

热处理工艺对 60Cr2MnMoNi 钢组织和性能的影响

王 权¹, 包文清², 刘朋成³, 邬宇轩³, 王子轩¹, 孙 磊¹, 朱 辉⁴

1. 内蒙古中天宏远稀土新材料股份公司, 内蒙古 包头 014060;
2. 包头钢铁(集团)有限责任公司办公室, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
4. 内蒙古包钢钢联股份有限公司轨梁轧钢厂, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:采用 TV-4X 金相显微镜、R(D)-150A1 材料硬度计、N1500C 材料冲击试验机和 INSTRON5989 电子万能材料试验机研究了热处理工艺对 60Cr2MnMoNi 钢组织和性能的影响, 对比分析了不同状态下试样的组织和性能的变化情况。结果表明:60Cr2MnMoNi 钢铸态组织为 P+B+A(残余)+碳化物, 平均硬度为 28.1 HRC, 平均冲击韧性为 15.4 J/cm², 抗拉强度为 795.9 MPa, 屈服强度为 458.1 MPa, 延伸率为 2.6%, 断面收缩率为 1.1%; 退火态组织为 F(少)+P+碳化物, 平均硬度为 24.5 HRC, 平均冲击韧性为 193.4 J/cm², 抗拉强度为 846.6 MPa, 屈服强度为 443.1 MPa, 延伸率为 17.5%, 断面收缩率为 25.3%; 淬火态组织为 B+M+A(残余)+碳化物, 平均硬度为 58.1 HRC, 平均冲击韧性为 14.5 J/cm², 抗拉强度为 1442.6 MPa, 屈服强度为 1186.4 MPa, 延伸率为 2.7%, 断面收缩率为 1.8%; 回火态组织为 S(回火)+B+碳化物, 平均硬度为 45.1 HRC, 平均冲击韧性为 64.9 J/cm², 抗拉强度为 1389.5 MPa, 屈服强度为 1004.4 MPa, 延伸率为 7.4%, 断面收缩率为 10.9%。通过不同热处理工艺改变 60Cr2MnMoNi 钢的组织 and 性能, 能够满足不同工况服役设备对备件的性能需求。

关键词:60Cr2MnMoNi 钢; 热处理工艺; 组织与性能

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)04-0054-05

Effects of Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of 60Cr2MnMoNi Steel

Wang Quan¹, Bao Wenqing², Liu Pengcheng³, Wu Yuxuan³,
Wang Zixuan¹, Sun Lei¹, Zhu Hui⁴

1. Inner Mongolia Zhongtian Hongyuan New Rare Earth Materials Co., Ltd., Baotou 014060, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Office of Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
4. Rail and Beam Rolling Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,

收稿日期: 2025-03-01

作者简介: 王 权(1962-), 男, 内蒙古包头市人, 硕士, 正高级工程师, 现从事金属材料的研发工作。

(Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The effects of heat treatment process on the microstructure and properties of 60Cr2MnMoNi steel are studied as well as the changes of microstructure and properties of samples at different states are compared and analyzed with TV-4X metallographic microscope, R(D)-150A1 material hardness tester, N1500C material impact testing machine and INSTRON5989 electronic universal material testing machine. The results showed that the as-cast microstructure of 60Cr2MnMoNi steel was P + B + A(residual) + carbide, average hardness was 28.1 HRC, average impact toughness was 15.4 J/cm², tensile strength was 795.9 MPa, yield strength was 458.1 MPa, elongation was 2.6% and reduction of area was 1.1%; the annealed microstructure was F(a little) + P + carbide, average hardness was 24.5 HRC, average impact toughness was 193.4 J/cm², tensile strength was 846.6 MPa, yield strength was 443.1 MPa, elongation was 17.5% and reduction of area was 25.3%; the quenched microstructure was B + M + A(residual) + carbide, average hardness was 58.1 HRC, average impact toughness was 14.5 J/cm², tensile strength was 1 442.6 MPa, yield strength was 1 186.4 MPa, elongation was 2.7% and reduction of area was 1.8%; the tempered microstructure was S(temper) + B + carbide, average hardness was 45.1 HRC, average impact toughness was 64.9 J/cm², tensile strength was 1 389.5 MPa, yield strength was 1 004.4 MPa, elongation was 7.4% and reduction of area was 10.9%. The microstructure and properties of 60Cr2MnMoNi steel are changed through different heat treatment processes so that the performance requirements of spare parts for equipment in service under different operating conditions could be met.

