DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.07.026

热处理工艺对秸秆膨化机螺杆用 Cr20 高铬铸铁组织及耐磨性影响

李国程[1], 陈　鑫[2], 蒋金哲[2], 刘　越[2]

(1. 辽宁祥和农牧实业有限公司,辽宁 阜新 123000; 2. 东北大学 材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘　要:对秸秆膨化机螺杆用 Cr20 高铬铸铁进行不同温度的淬火及回火处理,借助光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪和磨损试验机等研究不同热处理温度和回火次数对 Cr20 高铬铸铁微观组织、硬度、韧性、耐磨性的影响。结果表明,采用 990 ℃×1 h 风冷淬火,配合 250 ℃×1 h 一次空冷回火和 400 ℃×1 h 二次空冷回火处理,Cr20 基体组织二次碳化物析出量较多,马氏体含量高,材料耐磨性能好,耐磨性高于 Cr15、Cr26 高铬铸铁。

关键词:高铬铸铁;热处理;微观组织;硬度;韧性;耐磨性

中图分类号: TG156　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)07-0701-05

Effects of Heat Treatment on Microstructure and Wear Resistance of Cr20 High Chromium Cast Iron Used for Straw Extruder Screw

LI Guocheng[1], CHEN Xin[2], JIANG Jinzhe[2], LIU Yue[2]

(1. Liaoning Xianghe Husbandry Co., Ltd., Fuxin 123000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The effects of quenching and tempering temperature on the microstructure, hardness, toughness and wear resistance of Cr20 high chromium cast iron were studied by means of optical microscope, scanning electron microscope, X-ray diffraction instrument, hardness tester and abrasive wear testing machine. The results show that Cr20 has the highest wear resistance compared with Cr15 and Cr26 because of the high content of secondary carbide and martensite after quenching at 990 ℃×1 h, combined with primary tempering at 250 ℃×1 h and secondary tempering at 400 ℃×1 h (Air cooling).

Key words: high chromium cast iron; heat treatment; microstructure; hardness; toughness; wear resistance

膨化机作为挤压膨化技术的载体,广泛应用于包括膨化食品加工、谷物加工、变性蛋白质和膨化饲料等[1-3]。物料送入膨化机机筒后,由螺杆推动向前移动,受到螺杆的剪切、挤压、搅拌和摩擦作用,螺杆作为膨化机的关键部件,在长期工作过程中容易发生磨损失效。因此,关于螺杆材料强韧型、耐磨性的研究具有重要意义。Cr20 高铬铸铁作为生产膨化机螺杆的主要材料,其微观组织主要由基体和 M_7C_3 碳化物组成,虽然碳化物硬度高,耐磨性强,但需要基体对碳化物良好的镶嵌和支撑,并且基体要具备较高的耐磨性,方可使 Cr20 的耐磨性增强[4,5]。目前主要通过调整淬火、回火工艺改善高铬铸铁的基体组织,以获得良好的耐磨性能[6,7]。近些年,国内外研究学者对 Cr20 高铬铸铁做过大量研究。索忠源等[8]对Cr20 在500~1 000 ℃区间内热处理下的组织及力学性能做了详尽研究,发现随着加热温度的升高,基体由奥氏体转变为珠光体并析出二次球状 M_7C_3 型碳化物。聂辉文等[11]研究随着淬火温度升高,Cr20 的冲击韧度值先缓慢下降,然后反向上升,在 1 050 ℃达到最高值,超过 1 050 ℃淬火时,冲击性能急剧下降。张志浩等[12]对 Cr20 的高温磨损性能做了研究,结果表面随着磨损时间延长,磨损机制由磨粒磨损逐渐转变为磨粒磨损 + 轻微氧化磨损。目前关于 Cr20 材料的研究多集中在热处理与硬度、韧性方面,但是对不同热处理制度下 Cr20 的耐磨性缺乏系统研究,特别是二次回火对 Cr20 耐磨性的影响,并且缺乏与 Cr15、Cr26 等常用高铬铸铁耐磨性的对比。本文以 Cr20 高铬铸铁为研究对象,通过调整淬火、回火温度,回火次数,结合不同载荷和磨程下的材料磨损状况,优化出最佳耐磨性的热处理工艺,并且将热处理优化后的 Cr20 与 Cr15、Cr26 做了

