铜－铬合金化生产球墨铸铁机床铸件的研究应用

沈永涛，刘仕法，赵生存，余绍鹏，段先伟，王　琳，孙卓洋，蒋　维，郭平昌

（通用技术集团昆明机床股份有限公司，云南昆明 651701）

摘要：针对球墨铸铁机床铸件传统铜-锡合金化因锡价攀升导致生产成本过高的问题，探索采用铜-铬复合合金化替代方案，以低成本制备满足高强度高韧性要求的大型机床铸件。采用合成铸铁工艺（Q10生铁30%+优质废钢70%+90碳化硅1.2%），在中频感应电炉中熔炼，添加0.2%~0.4%铜和0.2%~0.3%铬，冲入法球化处理后浇注Y型试块，通过拉伸试验和金相检验分析铜-铬合金化对球墨铸铁组织与性能的影响，并在实际铸件（单件10 kg~55 t）上进行工艺验证。铜-铬复合合金化可使石墨球细化圆整，珠光体因合金渗碳体形成而强化，铜含量0.4%、铬含量0.26%时，抗拉强度达750 MPa、伸长率6%，优于QT700-2要求；铬含量低于0.3%时碳化物数量无明显增加（<1%），且随铜含量提升珠光体体积分数从35%增至65%、强度同步提高。实际生产约150 t铸件（壁厚50~135 mm）全部满足QT600-3要求。铜-铬合金化可有效替代铜-锡合金化生产高品质球墨铸铁机床铸件，在保证高强度高韧性的同时显著降低合金成本；铬在0.3%以下对球化及碳化物无害，为该技术在厚大断面机床铸件中的推广应用提供了理论和实践依据。

关键词：球墨铸铁；铜-铬合金化；机床铸件；合成铸铁工艺；力学性能；珠光体强化；铸造工艺优化

中图分类号：TG255；TG143.5；TG113.25　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）09-1033-06

DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0131

Research and Application of Cu-Cr Alloying for Producing Ductile Iron Machine Tool Castings

SHEN Yong-tao, LIU Shi-fa, ZHAO Sheng-cun, YU Shao-peng, DUAN Xian-wei, WANG lin, SUN Zhuo-yang, JIANG Wei, GUO Ping-chang

(Genertec Kunming Machine Tool Co., Ltd., Kunming 651701, Yunnan, China)

Abstract: To address the escalating production cost of ductile iron machine tool castings caused by rising tin prices in traditional Cu-Sn alloying, a Cu-Cr composite alloying alternative was explored to produce large machine tool castings with high strength and toughness at lower cost. Using a synthetic casting process (30% Q10 pig iron+70% high-quality steel scrap+1.2% 90SiC), melted in a medium-frequency induction furnace, and 0.2%-0.4% Cu and 0.2%-0.3% Cr were added. The Y blocks were cast after nodulizing treatment with sandwich method, and the tensile tests and metallographic analysis were conducted to evaluate the effects of Cu-Cr alloying on the microstructure and properties of the ductile iron, and the process validation was performed on actual castings ranging from 10 kg to 55 t. The Cu–Cr composite alloying refined and spheroidized graphite, while the pearlite was strengthened by the formation of alloyed cementite. When the contents of Cu and Cr were 0.4% and 0.26%, respectively, the tensile strength and elongation reached 750 MPa and 6%, respectively, exceeding QT700-2 requirements. With the Cr content below 0.3%, the carbide content remained <1% with no significant increase. Increasing the Cu content raised pearlite fraction from 35% to 65% and enhanced the tensile strength accordingly. Over 150 t of production castings (section thickness 50-135 mm) all met QT600-3 requirements. The Cu-Cr alloying can effectively replace the Cu-Sn alloying for high quality ductile iron machine tool casting production, significantly reducing alloying costs while maintaining high strength and toughness. Chromium contents below 0.3% exert no detrimental effect on nodularity and carbide formation, providing theoretical and practical foundations for extending this technology to heavy section machine tool castings.

