

ADI 材料在轨道交通行业的应用研究及发展趋势

朱正锋, 喻光远, 王 瑞

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所股份有限公司, 江苏 常州 213011)

摘 要: 本文综述了 ADI 材料的发展简况及材料特点, 重点分析了 ADI 材料在轨道交通行业的典型案例研究和应用情况, 厘清了面临的困境和挑战。预测了 ADI 材料在轨道交通领域的发展新趋势, 明确了 ADI 材料在轨道交通行业轻量化应用中潜在的广阔发展前景。

关键词: ADI 材料; 轨道交通; 轻量化; 应用; 趋势

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)06-0590-06

Application Research and Development Trends of ADI Materials in the Rail Transportation Industry

ZHU Zhengfeng, YU Guangyuan, WANG Rui

(CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, China)

Abstract: A comprehensive overview of the evolutionary development and material properties of austempered ductile iron (ADI) materials is provided. It highlights typical case studies and practical applications of ADI materials within the rail transportation sector while systematically analysing the current dilemmas and technical challenges encountered. It forecasts emerging trends in rail transportation, with a specific focus on the innovative utilization of ADI materials, and elucidates the substantial potential of ADI materials for advancing lightweight applications in rail transportation.

Key words: ADI materials; rail transportation; lightweight; application; trend

随着轨道交通行业向高速重载、轻量化、低能耗、长寿命、低维护、智能化方向发展, 对车辆关键零部件的材料和性能提出了越来越高的要求。等温淬火球墨铸铁材料拥有独特的奥铁体组织, 也被称为奥氏体-贝氏体球墨铸铁(奥-贝球铁)。ADI 材料具备优良力学性能、耐磨性及高韧性的综合特性, 其性能指标可满足轨道交通车辆关键零部件的严苛工况需求。自 20 世纪 70 年代以来, 该材料在轨道交通领域受到广泛关注, 已成为传统钢材的理想替代材料, 在轨道交通行业轻量化技术应用中展现出广阔的工程应用前景。

1 ADI 材料概述

1.1 ADI 材料发展概述

20 世纪 30 年代, 美国材料学家 Bain 在钢的研究中发明了等温淬火技术。继而 40 年代, Flinn 教授将该工艺应用于灰铸铁的热处理, 然受限于当时的

试验条件, 经等温淬火制备的灰铸铁性能未达预期, 故未引起关注。美国 International Harvester 公司在 1952 年对球墨铸铁开展大量试验, 取得了较好的试验结果, 获得具有高强高韧性能的等温淬火球墨铸铁, 并将其命名为 austempered ductile iron, 简称 ADI^[1]。该材料虽逐渐引发业界关注, 然受限于当时工业应用条件, 直至 20 世纪 60 年代末 ADI 齿轮才开启系统研究与工程应用。20 世纪 70 年代, 芬兰、美国和中国同期宣布 ADI 材料研究成功, 同步实现工业化应用。随后, 国内外对 ADI 材料的研究和应用进入快速发展期, ADI 铸件产量每年增长速度超过 15%。在 ADI 材料研究方面, 国内外学者开发了双相 ADI、CADI、铸态 ADI、低碳当量 ADI、无奥氏体 ADI、两步法 ADI 等^[2]。2000 年以前, 由于 ADI 热处理工艺跟钢的等温淬工艺相似, 且 ADI 材料中针状铁素体非常类似钢中的贝氏体组织, 国内部分学者将 ADI 材料称为奥-贝球铁。随着对 ADI 材料微观

收稿日期: 2025-06-04

作者简介: 朱正锋, 1978 年生, 教授级高工, 硕士。主要从事铸造工艺及新材料研究和管理方面的工作。Email: zhuzf9732@163.com

引用格式: 朱正锋, 喻光远, 王瑞. ADI 材料在轨道交通行业的应用研究及发展趋势[J]. 铸造技术, 2025, 46(6): 590-595.

ZHU Z F, YU G Y, WANG R. Application research and development trends of ADI materials in the rail transportation industry[J].

Foundry Technology, 2025, 46(6): 590-595.