收稿日期: 2020-06-10

基金项目: 辽宁省中央引导地方科技发展专项资助(2019JH6/10200007)

作者简介: 李国程(1985-),辽宁鞍山人,工程师,硕士研究生.主要从事农机机械制造技术和管理等方面的研究.电话:13940062930,E-mail:18004188888@163.com

耐磨性对比与磨损机理分析。

1 实验部分

1.1 实验材料及热处理

实验材料 Cr15、Cr20、Cr26 高铬铸铁成分如表 1 所示，采用 500 kg 真空感应炉冶炼并浇铸成楔形试块，熔炼温度为 1 520~1 550 ℃，浇注温度为 1 450~1 480 ℃。

表 1 实验材料化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of experimental steels

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	P	S
Cr15	2.98	2.52	0.35	15.48	1.49	0.94	0.13	0.01	0.01
Cr20	2.96	0.92	0.62	19.94	0.89	1.91	0.57	0.01	0.01
Cr26	2.74	1.71	0.36	27.25	0.27	0.96	0.02	0.02	0.01

将铸锭加工成尺寸为 ϕ30 mm×60 mm 的圆柱形试样进行风冷淬火和回火热处理。淬火温度共设置 960、990、1 020 和 1 050 ℃共 4 个梯度，回火温度设置 250、400 和 550 ℃共 3 个梯度，热处理工艺如图 1 所示。

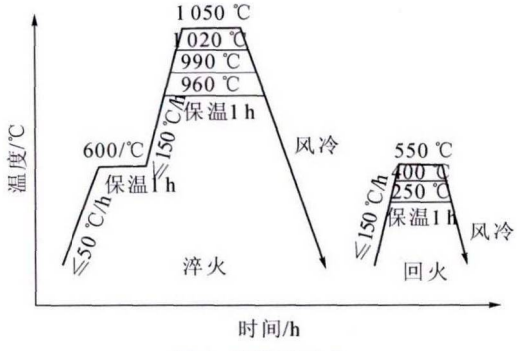


图 1 热处理工艺
Fig.1 Heat treatment process

1.2 实验方法

将热处理后实验样品加工成 20 mm×20 mm× 20 mm 的块状试样，用 HRS-150 数显洛氏硬度计测量试样样品硬度值，取 5 个不同位置测试硬度后取平均值。用线切割机从试块上切取 10 mm×10 mm×55 mm 无缺口标准试样，用 JB-300B 摆锤氏冲击试验机测量试样冲击功，同一组测量 3 个试样，取平均值。切取 10 mm×10 mm×10 mm 的样块，抛光并用 4%硝酸酒精溶液腐蚀后用 OLYMPUS DSX-500 金相显微镜进行金相观察和分析；用 Zeiss Ultra Plus 场发射扫描电镜(SEM)观察试样微观组织，并进行能谱分析 (EDS)；使用 Image pro plus 软件统计材料组织中碳化物平均尺寸及含量。