Key words: ductile iron; Cu-Cr alloying; machine tool casting; synthetic cast iron process; mechanical property; pearlite strengthening; casting process optimization

基金项目：国家科技重大专项“高精度落地铣镗机床研制与验证”（2024ZD0709301）。

收稿日期：2026–06–03 收到初稿，2026–06–22 收到修订稿。

作者简介：沈永涛（1993–），男，工学学士，工程师，主要从事铸造工艺设计、铸铁熔炼工艺及树脂砂工艺研究和生产方面的工作。E-mail：shenyongtao@gt.cn

引用格式：沈永涛，刘仕法，赵生存，等 . 铜 - 铬合金化生产球墨铸铁机床铸件的研究应用 [J]. 铸造，2026，75（9）：1033–1038.
Shen Yongtao，Liu Shifa，Zhao Shengcun，et al. Research and application of Cu-Cr alloying for producing ductile iron machine tool castings [J]. Foundry，2026，75（9）：1033–1038.

近年来，国内高端数控机床在设计阶段愈发重视材料的弹性模量。部分高端数控机床的横梁、立柱、工作台、滑枕与主轴箱等构件，均要求选用弹性模量更高的球墨铸铁材质。但笔者所在企业生产的机床铸件不仅单件自重较大、内部结构复杂，还存在壁厚不均匀的问题，关键部位壁厚通常为50~100 mm。以上各类因素都对铸件生产制造带来不小挑战。为保障铸件质量，生产厚大截面球墨铸铁件时，行业普遍采用适度提升碳当量的工艺手段。而碳当量提高后，若要使基体珠光体体积分数达到工艺标准，便需添加大量铜、锡、锑开展合金化处理[1-3]。近期铜、锡等有色金属市场价格持续上涨，沿用传统铜-锡复合合金化方案会造成生产成本大幅增加。为有效控制生产制造成本，行业亟需研发并推广其他替代型合金化工艺。

长期以来，铬在球墨铸铁中被视为需要严格限制的微量元素。传统理论认为，铬是强碳化物生成与稳定元素，会在球墨铸铁共晶转变过程中产生反石墨化作用，促使白口组织形成；在共析转变阶段同样发挥反石墨化效果，推动珠光体组织生成。铬在球墨铸铁内主要富集于碳化物当中，材料中仅含有0.1%的铬就能够生成碳化物，这类碳化物会偏析在共晶团边界并呈网状分布，即便通过热处理工艺也很难将其消除[4]。因此，常规球墨铸铁产品通常会将铬含量严格控制在0.05%以下。

基于这一传统认知，国内外铸造领域专家与权威专著普遍认为球墨铸铁可选用的合金化元素仅包括铜、镍、钼和锡等，铬则被明确归为有害元素[5]。这一观点长期指导着球墨铸铁的合金化设计工作。

近年来开展的大量深入研究逐步推翻了上述传统观点。经过多年试验探究与工业化生产验证，诸多研究证据证实：在匹配适宜的工艺参数时，铬不会破坏石墨球化效果，反而能有效促进珠光体生成，还可生成合金渗碳体，以此提升铸件的强度、硬度与耐磨性[5-7]；因此铬能够作为球墨铸铁合金化元素，替代铜、镍和钼等贵重金属[8]。但另有相关研究指出，当铬添加量超过0.5%时，会大幅降低球墨铸铁的冲击韧性[9]。

有研究者从金属学及量子力学的基本原理出发，指出铬并非“强”或“强烈”的碳化物形成与稳定元素——真正能够形成金属碳化物的元素，是元素周期表中d层电子轨道未填满的过渡族元素[10]。这一理论分析为重新认知铬在球墨铸铁中的作用提供了科学依据。

试验研究进一步佐证了上述全新认知。陈培忠等人的研究表明，若铁液成分、浇注工艺及孕育工艺控制得当，低铬合金化不会在球墨铸铁内部生成渗碳体，也不会降低石墨球的圆整度[11]。针对铬系铸态球铁的相关研究同样证实，铬可作为合金化元素用于熔炼铸态球铁，生产过程无需配套正火或退火工序；相较于含铜铸态球铁，该方案生产成本更低[12]。

含铬球墨铸铁现已广泛应用于汽车制造、耐磨铸件等行业，但在机床铸件领域的应用案例极少。本课题系统探究铜-铬复合合金化对球墨铸铁组织与力学性能的作用规律，可为含铬球墨铸铁在机床铸件上的产业化应用，以及采用合成铸铁工艺制备高品质球墨铸铁的相关研究提供理论与实践参考。

