

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2020.02.003

国内齿辊式破碎机常用齿板材料的组织和性能

刘志学¹, 刘元元¹, 王宏¹, 王军¹, 冯异², 坚增运¹

(1. 西安工业大学 陕西光电功能材料与器件重点实验室, 陕西 西安 710032; 2. 四川秦岭科技有限公司 新产品研发部, 四川 绵阳 621000)

摘要:通过组织观察、力学性能检测和磨损实验,对比研究了洗煤生产过程中齿辊式破碎机的国内4种常用齿板材料的组织和性能。结果表明,进口齿板材料的组织由板条马氏体和6.13%的残余奥氏体组成;高锰钢齿板的组织为单相奥氏体组织;ZG32CrMnSiNi2Mo齿板的组织由贝氏体铁素体板条和13.18%残余奥氏体组成;ZG22CrMnSiNiMo齿板为粒状贝氏体组织,组织中条型M-A岛比例较多,残余奥氏体量为14.9%。940℃淬火+200℃回火后,进口齿板材料具有最优的综合性能,硬度和冲击韧性分别为44.1 HRC和34.5 J;高锰钢齿板水韧处理后平均硬度为216.5 HB,冲击韧性为113.8 J;ZG32CrMnSiNi2Mo齿板900~940℃正火处理后,冲击韧性值略低于进口齿板的供货状态,但硬度高于进口齿板;960~1000℃正火处理后,ZG22CrMnSiNiMo齿板硬度略低于进口齿板材料,冲击韧性略高于进口齿板材料。选取进口齿板材料供货状态为标准,高锰钢齿板材料的相对耐磨性较低,仅为0.76;ZG32CrMnSiNi2Mo齿板材料经900~980℃正火处理后,耐磨性能较好,相对耐磨性为1.19~1.23;ZG22CrMnSiNiMo齿板材料经920~1000℃正火处理,耐磨性能介于进口齿板材料和ZG32CrMnSiNi2Mo齿板材料之间,相对耐磨性为1.10~1.13。

关键词:齿辊式破碎机;齿板;组织;性能

中图分类号: TG 142.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)02-0106-05

Microstructure and Properties of Common Domestic Tooth-plate Materials for Tooth-roll Crushers

LIU Zhixue¹, LIU Yuanyuan¹, WANG Hong¹, WANG Jun¹, FENG Yi², JIAN Zengyun¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Photoelectric Functional Materials and Devices, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China; 2. New Product R & D Department, Sichuan Qinling Mountains Science and Technology Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: Microstructure and properties of four kinds of common domestic tooth-roll crusher materials in coal washing production were compared and studied by means of microstructure observation, mechanical properties test and wear experiments. The results show that the microstructure of the plate is composed of lath martensite and 6.13% residual austenite. The microstructure of high manganese steel tooth plate is single phase austenitic structure. The structure of ZG32CrMnSiNi2Mo tooth plate is composed of lath bainite and ferrite, and 13.18% residual austenite. The ZG22CrMnSiNiMo tooth plate is granular bainitic with a large proportion of strip-type M-A island and a residual austenitic volume of 14.9%. After quenching at 940 °C and tempering at 200 °C, the imported plate materials have the best comprehensive performance, and its hardness and impact toughness are 44.1 HRC and 34.5 J, respectively. After water toughening treatment, the average hardness of the tooth plate of high manganese steel is 216.5 HB, and the impact toughness was 113.8 J. ZG32CrMnSiNi2Mo plate after 900~940 °C normalizing, the impact toughness value is slightly lower than the supply state of the imported plate, but the hardness is higher than that of the imported plate. After normalizing at 960-1000 °C, the hardness of ZG22CrMnSiNiMo plate is slightly lower than that of the imported plate, and the impact toughness is slightly higher than that of the imported plate. The supply state of the feed plate materials is selected as the standard, and the relative wear resistance of the high manganese steel plate material is low, only 0.76. ZG32CrMnSiNi2Mo tooth plate materials after 900~980 °C normalizing, wear resistance is better, the relative wear resistance varies from 1.19 to 1.23; ZG22CrMnSiNiMo plate is normalized at 920~1000 °C, and its wear resistance is between that of the imported plate and that of ZG32CrMnSiNi2Mo and the relative wear resistance varies from 1.10 to 1.13.