组织认识的不断深入,ADI微观组织中的针状组织并非钢中的贝氏体,且生产中应控制等温淬火二阶段时间,避免出现贝氏体而恶化力学性能^[3]。ADI材料的微观组织主要由针状铁素体(α_B)+富碳奥氏体(γ_{HC})组成,由于存在这种特殊的微观结构,促使ADI材料的性能与合金铸钢和锻钢相媲美。由此可见,ADI不应称为奥-贝球铁,应称为奥铁球铁^[4]。根据行业分析,我国ADI年产量保持稳健增长,预计到2025年我国ADI年产量将接近60万吨,较2019年的30万吨翻一番。这一增长主要受益于汽车轻量化、新能源和高端装备制造等领域的强劲需求^[5]。

1.2 ADI材料特点

ADI材料具有如下特点^[6-8]:①综合力学性能优异,高强度、高塑性。相比普通球铁,ADI材料的抗拉强度和伸长率可提高2倍以上,抗拉强度达到或超过合金钢,优于调质碳钢。②质量轻,屈强比高、密强比低。得益于其内部大量石墨相的存在,ADI材料密度较钢低约10%,以ADI替代钢材制备零件时可显著降低构件的重量,实现轻量化设计。该材料兼具轻质与高的单位质量屈服强度,密强比低于普通球墨铸铁和铸钢,与20CrMnTi调质钢相当。③优异的耐磨性。ADI的耐磨性优于同硬度的钢,如HRC30~40硬度的ADI零件,其耐磨性相当于HRC60硬度的淬火钢;如HRC45~48硬度的ADI齿轮,其耐磨寿命长于HRC56~62硬度的马氏体组织的锻钢齿轮。④减震性和吸音性好。ADI材料中含有大量石墨球、可快速吸收震动和噪声,使部件运行的平稳、安静,吸音减振的特性对各种运动件十分有利。⑤耐疲劳性能优良。ADI具有高的弯曲疲劳和接触疲劳等动载性能,旋转弯曲疲劳强度可达400~500 MPa,相当于调质合金钢;接触疲劳强度达1 600~2 100 MPa,高于氮化合金钢。⑥加工难度相对较大。ADI材料具有加工硬化特性,其零件加工通常遵循“粗加工-热处理-精加工”的工艺路线。近年来,ADI材料的加工技术取得重要进展,通过优化切削速度、进刀量等工艺参数,配合特种刀具的应用,可有效降低刀具磨损程度。⑦要求较高质量的球墨铸铁原件。如毛坯组织和化学成分稳定、石墨球数高于200个/mm²,85%及以上的球化率,6级及以上的石墨球大小,小于0.5%的碳化物及夹杂物,小于1%的显微缩松,比例恒定的珠光体/铁素体等。⑧不适合长时间在>300℃高温环境下使用。当环境温度高于300℃尤其是500℃以上,奥铁体会发生相变转化,造成ADI材料性能大幅度降低。

1.3 ADI材料最新研究应用进展

近年来,欧洲在Rail2019项目中,提出采用ADI材料在铁路车辆结构件中的应用,并进行了装车试验研究,如德国西门子开发的ADI车轮、转向架构件、制动梁等^[9];欧美主要ADI生产开发者,如美国Applied Process公司、英国ADI Treatments公司、意大利Zanardi铸造厂等在ADI产品应用、ADI性能提升及质量保证能力上都在不断创新和发展,同时在计算机数学模拟设计最佳ADI工艺规范方面的软件水平走在世界前列^[10]。国内外学者利用人工神经网络开发低成本ADI材料,采用GA-BP网络方法预测ADI材料硬度,研究等温时间对双相ADI微观组织和力学性能影响,ADI组织均匀及热物理性,不同盐浴温度下ADI力学性能及组织转变规律,热处理参数对ADI显微组织、腐蚀和摩擦学性能影响等^[11-17],进一步推动ADI材料应用发展。