1 试验炉料和成分设计

1.1 炉料

生产高质量球墨铸铁对炉料纯净度有较高要求，需严格控制炉料中的锰、磷、硫及其他微量元素含量[13]。本研究采用合成铸铁工艺开展熔炼，选用Q10生铁、优质碳素废钢、全石墨化增碳剂与90碳化硅，主要炉料配比如表1所示。

表1 主要炉料配比

Tab. 1 Proportioning of main charging material

w_B/%

Q10生铁	废钢	90碳化硅
30	70	1.2

1.2 化学成分设计

笔者公司生产的球墨铸铁机床铸件主要壁厚通常为50~100 mm。结合过往生产经验，为避免产生石墨漂浮缺陷，将碳当量控制在4.3%~4.6%，碳含量控制在3.4%~3.8%。锰可在球墨铸铁中促进并细化珠光体，为降低锰元素带来的不利影响，本研究将锰含量控制在0.3%以下[14-17]。高强韧性铬系球墨铸铁相关专利表明，温度为1 150 ℃时，铬在奥氏体中的溶解度降至最低（0.2%），且珠光体体积分数会对铬的偏析程度产生影响[18]。因此将铬含量设定为0.25%~0.3%，同时适量添加0.2%~0.4%的铜，防止珠光体体积分数过低造成铬在晶界发生偏析。本次试验目标为满足QT600-3牌号性能标准，最终拟定的化学成分如表2所示。

2 试验方案及操作方法

采用20 t中频感应电炉进行熔炼，生铁、废钢及90碳化硅按前述炉料比例加入，并投入全石墨化增碳剂、硅铁、铬铁和电解铜等原料；待炉料完全熔清后，升温至1 400 ℃时铁液取样，利用炉前热分析仪与直读光谱仪检测铁液化学成分，再依据检测结果调整

表2 化学成分设计
Tab. 2 The design of chemical composition

w_B/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
3.4~3.8	2.2~2.7	≤0.3	≤0.03	≤0.02	0.25~0.3	0.2~0.4

成分。铁液化学成分达标后继续升温至1 520 ℃，高温静置5~8 min；待铁液温度降至1 460 ℃时出炉进行球化处理。球化工艺采用冲入法，选用稀土镁球化剂，添加量控制在1.1%~1.2%；当铁液放出总量的2/3时，加入占铁液总质量0.2%~0.3%的硅钡孕育剂实施强化孕育。球化工序完成后扒除熔渣，取样复测球化后铁液的化学成分，测温后开始铸件浇注，同步浇注Y型试块，后续对Y型试块开展力学性能检测与金相组织检验。

3 试验结果及分析

3.1 化学成分

在不同炉次上取到6组试样，采用斯派克M10直读光谱仪进行化学成分检测，结果如表3所示。序号1-5的试样，检测的化学成分结果符合化学成分设计要求，序号6的试样为QT500-7牌号，所以铜含量有所减少。

表3 化学成分检测及力学性能检测结果
Tab. 3 The chemical compositions and mechanical properties of the test ductile irons

序号	化学成分（w_B/%）							抗拉强度/MPa	伸长率/%
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu		
1	3.45	2.18	0.246	0.012	0.009	0.266	0.444	750	5
2	3.37	2.52	0.253	0.011	0.007	0.264	0.445	750	6
3	3.57	2.34	0.278	0.013	0.011	0.289	0.246	645	7
4	3.49	2.32	0.277	0.014	0.013	0.289	0.216	620	5.5
5	3.39	2.60	0.277	0.013	0.009	0.29	0.246	605	6
6	3.35	2.74	0.262	0.015	0.014	0.278	0.122	560	16.5

3.2 力学性能

将Y型试块加工为符合国标GB/T 1348—2019标距长度处直径为14 mm的拉棒，使用万能材料试验机进行检测，检测结果如表3所示。序号1-2的试样达到了QT700-2的要求，序号3-5的试样达到QT600-3的要求，序号6的试样达到QT500-7的要求。