Key words: tooth-roll crusher; tooth plate; microstructure; properties

收稿日期: 2019-11-04

基金项目: 陕西省重点实验室基金(15JS038); 国家自然科学基金(51671151)

作者简介: 刘志学(1968-), 陕西大荔人, 副教授, 硕士。研究方向: 高性能耐磨材料和特种金属结构材料。

电话: 029-86173324, E-mail: XAGDCHXY@163.com

煤炭是我国主要的基础能源和重要的工业原料,其对我国的经济发展和建设具有强大的支撑作用^[1,2]。洗煤是煤炭深加工的一个不可缺少的工序,由于从矿井中直接开采出来的原煤混入了许多杂质,为了能够达到环保的目的和提高煤炭的利用率,需要对原煤进行洗煤加工。所谓洗煤就是将原煤中的杂质剔除,或将不同品质煤炭进行分类的一种煤炭加工工程。煤炭破碎和筛分是洗煤过程的一个重要环节。齿辊破碎机因具有破碎粒度均匀性好、生产效率高、破碎比大、过粉碎率低、体积小、噪声低、结构简单、安全可靠和维修方便等特点^[3,4],目前已广泛应用于国内各洗煤厂。齿辊式破碎机的破碎原理是在辊齿的冲击和挤压作用下,被破碎物料的局部受到载荷而变形后出现裂纹,随着齿辊的转动,辊齿切入物料深度的增加,使裂纹扩展导致物料破碎^[5,6]。

在齿辊式破碎机实际工作过程中,齿板作为破碎设备的主要耗材,一方面在使用过程通过冲击和挤压物料使物料破碎的同时,也受到物料强烈的磨料磨损,消耗量很大;另一方面,原煤中少量的高硬度杂质矿物,会造成齿板发生断齿或断裂等损坏现象。频繁地更换齿板会造成企业生产成本的增加和生产效率的降低,因此提高齿板的耐磨性和综合性能具有重要的现实意义。目前,国内市场上使用的齿板主要有3类。第1类是以ZGMn13Cr2为代表的高(中)锰钢齿板,组织为单相奥氏体,材料韧塑性好,不易出现断板现象,齿板价格较低,但使用寿命相对较短。目前,该类齿板因价格较低市场占有率最高。第2类是以进口齿板为代表的马氏体组织齿板,性能优良、使用寿命较长、使用效果好,但价格很高。国内制造的马氏体组织齿板,由于合金成分设计差异、熔体纯净度较低和冶金品质较差等原因,产品使用效果与进口齿板具有较大的差距,部分厂家产品在使用过程中存在断板现象。第3类是以ZG32CrMnSiNi2Mo(或ZG22CrMnSiNiMo)为代表的无碳化物贝氏体组织齿板,该类齿板是近几年发展起来的一类新型齿板。相比于马氏体组织,无碳化物贝氏体组织具有较好的强韧性配合,性能特点适用于齿板产

品的工况和要求,实际使用工程中取得了较好的使用效果。

本文选取以上3类齿板为研究对象,通过实体取样,对比研究了3类齿板材料的组织和性能,为不同工况条件下齿板材料的合理选择提供实验数据和指导。

1 实验方法

几种实验材料均取自同型号齿板实体,进口齿板为外购,判断其材料可能为中低碳低合金钢,具体成分不详。高锰钢齿板、ZG32CrMnSiNi2Mo齿板和ZG22CrMnSiNiMo齿板材料的设计成分见表1。齿板生产采用0.5 T中频感应电炉熔炼,熔化工艺为熔清废钢、炉前成分分析、加入中间合金调整钢液成分、预脱氧、终脱氧。钢包预热后,采用消失模和串浇铸造工艺,浇注成某型号的齿辊式破碎机齿板。

