

制浆磨片不锈钢材料的数字化模拟及热处理研究

赵仲恺¹, 赵平²

(1. 青岛华通国有资本投资运营集团有限公司, 山东青岛 266000; 2. 青岛科技大学 材料学院, 山东青岛 266042)

摘要: 造纸制浆磨片是制浆系统中磨浆工段的核心件和易损件, 在制浆生产线中消耗量巨大, 同时也是决定纸浆质量的关键零部件。通过对制浆磨片制造厂的实地跟踪, 并记录其生产情况, 对磨片生产现场存在的问题进行汇总与分析。通过JMatPro软件模拟计算了耐磨材料的相变特征, 并以此制定了热处理制度, 进行热处理试验, 对热处理后的样品使用OM、SEM、EDS等表征和测试手段, 研究了制浆磨片的微观组织特征。结果表明: JMatPro模拟计算结果与试验结果基本吻合, 通过合适的热处理, 磨片材料组织主要为强度和硬度较高的马氏体基体+微米级细小碳化物, 这种组织有利于磨片长寿命使用。

关键词: 耐磨材料; 相变计算; 热处理; 碳化物

截止2020年全国造纸企业6 000多家, 国内纸浆消费总量为10 200万吨, 生产总量为7 378万吨^[1-2]。制浆是造纸工业中最重要的一环, 国内制浆装备承载了60%~70%的纸浆生产能力。在制浆设备中, 制浆磨片作为更换最为频繁、使用量最大的易损件和关键件, 国内自给率仅为20%~35%, 其中高端制浆磨片的占有率更低。我国纸浆产能巨大, 每年制浆磨片的需求量至少在2万吨, 高端制浆磨片市场缺口巨大^[3-5]。国内生产的磨片质量普遍较低, 使用寿命在600 h左右且存在异常损坏情况。磨片出现异常断裂和脱落等非正常失效, 就需要对整条生产线进行全面清理, 工作量大, 给企业增加时间和经济成本。此外, 磨片的性能直接影响纸浆的质量, 低性能磨片将导致纸浆质量较低。磨片制造商生产的磨片材料大多采用马氏体不锈钢, 例如: 7Cr17Mo、5Cr16Mo、3Cr15Mo等^[6-8]。

目前, 国内厂家在原材料控制、熔炼工艺、材料成形等生产工艺方面控制不稳定, 影响钢液的纯净度、组织的均匀性等, 导致国产磨片与国外磨片的产品质量差距较大, 高质量磨片严重依赖进口^[9-14]。为促进我国纸浆装备制造制造业向着高端和高质量进步, 打造中国纸浆装备的新品牌, 需加大对制浆磨片用耐磨材料研发投入, 系统研究材料的铸造、成形、热处理等生产工艺对磨片组织结构和性能的影响, 并深入探究马氏体不锈钢中各相的组成和相变机理, 通过热处理工艺控制其微观结构, 对我国制浆磨片用耐磨材料系统化和完善化发展积累试验数据。

1 试验材料和方法

本试验根据制浆磨片多年生产经验, 设计磨片化学成分如表1所示。制浆磨片因其恶劣的工作环境对强度要求较高, 适当提高钢中C和Cr含量, 结合稀土元素, 有利

表1 新型马氏体不锈钢的化学成分
Table 1 Chemical composition of new type martensitic stainless steel

C	Cr	Ni	Si	Mo	Mn	Nb	P	S	Fe
0.35~0.8	17~20	1~2	0.5~1.5	0.5~1	0.5~1.5	0.01~0.05	≤0.025	≤0.01	余量

作者简介:

赵仲恺(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 信息系统项目管理师, 主要从事先进制造领域的研究开发工作。电话: 0532-85720916, E-mail: zhaozhk@qq.com

中图分类号: TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

07-1004-06

基金项目:

山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME009)。

收稿日期:

2023-07-25 收到初稿,

2023-09-08 收到修订稿。

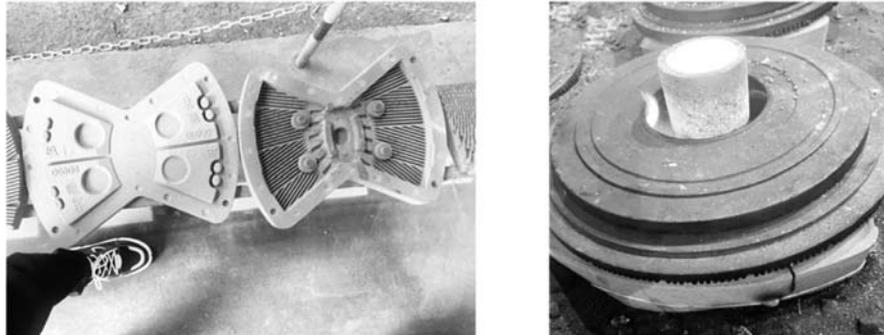
于形成符合要求的显微组织；Mn可增强奥氏体的稳定性，在一定条件下可以代替Ni在不锈钢中的作用；Si可以提高不锈钢抗腐蚀性，抗高温氧化效果显著，增加 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变的驱动力。其他合金元素的加入，可有效改善马氏体组织、细化晶粒，提高钢的塑韧性和延迟断裂性能。

原材料使用废钢片、铬铁和生铁等材料，在中频感应炉（型号：KGPS/500 kg）内熔炼，使用覆膜砂造型工艺浇注成形。根据设计成分和原材料种类，计算试验中使用各种材料数量为：废钢片400 kg、铬铁150 kg、生铁10 kg、回炉料和其他添合金。使用中频电炉之前，提前6 h温炉，温炉结束后加大电炉功率，并依次加入原材料进行熔炼。原材料完全熔化后，出炉前使用样勺从炉中取出少量钢液浇注试样，使用火花直读光谱仪（型号：GNR S3 MiniLab 300）进行炉前成分含量检测。检测出炉钢液成分符合设计成分后，进行脱氧处理。对熔炼好的钢液表面进行盖渣，保持一段时间后扒渣处理。然后，用纯铝颗粒进行两段式脱氧：一是在钢液成分合格且扒渣处理完后将一份铝颗粒倒入炉内进行脱氧；二是在烤好的浇包内加入

铝颗粒和重稀土脱氧剂，在钢液倒入浇包的同时进行二次脱氧。然后，立刻进行浇注。

磨片因其复杂的齿形，对于砂型的强度、发气量等均有一定的要求，本试验铸造磨片全部使用覆膜砂造型，如图1a所示为磨片的覆膜砂壳型，磨片砂型主要分为两个部分，齿形壳体和封盖壳体。当高温钢液浇入铸型时，对砂型有较大的冲击力，因此需用专业砂型密封胶将上下两个壳体粘连起来，同时在壳体上用较重的钢板压住，如图1b所示，防止钢液顶开砂型溢出，同时还能防止铸件变形。砂型摆放时需保证砂型水平，保障钢液充型平稳且充分。

耐磨材料的高合金化对熔炼工艺提出了更高的要求，本试验将出炉温度定在1 680~1 730 ℃。钢液熔炼完成后倒入浇包内，注满后在钢液表面覆盖一层除渣剂用于保温，同时隔绝空气避免生成非金属氧化物，过多的氧化物会阻塞浇注，影响过滤器的效果。盖渣的保温效果对于表面钢液的保温效果有限，因此浇注包上层钢液较中下层钢液流动性差，因此本试验选择图2a中的茶壶型浇注包，用中下层钢液浇注，图2b为浇注现场。



(a) 覆膜砂型壳

(b) 砂型放置

图1 磨片铸件的覆膜砂造型

Fig. 1 Molding with precoated sand for the abrasive disc castings



(a) 茶壶型浇注包

(b) 浇注磨片现场

图2 浇注包和使用方法

Fig. 2 Pouring ladle and its application method

磨片的热处理使用PQ系列真空热处理炉和双室真空油淬炉。PQ系列真空热处理炉和双室真空油淬炉为升温、保温和淬火一体化设备，可有效提高磨片的热处理效果。使用电火花线切割机将制浆磨片（型号：DK7735）切割成150 mm × 15 mm × 20 mm的长方体长条，方便对磨齿硬度性能测试。试验磨片硬度检测使用触摸屏数显洛氏硬度计（型号：MHRS-150）。磨片工作面是磨齿部位，因此切割表征试样需将宽度较小的磨齿切开。主要测试磨齿上的硬度检测，从齿顶、齿中、齿根和磨片底部检测硬度，每块试样选取3~5个齿进行测试，然后取其平均值。制备不同处理状态下材料表征试样，金相试样切割后使用砂轮将切割表面打磨平整，使用砂纸进行粗抛光，然后用金相抛光机（型号：ZYP-2X）进行精细抛光。使用正置金相显微镜（型号：XTL-16）对金相试样进行表征。使用SEM（型号：JSM-7900F）对材料基体组织和第二相碳化物进行观察。使用EDS对磨片材料基体和析出相碳化物成分进行测定。