Key words: 60Cr2MnMoNi steel; heat treatment process; microstructure and property

热处理工艺是改善经过铸造、锻造、轧制的钢铁材料组织和性能的重要工艺手段,常规的热处理工艺包括退火、正火、淬火和回火等。铸造、锻造和轧制后的钢铁材料可以通过不同的热处理工艺来消除液析碳化物,均匀化学成分,降低钢中有害元素氢的含量,消除钢在生产过程产生的内应力,均匀化或改善组织,细化晶粒,提高钢铁材料的强度、硬度及韧性,满足不同工况环境下设备对备件的使用要求。

耐磨材料是冶金、矿山、建材、电力、化工等行业中研磨设备所用的主要材料,采用合金钢生产的耐磨衬板被大量用于各种型号的球磨机、棒磨机和半自磨机中^[1-3],取代在低冲击载荷环境下使用的耐磨性差的高锰钢^[4-7]和生产成本高的高铬白口铸铁或镍硬铸铁材料^[8-9]。60Cr2MnMoNi 属于高碳低合金钢,是内蒙古中天宏远稀土新材料股份公司自主设计研发的一种新型耐磨材料,主要用于制造各种矿用设备的耐磨备件。该材料以廉价的硅、锰为基础元素,加入一定量的铬、钼、镍等合金元素,并经微量稀土元素变质处理,充分利用碳元素的强化作用,少量合金元素增加钢的淬透性、淬硬性以及稀土在钢中具有净化、变质及合金化作用^[10-12]等原理,配合风淬冷却及回火工艺,获得材料合理的强韧性匹配。本文系统研究了不同热处理工艺对 60Cr2MnMoNi 铸钢的组织与力学性能的影响,为工业大生产提供技术支撑。

1 试验材料制备及试验方案

1.1 试验材料的制备

试验材料采用 1 000 kg 中频感应电炉冶炼,经水玻璃砂型浇注成标准基尔试样。炼钢原材料分别为 930 kg 废钢、8 kg 高碳锰铁合金、5 kg 硅铁合金、45 kg 高碳铬铁合金、7 kg 钼铁合金、5 kg 镍板、3 kg 1[#]稀土合金、1 kg 铝线和 1 kg 增碳剂。出钢前,在炉内进行铝终脱氧,出钢温度 1 620 ℃,包内加入 1[#]稀土合金。钢包内加入造渣剂并覆盖保温剂,钢水镇静 7 min 后进行浇注,浇注温度 1 530 ℃,铸锭缓冷至 300 ℃后开箱空冷。60Cr2MnMoNi 钢的主要化学成分(质量分数,%)为 0.609% C、0.652% Si、1.382% Mn、0.004% P、0.027% S、2.311% Cr、0.374% Mo、0.591% Ni、0.0005% RE,余量 Fe。

1.2 试验方案

采用线切割机床将浇注好的基尔试样分别切割成尺寸为 40 mm × 50 mm × 70 mm 和 40 mm × 50 mm × 200 mm 的毛坯试样,采用 SX13-BYL 高温箱式电阻炉进行 950 ℃ × 2 h 的加热保温、均匀化退火处理;采用 KLS-1200X 中温热处理炉进行 890 ℃ × 2 h 的加热保温、风淬冷却处理及 600 ℃ × 2 h 的加热保温、回火处理,热处理工艺曲线见图 1。热处理后的试样加工成拉伸、硬度、冲击及金相等试样,然后进行不同性能及组织的检测分析,研究

60Cr2MnMoNi 钢铸态、退火态、淬火态及回火态的组织与性能之间的相关关系。

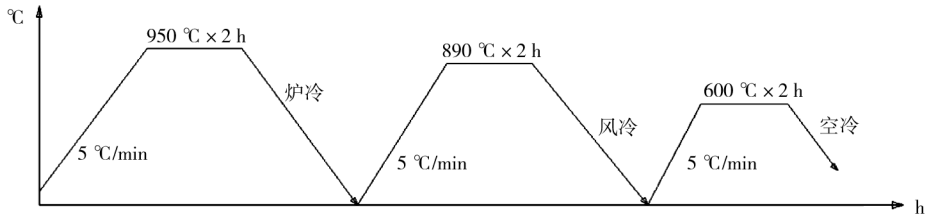


图 1 热处理工艺曲线

2 试验结果及分析

2.1 热处理工艺对铸态 60Cr2MnMoNi 钢组织的影响

将铸态 60Cr2MnMoNi 钢试样按图 1 的热处理

工艺处理,处理后的试样采用线切割机床制备成金相试样,经砂带磨床磨平、金相砂纸磨制和绒布抛光,体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀,采用 TV-4X 金相显微镜进行组织观察,结果见图 2。

