用于煤机的低合金耐磨铸钢性能改良研究

马志英，方　静，杨弋涛
（上海大学材料科学与工程学院，上海 200072）

摘要：本研究以煤机行业使用的ZG25MnNi和ZG30Mn2铸钢件为参照对象，借助于真空熔炼钮扣锭的试验方法，并辅以相应的热处理工艺，优化出适合于煤机工况的改良型铸钢材料，其主要成分范围为0.2%~0.4% C、1.0%~1.8% Mn、0.01%~0.04% Nb。改良型铸钢材料具有较高的硬度和更好的耐磨性，实际生产后改良型铸钢件的综合力学性能有明显提高。

关键词：低合金铸钢；真空熔铸；物理模拟；耐磨性
中图分类号：TG142.72　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001–4977（2011）03–0302–05

Properties Improvement of Low Alloy Wear Resistant Steel Casting for Coal-Mining Machinery

MA Zhi-ying, FANG Jing, YANG Yi-tao
(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to improve the properties of some steel casting, the study was carried out based on the steel castings of ZG25MnNi and ZG30Mn2, which were practically used in coal mining industry. The button ingots of cast steel were produced by using of the vacuum arc furnace in lab. At the same time, the heat treatments were studied in theory and practice. As a result, a new kind of steel casting material was obtained, with a composition range of 0.2%-0.4% C, 1%-1.8% Mn and 0.01% -0.04% Nb. The modified material has higher hardness and better wear resistance. Furthermore, the practical production validated that the comprehensive mechanical properties of the steel castings were enhanced greatly.

Key words: low alloy cast steel; vacuum casting; physical simulation; wear resistant

铸钢件设计灵活，冶金制造适应性和可变性强，因此为保障安全，在矿山、煤炭行业设备的关键部件均采用铸钢件。颚板、锤头及衬板等耐受冲击磨损的零件一般为高锰钢铸件，机架则多为碳钢或低合金钢铸件[1]。从2006年新建煤矿投资构成来看，煤炭设备投资额所占比重为35%，设备投资比重大。然而煤机行业铸钢件也表现出使用寿命短、设备更新频繁的弱点。研究表明，性能不足或磨损失效是其重要原因[2]。为解决这一问题所做的工作推动了耐磨材料的发展[3]。在一些煤机行业挖掘设备中使用的ZG25MnNi（主要化学成分为0.252% C、0.492% Si、0.872% Mn、0.152% Mo、0.273% Ni、P和S含量均小于0.05%）或ZG30Mn2（主要化学成分为0.295% C、0.329% Si、1.43% Mn、P和S含量均小于0.05%）铸钢零件因综合力学性能不足、服役时间短，制约了企业的发展，因此设法提高其使用寿命有重要经济意义。

对铸件中合金元素含量进行控制和优化[4-5]，是一种改善铸钢件性能、延长其使用寿命的重要途径。铸钢件的性能除了取决于化学成分、工艺质量要求外，还可以借助不同热处理方法来获得优良的综合性能。适用于煤机工况的结构铸钢件常用的热处理手段有退火、正火以及调质处理[6-7]。企业直接进行材质改良工作受到生产成本和技术的限制，因此利用高校先进的技术设备进行材质改良优化，不仅具有重要科研意义，还具有重要的经济价值。

1　试验材料与方法

1.1　真空熔炼炉制备钮扣锭

工业生产中铸钢件的熔炼广泛采用电弧炉，原料主要为生铁、废钢、脱氧剂等。对于质量要求高的铸钢件还要配备相应的炉外精炼设备。因此铸钢件生产的周期长、批量大、成本高。相比之下在实验室中采用真空熔炼电弧炉熔炼钮扣锭[8]工艺简单灵活，明显缩短了熔炼周期，降低了生产成本，非常有利于现有材

收稿日期：2010–12–06收到初稿，2011–01–10收到修订稿。
作者简介：马志英（1985–），男，硕士生，研究方向为耐磨材料。电话：021-56331485，E-mail：nice1985@shu.edu.cn
通讯作者：杨弋涛，教授，博士。电话：021-56334465，E-mail：yyt@staff.shu.edu.cn