采用 MLS-225 型干湿砂橡胶轮磨损试验机进行磨损实验。利用 FA2204B 电子天平(0.000 1 g)准确测量并记录磨损前后试样的质量。

2 结果与讨论

2.1 淬火温度对 Cr20 组织性能的影响

对不同温度淬火后的 Cr20 试样进行 XRD 分析，结果如图 2 所示。可以看出，Cr20 经不同温度淬火后，组织中均包含马氏体、奥氏体、M_7C_3 和 $M_{23}C_6$ 碳化物，淬火温度不同，组织中各相含量出现差异。随着淬火温度的增加，马氏体峰呈现先增高后降低的趋势，在这个过程中，可以看出在 990 ℃淬火时，马氏体峰最高；并且在 900 ℃淬火时，$M_{23}C_6$ 及 M_7C_3 相明显增多；随着淬火温度的升高，奥氏体含量逐渐增加。马氏体是 Cr20 的主要强化相，在 900 ℃以下淬火时，随着淬火温度的升高，碳在奥氏体基体中溶入量逐渐增加，淬火后形成的马氏体因含有较多的合金元素而具有较高硬度[9]，因此基体组织硬度逐渐增加，同时淬火过程中从基体组织中析出较多的 $M_{23}C_6$ 型二次碳化物，进一步增加材料硬度；随着淬火温度的增加，过多的合金元素溶入奥氏体中，导致奥氏体稳定性增加，冷却后残余的奥氏体含量逐渐增多[10]，奥氏体硬度较低，降低材料硬度，因此在 990 ℃以上淬火时，材料硬度出现降低趋势，这和图 3 中 Cr20 硬度随淬火温度的变化趋势一致。

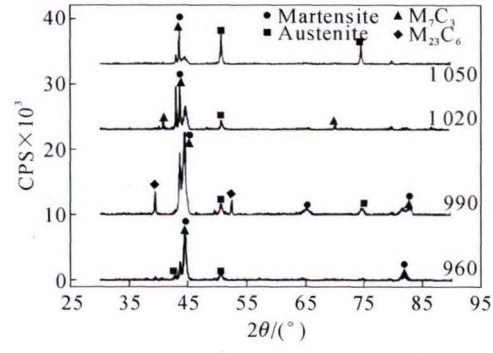


图 2 Cr20 不同温度淬火后 X 射线衍射图谱
Fig.2 XRD pattern for Cr20 after quenching at different temperatures

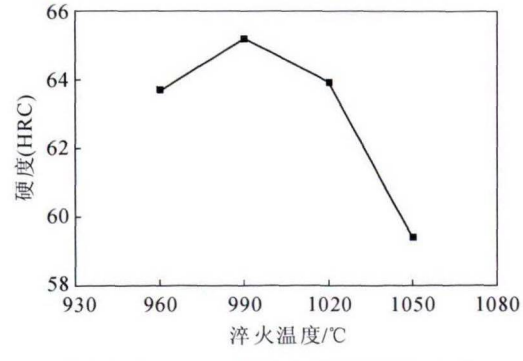


图 3 不同淬火温度下 Cr20 硬度变化曲线
Fig.3 Hardness of Cr20 after quenching at different temperatures

2.2　回火工艺对 Cr20 组织性能的影响

由图 2 和 3 可知，990℃风冷淬火后马氏体峰值最高，硬度最高。以下仅对 990 ℃风冷淬火的 Gr20 试验进行了进一步实验研究。图 4 为 990 ℃淬火后，不同回火温度下的 Cr20 硬度与冲击功。图 5 为 990 ℃风冷淬火不同温度回火后 X 射线衍射图谱。图 6 为 990 ℃风冷淬火不同温度回火的微观组织。从图 4 可以看出，随着回火温度的增加，Cr20 的冲击功逐渐增加，而硬度在中温回火时最高，高温回火时最低。回火过程中残余奥氏体的分解温度约在 350 ℃左右[11]。因此，250 ℃回火时，温度较低，主要消除内应力，不足以使残余奥氏体发生相变转变为回火马氏体[12,13]，从图 6(a)可以看出基体组织仍保持针状马氏体形状，并且基体中析出的二次碳化物尺寸细小，数量也比较少，因此基体保持较高的硬度。400 ℃中温回火时，在马氏体基体上弥散析出大量尺寸小于 1 μm 的菱形二次碳化物，如图 6(b)所示。残余奥氏体冷却后转变为回火马氏体，马氏体含量增多，如图 5 所示，因此试样硬度有所增加。从图 6(c)可以看出，550 ℃高温回火时，回火温度较高，基体中合金元素大量析出，碳化物粗化，导致基体硬度急剧降低。对 Cr20 二次回火机理与一次回火一致，及随着回火温度升高，碳化物析出量渐增，基体硬度降低，韧性增强。