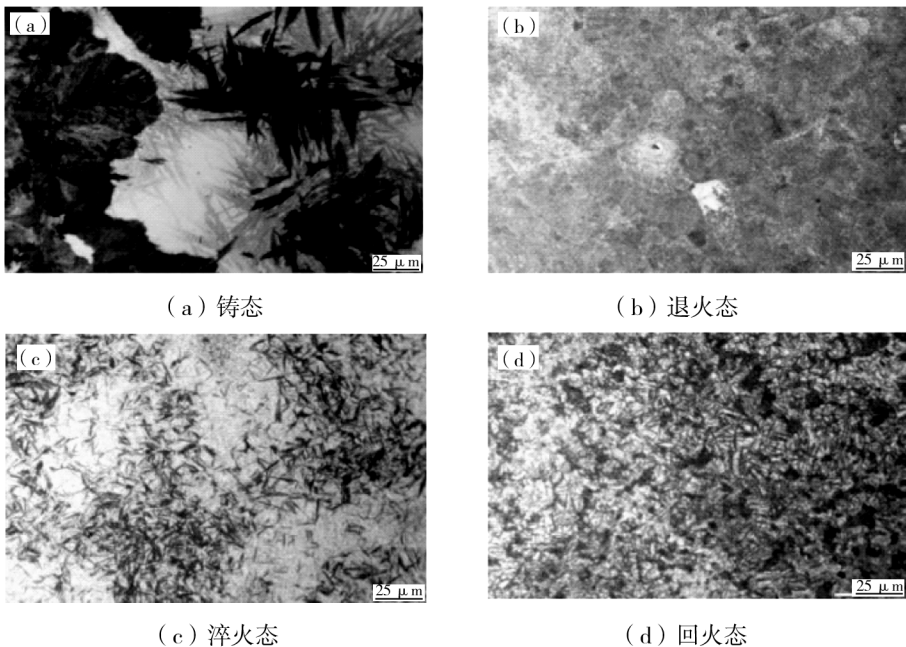


图 2 不同状态 60Cr2MnMoNi 钢金相组织

金相显微镜观察发现,60Cr2MnMoNi 钢铸态组织为 P + B + A (残余) + 碳化物,见图 2(a);经 950 °C 保温退火后组织为 F(少量) + P + 碳化物,见图 2(b),通过退火消除了钢凝固过程中产生的枝晶偏析和区域偏析,实现了成分和组织均匀化,获得了近平衡的金相组织。退火后的 60Cr2MnMoNi 钢经 890 °C 加热保温,然后风淬冷却,获得了 B + M + A(残余) + 碳化物的金相组织,见图 2(c);淬火后的 60Cr2MnMoNi 钢再经 600 °C 加热保温和空冷回

火后,得到了具有较好综合力学性能的 S(回火) + B + 碳化物的平衡组织,见图 2(d)。试验结果说明,60Cr2MnMoNi 铸钢通过不同的热处理工艺处理,能够获得不同的基体组织,组织的改变必将改变钢的力学性能,使其能够满足不同工况服役设备的工业生产的要求。

2.2 热处理工艺对铸态 60Cr2MnMoNi 钢力学性能的影响

2.2.1 热处理工艺对硬度的影响

铸态、退火态、淬火态及回火态试样经过机械加工,分别制成硬度测试样,采用 R(D) - 150A1 型号材料硬度试验机测量试样的洛氏硬度,每个试样从表面到心部共测量 5 点,计算其平均值,得出不同状态试样的硬度变化规律,见图 3。