质的改良工作。

本研究中的钮扣锭试样均在DHL1250高真空电弧熔炼炉中熔炼。真空电弧炉以铜坩埚为阴极，钨极棒为阳极，纽扣锭试样在铜坩埚内进行熔炼。

配料采用BS300A型高精度电子天平进行称量，测量精度为0.01 g。熔炼的钮扣锭试样质量在100 g左右。

1.2　成分分析、组织观察与性能测试

真空熔炼的钮扣锭采用PMI-MASTER PRO移动式光谱仪进行成分分析，确保钮扣锭实际成分与目标成分相同。试样抛光后经4%硝酸酒精腐蚀，用Nikon LV150型金相显微镜进行组织观察。硬度测试采用HBE-3000A电子布氏硬度计。磨损性能试验在MM200摩擦试验机上完成（钮扣锭试样加工成30 mm×7 mm×3 mm尺寸的耐磨块，对磨环的材料为合金铸铁（HRC 55）。拉伸试验在CMT5305电子万能试验机上进行，试验标准按GB/T 228—2002执行。拉伸试样按GB/T 228—2002中的R4标准加工。冲击试验在JB-50冲击式试验机上进行，试样加工成V型缺口标准冲击试样。

2　结果与讨论

2.1　物理模拟方法的确定

真空熔炼的钮扣锭采用循环水冷却凝固，室温时获得马氏体组织。煤机工况中实际使用的铸钢件显微组织为珠光体加铁素体，因此为实现实验室熔炼钮扣锭与实际铸件组织性能的可比性，增加对实际生产的指导意义，对钮扣锭试样进行物理模拟。

利用JMatPro模拟软件计算钮扣锭试样不同温度下的相组成，其中具有典型代表性的两种试样成分模拟计算结果如图1所示。图1a的试样主要成分为0.39% C 、0.86% Mn、0.38% Si、0.005% Mo以及0.003% Nb；图1b的主要成分为0.25% C、1.05% Mn、0.6% Si、0.26% Mo和0.013% Nb。

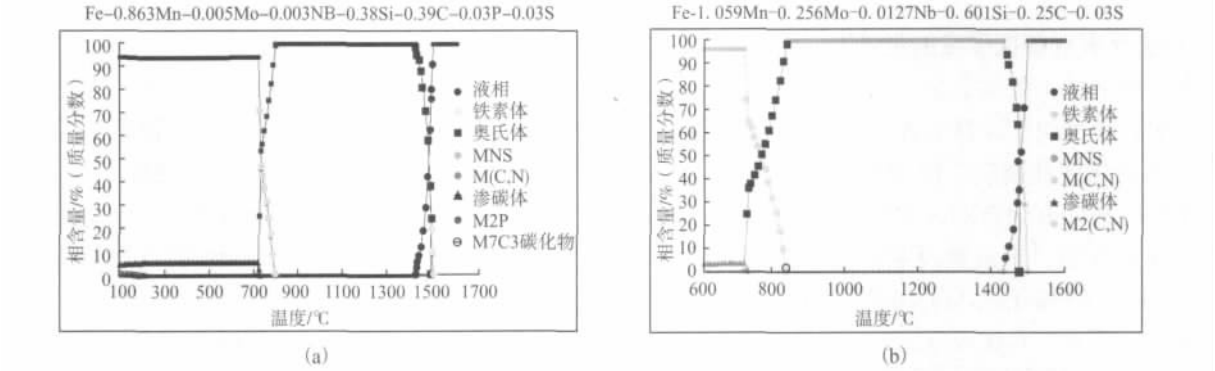
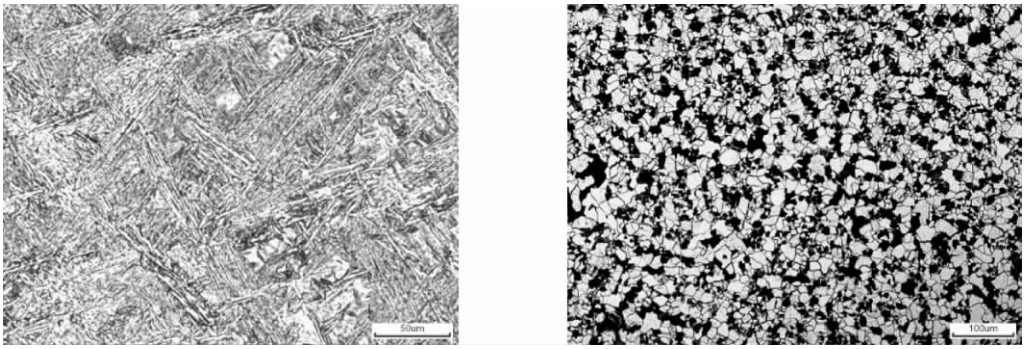