实验用各类试样均取自齿板实体的相同位置,采用线切割加工成10 mm×10 mm×55 mm的标准冲击试样和 $\phi 4$ mm×24 mm的销盘磨料磨损试样,热处理后冲击试样开U型缺口。具体热处理工艺为:进口齿板材料940℃水淬后,分别在200、300和500℃回火;高锰钢1050℃水韧处理;G32CrMnSiNi2Mo齿板材料为900、940和980℃正火处理及940℃淬火处理;ZG22CrMnSiNiMo齿板材料为920、960和1000℃正火处理及960℃淬火处理。热处理过程中为避免材料发生氧化脱碳,处理时采用保护液覆盖保护。

采用HRC150型洛氏硬度计进行硬度测试,采用JB-30型摆锤式冲击试验机进行冲击韧度测试。金相试样采用4%的硝酸酒精溶液腐蚀,采用EPIHOT300型金相显微镜、JEM-200CX型透射电子显微镜和FEIQUANTA400型扫描电子显微镜以及LabX XRD-6000型X射线衍射仪对材料组织进行分析。组织中残余奥氏体含量的测试根据ASTM E975-03进行,奥氏体晶面取(200)、(220)和(311),铁素体晶面取(200)和(211)。耐磨性能实验采用ML-10销盘磨料磨损试验机,磨料为180碳化硅水砂纸,磨程10.409 m,载荷0.5 kg。

表1 3种实验材料的设计成分 w(%)

Tab.1 Designed chemical composition of three experimental materials

材料	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	P、S	Fe
ZGMn13Cr2	0.90~1.30	0.3~0.8	11~14	1.5~2.5	/	/	/	0.035	余量
ZG32CrMnSiNi2Mo	0.30~0.35	0.6~1.4	0.7~1.5	0.8~1.5	1.2~1.8	0.5~1.0	0.05~0.15	<0.035	余量
ZG22CrMnSiNiMo	0.18~0.24	1.0~1.6	1.0~1.8	0.6~1.4	0.5~0.8	0.2~0.6	0.05~0.15	≤0.035	余量

2 实验结果与分析

2.1 组织

图 1 是几种常用齿板材料工作状态的组织。图 1(a)、(b)是进口齿板材料 940 °C 水淬、200 °C 回火后的组织,可以看出组织主要由板条马氏体和残余奥氏体组成,残余奥氏体主要以薄膜状分布于马氏体板条间;根据 XRD 图谱测算了组织中的残余奥氏体量为 6.13%。通过图 1(b)可以看到,板条马氏体的亚结构中存在着大量的缠结位错,大量的缠结位错存在有利于提高材料的强度和硬度。图 1(c)是高锰钢齿板材料 1 050 °C 水韧处理后的金相组织,可以看出其组织为单相奥氏体,奥氏体晶粒呈大小不一的多边形块状,组织中弥散分布的黑点经分析确定为夹杂。由此表明,该高锰钢齿板材料的冶金品质较低,在熔炼过程中金属液的纯净度控制的较差。图 1d、e 是 ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板材料 940 °C 正火、200 °C 回火后的组织。结合 XRD 物相分析可知,ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板材料的组织由贝氏体铁素

体板条和残余奥氏体组成,组织为无碳化物贝氏体组织,经测算组织中的残余奥氏体含量约为 13.18%;可以看出,与马氏体组织相比,贝氏体铁素体板条间距相对较宽,残余奥氏体主要也是以薄膜状分布于贝氏体铁素体板条间,贝氏体铁素体板条的亚结构中存在着有一定数量的位错。图 1 (f)、(g)是 ZG22CrMnSiNiMo 齿板材料 960 °C 正火、200 °C 回火后的组织,可以看出,组织为粒状贝氏体,组织中由贝氏体铁素体和不同形貌的 M-A 岛组成;组织中的 M-A 岛有块型和条型两种,条型比例较大,数量较多;根据 XRD 图谱测算了组织中的残余奥氏体量为 14.9%。研究表明^[7,8],条型粒状贝氏体组织的转变温度区间低于块型粒状贝氏体组织,条型粒状贝氏体组织的综合性能优于块型粒状贝氏体组织。

