DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.02.002

废旧轮胎内钢丝对合成灰铸铁制动盘性能的影响

李　钊[1,2],赵忠魁[1,2],衣冠玉[1,2],王春轩[3],孙红滨[3]

(1. 山东建筑大学 材料科学与工程学院，山东 济南 250000;2. 山东省铸造清洁生产工程技术研究中心，山东 济南 250000;3.山东卢斯得机械有限公司,山东 滨州 256600)

摘　要:介绍了采用不同配比的废旧轮胎内钢丝和回炉料作为主要原材料,使用增碳剂进行增碳,使用75硅铁孕育剂和硅钡钙铝长效孕育剂进行随流孕育,并加入Cr、Cu等合金元素进行组织强化。在相同铸造工艺下,制备化学成分基本相同的灰铸铁制动盘和ϕ30 mm的单铸试棒,然后对试件的金相组织、硬度、抗拉强度进行检测分析。结果表明,不同的原材料配比对金相组织中的石墨的类型、长度以及珠光体的片间距有着较大的影响,珠光体含量未发生明显变化;对硬度和抗拉强度影响较大,当废旧轮胎内钢丝的加入比例由70%变为80%时,抗拉强度与硬度变化明显。随着废旧轮胎内钢丝的比例不断增加,A型石墨的比例不断升高,由93.7%增长至99.2%;珠光体含量由95.3%增长至99.1%,珠光体石墨与珠光体逐渐细化,抗拉强度及硬度逐渐升高,满足了高性能制动盘的性能要求。

关键词:废旧轮胎内钢丝;回炉料;合成灰铸铁;制动盘

中图分类号:TG223　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)02-0101-06

Effect of Scrap Tire Inner Steel Wire on Performance of Synthetic Gray Cast Iron Brake Disc

LI Zhao[1,2], ZHAO Zhongkui[1,2], YI Guanyu[1,2], WANG Chunxuan[3], SUN Hongbin[3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250000, China; 2. Shandong Foundry Clean Production Engineering Technology Research Center, Jinan 250000, China; 3. Shandong Luside Machinery Co., Ltd., Binzhou 256600, China)

Abstract: The steel wire inside waste tires and the return charge of different ratio were used as the main raw materials, the carburizing agent was used for carburizing, 75 ferrosilicon inpregnant agent and Si-Ba-Ca-Al long-acting inpregnant agent were used for in-stream inpregnant, and Cr, Cu and other alloy elements were added for microstructure strengthening. Under the same casting process, the preparation of basically the same chemical composition of gray cast iron brake disc and Φ 30 mm single cast test bar, then the microstructure, hardness, tensile strength of the specimens for detection analysis. The results show that different ratio of raw materials has a great influence on the type, length and sheet spacing of pearlite, and the pearlite content does not change significantly. The influence on the hardness and tensile strength is great, when the proportion of steel wire in the waste tire is changed from 70% to 80%, the change of tensile strength and hardness is obvious. With the increase of the proportion of steel wire in waste tires, the proportion of A-type graphite increases from 93.7% to 99.2%. Pearlite content increased from 95.3% to 99.1%, pearlite graphite and pearlite gradually refined, tensile strength and hardness gradually increased, meeting the performance requirements of high-performance brake disc.

Key words: waste tire inner steel wire; back to the furnace charge; synthetic gray iron; brake disc

汽车制动盘是汽车制动的重要部件,灰铸铁以其良好的导热性、减振性、摩擦性能,简便的加工工艺和低廉的制造成本使其在制动盘材料中应用最为广泛[1]。根据意大利标准GLL190,材质要求制动盘金相组织中A型石墨≥70%,D、E型石墨≤4%,珠光体含量≥90%,铁素体含量≤5%,抗拉强度≥220 MPa,盘体硬度为190～230 HB。为了获得高性能的制动盘，我们需选择合适的熔炼原材料和对灰铸铁采取微合金化和孕育处理。现今国内铸造企业通常使用原生铁、废钢、回炉料等原材料生产灰铸铁铸件。原生铁用来生产铸件的质量好,但价格高。废钢来源广泛,但钢号繁多,内部合金成分不易确定,若废钢出现锈蚀、表面涂漆、镀Zn等[2],在熔炼时会