2 ADI材料在轨道交通行业的典型应用场景

2.1 斜楔

1991年,中车戚墅堰所开始研究ADI斜楔,于1992年在大秦线重载火车上开始试用,1993年通过铁道部鉴定,在铁路车辆系统全面推广使用,如图1所示。由于ADI斜楔试用时稳定可靠、耐磨寿命是原铸钢斜楔的6~10倍,并且单件ADI斜楔重量由10 kg减轻到7.5 kg,轻量化和使用寿命带来了巨大的经济效益和社会效益,ADI斜楔年用量约100万件^[9]。ADI斜楔的材料要求: $R_m \geq 1\ 200\text{ MPa}$, $A \geq 1\%$,冲击吸收能量(无缺口) $\geq 30\text{ J}$,I~III级球化率,5~6级球径^[18]。

2.2 衬套

1996年,中车戚墅堰所和南京某车辆厂联合研究ADI衬套并分批装车使用,于1998年通过技术鉴定,并迅速在全铁路系统推广应用。装车运用结果显示,ADI衬套比45钢、A3钢、20CrMnTi、20Cr等材质衬套的耐磨寿命长。48万公里使用后磨耗量是段修允许值的8%~16%,ADI衬套可在一个厂修期内完好使用,ADI衬套年使用量达800万只。ADI衬套的材料要求: $R_m \geq 1\ 200\text{ MPa}$, $A \geq 1\%$,冲击吸收能量(无缺口) $\geq 30\text{ J}$,I~III级球化率,5级球径^[9]。大连三明铸造有限公司试制东风4B内燃机车制动装置用衬套,选用QTD1400-1材料牌号,通过30万公里行车试验考核,ADI衬套满足内燃机车制动装置的服役使用要求,且相同工况下,与钢衬套相比,磨耗量仅为原来的1/3~1/5。ADI衬套使该类零件的耐磨性

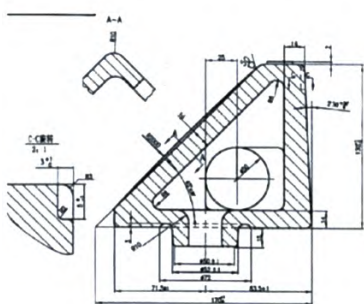


图 1 ADI 斜楔
Fig.1 ADI wedge



大大提高,可达 2~3 个段修期的使用寿命,每年可使全国 1.2 万台内燃机的零件费用节约 3 000 万元。主要材料要求:II~III 级球化率,5~7 级石墨大小;衬套热处理工艺为:(880~920) °C×(1~2) h+ (240~280) °C×(1~2) h;力学性能指标:1 460~1 510 MPa 的抗拉强度,1.6%~4%的伸长率,硬度 46.0~48.5 HRC^[20]。

2.3 磨耗板

铁路货车侧架立柱磨耗板,主要有 8A 型、转 8G 型、转 8AG 型几种,材质为 45 钢。原来磨耗板采用调质处理钢,硬度 HRC38~50,每个检修期更换率超过 60%。在服役过程中,在与对偶间斜楔进行强挤压摩擦时,磨损超限(磨损 2 mm 以上)是磨耗板失效的主要形式,有时因调质钢本身淬火应力大导致工件在使用过程中发生爆裂而失效。后来,随着火车提速,对磨耗板的要求和使用寿命提出更高要求,故使用 T10 工具钢、47Mn2SiTiB 合金钢制造磨耗板来满足需求。近年来,随着 ADI 材料的快速发展,采用 ADI 材料试制磨耗板,并通过了磨损试验和装车试验;ADI 与 45 钢、T10 工具钢及 47Mn2SiTiB 合金钢制造的磨耗板与对偶斜楔进行对比,结果显示:ADI 磨耗板耐磨性优于 45 钢 2 倍以上,与 T10 工具钢和合金钢接近,但 T10 工具钢和合金钢的对偶斜楔磨耗量分别是 ADI 的 4.4 倍和 3.5 倍;通过 1 个检修期内装车试用,ADI 与 T10 工具钢及 47Mn2SiTiB 合金钢相比,自身磨耗及对偶斜楔的磨耗都是最小,其中 ADI 磨耗量小于 0.5 mm,45 钢磨耗板磨耗量大于 1.6 mm。由此可见,ADI 材料磨耗板是较理想的替代材料^[21]。ADI 磨耗板在铁路货车车架立柱磨耗板和牵引梁磨耗板中已经大批量生产,中车江岸车辆段采用 ADI 磨耗板,既提高了耐磨性又减小了对摩擦副的损伤。