2 试验结果与分析

2.1 不锈钢相变特征分析

根据耐磨材料的化学成分，使用JMatPro软件进行相变计算，温度区间为0~1 600 °C，计算温度间隔设置为10 °C。如图3所示，在900~1 270 °C时奥氏体体积分数达到99.98%，在温度低于820 °C后奥氏体含量急剧降低，同时铁素体含量急剧增加，此温度区间存在大量的 γ -Fe与 α -Fe转变的过程，冷却至710 °C后不锈钢各相趋于稳定。当温度低于1 270 °C时，碳氮化物M(C, N)一直处于较低含量水平。因此热处理工艺中常采用高温淬火处理，阻止奥氏体(γ)向铁素体(α)转变，促进马氏体相变来提高材料强度和硬度。

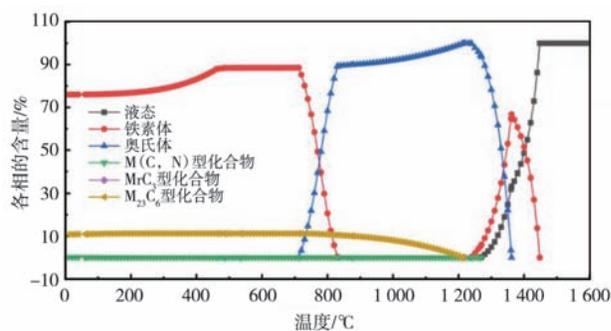


图3 温度对相组成的影响

Fig. 3 Effect of temperature on the phase composition

图4为不同温度下磨片材料的物相组成。随温度的升高，奥氏体化程度显著提高，更多碳化物溶解到

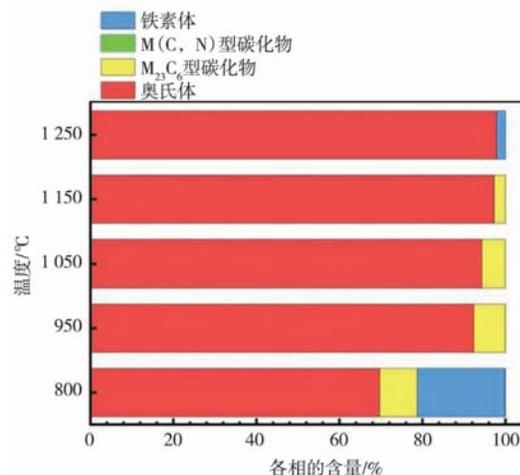


图4 计算不同温度下各物相组成

Fig. 4 Calculating the phase compositions at different temperatures

奥氏体晶格中，碳化物含量减少。第二相析出碳化物作为材料中不可缺少的组织，在磨片材料中可以起到增强耐磨性，提高使用稳定性和使用寿命的作用。淬火温度需具备较好的奥氏体化效果的同时，为第二相碳化物的析出创造条件。在1 050 °C时奥氏体含量为94.29%， $M_{23}C_6$ 含量为5.67%，M(C, N)含量为0.03%，根据各相含量，最终选用1 050 °C进行淬火处理。

2.2 不锈钢的热处理工艺

本试验的热处理工艺如下：高温退火、淬火和回火三段式热处理工艺，如图5所示。高温退火工艺：在室温下将磨片试样放入炉子内，从室温开始以150 °C/h升温速率，升温至650 °C保温1 h，然后加快升温速率，在100 min内升温至1 050 °C，保温2 h，之后断开电源，样品随炉冷却至100 °C以下。淬火工艺的升温方式与高温退火相同，1 050 °C保温2 h后，取出试样直接浸没在淬火油中进行冷却。油淬完成后，处理干净金属表面的油渍等附着物后，立刻放入回火炉内以150 °C/h升温速率，加热至350 °C，保温4 h后随炉冷却。