收稿日期:2019-11-08

作者简介:李　钊(1993-),山东曹县人,硕士生.研究方向:液态金属成型的设计与研究.电话:13793177651,E-mail:1130010322@qq.com

通讯作者:赵忠魁(1968-),山东曹县人,博士,教授.研究方向:新材料及成形工艺.硕士生导师,电话:13064061739,E-mail:jorezhk@163.com

造成铁液的氧化，导致大量出现细小的D、E型石墨，降低制动盘的导热性及耐热疲劳性能。废旧轮胎内钢丝是将废旧轮胎及其内部钢丝帘线经过机械破碎作用产生的长度为1~3 cm，直径为0.38 mm的短小钢丝[3]，这种材料在废旧轮胎回收厂大量堆积，积存到一定程度，送到炼钢厂回收。废旧轮胎内钢丝是由低硫、低磷成分纯净的高碳钢加工而成，在钢丝的表面镀有黄铜镀层。废旧轮胎内钢丝搭配增碳剂在熔炼过程中有着提供合金元素Cu、成分易调节、引入杂质少、增加A型石墨及珠光体含量等优势，不但可以减少增碳剂加入量，得到高质量铸铁刹车盘，也为废旧轮胎中钢丝寻找了新的再利用途径。

本文在现今研究的基础上，采用不同配比的废旧轮胎中的钢丝和回炉料，添加增碳剂来调整碳的含量，添加铬、铜等合金元素进行微合金化，并在相同的铸造工艺下，制成化学成分相同的合金灰铸铁制动盘；并与其他采用废钢及生铁所生产出的铸件性能相比较，以此来研究废旧轮胎内钢丝对合金灰铸铁制动盘性能的影响。

1 实验材料与方法

本研究做出6组实验，即采用6组不同配比的废旧轮胎内钢丝和回炉料的方案，废旧轮胎中的钢丝和回炉料配比方案见表1。在相同的实验工艺下进行浇注，做出成分基本相同的制动盘铸件及ϕ30 mm的单铸试棒。所用的废旧轮胎内钢丝其化学成分见表2。抛丸清理后的浇注系统中的浇冒口、缺陷废盘和制动盘的机械加工铁屑作为回炉料加入。为了提高铸铁硬度，加入含65.13%的锰铁，含量为55.05%的铬铁，含量为99.95%的紫铜。增碳剂采用锻煤90增碳剂，其含碳量91.8%，含氮量极低，硫磷含量低。

表1 配比方案
Tab.1 Matching scheme

编号	1	2	3	4	5	6
废旧轮胎内钢丝与回炉料比例(%)	30:70	40:60	50:50	60:40	70:30	80:20

表2 废旧轮胎内钢丝成分 w(%)
Tab.2 Steel wire composition in used tire

C	Si	Mn	S	P	Cu	其他
0.75~0.85	0.20~0.30	0.50~0.56	≤0.02	≤0.015	0.08~0.10	≤0.01

采用2 t中频感应电炉进行铁液的熔炼，每炉分3包浇注，每包包尾的铁液浇注1个ϕ30 mm×200 mm的单铸试棒，每炉共3个。熔化前，先将配比完成的废旧轮胎内钢丝、回炉料的1/5加入中频感应熔炼炉中，然后加入增碳剂，再加入剩余4/5的废旧轮胎内钢丝和回炉料，升温至1 200 ℃，再加入工业纯铜、铬铁、锰铁等合金材料并升温至1 500 ℃左右，保温10 min以上，微调化学成分至目标化学成分，最后升温至1 550 ℃出炉。采取粒度为3~8 mm的75硅铁随流孕育，其加入量为浇包内铁液质量0.20%~0.25%。浇注温度控制在1 360~1 460 ℃，采用粒度为1~3 mm的硅钡钙铝合金在浇注时进行二次随流孕育，孕育剂添加量为铸型内铁液总质量的0.1%~0.2%。