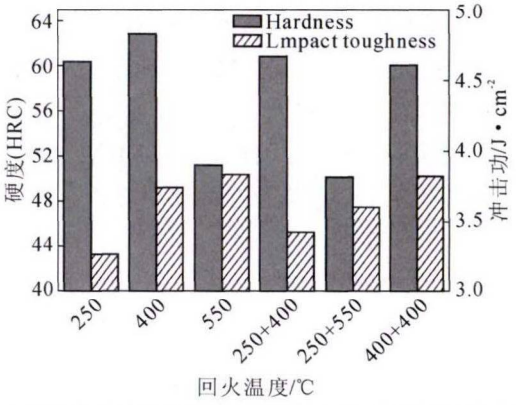


图 4　990 ℃风冷淬火不同温度回火处理后 Gr20 的性能

Fig.4　Properties of Cr20 after tempering at different temperatures for quenched at 990 ℃

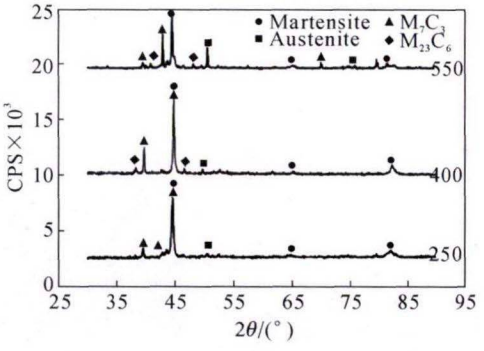


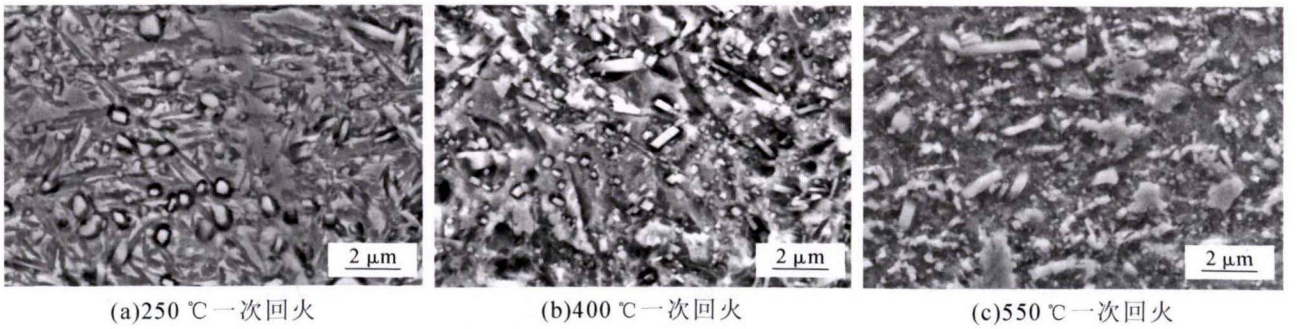
图 5　990 ℃风冷淬火不同温度回火处理后 Gr20 的 X 射线衍射图谱

Fig.5　XRD pattern for Cr20 after tempering at different temperatures for quenched at 990 ℃

2.3　热处理对 Cr20 耐磨性能的影响

图 7 为相同磨损条件下(正压力 90 N，石英砂尺寸 215~270 μm)，不同回火制度的 Cr20 实验材料随磨程变化的磨损失重曲线。从图中可以看出，各实验钢的磨损量均随着磨程的增加而增加。550 ℃一次高温回火后的 Cr20 试样耐磨性能最差，并且随着磨程增加，磨损量急剧增长。经 400 ℃一次中温回火处理的 Cr20 试样磨损失重较小，并且随磨程增加，磨损失重增长较为缓慢，具有较好的耐磨性。经 250 ℃一次低温回火后，再进行 500 ℃二次高温回火时，耐磨性降低，而经过 400 ℃二次中温回火后，其耐磨性最佳，说明高温回火不利于 Cr20 耐磨性的提高，中温回火对 Cr20 耐磨性的提高的非常有利。

