

## 软磁铁素体不锈钢 JB-J6 线材的研制与应用

陈超<sup>1,2</sup> 张增武<sup>2</sup>

(1 太原钢铁(集团)有限公司 先进不锈钢材料国家重点实验室,太原 030003;

2 山西太钢不锈钢股份有限公司,太原 030003)

**摘要** 设计了 JB-J6 钢目标化学成分( /% :0.01C,2.1Si,0.25Mn,0.018P,0.025S,16Cr),通过 VOD 工艺、LF 精炼(渣中二元碱度控制在 0.9~1.1)、保护浇注工艺(过热度 30~50℃,拉速 0.9~1.2 m/min,二冷比水量 0.85~0.95 L/kg)和轧制温度 1100~1180℃,成功生产太钢软磁铁素体不锈钢 JB-J6 Φ8 mm 线材,各项性能满足用户要求。

**关键词** 铁素体不锈钢 JB-J6 化学成分 性能 工艺 软磁 线材

## Development and Application of Soft Magnetic Ferritic Stainless Steel JB-J6 Wire Rod

Chen Chao<sup>1,2</sup> and Zhang Zengwu<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials, Taiyuan Iron & Steel( Group) Co Ltd, Taiyuan 030003;

2 Shanxi Taiyuan Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** The aim chemical composition of JB-J6 steel ( /% :0.01C,2.1Si,0.25Mn,0.018P,0.025S,16Cr) is designed, and by VOD refining technology, LF refining process (binary basicity slag control in 0.9~1.1), protecting pouring process (superheat degree 30~50℃, casting speed 0.9 to 1.2 m/min, secondary cooling water rate 0.85 to 0.95 L/kg) and rolling temperature 1100~1180℃, the Tisco soft magnetic ferrite stainless steel JB-J6 wire has been successfully produced, each property meets the requirement of user.

**Material Index** Ferritic Stainless Steel JB-J6, Chemical Composition, Properties, Process, Soft Magnetic, Wire Rod

通常将矫顽力  $H_c \leq 400$  A/m 的材料称为软磁材料。在不锈钢中,只有体心立方的铁素体不锈钢才有可能成为软磁材料<sup>[1]</sup>。

在直流和低频、大功率器件中,以前常用的软磁材料是纯铁和硅钢。这两种材料在加工成元件后为确保其耐蚀性就必须加以电镀,或者增加防锈涂层,这样既增加了生产成本又有污染环境的问题。在某些特殊的使用环境下,既要求软磁材料应具有良好的软磁性能和电性能,又要求有良好的耐腐蚀性,因此研究开发具有优异磁性能的不锈钢就显得非常必要<sup>[2]</sup>。

### 1 研制情况

#### 1.1 国外材料实物对标分析检测

为了解国外软磁铁素体不锈钢的实物质量水平,收集到牌号 KM-31(日本)磨光棒试样 5 支:  $\Phi 7.8 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,针对市场用户关注的化学成分、室温力学性能、布氏硬度、非金属夹杂物级别,进行对标分析检测。

通过 Leco 碳硫分析仪(型号 CS600)进行 C、S 检测,试验标准为 GB/T20123-2006《钢铁总碳硫含量的测定高频感应炉燃烧后红外吸收法(常规方法)》;通过 Leco 氧氮分析仪(型号 TC600)进行 N 检测,试验标准为 GB/T20124-2006《钢铁氮含量的

测定惰性气体熔融热导法(常规方法)》;其余元素采用湿法检测,试验标准为 GB/T223-2008《钢铁及合金化学分析方法》。KM-31 钢分析成分为( /% ) 0.037C, 2.11Si, 0.25Mn, 0.032P, 0.024S, 13.5Cr, 0.19Ni, 0.19Mo, 0.032N。

通过山东威海 10t 液压式万能试验机(型号 WE-100B)进行室温力学性能检测,试验标准为 GB/T228.1-2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》;沿纵向切取试样,镶样、打磨、抛光,通过莱州华银数显布氏硬度计(型号 210HBS-3000)进行布氏硬度检测,试验标准为 GB/T231.1《金属材料布氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》。

通过 Lecia 显微镜(型号 DM4000)进行非金属夹杂物的观察和评级,试验标准为 GB/T10561-2005《钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》。