3.3 金相检验

采用OLYMPUS TIGER3000金相分析软件和GB/T 9441—2021图谱比较评级，对6组试样的金相进行了检验，检验结果如表4所示。金相图片如图1所示。

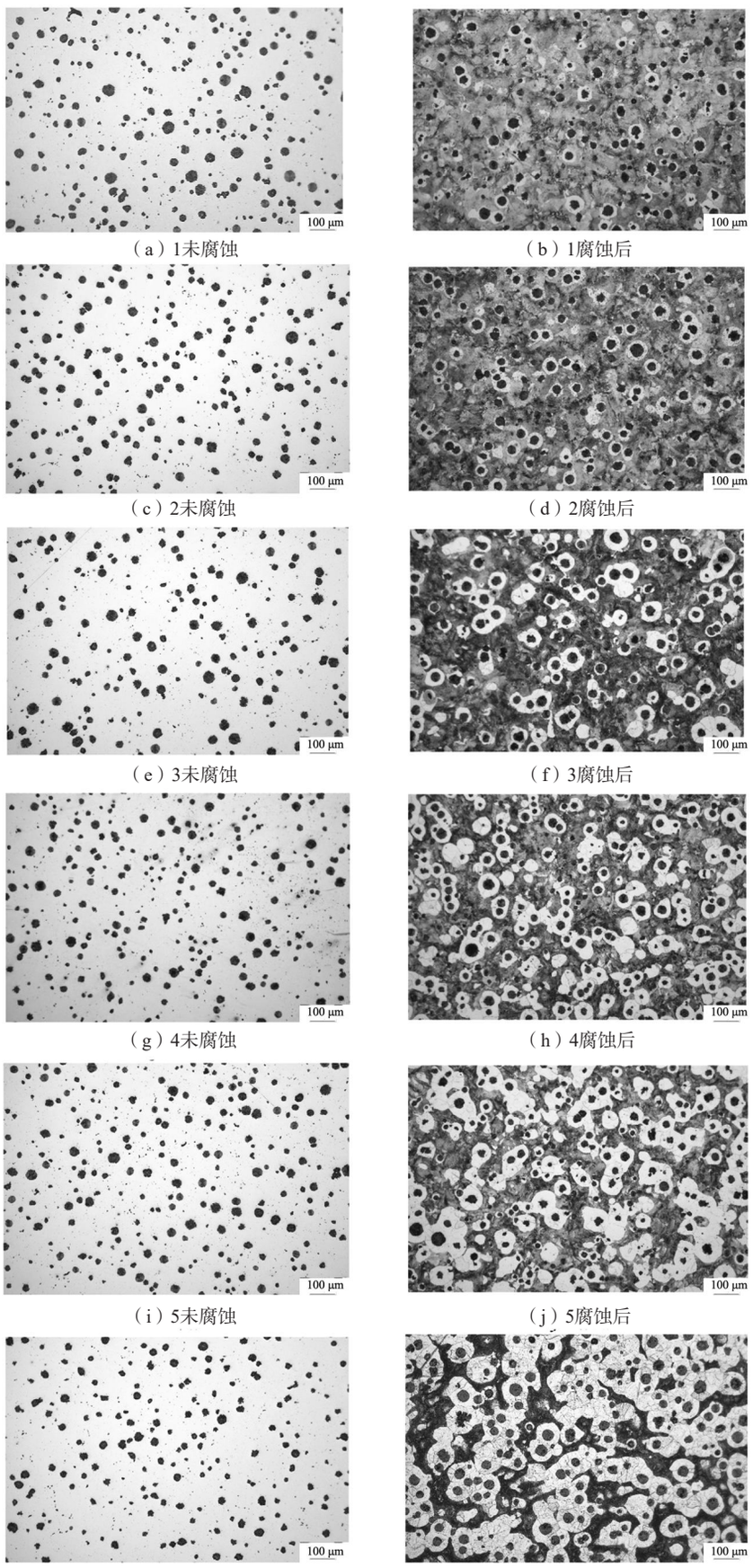
表4 金相检验结果
Tab. 4 Metallographic examination results

序号	金相组织			
	球化级别	石墨大小等级	珠光体含量等级	碳化物含量/%
1	2	6	65	<1
2	2	6	65	<1
3	2	6	55	<1
4	2	6	45	<1
5	2	6	35	<1
6	3	6	35	<1