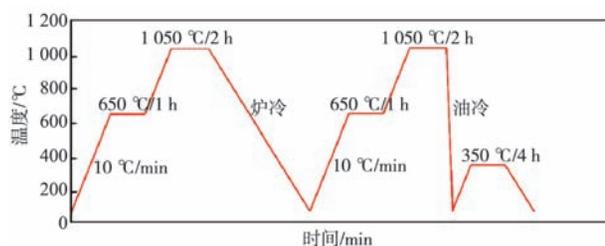


图5 磨片热处理工艺示意图

Fig. 5 Diagram of heat treatment process for abrasive disc

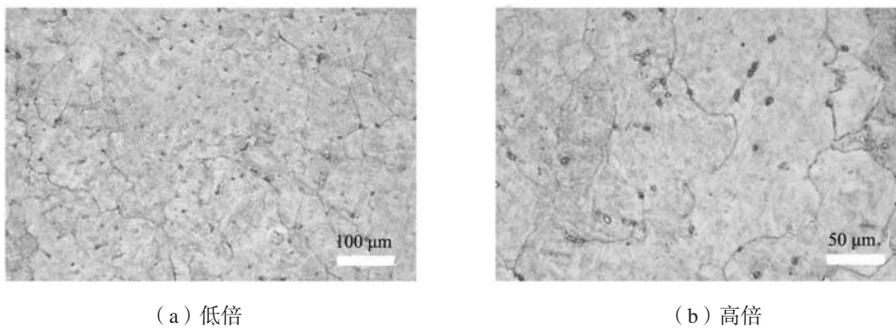
2.3 不锈钢的组织 and 硬度

如图6所示为磨片铸造成形的金相显微组织图片。图6a为50倍下显微组织图片，可以观察到磨片材料主要由板条状马氏体、残余奥氏体、铁素体和第二相析出物组成。马氏体在磨片材料基体广泛存在，残余奥氏体和铁素体沿晶界分布，第二相在铸态基体中分布较少。磨片形状较为复杂，磨齿部位散热较快，齿根底部散热较慢，因此磨片局部降温速率存在差异，影响磨片显微组织的均匀性。晶粒大小从齿顶向齿根尺寸依次减小。磨片磨齿顶部部位比齿根中残余奥氏体和铁素体含量较少，晶粒尺寸减小。铸态磨片在覆膜砂型内冷却，相较于空气或淬火油等介质中降温速率缓慢，影响第二相析出，导致晶粒粗大，如图6b，一次铸造成形磨片存在较为严重的组织偏析，组织分布不均匀和晶粒粗大等缺陷。

使用真空油淬炉在高温退火和油淬后在350℃保

温4 h后的金相图片如图7a所示。磨片材料显微组织边界主要为残余奥氏体和析出碳化物，只有在多晶体交界处会有少量的铁素体分布，其余基体组织中含量很少，多晶界处铁素体明显长大，尚存部分等轴铁素体。图7b, c为扫描电镜表征油淬+350℃回火工艺下，不同倍数的显微组织。淬火+回火后的组织主要由马氏体板条、铁素体、部分残余奥氏体和碳化物组成。随着温度的升高，基体中原子活性提高，铁素体转化完成，晶体中原本固定的碳原子和强碳化物元素析出、聚集，析出碳化物含量、尺寸和聚集程度均有一定程度的增加。

图7d所示为真空油淬+350℃回火后，不同尺寸碳化物和基体EDS检测区域图，各元素含量见表2。小尺寸碳化物较大尺寸碳化物含碳量高，这与上文分析的热处理工艺相吻合。根据表2数据，MC、M₂C型碳化物形成元素Mn、Mo含量明显减小，但共晶碳化物固