图 8 为经 550 ℃一次回火处理后的 Cr20 磨损表面微观组织形貌，从图中可以观察到较多的凸起部分和凹陷部分，通过 EDS 能谱分析可以得出该凸起部分为碳化物相，而凹陷部位主要是基体组织，由于 550 ℃高温回火后 Cr20 基体组织中析出大量合金碳化物，导致基体硬度较低，因此 Cr20 基体磨损严重形成沟壑，留下的碳化物构成凸起部位。影响 Cr20 耐磨性的微观组织主要是基体和碳化物[14]，其中基体主要是由马氏体和残余奥氏体组成。磨粒磨损的过程中，基体主要起支撑碳化物的作用，碳化物作为硬质相，主要用于抵抗磨粒磨损[15]。



(a)250 ℃一次回火　　(b)400 ℃一次回火　　(c)550 ℃一次回火

图 6　990 ℃风冷淬火不同温度回火处理后 Gr20 的微观组织

Fig.6　Microstructure of Cr20 after tempering at different temperatures for quenched at 990 ℃

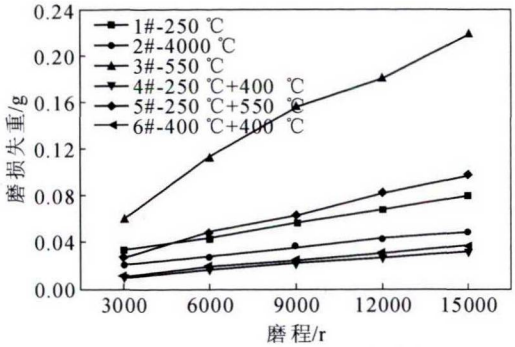


图 7 不同回火温度处理后 Cr20 的磨损失重
Fig.7 Wear loss of Cr20 after tempering at different temperatures

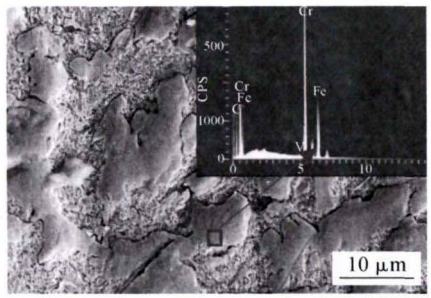


图 8 550 ℃回火处理后的 Cr20 磨损表面微观形貌及 EDS
Fig.8 The wear surface morphology and EDS of Cr20 after tempering at 550 ℃

将热处理优化后（990 ℃淬火，250 ℃一次回火，400 ℃二次回火）的 Cr20 与常规的热处理制度（1 020 ℃淬火，550 ℃一次回火）下的高铬铸铁进行耐磨性比较，结果如图 9 所示，通过对比常规热处理后各试样的磨损失重可以得知，随着 Cr 元素的逐渐升高，高铬铸铁的失重逐渐减小，耐磨性逐渐增强，原因主要是随着 Cr 元素含量的逐渐增加，材料中碳化物总量逐渐增多，硬度较高的碳化物能够抵御磨粒对材料表面的磨损[16]，通过对比热处理优化后的 Cr20 与常规热处理下其他高铬铸铁的磨损失重可以发现，热处理优化后的 Cr20 试样的磨损失重最小，耐磨性能最佳，说明在不增加高铬铸铁 Cr 含量的情况下，可以通过优化热处理工艺显著改善高铬铸铁耐磨性。