使用BRUKER光谱仪及碳硫分析仪测量铸件成分，使用SHT-600型万能试验机测量抗拉强度，使用HB-3000型布氏硬度计测量制动盘硬度，每个盘体测量11个点，取平均值，使用FCM2000W型倒置金相显微镜及AON-STUDIO2018（金相分析软件，软件执行标准GB7216,2009)观察试样金相组织。

按照表1的配比方案，采取相同的熔炼工艺制成成分基本相同的制动盘，其中制动盘工作面壁厚11 mm，直径275 mm，铸件各配比制动盘试样成分如表3。

表3 不同配比制动盘成分 w(%)
Tab.3 Different proportion of brake disc composition

编号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu
1	3.249	1.75	0.800	0.048	0.026	0.257	0.172
2	3.270	1.79	0.829	0.047	0.025	0.263	0.153
3	3.268	1.80	0.758	0.041	0.028	0.259	0.164
4	3.275	1.81	0.752	0.046	0.030	0.271	0.159
5	3.253	1.76	0.762	0.037	0.012	0.281	0.148
6	3.261	1.78	0.769	0.035	0.016	0.252	0.160

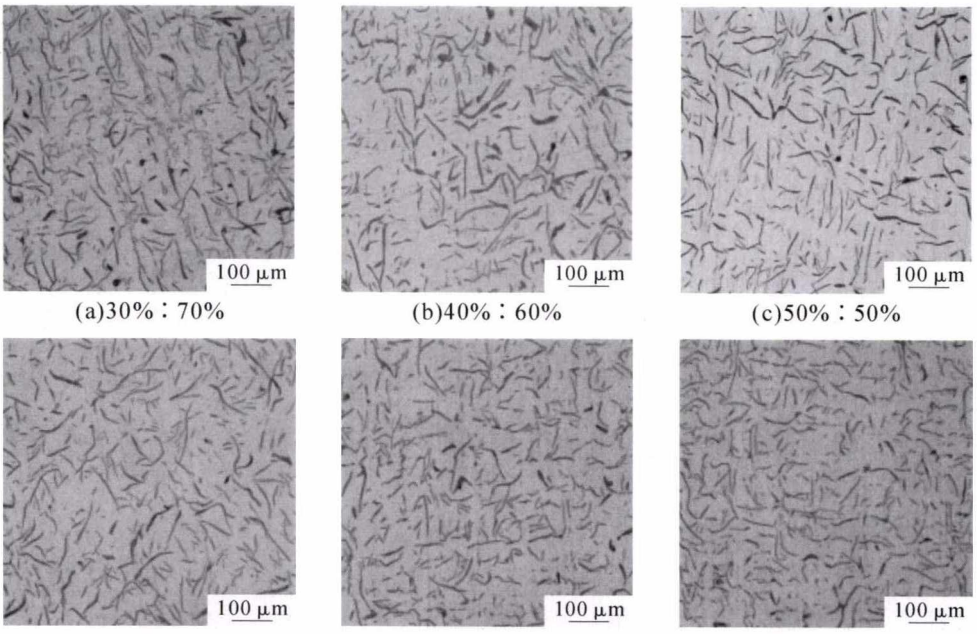
2 实验结果

2.1 废旧轮胎内钢丝量对制动盘石墨类型的影响

不同废旧轮胎内钢丝和回炉料量生产出的制动盘石墨组织和石墨类型如图1，不同类型石墨的含量、石墨长度及分级如表4。从图和表中看出，图1(a)中，B、E型石墨含量较高，随着废旧轮胎内钢丝加入的比例增加，1至6试块中的A型石墨比例逐渐增高由93.7%增长至99.2%，B型石墨含量逐渐降低，石墨逐步细化，粗大型石墨及E、F型石墨逐渐降低，石墨弯曲度增高，石墨长度逐渐缩短由4级缩短至5级。