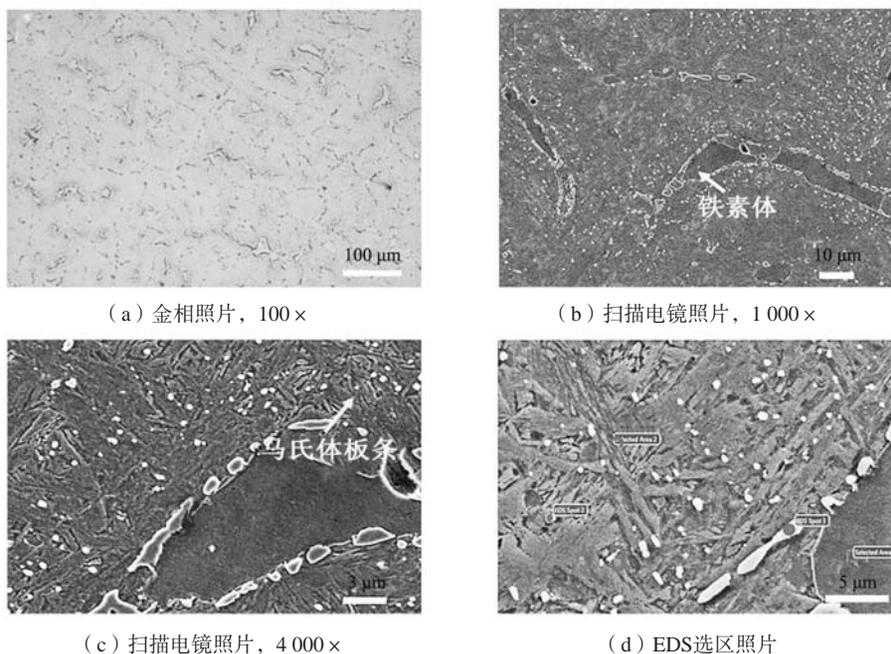


(a) 低倍

(b) 高倍

图6 铸态磨片金相组织图片

Fig. 6 Pictures of metallographic structures of as-cast abrasive disc



(a) 金相照片, 100×

(b) 扫描电镜照片, 1 000×

(c) 扫描电镜照片, 4 000×

(d) EDS选区照片

图7 磨片材料淬火+回火后的组织

Fig. 7 Microstructures after quenching and tempering of the abrasive disc materials

表2 磨片真空热处理后EDS检测数据
Table 2 EDS test data of the abrasive disc after vacuum heat treatment

位置	原子分数%							
	C	Cr	Fe	Si	Mo	Mn	Ni	V
点3	40.9	27.9	29.1	0.4	0.5	0.5	0.3	0.4
点4	31.6	33.8	31.8	0.3	0.7	0.8	0.4	0.6
区域2	8.8	15.1	73.0	0.9	0.2	0.9	1.1	-

碳能力提升了约5%。相较于气淬工艺，油淬工艺中小尺寸碳化物中的Fe含量明显增加5%~10%，且Cr含量减少5%~10%。油淬相较于气淬冷却速率较快，高温奥氏体溶解度较高的元素，在快冷条件下奥氏体中的元素来不及析出被固溶在奥氏体中。析出的小尺寸碳化物主要与Fe结合形成 M_3C 、 M_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 型碳化物，结合形式为 $(Fe, Cr)_3C$ 、 $(Fe, Cr)_7C_3$ 、 $(Fe, Cr)_{23}C_6$ 等。在特殊的条件下与C结合的Fe和Cr元素可以相互替换。碳化物析出长大，晶体内Fe元素含量上升Cr含量下降，因此可得结论碳化物长大过程中Fe逐渐被Cr取代。对比基体检测数据，随着回火温度的升高基体中碳含量逐渐降低，其他强碳化物元素变化均不明显。综合上文分析，随着回火温度的升高，铁素体、残余奥氏体含量升高，基体中的碳多被固定在铁素体和残余奥氏体内。

对磨片材料进行硬度测试（表3），磨片的平均HRC硬度值为41.5。磨片材料并不是越硬越好，硬度值过高，有“崩齿”的可能，硬度值太低，会影响使用寿命。此硬度值磨片经过造纸厂使用后，符合要求。

表3 磨片真空油淬+回火的硬度数据
Table 3 Hardness data of the abrasive disc after vacuum oil quenching and tempering