#### 1.2 工艺流程与成分设计

90 t 转炉初炼→VOD 精炼→LF→方坯连铸( /mm:220×220×3200)→退火→检验及修磨→步进式加热炉加热→线材轧机轧制。

牌号 KM-31 钢 C、N、P 含量均在 0.030% 以上;为降低矫顽力,减小晶体的各向异性倾向,提高磁导

率, Si 含量 2.11%; 为提高加工过程中的易切削性, S 含量 0.024%; Cr 含量 13.5%; Ni、Mo 为残余元素。

随着 C 含量的增加, 钢材的强度、硬度升高, 而塑性、韧性下降, 并且焊接性能变差、冷脆性增大, 耐腐蚀性下降, N 对钢材性能的影响与 C 元素相似, P 是由矿石原料带入钢中的, 一般来说也是有害元素, P 能使钢材强度、硬度升高, 而塑性、韧性下降, 特别是低温时, 这种现象称为“冷脆”, 因此应尽量减少和限制钢材中的 C、N、P 含量。Cr 是不锈钢都含的主要元素, 当 Cr 含量达到 12% 时, 在大气环境下或在氧化性介质中 Cr 可在材料表面形成一种稳定的钝化膜来阻止腐蚀, 基本上不会生锈, 较高的合金含量可通过强化薄膜和快速自我修复薄膜来提高抗蚀性<sup>[3]</sup>。太钢通过“铁水预处理 + 转炉 + VOD + LF”的工艺路线, 降低钢中的 C、N、P 含量; 提高 Cr 含量至 15% ~ 17%, 达到中 Cr 水平; Mn、S 含量与日本材料持平; Ni、Mo、Cu 为残余元素(表 1)。

### 1.3 生产工艺

太钢是国内最早开发超纯铁素体不锈钢的企业之一, 通过近 20 年的工艺开发和技术进步, 已大批量稳定生产出牌号齐全的 400 系超纯铁素体不锈钢, 积累了丰富的脱 C、脱 N 冶炼技术和实践经验。以铁水为原料, 采用“转炉初炼 + VOD 精炼 + LF 精炼”的不锈钢冶炼工艺, 利用深脱 O、脱 C、脱 N 技术, 造低碱度渣(碱度 0.9 ~ 1.1)防止脱 S, 提高 S 收得率, 可使钢中 C、N、P、Ni、Mo 的含量控制在设计范围, 非金属夹杂物级别 ≤ 1 级, 来保证钢质纯净度, 并将 S 含量控制在设计范围。方坯连铸采用浸入式水口、中间包覆盖剂和结晶器保护渣等进行全保护浇注, 保护渣使用前必须烘烤并均匀加入, 严格控制浇铸温度以减少漏钢事故, 过热度 30 ~ 50 °C, 拉速 0.9 ~ 1.2 m/min, 二冷比水量采用弱冷(0.85 ~ 0.95 L/kg), 避免铸坯横截面温度梯度大而产生裂纹甚至漏钢。

为提高加工过程中的易切削性, 软磁铁素体不锈钢线材要求含有易切削元素硫(S)。硫以硫化锰(MnS)的形式分布在钢中, 由于 MnS 夹杂物割断了基体的连续性而使车削易断, 又由于 MnS 的润滑作用而降低了刀具磨损, 从而改善了钢材的切削加工性能<sup>[4]</sup>。而钢材在热加工时, 由于 S 的热脆性, 含硫钢容易出现轧制开裂、劈头, 所以合理设计轧制温度范围, 显得尤为重要。

表 1 太钢软磁铁素体不锈钢 JB-J6 的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of soft magnetic ferritic stainless steel JB-J6 at TISCO / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
目标	0.010	2.10	0.25	0.018	0.025	16.00	0.10	0.01	0.015
范围	≤ 0.020	2.00 ~ 2.20	0.20 ~ 0.30	≤ 0.020	0.020 ~ 0.030	15.00 ~ 17.00	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.020

实验室通过 50 kg 真空感应炉, 按表 1 要求冶炼 1 支真空锭, 尺寸为 130 mm × 130 mm × 270 mm, 中间部位钻样检测化学成分, 试验设备、型号和试验标准同上文所述, 结果见表 2。