2.2 力学性能

表 2 是几种常用齿板材料经不同工艺热处理后的力学性能。在进口齿板上实体取样,检测了进口齿板供货状态的硬度为 43.4 HRC、冲击韧度为 30.0 J。由表 2 可以看出,进口齿板材料经 940 °C 奥氏体化

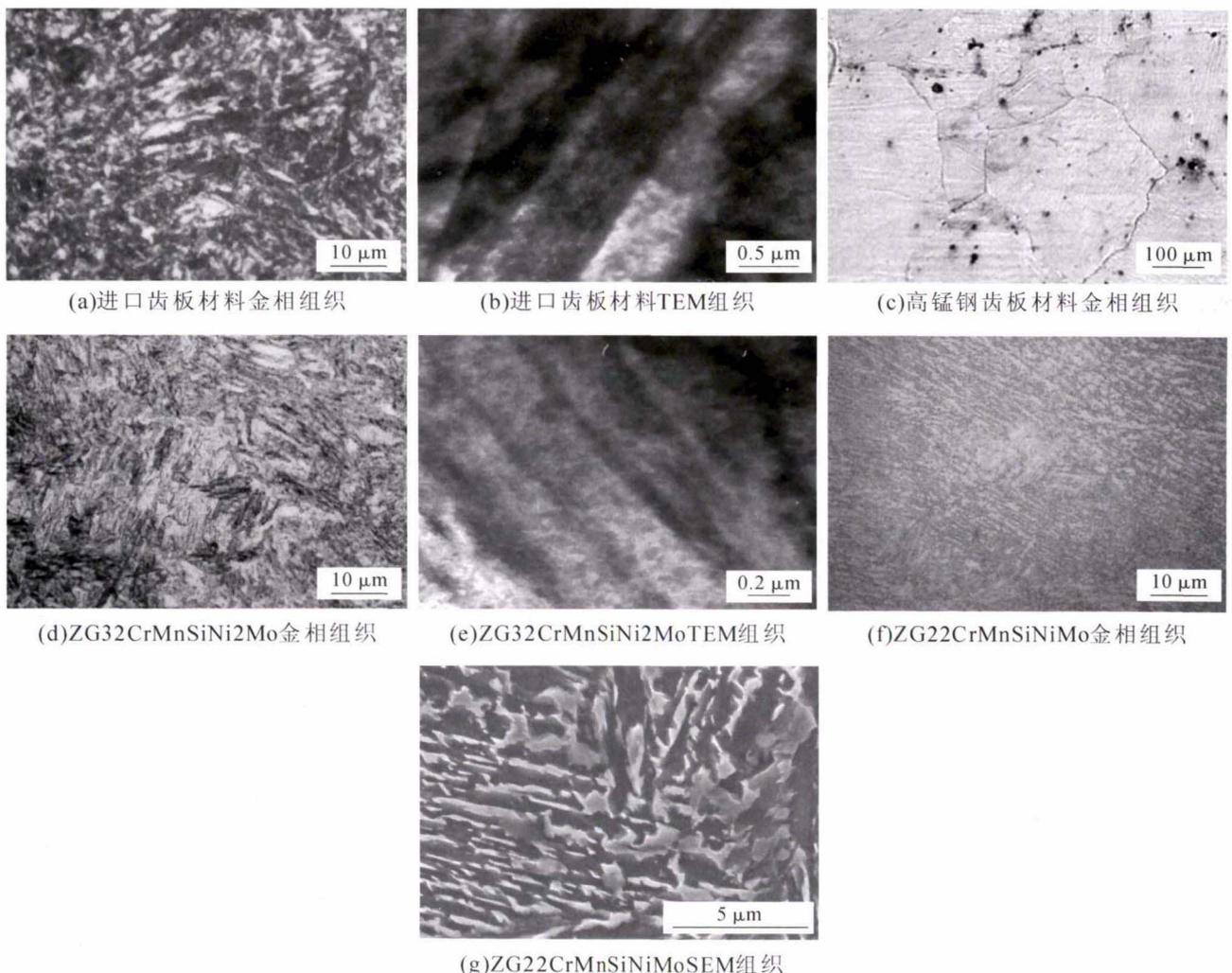


图 1 常用齿板材料工作状态的组织
Fig.1 The microstructure of common toothed plate materials under working condition