2.2 材料配比对制动盘金属基体组织的影响

不同废旧轮胎内钢丝和回炉料配比生产出的制动盘试块金相照片如图2、图3所示，珠光体、铁素体、碳化物含量及珠光体片间距离如表5所示，从中可以看出，随着废旧轮胎内钢丝加入比例的增加，珠

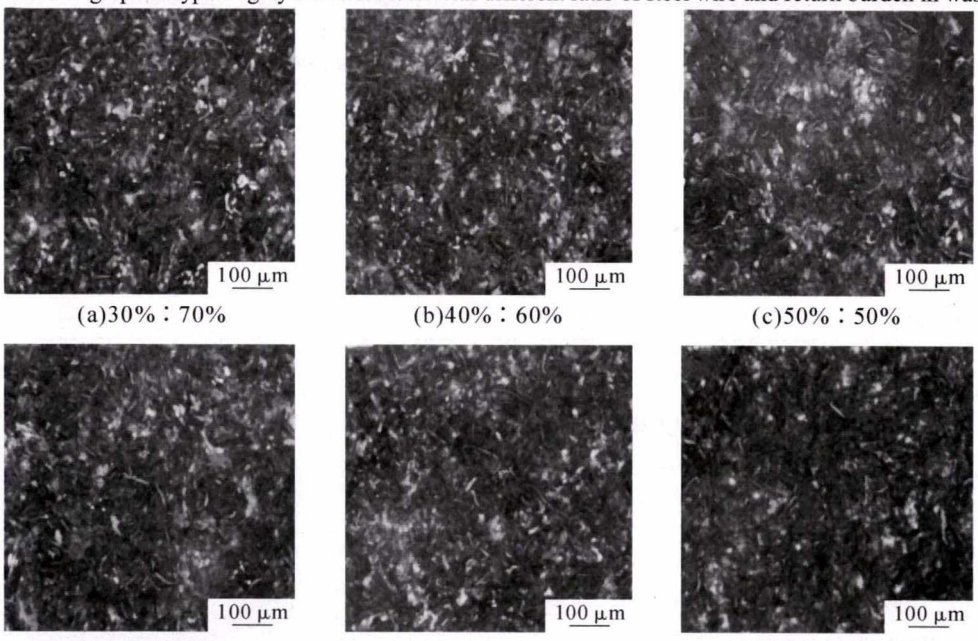


(a)30%：70%　(b)40%：60%　(c)50%：50%

(d)60%：40%　(e)70%：30%　(f)80%：20%

图 1 废旧轮胎内钢丝与回炉料不同配比灰铸铁试块的石墨类型照片

Fig.1 Photo of graphite type of gray iron test block with different ratio of steel wire and return burden in waste tire



(a)30%：70%　(b)40%：60%　(c)50%：50%

(d)60%：40%　(e)70%：30%　(f)80%：20%

图 2 废旧轮胎内钢丝与回炉料不同配比灰铸铁试块基体组织照片

Fig.2 Matrix microstructure of gray iron test block with different ratio of steel wire and scrap returns

