [52] 赵迪, 马宁, 张柯柯, 等. 钨极氩弧熔覆原位自生铁基复合涂层组织与性能[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 20-25.
- ZHAO Di, MA Ning, ZHANG Ke-ke, et al. Microstructure and Properties of In-Situ Synthesized Fe-Based Composite Coating by Tungsten Inert Gas Cladding[J]. Surface Technology, 2017, 46(7): 20-25.
- [53] SANTANA D A, KOGA G Y, WOLF W, et al. Wear-Resistant Boride Reinforced Steel Coatings Produced by Non-Vacuum Electron Beam Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 386: 125466.