

中央编译出版社, 1998

- 2 柳卓之等. 基于产品数据管理和三维参数化造型技术的模具 CAD 系统. 模具工业, 1998 (2): 5~8
- 3 宋天虎. 先进制造技术的发展与未来, 中国机械工程, 1998, 9 (4): 2~5
- 4 王树杰. 快速原型技术及其在铸造中的应用. 铸造, 1998 (4):

52~55

- 5 尹希猛. 快速造型技术的研究. 华中理工大学博士学位论文, 1995
- 6 陈立亮. 基于 STL 网格剖分技术的研究. 特种铸造及有色合金, 1999 (增 1): 18~21

(编辑: 郭桂林)

# HT200 化学成分控制的模糊评价

天津大学机械工程学院 (天津 300072) 李贵成

**【提要】**把模糊教学引入到铸铁生产中。为保证生产中化学成分的准确度和稳定性，探讨了成分模糊参数的计算，提出综合统计模糊评价的方法。结果表明，此方法对灰铸铁成分统计质量控制具有实际意义。

**关键词:** 灰铸铁 统计质量控制 模糊数学

## Method of Fuzzy Evaluation for Controlling Chemical Composition of HT200

Li Guicheng  
(Tianjin University)

### Abstract

In order to ensure accuracy and stability of chemical composition, the fuzzy mathematics is used for production of cast iron. The calculation of fuzzy parameters of composition has been discussed and a method for statistical integrated fuzzy evaluation is put forward. The result showed that this method has an important effect for statistical quality control of chemical composition of cast iron.

灰铸铁的化学成分受配料、设备、炉况、操作及管理平等因素的影响，是一个多因素作用的结果。保证铸铁成分的准确度和稳定性具有重要意义。我们用模糊评价的方法，把生产技术资料通过模糊变换等数字化处理，针对 HT200 化学成分的稳定性和准确性作出生产综合水平的评价，以达到生产过程中严格控制化学成分的目的。

模糊综合评价不单纯是对铸铁理论应用水平的评价，也不单纯是对设备和管理水平的评价，而是对二者综合利用的“生产水平”的评价。

### 一、模糊评价程序

模糊评价程序框图见图 1。以灰口铸铁的化学成分为分析对象，铸铁牌号为 HT200，铸件的壁厚为 15mm~30mm。通过方框图所示的过程，对化学成分的优劣进行综合模糊评价。

### 二、变换矩阵

#### 1. 等级划分

1999 年 4 月 13 日收到初稿，1999 年 7 月 28 日收到修改稿。

《铸造》1999. 11

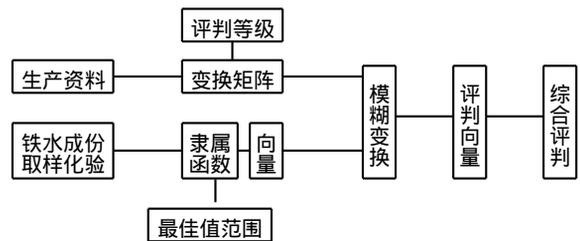


图 1 模糊评价程序框图

Fig. 1 Procedure graph of evaluation with fuzzy mathematics

据国内工厂经验，HT200 铸件壁厚与各元素最佳取值范围列于表 1<sup>[1]</sup>。依天津电机铸造厂生产经验，评价等级划分如表 2 所示。表 2 中评价等级分优、良、中、差、最差 5 个级别。分别以  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_4$ 、 $y_5$  表示。当某元素达到壁厚 = 15mm~30mm 所要求化学成分的中心值时，规定等级为优；达到要求成分范围边界时，规定等级为中；当铁水成分超出要求成分上、下限时，规定为差；当铁水成分超出了所有壁厚尺寸所要求的范围时为最差。

#### 2. 变换矩阵的建立

表1 HT200 铸铁的化学成分 (质量分数, %)

铸件壁厚/mm	C	Si	Mn	P	S
所有尺寸	3.0~3.6	1.4~2.2	0.6~1.0	<0.15	0.12
15~30	3.1~3.5	1.8~2.1	0.7~0.9	<0.15	0.12

表2 各元素的等级取值范围 (%)

元素	优 (y <sub>1</sub> )	良 (y <sub>2</sub> )	中 (y <sub>3</sub> )	差 (y <sub>4</sub> )	最差 (y <sub>5</sub> )
C(z <sub>1</sub> )	3.26~3.34	3.34~3.42 3.18~3.26	3.42~3.50 3.10~3.18	3.50~3.60 3.00~3.10	>3.60 <3.00
Si(z <sub>2</sub> )	1.92~1.98	1.98~2.04 1.86~1.92	2.04~2.10 1.80~1.86	2.10~2.20 1.40~1.80	>2.20 <1.40
Mn(z <sub>3</sub> )	0.78~0.82	0.82~0.86 0.74~0.78	0.86~0.90 0.70~0.74	0.90~1.00 0.60~0.70	>1.00 <0.60
P(z <sub>4</sub> )	<0.10	0.10~0.12	0.12~0.14	0.14~0.16	0.16
S(z <sub>5</sub> )	<0.09	0.09~0.10	0.10~0.11	0.11~0.12	0.12