切除真空锭的头部和尾部缺陷, 从中间部位, 纵向锯切并加工成 Φ10 mm × 120 mm 的热模拟拉伸试样, 通过 Gleeble-3800 热模拟系统进行高温拉伸试验: 将试样在工作室内固定, 抽真空后通电加热, 以 ≤ 10 °C/s 的速度加热到 1350 °C, 保温 3 min 后, 以 ≤ 10 °C/s 的速度降低到拉伸温度, 保温 20 s 后进行拉伸, 拉断后空冷。拉伸过程变形速率为 0.1 s<sup>-1</sup>, 拉伸温度分别为 1300、1250、1200、1150、1100、1050、1000、950、900、850、800 °C, 获得的数据通过 Origin 软件(2018 版)绘制得到高温热塑性曲线(见图 1), 可见随着温度的升高, 抗拉强度不断降低, 断面收缩率逐渐升高, 钢温 1000 °C 时达到最高, 即热塑性最佳, 然后逐渐降低, 钢温超过 1150 °C 时明显降低, 热塑性明显变差。根据实验结果, 结合现场实际, 并考虑轧制过程中的降温情况, 宜将加热炉温度设定在 1100 ~ 1180 °C, 粗轧机咬入温

表 2 真空感应冶炼 JB-J6 钢化学成分 / %

Table 2 Chemical compositions of vacuum induction smelting JB-J6 steel / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.010	2.09	0.26	0.005	0.027	16.10	0.01	0.01	0.0079

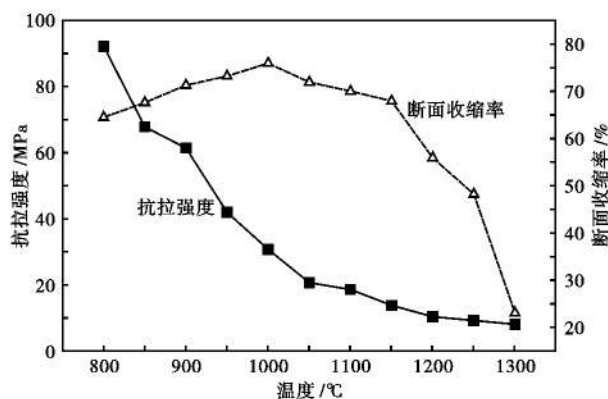


图 1 JB-J6 钢高温热塑性曲线

Fig. 1 High temperature thermoplasticity curve of JB-J6 steel

度 $\geq 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,轧后温度 $\geq 1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,投用冷却水,吐丝温度 $\leq 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,空冷至室温。

#### 1.4 太钢材料性能

取得太钢磨光棒试样 2 支,均为  $\Phi 8.5\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ,检测室温力学性能、布氏硬度、非金属夹杂物级别,试验设备型号、试验方法、试验标准均同上文所述,结果见表 3、表 4。

取得太钢磨光棒试样 2 支,均为  $\Phi 8.1\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ,与日本磨光棒试样  $\Phi 7.8\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ,同测矫顽力和磁导率,试验设备为软磁材料直流磁性能精密测量装置(型号 NIM-2000S),矫顽力试验标准为 GB/T3656-2008《软磁材料矫顽力的抛移测量方法》,磁导率试验标准为 GJB937-90《弱磁材料磁导率的测量方法》,结果见表 5。

通过实物对标,结合太钢实际开发的软磁铁素体不锈钢线材,经用户加工成磨光棒后,由表 3、表 4 和表 5 知,两种材料的室温力学性能和布氏硬度相当;非金属夹杂物级别,总体上太钢 JB-J6 低于 KM-31;两种材料的电磁性能相当。

## 2 应用情况

太钢生产的软磁铁素体不锈钢线材(牌号 JB-J6),规格范围 $\Phi 7.5 \sim 16\text{ mm}$ ,已经供货江苏、浙江的市场达 400 余 t。用户生产流程为“线材原料 $\rightarrow$ 冷