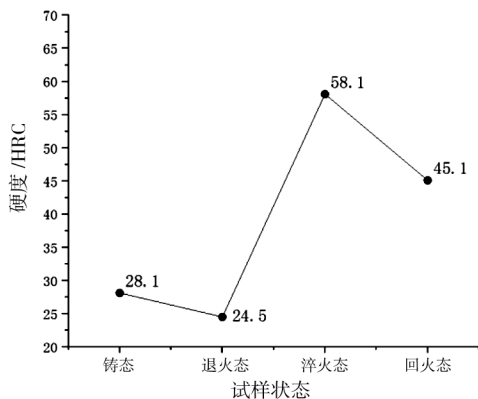


图3 不同状态试样的硬度变化规律

由图3可知,60Cr2MnMoNi 铸钢(缓冷到300 °C 开箱空冷)的洛氏硬度值为 28.1 HRC; 60Cr2MnMoNi 钢 950 °C 加热保温退火后,实现了近平衡态转变,其平均硬度值降低到 24.5 HRC,降低了 3.6 HRC;将退火后的试样继续加热到 890 °C 保温,采用风淬火冷却到室温,试样的平均硬度迅速提高到本试验的最大值 58.1 HRC,这是由于固溶与相变的联合强化机制提高了 60Cr2MnMoNi 钢的硬度。淬火后 60Cr2MnMoNi 钢继续进行 600 °C 加热保温、空冷到室温的回火工艺处理,由于消除了淬火残余应力、过饱和的碳和合金元素再分配,致使平均硬度值降低到 45.1 HRC,与淬火态相比下降了 13 HRC。结果说明,铸态 60Cr2MnMoNi 钢通过不同的热处理工艺处理可以改变铸钢内部的组织结构,进而获得不同的硬度,不同硬度的备件可以应用于不同工况条件下的设备,实现材料性能与服役环境的合理匹配,最大程度地满足工艺需求。

2.2.2 热处理工艺对铸态 60Cr2MnMoNi 钢冲击韧性的影响

将试验后的毛坯样加工成 10 mm × 10 mm × 55 mm 标准无缺口冲击试样,每组 3 支,夏比冲击试验采用 N1500C 型号材料冲击试验机。不同状态试样冲击韧性之间的相关关系见图 4。

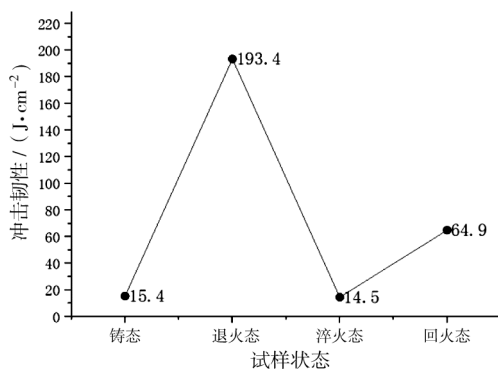


图4 不同状态试样冲击韧性的变化规律

由图4看出,铸钢 60Cr2MnMoNi 经不同热处理工艺处理后,其无缺口试样的平均冲击韧性发生了很大的变化。在铸态时,由于存在枝晶、成分偏析和粗大的奥氏体晶粒及非平衡组织,冲击韧性较低,平均仅为 15.4 J/cm²;950 °C 加热保温、退火后,降低了残余应力,均匀了成分、组织,细化了奥氏体晶粒,获得了近平衡组织,提高了试样的韧塑性,使冲击韧性达到了 193.4 J/cm²;再经 890 °C 加热保温、风淬火冷却后,由于发生了马氏体和贝氏体相变,提高了钢的基体强度,降低了韧塑性,致使冲击韧性降低到 14.5 J/cm²;淬火后的试样通过 600 °C 加热保温、回火工艺处理,使非稳定的马氏体和贝氏体转变成了稳定的回火索氏体组织,消除了淬火产生的残余应力,软化了钢的基体,降低了强度,提高了韧塑性,促使平均冲击韧性提高到 64.9 J/cm²,实现了 60Cr2MnMoNi 钢强韧性的合理匹配。

2.2.3 热处理工艺对铸态 60Cr2MnMoNi 钢拉伸性能的影响

将试验后的毛坯样加工成 Φ10 mm 的标准拉伸性能试样,每组 2 支,采用 INSTRON5989 电子万能材料试验机进行拉伸性能测试,不同状态试样平均拉伸性能指标的变化见图 5、6。