2.4 车轮

轨道交通车辆车轮分为辗钢轮和铸钢轮两种,其中国内货车车轮主要采用铸钢车轮,生产厂家为大同 ABC 和信阳同和,采用压力浇注/石墨型芯等

工艺;地铁车轮主要采用辗钢车轮,生产厂家为马钢和太重。德国铁路公司与西门子公司通过近 20 年的研究,在 2020 年推出了 ADI 车轮,具有静音、耐磨、轻量化 3 方面的优势,并在样车上实现装车运用,引起了业内的广泛关注。目前国内业界竞相开展 ADI 车轮的研发工作,其中中车戚墅堰所与青岛国创中心联合开发了一种新型 ADI 辐条车轮,应用地铁或市域车,相比铸钢车轮达到减重、耐磨、降噪等效果,如图 2 所示。



图 2 ADI 辐条车轮
Fig.2 ADI spoke wheel

2.5 悬挂梁

轨道交通客车底盘关键零件悬挂梁之前是铸钢产品,为了减轻质量改成 ADI 材料,悬挂梁的轮廓尺寸 1 132 mm×172 mm×302 mm,铸件质量 70 kg,主要壁厚 10 mm,最大壁厚 25 mm,铸件的质量要求比较高。中车四方机车车辆股份有限公司进口件采用欧洲材料牌号 GJS-1000-5 的标准,国产化后采用国标 QTD1050-6 牌号,本体不同部位的抗拉强度均达到 1 050 MPa 以上,屈服强度 700 MPa 以上,断后伸长率 7%以上,悬挂梁本体材料的 -10 °C 冲击吸收能量 KV₂ 平均达到 7 J 以上,无缺口冲击能量平均超 80 J 以上。ADI 悬挂梁较铸钢悬挂梁质量减轻 10%,成本下降 15%以上,如图 3 所示。

2.6 转向架结构件

在《中国中车集团“十四五”发展战略纲要》指引下,轻量化成为各主机厂产品设计、升级迭代的主要



图3 ADI 悬挂梁
Fig.3 ADI suspension beam

发展方向之一。转向架作为轨道车辆的核心承载部件,需满足高强度、高韧性、轻量化及耐疲劳等严苛要求。其轻量化与集成设计主要通过以铁代钢、铸铁件整体铸造实现整机轻量化,通过以铁代钢、以铁代铝,复杂结构铸铁件整体铸造代替焊接件等途径适应国内轨道轻量化设计发展趋势。如牵引梁、横梁、制动器吊座、侧梁、构架、抗蛇形减震器等铸件,基于某新承载构形的轻量化转向架系统如图4所示,采用 ADI 材料或整体铸造等方式替代铸钢件、焊接钢结构等减重 15%以上。



图4 轻量化转向架
Fig.4 Lightweight bogie

3 面临难题和挑战

尽管 ADI 材料在轨道交通行业很多场景中得到应用,但并未大面积推广应用,主要利用 ADI 材料耐磨性优点的应用较多,而高强塑性、高疲劳性及高动载性等高性能结构件还未能批量应用,在实际应用中仍然面临以下难题和挑战。

3.1 高性能 ADI 材料铸件制造技术难度大

3.1.1 优质 ADI 球铁原件制备难度大

ADI 球墨铸铁原件质量是 ADI 材料基础,优质的球铁原件需要控制球化等级 1~2 级,球化率 $\geq 90\%$,石墨等级 6~8 级,石墨球数 ≥ 150 个/ mm^2 ;C、Si 控制范围 $\pm 0.1\%$,Mn、Cu、Ni 等合金控制范围 $\pm 0.03\%$,Mg、Re 控制 $\pm 0.005\%$,球化干扰元素系数 $K_1 < 0.6$ 等;采用 MAGMA 等凝固模拟软件对 ADI 球铁原件进行分析,设计合适的铸造工艺和优化的熔炼工