拉(减面率 20%~30%) $\rightarrow$ 剪切成段(长度 2 000~3 000 mm) $\rightarrow$ 打捆退火 $\rightarrow$ 磨光”,冷拉和剪切会产生内应力,而这种内应力的存在将使材料的磁性能变坏,退火可以消除内应力,从而使材料磁性能得以改善<sup>[5]</sup>,由此生产出来的磨光棒的室温力学性能、布氏硬度和非金属夹杂物级别,与进口材料相当,满足加工使用需求,并制作成各种家用电器上的电磁阀,工作状态下的阀体反应迅速灵敏,得到用户的广泛认可。

## 3 结束语

太钢采用“90 t 转炉初炼 $\rightarrow$ 90 t VOD 精炼 $\rightarrow$ 90 t LF 精炼 $\rightarrow$ 方坯连铸(220 mm $\times$ 220 mm $\times$ 3 200 mm) $\rightarrow$ 加热炉加热 $\rightarrow$ 线材轧机轧制”的工艺流程,成功开发了软磁铁素体不锈钢线材。

(1)优化化学成分,降低对加工塑性不利的 C、N 含量( $C \leq 0.020\%$ ,  $N \leq 0.020\%$ );提高对耐蚀性有利的 Cr 含量(Cr 控制在 15%~17%)。

(2)为了控制钢中夹杂物含量,保证钢质纯净度,利用精炼炉深脱氧、脱碳、脱氮,并造低碱度渣(碱度 0.9~1.1)防止脱 S,提高 S 收得率,使成分满足设计范围。

(3)为了控制方坯表面质量,制定合适的保护浇注工艺:过热度 30~50 $^{\circ}\text{C}$ ,拉速 0.9~1.2 m/min,二冷比水量 0.85~0.95 L/kg。

(4)为了避免轧制开裂、劈头,制定合适的轧制温度 1 100~1 180 $^{\circ}\text{C}$ 。

(5)经检测,材料各项性能与进口材料相当,具有广阔的市场和应用前景,并有望逐步替代进口材料。

### 参考文献

- [1] 刘筱薇,杨治立,张明远,等. 不锈软磁合金研究[J]. 功能材料, 2005, 36(12): 1820-1823.
- [2] 刘亚丕,牛振标,周焊峰,等. 现代不锈钢材料:结构、性能、特点和应用[J]. 磁性材料及器件, 2016, 47(1): 72-80.
- [3] 林企曾,单家富,刘尔华,等. 不锈钢实用手册[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2003: 9.
- [4] 周平,刘景化,衣中文,等. 国内外易切削钢综述[J]. 莱钢科技, 2004(3): 63-64, 90.
- [5] 曹标,吴敬艳. 退火对经剪切制样的 35RG155 冷轧取向硅钢片磁性能的影响[J]. 理化检验-物理分册, 2000, 36(5): 207-208.

陈超(1986-),男,工程师,2009年中北大学(本科)毕业,不锈钢线材研发及质量分析。E-mail:chenchao02@tisco.com.cn

收稿日期:2021-03-20

表 3 KM-31 钢和 JB-J6 钢 800 $^{\circ}\text{C}$  4 h 空冷的力学性能和布氏硬度值

Table 3 Mechanical properties and brinell hardness numbers of 800 $^{\circ}\text{C}$  4 h air cooling KM-31 steel and JB-J6 steel

项目	抗拉强度/ MPa	断后伸长率/ %	断面收缩率/ %	HB 布氏 硬度值
KM-31	520	32	78	165
JB-J6	525	35.5	81	170
标准要求	$\geq 450$	$\geq 25$	$\geq 65$	150~200

表 4 KM-31 钢和 JB-J6 钢非金属夹杂物级别/级

Table 4 Non-metallic inclusion rating of KM-31 steel and JB-J6 steel /rating

项目	A 类		B 类		C 类		D 类		Ds 类
	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	
KM-31	0	1.5	0	1.5	0	0	0	0	0
JB-J6	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0

表 5 800 $^{\circ}\text{C}$  4 h 空冷 KM-31 钢和 JB-J6 钢电磁性能

Table 5 Electromagnetic property numbers of 800 $^{\circ}\text{C}$  4 h air cooling KM-31 steel and JB-J6 steel

项目	矫顽力(Hc)/ ( $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ )	相对磁导率 ( $\mu_r$ )
KM-31	180	1.2
JB-J6	160	1.3
工艺要求	$\leq 200$	1.1~2.0