图1　不同成分钮扣锭试样相组成模拟图

Fig. 1 The phases of two button ingot steel casting samples with different compositions

以上模拟计算结果显示，在设计成分范围内试样完全奥氏体化的最低温度（Ac_3）为800~830 ℃。计算结果提供了制定试验热处理工艺的基础数据。分析模拟相组成图可知，由于合金含量比较低，冷却至室温时仅有少量的碳化物析出。

试验中以加热温度、保温时间和冷速为变量制定了数种热处理方案。比较不同热处理方案的实际效果，最终确定进行两个步骤热处理实现物理模拟。首先进行高温扩散退火（即在950 ℃时保温2 h后随炉冷却），高温扩散退火目的是使钮扣锭由马氏体组织转变为铁素体加珠光体，同时增加成分均匀性，见图2。



(a) 原始试样组织　　(b) 高温扩散退火后试样组织

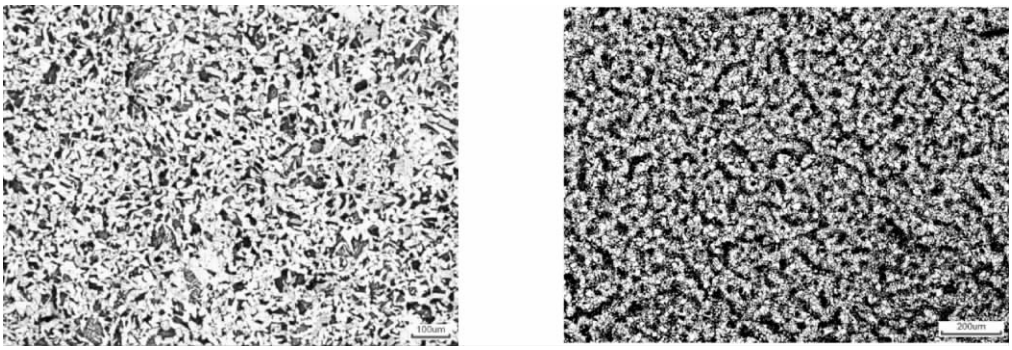
图2　原始和高温扩散退火后钮扣锭显微组织

Fig. 2 The microstructure comparison of samples before and after high temperature diffusion annealing

高温扩散退火后钮扣锭试样硬度从HBS 302~325降至HBS 170~180。试验测得ZG25MnNi铸钢件的硬度范围为HBS 140~172，高温扩散退火后试样硬度与之较接近。

随后对钮扣锭进行正火处理（即在900 ℃保温1 h后空冷）得到的金相组织仍为珠光体加铁素体，正火的目的是使组织均匀细化提高其综合性能。从图3所示铸钢件和正火后钮扣锭显微组织对比可以看出，两者有相近的组织形态。而且经过正火处理后它们的硬度值范围分别为HBS 137~167与HBS 174~185，亦显示了较为相近的结果。

经过上述两步的热处理工序，即通过高温扩散退火和正火，基本实现了钮扣锭原始组织和性能的转变，使之符合实际生产应用需求，达到了物理模拟的目的。



(a) 铸钢件组织　　(b) 钮扣锭试样正火后组织

图3 铸钢件和钮扣锭正火后显微组织

Fig. 3 The microstructure comparison between as-cast steel and the sample after normalizing

2.2 合金元素对铸钢硬度的影响

碳是钢中最主要的合金元素，亚共析钢中随碳含量的增加，平衡组织中珠光体的含量也随之增加。会增加铸钢的强度和硬度，但塑性和韧性会相应降低。为了保证铸钢件有综合的力学性能，同时保证其铸造性能和焊接性能，本试验设定的钮扣锭成分范围为：0.2%~0.4% C、0.8%~1.8% Mn、0.4%~0.8% Si、0~0.3% Mo和微量的Nb元素。具体成分见表1。

表1 钮扣锭编号及主要成分光谱分析

Table1 The serial number and chemical composition of the button ingot cast steel samples w_B/%