从图中可以看出,对于铸态 60Cr2MnMoNi 钢而言,采用不同的热处理工艺均可以改变其拉伸性能的各项指标。若以铸态 60Cr2MnMoNi 钢的拉伸性能为基数,试样经 950 °C 加热保温、退火后,除屈服强度有所降低外,其他 3 项性能指标均提高,且延伸率和断面收缩率增加的幅度较大,分别从铸态的 2.6% 和 1.1% 增大到 17.5% 和 25.3%;将退火试样经 890 °C 加热保温、风淬火冷却,能够大幅度提高试样的强度,使抗拉强度和屈服强度分别从铸态的

795.9 MPa 和 458.1 MPa 提升到 1 442.6 MPa 和 1 186.4 MPa, 而塑性指标与铸态样相比处于相同水平; 风淬火试样再经 600 °C 加热保温、空冷回火, 其抗拉强度和屈服强度从淬火态的 1 442.6 MPa 和 1 186.4 MPa 降低到 1 389.5 MPa 和 1 004.4 MPa, 与风淬火试样相比, 强度指标有所降低, 但下降幅度较小, 然而塑性指标却有较大程度的增加, 延伸率和断面收缩率分别从淬火态的 2.7% 和 1.8% 大幅提高到 7.4% 和 10.9%。由此说明铸态 60Cr2MnMoNi 钢采用不同的热处理工艺, 通过改变钢内部的成分、组织及应力状态能够改变其各项性能指标。采用退火工艺降低钢的残余应力, 消除枝晶和成分偏析, 细化晶粒, 获得近平衡组织, 提高了钢的塑性指标; 淬火工艺通过钢的固溶强化与相变强化等手段形成马氏体和贝氏体组织, 大幅提高钢的强度指标; 最后采用回火工艺消除了淬火产生的残余应力, 使不稳定的马氏体组织分解形成回火索氏体组织, 残余奥氏体分解形成马氏体或贝氏体组织, 在强度指标小幅度下降的同时, 能够大幅度提高塑性指标, 最终实现钢的强韧性的合理匹配。

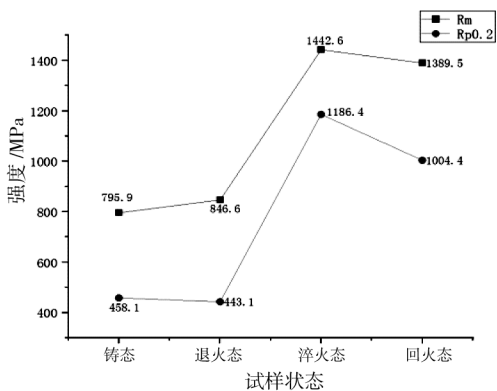


图 5 不同状态试样强度变化规律

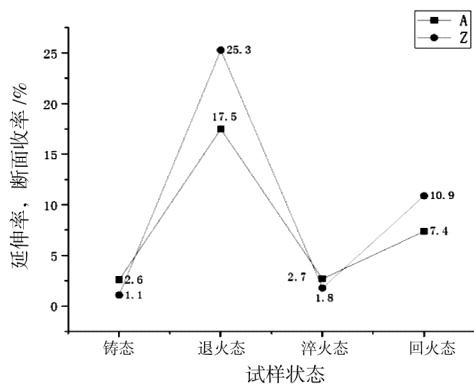


图 6 不同状态试样塑性变化规律

3 结论

(1) 60Cr2MnMoNi 钢的铸态组织为 P + B + A (残余) + 碳化物; 经 950 °C 加热保温、退火后的微观组织为 F(少量) + P + 碳化物; 再经 890 °C 加热保温、风淬火冷却后的微观组织为 B + M + A(残余) + 碳化物; 最后经 600 °C 加热保温、空冷回火后的微观组织为 S(回火) + B + 碳化物。

(2) 60Cr2MnMoNi 钢铸态平均硬度为 28.1 HRC, 平均冲击韧性为 15.4 J/cm²; 退火态平均硬度为 24.5 HRC, 平均冲击韧性为 193.4 J/cm²; 淬火态平均硬度为 58.1 HRC, 平均冲击韧性为 14.5 J/cm²; 回火态平均硬度为 45.1 HRC, 平均冲击韧性为 64.9 J/cm²。