淬火+回火工艺	硬度HRC
1点	42.6
2点	41.7
3点	39.7
4点	42.9
5点	40.8
平均值	41.5

3 结论

(1) 磨片材料的最佳淬火温度为1 050 ℃，此温度下基体组织几乎全部转化为奥氏体组织。

(2) 磨片材料的铸态组织粗大，且不均匀，经油淬+回火处理后，基体组织为板条马氏体+少量铁素体和残余奥氏体，碳化物尺寸在微米级，分布均匀。

(3) 经淬火+回火后，磨片平均HRC硬度在41.5左右，基本满足高耐磨性要求。

参考文献:

- [1] 中国造纸工业2021年度报告[J]. 中华纸业, 2022, 43(9): 8-18.
- [2] 中国造纸工业2020年度报告[J]. 中华纸业, 2021, 42(9): 11-21.
- [3] 周善亮, 赵平, 汪会秋, 等. 国外进口制浆磨片的机械性能探析[J]. 中华纸业, 2021, 42(14): 19-22.
- [4] 蒋小军. 四类不同功能磨片的打浆机理与应用案例分析[C]//江苏省造纸学会学术年会, 南京: 南京林业大学, 2012.
- [5] 刘士亮, 曹国平, 李广胜, 等. 稀土铸渗法研制盘磨磨片及使用效果[J]. 中国造纸, 2010, 29(9): 37-40.
- [6] 宋自力, 杜晓东, 陈翌庆, 等. 7Cr17Mo马氏体不锈钢组织和冲击韧性[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(5): 95-99.
- [7] WANG J J, DU X D, GAO Z. Comparison of 4Cr13 and 7Cr17Mo martensitic stainless steel in terms of microstructure and performance [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2012: 1172-1175.
- [8] LIU H, WANG J, SHEN B, et al. Influence of secondary carbide precipitation and transformation on abrasion resistance of a 3Cr15Mo1V1.5 white iron [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 14(13): 231-235.
- [9] PARDAL J M, SÉRGIO S M T, TAVARES M T, et al. Influence of carbon content on the martensitic transformation of titanium stabilized austenitic stainless steels [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(12): 345-356.
- [10] MOALLEMI M, KERMANPUR A, NAJAJA, et al. Deformation induced martensitic transformation in a 201 austenitic steel: the synergy of stacking fault energy and chemical driving force [J]. Mater. Sci. Eng. A, 2016, 653: 147-152.

- [11] LIU Z B, YANG Z, LIANG J X, et.al. Atomic-scale characterization of multiple precipitating species in a precipitation-hardened martensitic stainless steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2022, 29 (2) : 207–214.
- [12] HSIEH S H, CHUEH C H, CHEN I S. A microstructural investigation of 420 martensitic stainless steel processed by MIM [J]. *Powder Injection Moulding International*, 2021 (4) : 105–121.
- [13] ZHENG Y, SUN H L, YAN L C, et.al. Review of metal carbide nanoprecipitate effects on hydrogen embrittlement of high strength martensitic steel [J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2022, 69 (4) : 409–419.
- [14] JAIN A S, CHANG H W, TANG X H, et al. Refinement of primary carbides in hypereutectic high-chromium cast irons: a review [J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56 (2) : 999–1038.

Research on Phase Change Calculation and Heat Treatment of Stainless Steel Material for Pulping Abrasive Disc

ZHAO Zhong-kai¹, ZHAO Ping²

(1. Qingdao China Prosperity State-Owned Capital Investment Operation Group Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao, 266042, Shandong, China)

Abstract:

Paper pulping abrasive disc is a core part and wearing part of the pulping section in the pulping system, which is a huge consumption products in the pulping production line, and also a key part to determine the quality of pulp. The problems existing in the abrasive disc production site are summarized and analyzed through the field tracking of the abrasive disc manufacture factory and recording its production situation. The phase change characteristics of wear-resistant materials were simulated and calculated by JMatPro software, and the heat treatment process was formulated and the heat treatment experiment was carried out. OM, SEM, EDS and other characterization and testing methods were used to study the microstructure characteristics of pulping grinding pieces after heat treatment. The results show that the JMatPro simulation results are basically consistent with the experimental results. Through proper heat treatment, the microstructure of the grinding plate material is mainly martensitic matrix with high hardness+micron fine carbide, which is conducive to the requirement of long service life of the grinding plate.

Key words:

wear-resistant material; phase change calculation; heat treatment; carbide