试样编号	C	Si	Mn	Mo	Nb
1	0.26	0.41	0.90	0.005	0.003
2	0.32	0.41	1.55	0.005	0.003
3	0.3	0.81	1.52	0.005	0.003
4	0.39	0.38	0.86	0.005	0.003
5	0.35	0.38	1.75	0.005	0.003
6	0.28	0.81	1.40	0.160	0.029
7	0.28	0.60	1.05	0.260	0.013
8	0.3	0.72	1.25	0.300	0.045
9	0.32	0.73	1.10	0.230	0.042
10	0.33	0.60	1.25	0.130	0.011
11	0.34	0.80	1.55	0.320	0.023

2.2.1 碳元素对铸钢硬度的影响

比较分析表1中1、4、6、11号钮扣锭试样的成分和硬度值。1、4号试样中除C元素外其他元素含量相当，C由0.25%~0.3%增加至0.38%~0.39%，硬度值有较大提高，即硬度平均值从HBS 159增加至HBS 186。分析相应的显微组织，4号试样（图4b）中珠光体含量多于1号试样（图4a），因而提高了硬度。近似条件下比较6号（图4c）和11号试样（图4d），C含量分别为0.237%~0.309%和0.312%~0.353%，平均硬度依次为HBS 204和HBS 266。图4c、图4d显示两者的珠光体含量都很少，但由于Si和Mn的含量较高，他们固溶到铁素体中强化了基体，因而获得了硬度。

由此可见C元素的增加能够有效的增加试样硬度，配合Si、Mn、Mo等元素含量的提高这种作用的效果则更加明显。

2.2.2 其他合金元素对铸钢硬度的影响

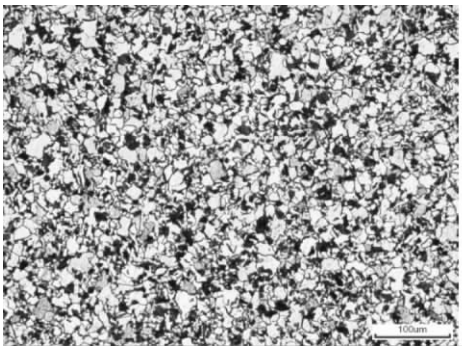
Mn含量增加会提高试样硬度。当Mn含量从0.8%（4号试样）增加到1.8%（5号试样）时，试样硬度从HBS 186增加到HBS 224。而Mn含量从0.8%（4号试样）增至1.5%（2号试样）时，虽然2号试样的C含量略低，但硬度值仍然从HBS 186增加到了HBS 199。显微组织如图5a、图5b所示，分析发现Mn可增加珠光体含量，并使铁素体更为细小。添加了Mo和Nb后，硬度有很大提高。如表1中3号和11号试样，其硬度从HBS 210增加至HBS 266。分析主要是因为元素的固溶强化作用，金相组织如图5c、图5d所示。因此适量增加Mo和Nb有利于获得高的强度。

由此可见Mn对硬度影响很大，其含量的增加会提高试样硬度。而实际上添加适量的Mo和Nb会提高钢的淬透性，有利于获得高硬度。

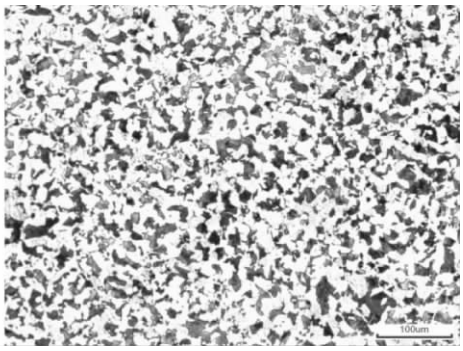
2.3 成分对铸钢耐磨性能的影响

在MM200磨损试验机上对纽扣锭的耐磨性进行测试，确定的试验载荷和试验时间分别为2 kg和60 min。通过磨损失重法评价的耐磨试验结果以及同硬度的对应关系如图6所示。

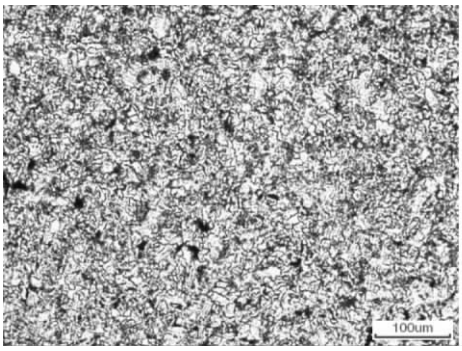
图6的对比表明，改良材质（即增加C、Mn含量并保持一定的Si、Mo和Nb元素配比）性能优于比较对象的铸钢件。试验结果还显示试样耐磨性与硬度大体上