艺,制造的铸件没有缩松缩孔、气孔夹渣、碳化物、非金属夹杂物等缺陷。

3.1.2 缺少“铸件-热处理”两者关系的设计指导依据

目前,对“铸件-热处理”两者关系的准确描述和设计依据仍不完善,主要体现在 2 个方面:①缺少根据 ADI 铸件结构设计最优合金成分的依据,如何能做到满足淬透性和本体材质的前提下使用最少的合金;②缺少精准的热处理工艺窗口设计依据,等淬工艺窗口(奥氏体温度/时间,等淬温度/时间)直接决定了 ADI 材料的性能。目前,技术人员在制定 ADI 铸件合金成分和热处理工艺时,主要依据经验、试验验证及文献资料等摸索确定,没有相对精准的 ADI 材料模拟软件或公式进行计算确定,标准体系也尚未建立。

3.1.3 热处理精度要求高

ADI 的性能高度依赖精确的热处理工艺参数(温度、时间、冷却速率等),尤其是等温淬火工艺参数,任何偏差都可能导致材料性能不稳定。如 ADI 铸件盐浴温度要求控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$,这对热处理设备工艺保证能力要求很高,非专业 ADI 处理厂很难做到。

3.2 轨道交通行业特殊性

3.2.1 行业特点

轨道交通行业以安全为第一,铁路产品要求高,验证流程长,产品变更尤其是材质类重大变更,审核严、认证难,准入周期长。轨道交通行业倾向于使用成熟材料(如钢、铝合金),对新材料的应用持谨慎态度,需通过成功案例逐步建立信任。

3.2.2 设计与验证的挑战

标准和规范滞后:轨道交通行业对材料性能有严格的安全标准(如 EN、ISO、AAR 等),但针对 ADI 的行业标准尚未完善,导致设计缺乏依据。长期可靠性验证不足:ADI 在动态交变载荷(如轮轨冲击、震动)下的疲劳性能、蠕变性能等数据积累不足,需长期实车测试验证。仿真模型待优化:现有材料模型可能无法完全反映 ADI 的复杂微观结构特性,影响设计准确性。

3.3 成本效益与供应链不完善

3.3.1 成本与经济效益的平衡

ADI 铸件毛坯质量及热处理工艺成本明显高于普通铸铁或钢,质量波动风险可能抵消轻量化带来的长期节能受益。另外 ADI 材料因加工硬化倾向明显,致使加工难度大和刀具磨损快,进一步推高了成本。

3.3.2 供应链不成熟

具备 ADI 批量生产能力且通过行业认证的供

应商较少,存在供货周期长,区域分布不均等问题。ADI 材料产品从铸造、热处理、加工及检测等制造过程未能形成完整顺畅的供应链闭环,很多工序都是散点分布且工序难度大、时间长,造成工序成本高。

ADI 材料制造技术的难点、轨道交通行业产品使用特殊性、成本与经济效益的平衡等都是 ADI 材料在轨道交通行业应用的挑战,需要时间破解。

4 ADI 材料在轨道交通行业发展趋势

4.1 ADI 材料性能待提升

通过合金优化设计、精细等淬工艺和创新性铸件工艺,开发更高强度、更高韧性的 ADI 材料,满足高速列车和重载列车对材料的更高要求,研发抗拉强度超过 1 600 MPa 的超高强度 ADI 材料,同时保持良好的韧性,如 CADI、无奥氏体 ADI 等非标 ADI 材料等。或研发更高强韧的非标 ADI 材料,如 QTD1050-9、QTD1200-7,保持标准高抗拉强度的前提下进一步提高塑性抗拉强度,保持标准塑性。

4.2 ADI 产品成本待下降

相对较高的生产成本长期制约了 ADI 材料大规模推广应用,近年来,围绕 ADI 产品成本下降的技术路径与产业实践成为研究热点。随着铸件毛坯质量的提升及成本压降创新,热处理工艺设备技术提高及成本的降低,和 ADI 材料加工工艺的进步及成本降低,会出现越来越多的高质量 ADI 材料产业链协同企业;ADI 材料产品产业链的成熟必然会进一步降低 ADI 产品的制造成本。