3.4 分析

从试样1-6的化学成分可以看出，由于废钢本身具备低磷、低硫的特性，采用合成铸铁工艺制备的球墨铸铁，其磷、硫含量均可控制在较低范围；在炉料中添加碳化硅能够降低铁液的氧含量[19]。原铁液中较低的硫含量与氧含量，既为球化反应创造了优良的工艺条件，也有助于提升石墨球数量与球化率[20]。观察试样1-6的金相组织可见，石墨球形态圆整，球化等级为2~3级，球化效果优异；金相组织由石墨、珠光体与铁素体构成，未检出磷共晶，为材料获得优良力学性能奠定基础。试样1-6的力学性能测试结果表明，经由合成铸铁工艺生产的球墨铸铁，完全符合国家标准牌号的使用要求。

试样1-2的抗拉强度均达到750 MPa，断后伸长率同样较高，为6%，展现出优良的力学性能，在具备高强度的同时拥有良好塑性，指标高于国标QT700-2的相关要求。在笔者以往采用铜-锡合金化工艺进行生产



（a）1未腐蚀　（b）1腐蚀后
（c）2未腐蚀　（d）2腐蚀后
（e）3未腐蚀　（f）3腐蚀后
（g）4未腐蚀　（h）4腐蚀后
（i）5未腐蚀　（j）5腐蚀后
（k）6未腐蚀　（l）6腐蚀后

图1　金相图片

Fig. 1 Metallographic images

时，若要满足QT700-2牌号的性能要求，试样金相组织内的珠光体体积分数至少需达到80%，同时断后伸长率无法达到6%。而采用铜-铬合金化方案时，珠光体体积分数仅65%即可使抗拉强度达到750 MPa，且基体中铁素体占比更高，可获得更优异的断后伸长率，这一现象表明基体内部的珠光体与铁素体均得到有效强化。文献[5-12]均指出，铬可与碳结合生成富铬合金渗碳体，进而实现珠光体的强化。同时，铜是促进石墨化的元素，加入一定量的铜能够提升石墨球的圆整度、缩小石墨球直径，并抑制游离渗碳体的生成[21]。铜与铬的复合作用会使石墨球尺寸减小、形态更圆；珠光体不仅得到细化，还因合金渗碳体的生成实现进一步强化，最终制得兼具高强度与高韧性的球墨铸铁材料。

试样1-6在铬含量基本一致的情况下，抗拉强度随着铜含量的提高而上升，金相中的珠光体体积分数也不断提高，铜含量为0.1%时珠光体体积分数为35%，铜含量提升到0.4%后，珠光体体积分数提升到了65%。这证明铜的加入能显著促进珠光体形成，提高球墨铸铁的性能。而且随着铜含量持续降低且铬含量保持恒定，金相组织中未出现游离渗碳体增多的趋势，这表明当铬含量低于0.3%时，铬不会大量促进游离渗碳体生成。

4 应用

笔者使用合成铸铁工艺和铜-铬合金化方案进行了多炉次QT600-3机床铸件的生产，共生产了约150 t不同类型、单件重从10 kg到55 t不等的铸件。铸件的力学性能均能达到国标要求，有小部分铸件甚至超过了QT600-3的要求。

表5 部分实际生产铸件示例
Tab. 5 Some samples of actual casting production

名称	单件质量/t	主要壁厚/mm	单铸Y块力学性能及金相						主要使用面硬度（粗加工后）
			抗拉强度/MPa	伸长率/%	球化级别	石墨大小级别	珠光体含量等级	碳化物含量/%	HB
工作台	55	135	660	7	2	6	45	<1	200
滑枕	5	50	785	3	2	7	90	<1	210
工作台	3	75	630	7	2	7	45	<1	195
立柱	18	120	645	8	2	6	55	<1	210