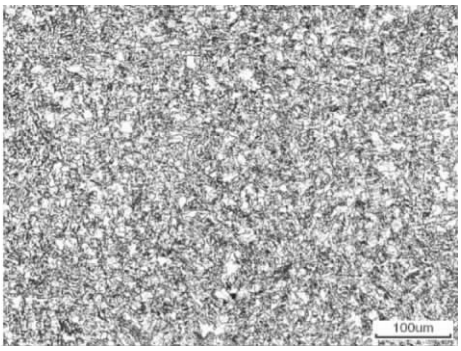
(a) 1号钮扣锭显微组织



(b) 4号钮扣锭显微组织



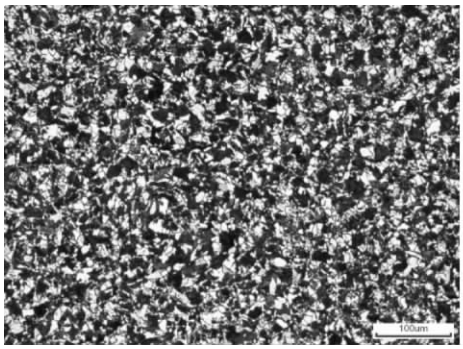
(c) 6号钮扣锭显微组织



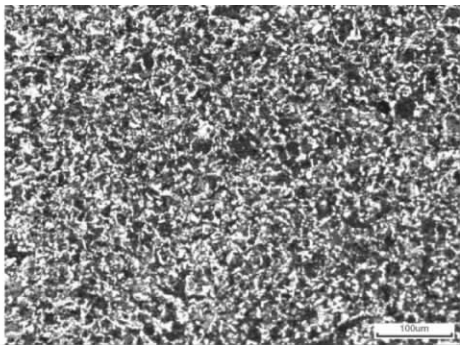
(d) 11号钮扣锭显微组织

图4　不同钮扣锭试样热处理后显微组织

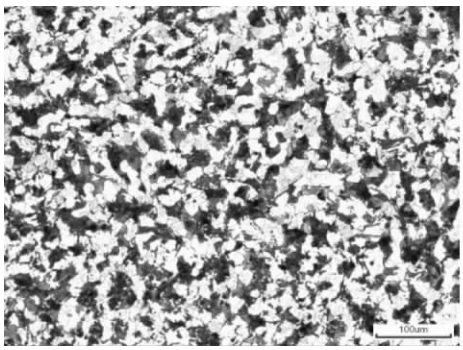
Fig. 4 The microstructures of different samples after heat treatment



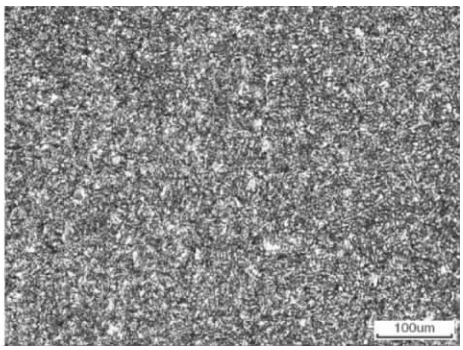
(a) 2号钮扣锭显微组织



(b) 5号钮扣锭显微组织



(c) 3号钮扣锭显微组织



(d) 11号钮扣锭显微组织

图5　不同钮扣锭试样热处理后显微组织

Fig.5 The microstructures of different samples after heat treatment

呈相关性，即当硬度较高时试样的耐磨性较好。但是试验结果表明并非硬度越高越好，硬度最高的11号试样耐磨性不及5号试样，这是因为试样要保证有一定的塑性。试验条件下最适的成分组合为0.2%~0.4% C、0.6%~0.8% Si、1.0%~1.8% Mn、约0.3% Mo和0.04% Nb。

2.4　改良材质的实际应用

以试验室结果为指导进行了铸钢件的试生产，在企业中实际浇注含0.2%~0.4% C、0.6%~0.8% Si、1.0%~1.8% Mn、0.1%~0.3% Mo和0.01%~0.04% Nb的改良铸钢件。检测改良铸钢件和对比铸钢件的性能，前者的综合