4.3 应用范围进一步扩大

除现有轨道交通耐磨系统、转向架系统和制动系统部件外,ADI 材料将向更多关键部件及高质量结构件等领域扩展,如车钩缓冲装置、悬挂系统部件等转向架关键件。随着轨道交通车辆对轻量化需求的增加,对 ADI 材料在车辆结构件中应用的探索会进一步扩大。

4.4 智能制造技术将与 ADI 材料生产深度融合

利用大数据、人工智能等技术优化等温淬火工艺参数、铸造工艺参数、熔炼工艺参数等,采用智能控制与在线监测进行 ADI 材料产品的生产,不断提高产品质量稳定性和生产效率。

5 结论及展望

ADI 材料凭借其优异的综合性能,在轨道交通行业应用中展现出广阔的发展前景。当前在耐磨斜楔、衬套、磨耗板、车轮、悬挂梁、转向架系统等关键

部件中取得成功应用,实现减重、降噪和延长寿命等多重效益。然而,还需系统解决工艺、成本、标准及可靠性问题,通过技术创新和行业协同推动其落地。未来随着绿色制造和轻量化需求的提升,ADI 有望成为关键材料之一。工艺控制难度大、轨交行业特殊性和成本较高等挑战仍需克服。未来,随着材料性能的进一步提升、应用范围的扩大以及智能制造技术的融合,ADI 材料在轨道交通行业的应用将更加广泛。通过持续的技术创新和工艺优化,ADI 材料有望成为轨道交通领域的重要工程材料,为轨道交通装备的轻量化、高性能化和可持续发展做出重要贡献。

参考文献:

- [1] 邓宏远,王春景,章舟. 等温淬火球墨铸铁的生产及应用实例[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [2] 刘金城,龚文邦. 国外 ADI 研发的一些最新进展[A]. 2018 中铸协等温淬火铸件分会年会论文集[C]. 常州:中国铸造协会,2018. 20-30.
LIU J C, GONG W B. Some recent progresses of ADI research and development abroad [A]. Proceedings of the 2018 Annual Meeting of the Austempered Castings Branch of China Foundry Association [C]. Changzhou: China Foundry Association, 2018: 20-30.
- [3] 韩非,徐锦锋,闫启栋. 等温淬火球铁(ADI)实用生产技术[J]. 铸造技术,2019,40(8): 792-798, 803.
HAN F, XU J F, YAN Q D. Practical production technology of austempered ductile iron (ADI)[J]. Foundry Technology, 2019, 40 (8): 792-798, 803.
- [4] 曾艺成,李克锐,张忠仇,徐明君,卫东海. 等温淬火球墨铸铁研发工作的进展与发展趋势[J]. 铸造,2017,66(9): 940-947.
ZENG Y C, LI K R, ZHANG Z C, XU M J, WEI D H. The progress and development trend of austempered ductile iron[J]. Foundry, 2017, 66(9): 940-947.
- [5] 智信中科研究网. 2024-2030 年全球与中国等温淬火球墨铸铁(ADI)市场竞争态势及发展格局调研报告[R/OL]. 2024. https://www.cir.cn/2/83/DengWenCuiHuoQiuMoZhuTie-ADI_HangYe-FaZhanQianJing.html.
- [6] 张忠仇,李克锐,吴建基. 我国等温淬火球铁的现状及前景[J]. 铸造,2004,53(2): 87-92.
ZHANG Q C, LI K R, WU J J. Situation and prospect of austempered ductile iron (ADI) in China[J]. Foundry, 2004, 53(2): 87-92.
- [7] 曾艺成. 我国 ADI 产业现状及发展前景[J]. 现代铸铁,2008,28(4): 15-19.
ZENG Y C. Present situation and development prospect of ADI industry in China[J]. Modern Cast Iron, 2008, 28(4): 15-19.
- [8] 曾艺成,李克锐,张忠仇. 我国等温淬火球铁(ADI)生产应用及发展前景[J]. 现代铸铁,2007,27(1): 13-19.
ZENG Y C, LI K R, ZHANG Z C. Production, application and development forecast of isothermally-quenched (austempered) ductile iron in China[J]. Modern Cast Iron, 2007, 27(1): 13-19.
- [9] MEGNA G. Application of austenitized ductile irons to structural components of railway vehicles[D]. Florence: Università degli Studi