表 4 试块中不同类型石墨含量及分级

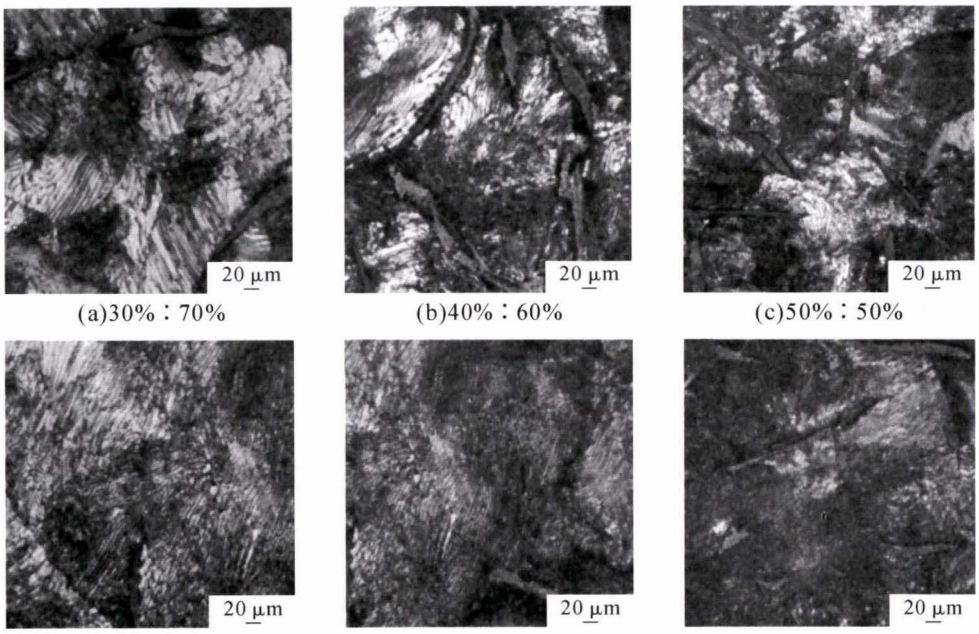
Tab.4 Graphite type of gray cast iron test block with different ratio of steel wire and systematics

石墨类型	石墨含量(%)					
	1	2	3	4	5	6
A	95.3	97.9	98.0	98.1	98.7	99.2
B	2.8	1.8	1.1	1.0	0.7	0.3
C	0	0	0	0	0	0
D	0.8	0.1	0.7	0.7	0.4	0.3
E	1.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
石墨长度 /mm	0.190 6	0.165 1	0.141 9	0.127 1	0.110 1	0.105 0
石墨长度分级	4	4	4	4	5	5

光体数量不断增多，珠光体含量由 97.3%增长至 99.1%，铁素体含量不断减小；珠光体片间距不断减小、细化效果明显。

2.3 原材料配比对制动盘力学性能的影响

表 6 为不同配比方案所测得的制动盘盘体硬度和所制成的单铸试棒的抗拉强度，由表中可以看出，随着废旧轮胎内钢丝加入量不断增加，铸件的硬度与抗拉强度不断提高；其中抗拉强度远高于意大利标准 GLL190 所规定大于等于 220 MPa，硬度处于标准中的 190～230 HB 范围内，当废旧轮胎内钢丝



(a)30%∶70% (b)40%∶60% (c)50%∶50%

(d)60%∶40% (e)70%∶30% (f)80%∶20%

图 3 废旧轮胎内钢丝与回炉料不同配比灰铸铁试块的珠光体照片

Fig.3 Pearlite photographs of gray cast iron test blocks with different proportions of steel wire and return burden in waste tires

表 5 不同配比试块金属基体组织类型

Tab.5 Different metal matrix structure types of test blocks

项目	1	2	3	4	5	6
珠光体含量(%)	97.3	97.5	97.6	97.6	98.2	99.1
铁素体含量(%)	2.5	2.3	2.4	2.2	1.4	0.7
渗碳体和自由碳化物含量(%)	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1
珠光体片层间距(放大 500 倍)/mm	2.47	1.98	1.79	0.97	0.86	0.78
珠光体片层间距等级	4	3	3	2	2	2
珠光体片形态	粗	中	中	细	细	细