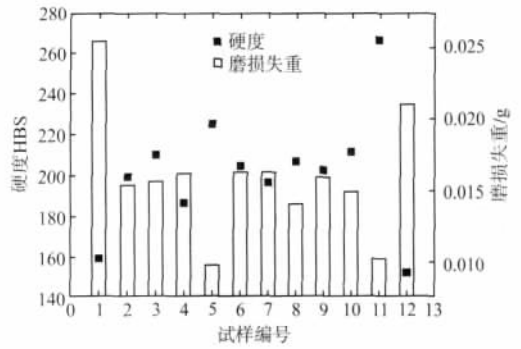


图6　钮扣锭磨损失重量与硬度图

Fig. 6 The weight loss and hardness of the button ingot cast steel samples

（注：编号1–11分别对应相应的的钮扣锭试样，12号对应ZG25MnNi铸钢件）

性能有较大提高。如改良的铸钢件的抗拉强度697 MPa，伸长率14.34%，断面收缩率27%，冲击功27 J；相比之下对照ZG25MnNi铸钢材料抗拉强度595 MPa，伸长率14.95%，断面收缩率43.2%，冲击功21.5 J；ZG30Mn2铸钢材料抗拉强度约655 MPa，伸长率约25%，断面收缩率约44%，冲击功68 J。

3　结论

（1）运用物理模拟的方法实现了实验室真空熔炼钮扣锭对铸钢件的模拟，物理模拟的热处理工序包括高温扩散退火和正火两个环节。

（2）通过试验确定了改良铸钢材质的化学成分，较合适的成分组合为0.2%~0.4% C、0.6%~0.8% Si、1.4%~1.8% Mn、0.3% Mo、0.01%~0.04% Nb。其中C、Mn元素的增加可以提高材质硬度和耐磨性，但要兼顾材料的塑性。适量Si、Mo和Nb的配比会增强材料的综合性能。

（3）企业中实际浇注的改良铸钢件（含0.2%~0.4% C、0.6%~0.8% Si、1.0%~1.8% Mn、0.1%~0.3% Mo和0.01%~0.04% Nb的铸件）与ZG25MnNi铸件相比综合力学性能有较大提高，而与ZG30Mn2相比强度有所提高。

参考文献：

[1] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册：第2卷 铸钢 [M]. 北京：机械工业出版社，2002：4–7.

[2] 中国机械工程学会热处理学会. 金属的摩擦磨损与热处理 [M]. 北京：机械工业出版社，1988：1–5.

[3] 李茂林. 我国金属耐磨材料的发展和应用 [J]. 铸造，2002，51（9）：525–529.

[4] 戴敦才，林怀涛，赵四勇，等. 铬钼铌合金耐磨铸钢的研制 [J]. 铸造，1996（11）：11–15.

[5] 马捷，孙方策，陈木兰，等. 微合金化元素对低合金铸钢组织和性能的影响 [J]. 铸造，1997（1）：25–27.

[6] 戚正风. 金属热处理原理 [M]. 北京：机械工业出版社，1987：89.

[7] 饶启昌，吕振林. 耐磨材料热处理问题的探讨 [J]. 水利电力机械，2000（1）：12–17.

[8] 罗威，武迎麦，陈锟，等. Cr5大型合金钢铸锭热应力状态的模拟分析 [J]. 铸造技术，2005（3）：344–347.

（编辑：潘继勇，pjy@foundryworld.com）

供 南 非 铬 矿 砂

大连佳和矿业有限公司是从事南非铬矿贸易和深加工的专业厂家，公司在上海、天津、连云港设有三个加工工厂和物流基地，长期备有现货。

我公司提供的南非铬矿砂有铸造级、化工级、耐火级、冶金级四大级别，主要用于铸造、引流砂和耐火材料，钢铁冶炼等方面。铸造级主要指标如下：

$Cr_2O_3 \geqslant 46\%$，$SiO_2 \leqslant 1\%$，$CaO < 0.3\%$

$Al_2O_3 < 16\%$，$H_2O < 0.5\%$，$Cr:Fe = 1.55:1$

我公司可根据客户的要求提供不同粒度的铬矿砂，主要粒度有20–40目，40–70目，50–100目。包装形式有吨袋、25 kg小袋、50 kg小袋。

欢迎广大客户来电洽谈！

地址：大连中山区港湾街20B名仕财富915　邮编：116001

电话：0411–82768529/82768526　传真：0411–82766485

联系人：王小姐、倪小姐

手机：13610966756/13998631008