- di Firenze, 2020.
- [10] 刘金城, 龚文邦. 欧洲北美 ADI 的最新进展[J]. 铸造技术, 2020, 41(1): 78-83, 86.
- LIU J C, GONG W B. Latest developments of ADI in the european and north american[J]. Foundry Technology, 2020, 41(1): 78-83, 86.
- [11] HOFMAM D, RAMOS F D, LEMOS G V B, DE LIMA LESSAA C R. Artificial neural networks for producing a low-cost austempered ductile iron[J]. Materials Research, 2022, 25: e20220336.
- [12] LI P C, DU Y Z, ZHANG M, YANG Q, LIU C, WANG X, ZHANG R C, JIANG B L. Genetic algorithm (GA) - backpropagation (BP) network approach for hardness prediction of austempered ductile iron (ADI)[J]. Materials Science and Technology, 2025, 3(41): 210-220.
- [13] MADDI L, DAKRE V, LIKHITE A, PATHAK S. Effect of two-step austempering process on the microstructure and mechanical properties of low-carbon equivalent austempered ductile iron [J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2024, 17(1): 51-58.
- [14] GÓRNY M, GONDEK Ł, TYRAŁA E, ANGELLA G, KAWALEC M. Structure homogeneity and thermal stability of austempered ductile iron[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2021, 52: 2227-2237.
- [15] OKTADINATA H, TRIANTORO T, ARDIANSYAH I. Microstructural characterization and mechanical properties of austempered ductile iron at different austempering temperatures [M]// SYAWITRI T P, PRATIWI D A, KULTSUM U, PRASETYA D, PAN-GARIBAWA M R, IQBAL T, NUGRAHAENI F T, PUTRI A S, ANGGONO A D. Proceedings of the 6th Mechanical Engineering, Science and Technology International Conference (MEST 2022). Indonesia: Atlantis Press, 2023: 114-121.
- [16] KRAWIEC H, LELITO J, MRÓZ M, RADON M. Influence of heat treatment parameters of austempered ductile iron on the microstructure, corrosion and tribological properties [J]. Materials, 2023, 16 (11): 4107.
- [17] UYAR A, SAHIN O, NALCACI BURAK, KILICLI V. Effect of austempering times on the microstructures and mechanical properties of dual-matrix structure austempered ductile iron (DMS-ADI) [J]. International Journal of Metalcasting, 2022: 16: 407-418.
- [18] 孙国厚, 段斌. 等温淬火球铁斜楔的生产实践[J]. 铸造, 2008, 57 (10): 1091-1093.
- SUN G H, DUAN B. The productive practice of austempered ductile iron slope wedge[J]. Foundry, 2008, 57(10): 1091-1093.
- [19] 王泽华, 李树中, 刘泉深, 方墩光. 等温淬火球铁在铁道车辆耐磨件上的应用研究[J]. 铸造, 2003, 52(7): 466-471.
- WANG Z H, LI S Z, LIU Q S, FANG D G. Application of austempered ductile iron on railway vehicles [J]. Foundry, 2003, 52 (7): 466-471.
- [20] 王怀林, 臧权同, 孙军, 孙公杰, 刘炳仁. ADI 铁路机车制动器耐磨件的试制[J]. 现代铸铁, 2012(3): 22-25.
- WANG H L, ZANG Q T, SUN J, SUN G J, LIU B R. An experiment of using ADI to produce wear-resistant parts of locomotive braking device[J]. Modern Cast Iron, 2012(3): 22-25.
- [21] 王合庆, 李献辉. 等温淬火球墨铸铁(ADI)在磨耗板上的应用[J]. 机械工人(热加工), 2004(9): 69-70.

(责任编辑: 杨浩雪)