表 2 常用齿板材料不同工艺热处理后的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of common tooth plate materials after heat treatment by different processes

材料	热处理状态	性能	
		硬度 (HRC)	冲击韧度 A_{KU}/J
进口齿板	供货状态	43.4	30.0
	940 °C 水淬+200 °C 回火	44.1	34.5
	940 °C 水淬+300 °C 回火	44.4	33.1
	940 °C 水淬+500 °C 回火	36.5	42.5
ZGMn13Cr2 齿板	1 050 °C 水韧处理	216.5 HB	113.8
ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板	900 °C 正火+200 °C 回火	47.6	27.0
	940 °C 正火+200 °C 回火	46.7	29.1
	980 °C 正火+200 °C 回火	42.2	28.0
	940 °C 水淬+200 °C 回火	50.3	22.9
ZG22CrMnSiNiMo 齿板	920 °C 正火+200 °C 回火	42.3	26.5
	960 °C 正火+200 °C 回火	41.2	36.5
	1 000 °C 正火+200 °C 回火	40.7	38.1
	960 °C 水淬+200 °C 回火	47.1	24.8

后水淬、不同温度回火后的性能不同;200 °C 回火后,综合性能最优,硬度和冲击韧度分别为 44.1 HRC 和 34.5 J;与 200 °C 回火相比较,300 °C 回火后,材料的硬度变化不大,冲击韧度值略有降低(33.1 J);500 °C 高温回火后,材料的硬度变化大幅降低,冲击韧度值有升高的趋势。综合来看,进口齿板在 940 °C 淬火和低温回火后,材料的强韧性匹配较理想。

高锰钢齿板材料实体取样和 1 050 °C 水韧处理后,经检测平均硬度为 216.5 HB,冲击韧度为 113.8 J。高锰钢齿板材料高的冲击韧度能够避免齿板在工作时发生断齿,但其较低的起始硬度不利于耐磨性能和使用寿命的提高。

ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板实体取样后,研究了不同奥氏体化温度正火处理后材料的性能。由表 2 可以看出,900~980 °C 正火处理后,ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板材料的冲击韧度变化不大;900~940 °C 正火处理后材料的硬度相对较高(46.7~47.6 HRC);980 °C 正火处理后,材料的硬度相对较低;940 °C 水淬处理后,材料的硬度较高(50.3 HRC),但冲击韧度相对较低(22.9 J)。与进口齿板材料性能相比,ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板材料 900~940 °C 正火处理后,冲击韧度略低于进口齿板材料的供货状态,但硬度高于进口齿板材料。

ZG22CrMnSiNiMo 齿板实体取样后,研究了不同奥氏体化温度正火处理后材料的性能。由表 2 可以看出,920~1 000 °C 正火处理后,ZG22CrMnSiNiMo 齿板材料的硬度呈缓慢降低的变化趋势,硬度

为 40.7~42.3 HRC;冲击韧度呈逐渐升高的趋势,具体数值为 26.5~38.1 J。960 °C 水淬处理后,ZG22CrMnSiNiMo 齿板材料具有相对较高的硬度(47.1 HRC),但冲击韧度较低,仅为 24.8 J。综合来看,960~1 000 °C 正火处理后,ZG22CrMnSiNiMo 齿板材料具有较佳的综合性能;与进口齿板材料性能相比,ZG22CrMnSiNiMo 齿板材料的硬度略低于进口齿板材料,而冲击韧度略高于进口齿板材料。

2.3 耐磨性能

采用销盘磨损实验研究了几种常用齿板材料不同热处理状态的耐磨性能。表 3 是几种常用齿板材料的耐磨性能结果。可以看出,进口齿板材料供货状态下的磨损失重为 0.0277 g;选取该试样作为对比试样,可以计算出各齿板材料不同热处理状态的相对耐磨性(注:相对耐磨性 = 标样磨损失重 / 试样磨损失重)。