(3) 60Cr2MnMoNi 钢铸态抗拉强度为 795.9 MPa, 屈服强度为 458.1 MPa, 延伸率为 2.6%, 断面收缩率为 1.1%; 退火态抗拉强度为 846.6 MPa, 屈服强度为 443.1 MPa, 延伸率为 17.5%, 断面收缩率为 25.3%; 淬火态抗拉强度为 1 442.6 MPa, 屈服强度为 1 186.4 MPa, 延伸率为 2.7%, 断面收缩率为 1.8%; 回火态抗拉强度为 1 389.5 MPa, 屈服强度为 1 004.4 MPa, 延伸率为 7.4%, 断面收缩率为 10.9%。

参 考 文 献

- [1] 刘俊生, 翟文霞, 孙晓永. 低合金耐磨耐冲击衬板在棒磨机上的应用[J]. 山西冶金, 2010, 33(7): 17-19.
- [2] 魏世忠, 徐流杰. 钢铁耐磨材料研究进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 523-538.
- [3] 黄茹清, 江海燕, 麻日来. 德兴铜矿球磨机衬板用耐磨钢的研制[J]. 铸铁, 2003, 52(7): 515-517.
- [4] 吴化, 徐珊珊, 王淮. 变质和时效处理对 ZGMn13 高锰钢力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(9): 78-82.
- [5] 孔君华, 陈大凯. 中锰奥氏体基耐磨钢中马氏体的应用[J]. 金属热处理, 2000, 25(2): 23-26.
- [6] 张明, 陈晓军, 刘凤君, 等. 变质中锰耐磨钢的性能与应用[J]. 机械工程材料, 2004, 28(1): 38-40.

通过更换轧机传动侧上、下工作辊出口牌坊衬板,轧机传动侧上工作辊出口牌坊衬板窗口尺寸偏差值从 0.492 mm 下降至 -0.04 mm,轧机传动侧下工作辊出口牌坊衬板窗口尺寸偏差值从 0.621 mm

下降至 -0.064 mm,轧机窗口尺寸偏差值均满足了 ± 0.15 mm 的设计要求。轧机调整前后的具体数据见表 4。

表 4 轧机传动侧牌坊衬板对中尺寸和窗口尺寸调整前后对比

位置	项目	mm			
		对中尺寸	窗口尺寸	水平偏斜	垂直偏斜
上工作辊	调整前	456.446	892.372	-0.529	0.154
	调整后	455.914	891.840	0.032	0.009
下工作辊	调整前	456.525	892.501	-0.500	0.055
	调整后	455.840	891.816	0.042	0.005
设计要求		455.940	891.880	± 0.200	± 0.200

4 结束语

本文总结了使用 API Radian Plus 激光跟踪仪测量 1 580 mm 热轧板带生产线精轧机组牌坊空间位置的方法,根据测量数据拟合出轧机机列中心线,以轧机机列中心线为基准建立坐标系,由坐标系获取轧机牌坊的对中尺寸、窗口尺寸、偏斜等空间位置关系。按照空间位置关系调整轧机牌坊衬板,轧机机列中心线偏移、窗口尺寸、水平和垂直偏斜等技术指标均达到设计安装要求,恢复了轧机设备设计安装精度。由此可见,采用激光跟踪仪测量轧机空间

位置关系的方法完全可靠,可以进行推广。

参 考 文 献

- [1] 李迎,伟李明,张靓. 激光跟踪测量技术在地铁检测中的应用[J]. 机械设计与制造,2017(7):98-100.
- [2] 高远,韩健哲,陈建华,等. 精密检测在轧机牌坊空间位置测量中的应用[J]. 轧钢机械,2021,3(38):80-84.
- [3] GB 50386—2016,轧机机械设备工程安装验收规范[S].

(上接第 58 页)

- [7] 朱绍峰,程正勇. 中锰铸态耐磨钢的冲击磨损性能[J]. 热加工工艺,2004(2):25-26.
- [8] 郭玉昆,王洪庆,朱福生,等. 一种新型高铬白口铸铁变质剂在生产中的应用[J]. 热加工工艺,2006,35(5):35-36.
- [9] 李茂林. 我国金属耐磨材料的发展和应用[J]. 铸造,2002,51(9):525-529.
- [10] 王龙妹,杜挺,卢先利,等. 微量稀土元素在

钢中的作用机理及应用研究[J]. 稀土,2001,22(4):37-40.

- [11] 李春龙. 稀土在钢中的应用及需注意的一些问题[J]. 稀土,2001,22(4):1-6.
- [12] 孙建国,牛泽鹏,穆鸿敏,等. 稀土 Ce 对低合金耐磨钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理,2025,50(4):40-47.