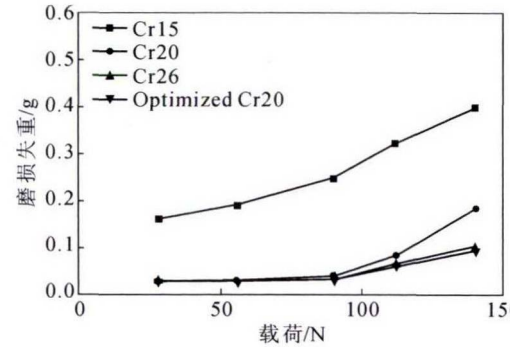
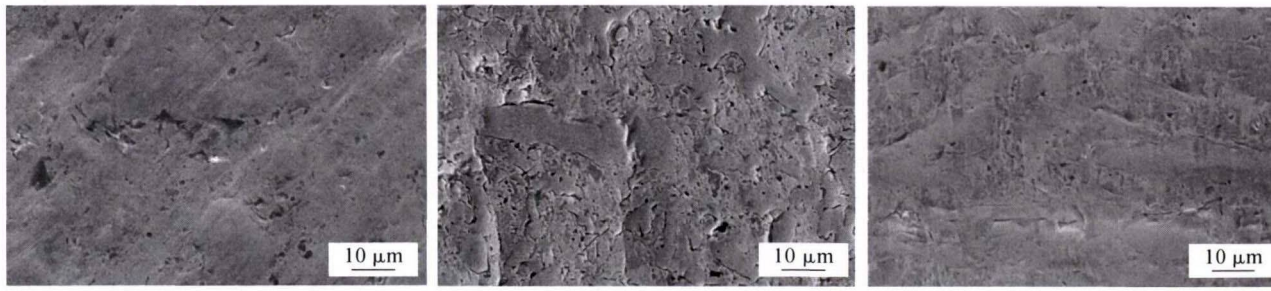


图 9 不同类型高铬铸铁磨损失重曲线
Fig.9 Wear loss curves of different types of high chromium cast iron

图 10 为 4 种实验材料磨损后磨损表面微观组织形貌。从图 10(a)中可以看到 Cr15 磨损表面存在较长的磨损沟壑，基体部位磨损严重，高度低于周围的碳化物，同时表面存在尺寸不一的剥落坑，这是由于 Cr15 中碳化物含量较少，对基体的保护作用较弱，导致基体磨损严重，磨损失重最大[17]。

从图 10(b)可以看出，Cr26 磨损表面存在较多的微型裂纹，并且主要分布在碳化物的周边，这是由于基体组织性能较差导致的，虽然 Cr26 因 C、Cr 含量较多，组织中含有较多的碳化物，可以抵御磨粒磨损[18]，但是由于热处理工艺不佳导致基体对碳化物的镶嵌与支撑能力较差，最终其耐磨性略低于热处理优化后的 Cr20。由于热处理优化后的 Cr20 基体组织马氏体含量高，二次碳化物细小弥散，具有较高的耐磨性，因此从图 10(c)看出，磨损表面基体与碳化物高度差很小，并且不存在明显的剥落坑、裂纹等。



(a)Cr15　(b)Cr26　(c)热处理优化后Cr20

图 10 28N 载荷下不同高铬铸铁磨损表面微观形貌
Fig.10 Micrographs of the worn surfaces for different types of high chromium cast iron under 28N

3 结论

(1)Cr20 淬火硬度随着淬火温度升高呈现先上升后下降趋势，并且在 990 ℃淬火时硬度值达到最高值 65.2 HRC。

(2)990 ℃淬火后 Cr20 耐磨性随回火温度的升高先上升后下降，400 ℃中温回火时，基体组织中马氏体含量最高，残余奥氏体较少，碳化物弥散分布于

基体中，Cr20 强韧型、耐磨性最佳。

(3)通过 990 ℃×1 h 淬火，配合 250 ℃×1 h 一次回火和 400 ℃×1 h 二次回火处理后的 Cr20 耐磨性能最好，并且耐磨性优于 Cr15、Cr26 高铬铸铁。

参考文献：

[1] 金征宇. 挤压膨化技术及其在饲料工业中的应用 [J]. 饲料工业, 2000 (6): 1-5.