表 3 常用齿板材料的耐磨性能
Tab.3 Wear resistance of common tooth plate materials

材料	热处理状态	耐磨性能	
		磨损失重 /g	相对耐磨性
进口齿板	供货状态	0.027 7	1
	940 °C 水淬+200 °C 回火	0.026 9	1.03
	940 °C 水淬+300 °C 回火	0.026 6	1.04
	940 °C 水淬+500 °C 回火	0.030 4	0.91
ZGMn13Cr2 齿板	1 050 °C 水韧处理	0.036 5	0.76
ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板	900 °C 正火+200 °C 回火	0.022 5	1.23
	940 °C 正火+200 °C 回火	0.022 5	1.23
	980 °C 正火+200 °C 回火	0.023 3	1.19
	940 °C 水淬+200 °C 回火	0.021 8	1.27
ZG22CrMnSiNiMo 齿板	920 °C 正火+200 °C 回火	0.025 2	1.10
	960 °C 正火+200 °C 回火	0.024 5	1.13
	1 000 °C 正火+200 °C 回火	0.024 7	1.12
	960 °C 水淬+200 °C 回火	0.022 7	1.22

由表 3 可知,进口齿板材料 940 °C 水淬、200~300 °C 低温回火后,材料的相对耐磨性分别为 1.03 和 1.04,略高于其供货状态。高锰钢齿板材料 1 050 °C 水韧处理后的相对耐磨性较低,仅为 0.76。900~980 °C 正火处理后,ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板材料均具有较好的耐磨性能,相对耐磨性为 1.19~1.23;940 °C 水淬处理后,ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板材料的相对耐磨性最高,为 1.27。920~1 000 °C 正火处理后,ZG22CrMnSiNiMo 齿板材料的耐磨性能介于进口齿板材料和 ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板材料之间,相对耐磨性为 1.10~1.13;960 °C 水淬处理后,ZG22CrMnSiNiMo 齿板材料的耐磨性能高于其正火处理态,相对耐磨性为 1.22。

与进口齿板材料相比,ZG32CrMnSiNi2Mo 和 ZG22CrMnSiNiMo 齿板材料具有较好的耐磨性能,其原因与 ZG32CrMnSiNi2Mo 和 ZG22CrMnSiNiMo 齿板材料组织中含有较多的残余奥氏体有关。磨损过程中,磨损面上的残余奥氏体在受到载荷作用发生塑性变形时可能会诱发马氏体转变,即在磨损面上形成贝氏体和马氏体的复相组织,高硬度的马氏体的存在有利于材料耐磨性能的提高。

3 结论

(1)进口齿板材料的组织主要由板条马氏体和残余奥氏体组成,组织中的残余奥氏体量为 6.13%。高锰钢齿板材料工作状态的组织为单相奥氏体,奥氏体晶粒呈大小不一的多边形块状。940 °C 正火处理后,ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板材料的组织由贝氏体铁素体板条和残余奥氏体组成,组织中的残余奥氏体含量约为 13.18%。960 °C 正火处理后,ZG22CrMnSiNiMo 齿板材料的组织为粒状贝氏体组织,组织中条型 M-A 岛比例较多,组织中的残余奥氏体量为 14.9%。

(2)进口齿板材料具有最优的综合性能,940 °C 淬火和 200 °C 回火后硬度和冲击韧度分别为 44.1 HRC 和 34.5 J。高锰钢齿板材料的硬度为 216.5 HB,冲击韧度为 113.8 J。ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板材料 900~940 °C 正火处理后,冲击韧度略低于进口齿板材料的供货状态,但硬度高于进口齿板材

料;960~1 000 °C 正火处理后,硬度略低于进口齿板材料,冲击韧度略高于进口齿板材料。

(3)选取进口齿板材料供货状态的试样为标准试样,高锰钢齿板材料的相对耐磨性仅为 0.76;900~980 °C 正火处理后,ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板材料均具有较好的耐磨性能,相对耐磨性为 1.19~1.23;920~1 000 °C 正火处理后,ZG22CrMnSiNiMo 齿板材料的耐磨性能介于进口齿板材料和 ZG32CrMnSiNi2Mo 齿板材料之间,相对耐磨性为 1.10~1.13。