表 6 不同配比试样的硬度与抗拉强度

Tab.6 Hardness and tensile strength of samples with different ratio

项目	1	2	3	4	5	6
硬度(HB)	195	198	200	204	205	212
抗拉强度 /MPa	250.9	256.9	261.8	271.6	274	291.2

与回炉料比值由 70%:30%变为 80%:20%时,硬度与抗拉强度的增长最为明显。

3 与其他材料对比分析

3.1 使用废钢生产灰铸铁件的金相及力学性能

现今废钢来源广泛,但钢号繁多,内部合金成分不易确定,若废钢出现锈蚀、表面涂漆、镀 Zn 等,在熔炼时会造成铁液的氧化,导致大量出现细小的 D、E 型石墨,如图 4[2],会降低制动盘的导热性及耐热疲劳性能。

有关资料显示,在不改变原配料比例的情况下,使用冲压件的废钢生产的铸件硬度较低。对同一型号制动盘使用碳钢件废钢和冲压件废钢配料进行制动盘生产,其硬度差别较大,如表 7[2]。

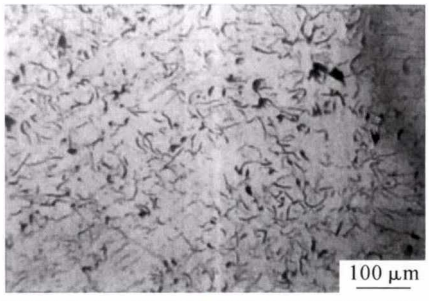


图 4 使用锈蚀和表面涂漆的废钢生产铸件得到的石墨形态

Fig.4 Graphite morphology obtained due to use eroded iron scrap and with surface paint to produce casting

3.2 使用废钢及生铁生产灰铸铁件的金相及力学性能

据有关资料显示,普通灰铸铁配比如表 8[4],即用废钢、生铁、回炉料等原料进行熔炼结果显示,由于加入大量的生铁,在铸铁的金相组织中出现了大块状石墨,且石墨长度较长,如图 5;表 9 为普通灰铸铁硬度及抗拉强度值[4]。

4 分析与讨论

本文实验表明,随着废旧轮胎内钢丝的加入量

表 7 用碳素废钢和冲压件废钢配料生产的硬度对比

Tab.7 Hardness comparison between using carbon steel scrap and using punching steel scrap

项目	硬度值(HB)									
碳钢件废钢配料	194	193	195	195	194	198	201	202	199	199
冲压件废钢配料	186	190	187	188	185	182	184	184	181	184

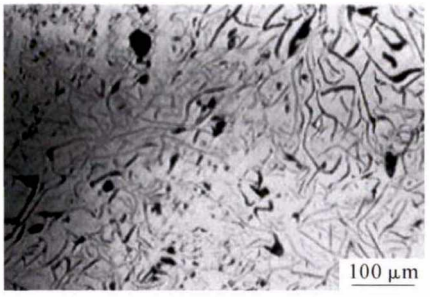


图 5 普通灰铸铁石墨形态

Fig.5 Common gray cast iron graphite form

表 8 普通灰铸铁炉料配比 w(%)

Tab.8 Common grey cast iron charge ratio

项目	废钢	回炉料	生铁	增碳剂	其余合金
普通灰铸铁配比	30~50	30~40	10~40	1.8~2.0	适量

表 9 普通灰铸铁硬度及抗拉强度值

Tab.9 Hardness and tensile strength of common gray iron

项目	硬度值(HB)	抗拉强度 /MPa
1	197	254
2	185	256
3	190	259

注：表 10 的数据是在同样的生产条件下，在化学成分为：3.10%~3.50% C，1.70%~2.40% Si，0.40%~1.00% Mn，0.08%~0.15% S 及 P≤0.10%，采用感应电炉熔炼时所测得的数据。