[2] 付玉升. 食品膨化机螺杆加工技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2005.

[3] 胡玉华，郭祯祥，王华东，等. 挤压膨化技术在谷物加工中的应用[J]. 粮食与饲料工业，2014 (12): 42-44.

[4] Chen S, Zhao A, Li Z, et al. Effect of heating temperature and cooling rate on microstructure of hypoeutectic high chromium cast iron [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33 (11): 78-84.

[5] Nie H, Nie J, Pan Q. Effect of heat treatment process on mechanical properties of high chromium cast iron Cr20[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(9): 183-187.

[6] 姜良朋，张克平，姚亚萍. 铬系白口铸铁组织与性能的研究进展[J]. 铸造技术，2016，37(6): 1162-1165.

[7] 平宪忠，乔峰，朴东学. 以高铬铸铁为例探讨抗磨白口铸铁件磨损特性[J]. 铸造技术，2019，40(12): 1286-1290.

[8] 索忠源，付立铭，张志浩，等. 热处理对 Cr20 高铬铸铁组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(07): 184-187.

[9] 李建伟，吴帆. 高强钢的直接淬火回火工艺研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(14): 234-237.

[10] 王玉江，宋百隆，魏世丞，等. 含碳量及热处理工艺对高铬铸铁组织与耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(2): 30-34.

[11] 聂辉文，聂俊红，潘清林. 热处理工艺对高铬铸铁 Cr20 力学性能的影响[J]. 金属热处理，2015，40(9): 183-187.

[12] 张志浩，索忠源，姜峰，等. Cr20 高铬铸铁的摩擦磨损及高温抗氧化性能[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(12): 78-83.

[13] 陈闪闪，赵爱民，李振. 加热温度和冷却速度对亚共晶高铬铸铁微观组织的影响[J]. 材料热处理学报，2012，33 (11): 78-84.

[14] Albertin E, Beneduce F, Matsumoto M, et al. Optimizing heat treatment and wear resistance of high chromium cast irons using computational thermodynamics [J]. Wear, 2011, 271 (9-10): 1813-1818.

[15] 刘旭. 稀土元素 La 对 Cr26 型高铬铸铁组织和耐磨性能的影响[J]. 热加工工艺，2017，46(13): 118-121.

[16] 龚沛，赵曜，杨浩，等. 碳、铬含量及热处理工艺对高铬铸铁力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(9): 137-142.

[17] 翟晨晨，苏恒渤，郭嘉，等. Cr/C 比对中铬铸铁复合抗磨辊圈组织和耐磨性的影响[J]. 铸造技术, 2019, 40(2): 139-142.

[18] Zhou S, Shen Y, Zhang H, et al. Heat treatment effect on microstructure, hardness and wear resistance of Cr26 white cast iron [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28 (1): 1-8.

2020年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855，中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、应用技术、生产管理经验及信息和铸造设备，覆盖铸铁、铸钢和有色合金等铸造领域，包括砂型铸造以及熔模铸造、金属型铸造、消失模铸造和压铸等特种铸造技术。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、特种铸造、装备技术、实用成型技术、材料改性、材料开发、材料保护及表面工程、材料失效分析、应力控制与理化测试技术、今日铸造等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造原辅材料、铸造设备、熔炼设备、热处理设备、环保设备、检测仪器以及铸件生产、科研成果转让、企业形象宣传等相关广告。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价25元，平寄全年300元（含邮费），挂号全年336元，快递全年420元。

海外：每期定价25美元，全年300美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

微信扫一扫 信息快知道

邮购地址：西安市金花南路5号西安理工大学608信箱（710048）

联系人：李巧凤　电话/传真：029-83222071

网址：www.zhuzaojishu.net　E-mail：zzjs@263.net.cn