参考文献:

- [1] 王海宁. 中国煤炭资源分布特征及其基础性作用新思考 [J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(7): 5-9.
- [2] 许红星. 我国能源利用现状与对策 [J]. 中外能源, 2010, 15(1): 3-14.
- [3] 赵宇轩, 王银东. 选矿破碎理论及破碎设备概述 [J]. 中国矿业, 2012, 21(11): 103-105.
- [4] 高强, 张建华. 破碎理论及破碎机的研究现状与展望 [J]. 机械设计, 2009, 26(10): 72-75.
- [5] 常锡振, 姚红良, 高英华. 双齿辊破碎机破碎过程研究 [J]. 有色金属(选矿部分), 2017(1): 55-59.
- [6] 刘威, 关贺. 筛分式双齿辊破碎机辊齿受力及强度分析 [J]. 煤矿机械, 2015, 36(3): 126-127.
- [7] 白秉哲, 方鸿生. 低碳合金钢中粒状贝氏体相变 [J]. 材料热处理学报, 1984(2): 15-34.
- [8] 方鸿生, 刘东雨, 徐平光, 等. 贝氏体钢的强韧化途径 [J]. 机械工程材料, 2001(6): 1-5

(上接第 105 页)

割和缩减作用。

(2)随着废旧轮胎内钢丝的加入量从 30% 增加至 80%, 珠光体含量由 97.3% 增长至 99.1%, 但增长效果不太明显; 铁素体含量不断减小, 珠光体片间距不断减小, 由 4 级粗片状珠光体变为 2 级细片状珠光体, 细化程度明显。制动盘铸件的硬度由 195 HB 增长至 212 HB, 抗拉强度由 250.9 MPa 增长至 291.2 MPa, 当废旧轮胎内钢丝与回炉料比值由 70% : 30% 变为 80% : 20% 时, 制动盘硬度与抗拉强度的增长最为明显。

(3)本实验采用废旧轮胎内钢丝所生产的铸件比采用废钢所生产的铸件的硬度高约 10 HB, 比采用废钢及生铁所生产的铸件的硬度高约 10 HB、抗拉强度高约 12 MPa。处于意大利标准 GLL190 规定的范围内, 相比于生铁、废钢有着明显的优势, 满足了高性能制动盘的使用要求。

参考文献:

- [1] 阳彦雄. 刹车盘用灰铸铁的组织 and 性能研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(13): 107-110.
- [2] 张士鹏, 刘晓萍. 原材料对灰铸铁制动盘组织和性能的影响 [J]. 现代铸铁, 2016, 36(1): 40-43.
- [3] 于清溪. 轮胎工业用钢丝帘线现状与发展 (一) [J]. 橡胶科技市场, 2007(11): 5-9.
- [4] 王顺安, 邹荣剑. 合成铸铁的研究及应用 [J]. 铸造, 2010, 59(7): 721-724.
- [5] 李长龙, 赵忠魁, 王吉岱. 铸铁 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [6] 林浩. 高强度合成灰铸铁的组织性能及断裂特征 [D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [7] 曹玉亭, 王文胜, 尹昊. 增碳剂对制动盘灰铸铁 D、E 型石墨形态的影响 [J]. 金属加工(热加工), 2016(3): 10-13.
- [8] 李建, 张俊涛, 张象中, 等. 浅谈对合成灰铸铁增碳剂的认识 [J]. 铸造技术, 2017, 38(7): 1758-1760.
- [9] 赵东升, 宇文江涛, 李海峰, 等. 不同壁厚灰铸铁性能随废钢加入量的关系研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 114-116, 119.
- [10] 赵岩. 原料对比对球墨铸铁珠光体片层间距及硬度的影响 [J]. 铸造, 2011, 60(4): 397-400.