从 30%增加至 80%，制动盘铸件的金相组织不断改善，硬度、抗拉强度不断增加，制动盘金相组织中 A 型石墨含量、珠光体数量、抗拉强度、硬度处于意大利标准 GLL190 规定的范围内，满足高性能制动盘的使用要求。

又根据有关资料表明，采用不同废钢种类进行灰铸铁件的熔炼生产，出现了大量的细小的 D、E 型石墨，且使用碳素废钢和冲压件废钢配料生产的铸件硬度差最大可达 20HB，对铸件的金相及硬度都有较大影响；采用生铁与废钢进行灰铸铁件的熔炼生产，在铸铁的金相组织中出现了大块状石墨，且石墨长度较长，对铸件的石墨类型及尺寸有着较大影响。

分析其原因为，在使用废旧轮胎内钢丝、回炉料和增碳剂熔炼产生的铁液中形成了高碳微区、中碳微区和低碳微区。高碳微区的形成是因为使用增碳剂后，在高温条件下形成了大量细小的弥散分布的石墨结晶核心，提高了合成铸铁的形核能力，同时减小了铁液的过冷倾向，在冷却过程中促使石墨类型呈 A 型石墨均匀分布[5-8]。中碳微区的形成与回炉料的加入有关，因为回炉料中的碳含量与目标含碳量相近，在高温条件下一些未完全熔化的石墨也会形成较多体积较大的石墨结晶核心，提高了合成铸铁的形核能力。低碳微区的形成与废旧轮胎内钢丝的加入有关，由于废旧轮胎内钢丝的碳含量远低于增碳剂及回炉料的碳含量，受到扩散速度影响，这就使得低碳微区与高碳微区和中碳微区之间存在着浓度起伏，再加上低碳微区缺少石墨结晶的核心，减小了低碳微区的石墨化能力，石墨形态较为细小，增大了低碳微区的过冷倾向，降低了共晶转变的始末温度，从而增大了低碳微区中铁液的形成初生奥氏体的能力，从而增加了在冷却过程中由奥氏体转变成的珠光体组织[9,10]。随着废旧轮胎内钢丝的比例从 30%增加至 80%，为达到目标碳含量，增碳剂的加入量也不断升高，增碳剂所形成的高碳微区和废旧轮胎内钢丝形成的低碳微区不断升高，回炉料所形成的中碳微区逐渐下降，在铁液高温精炼过程中，高碳微区、中碳微区和低碳微区 3 区不断扩散融合，再加上铬、铜等合金元素的使用，这就使得粗大型石墨的遗传性被抑制，A 型石墨比例增加，奥氏体枝晶不断发达，晶粒变得更加细小且均匀，所形成的珠光体片层更加细密，珠光体片间距越来越小，珠光体数量不断增加，从而提高了合成灰铸铁制动盘的铸铁的强度和硬度。

而在使用不同种类的废钢及生铁生产灰铸铁件时，由于不同种类的废钢元素含量差异较大，增碳剂加入比例不好确定，会影响铸件在凝固过程中的形核水平，再加上若废钢出现锈蚀、表面涂漆、镀 Zn 等杂质，在熔炼时会造成铁液的氧化，导致大量出现细小的 D、E 型石墨，影响铸件的力学性能。在使用生铁时，由于粗大型石墨的遗传性，会使铸件中存在 C 型石墨及粗大型 A 型石墨，从而降低灰铸铁件的强度和硬度。

5 结论

(1)废旧轮胎内钢丝的加入量从 30%增加至 80%，制动盘铸件内部 A 型石墨比例由 93.7%增长至 99.2%，片状石墨分布更加均匀，石墨逐步细化，石墨长度逐渐缩短，在增强了合成灰铸铁制动盘的散热性的同时，减少了粗大型石墨对金属基体的切

(下转第 110 页)

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 ZG22CrMnSiNi-Mo 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 ℃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 ℃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 ℃淬火和 200 ℃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 ℃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 ℃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 ℃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 ℃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和性能研究 [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. 原料配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.