5 结论

（1）采用合成铸铁工艺，可以利用废钢低磷、低硫的优点，并在炉料中加入碳化硅生产高品质球墨铸铁机床铸件，而且采用铜-铬合金化方案可以使用含铬废钢进行熔铸生产。

（2）铜与铬的复合作用会缩小石墨球尺寸并让石墨球形态更圆整；珠光体不仅被细化，还会因合金渗碳体的生成获得进一步强化，最终制得兼具高强度、高韧性的球墨铸铁材料。当铜含量为0.4%、铬含量为0.26%时，材料抗拉强度可达750 MPa，伸长率能达到6%。

（3）铬含量低于0.3%时，碳化物数量不会明显增多；铬含量固定的前提下，提高铜含量可改善球墨铸铁综合性能。

参考文献：

[1] 李晓辉，杨弋涛，赵凌，等. Cu对厚壁球铁石墨组织和性能的影响 [J]. 现代铸铁，2008，28（3）：28–32.

[2] 杨志超，佘小林，张建新，等. 铜、锑及硅含量对厚大断面珠光体球墨铸铁组织和性能的影响 [J]. 机械工程材料，2013，37（4）：30–34.

[3] 郭振廷，王成铎，孙雅心，等. 铸态高强韧性球墨铸铁的研制 [J]. 铸造，2005，54（2）：195–197.

[4] 吴德海，王怀林，张伯明. 铬对铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造工程，2023（2）：23–33.

[5] Gumienny G. Carbidic bainitic and ausferritic ductile cast iron [J]. Archives of Metallurgy and Materials，2013，58（4）：1053–1058.

[6] Guo X，Stefanescu D M. Partitioning of alloying elements during the eutectoid transformation of ductile iron [J]. International Journal of Cast Metals Research，1999，11（5）：437–441.

[7] 吕献丰，王立波，王雨霏，等. 新型低合金球墨铸铁在油润滑条件下的摩擦磨损性能 [J]. 机械工程材料，2024，48（12）：79–85.

[8] 饶群章，张元好，万仁芳，等. 高强韧铬球墨铸铁研究及其应用 [R]. 2014-05-30.

[9] Cheng H Q，Fu H G，Lin J，et al. Effect of Cr content on microstructure and mechanical properties of carbidic austempered

ductile iron [J]. Materials Testing，2018，60（1）：31–39.
[10] 饶群章，万仁芳，张元好，等. 铬铸态球铁的研究（下篇）—铬在球铁中的作用 [J]. 铸造技术，2008（2）：109–111.
[11] 陈培忠，范为民. 用低Cr合金化提高球铁力学性能的试验及应用 [J]. 现代铸铁，2015（6）：31–36.
[12] 饶群章，万仁芳，张元好，等. 铬铸态球铁的研究—铬铸态球铁的组织与性能（上篇）[J]. 铸造技术，2007（6）：134–142.
[13] 魏永强，杨智明，解戈奇. 大断面球墨铸铁的熔炼质量控制 [C]// 中国机械工程学会，中国机械工程学会铸造分会. 2009中国铸造活动周论文集，2009：180–185.
[14] 秦亮，马芳. 锰对球墨铸铁力学性能及耐腐蚀性能的影响 [J]. 铸造，2015，64（2）：148–152.
[15] 丁陈民，李永红，刘红. 铸态高强度高韧性球墨铸铁的生产技术 [J]. 铸造，2011，60（8）：788–790.
[16] 卫东海，李克锐，吴现龙，等. 高强度高弹性模量低应力铸态球墨铸铁的研究 [J]. 铸造，2014，63（2）：120–127.
[17] 胡勇，饶丽，陈国香. Mn、Cu对球墨铸铁组织性能的影响 [J]. 兵器材料科学与工程，2012，35（4）：5–7.
[18] 饶群章，张元好，何汉军，等. 高强韧性铬球铁：CN201811519113.7 [P]. 2020-12-15.
[19] 张太慧，周林波，孙新明，等. 碳化硅在球墨铸铁熔炼中预处理作用 [J]. 金属加工（热加工），2021（5）：93–95.
[20] 陈子华. 球墨铸铁预处理技术原理及生产应用实例 [J]. 现代铸铁，2010，30（5）：31–36.
[21] 齐鹏，许荣福，马驿皓，等. 铜对低温球墨铸铁组织与力学性能的影响研究 [J]. 铸造技术，2023，44（5）：443–448.

（编辑：潘继勇，pjy@foundryworld.com）