在图1中提到的“生产资料”，是指在100天的生产中，随机抽取16个铁水试样，其化学成分的分析结果如表3所示。以表3中C元素为例，对照表2中的C的等级划分，在16个数据中，优6个，良7个，中2个，差1个，最差0个。其它元素的等级统计，依此类推。统计结果如表4所示。

表3 化学成分 (质量分数 %) 的抽样数据

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C	3.26	3.38	3.60	3.33	3.39	3.28	3.22	3.19	3.12	3.28	3.33	3.48	3.36	3.24	3.37	3.30
Si	1.95	2.24	1.96	2.08	1.96	2.03	1.98	1.83	2.02	1.95	1.93	1.93	2.00	1.92	1.87	1.97
Mn	0.84	0.81	0.76	0.81	1.10	0.79	0.78	0.60	0.75	0.79	1.00	0.78	0.74	0.88	0.82	0.79
P	0.10	0.12	0.15	0.13	0.13	0.08	0.15	0.12	0.10	0.17	0.10	0.12	0.14	0.11	0.18	0.12
S	0.10	0.14	0.10	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.10	0.11	0.09	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10

表4 等级数据统计

	优 (y <sub>1</sub> )	良 (y <sub>2</sub> )	中 (y <sub>3</sub> )	差 (y <sub>4</sub> )	最差 (y <sub>5</sub> )
C	6	7	2	1	0
Si	9	4	2	0	1
Mn	8	4	1	2	1
P	1	4	6	3	2
S	0	2	8	4	2

把表4写成矩阵形式:

$$R = \begin{pmatrix} 6 & 7 & 2 & 1 & 0 \\ 9 & 4 & 2 & 0 & 1 \\ 8 & 4 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 4 & 6 & 3 & 2 \\ 0 & 2 & 8 & 4 & 2 \end{pmatrix}$$

矩阵R归一化处理, 可写成标准矩阵形式:

$$R = \begin{pmatrix} 0.38 & 0.44 & 0.12 & 0.06 & 0 \\ 0.56 & 0.25 & 0.13 & 0 & 0.06 \\ 0.50 & 0.25 & 0.06 & 0.13 & 0.06 \\ 0.06 & 0.25 & 0.37 & 0.19 & 0.13 \\ 0 & 0.13 & 0.50 & 0.25 & 0.12 \end{pmatrix}$$

### 三、隶属函数

隶属函数  $\mu_A(x)$  代表元素  $x$  的含量对中心值 (最佳值) 的隶属度。确定隶属函数  $\mu_A(x)$  的方法很多, 可根据统计试验、加权平均以及理论概括综合评价, 也可以根据实际经验。

#### 1. 确定 HT200 的隶属函数类型

确定函数的常用类型有戒上型、戒下型和对称型3种<sup>[2]</sup>。铸铁中的C、Si、Mn3个元素均有一定取值范围, 可以采用对称型中的正态分布型, 如图2所示。P和S的取值常常是小于某一个规定值, 则以戒上型为佳,

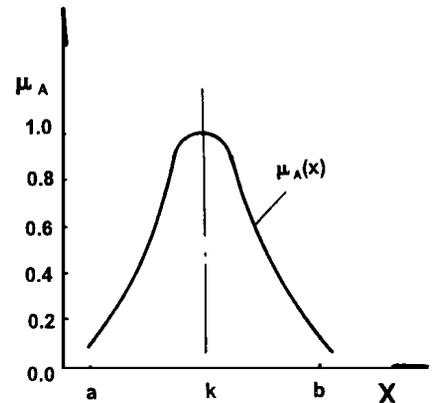


图2 对称型函数  
Fig.2 Symmetric function

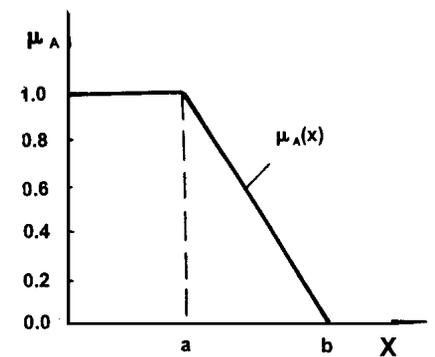


图3 非对称型函数  
Fig.3 Unsymmetric function

如图3所示。它们的数学表达式为式(1)和式(2)。式(1)为正态分布型, 式(2)为戒上型。 $\mu_A(x)$ 的取值范围为[0,1]中的任一数值。

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{(x-k)^2}{\sigma^2}} \quad (1)$$

式中  $k$ ——某一元素 ( $x$ ) 的中心值

——确定  $\mu_A(x)$  曲线陡峭程度的常数

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & (0 \leq x \leq a) \\ \frac{b-x}{b-a} & (a < x < b) \\ 0 & (x \geq b) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $a$ ——元素取值范围上限

$b$ ——元素取值范围下限

#### 2. 隶属函数参数选择

以含C量为例, 当壁厚 = 15mm ~ 30mm 时, 根据表1,  $C = a \sim b = 3.1 \sim 3.5$ , 则中心值  $K = (a + b) / 2 = (3.1 + 3.5) / 2 = 3.3$ , 偏差 =  $b - k = 3.5 - 3.3 = 0.2$ 。

因曲线  $\mu_A(x)$  是以横坐标为渐近线的曲线,

规定某元素达到上限  $a$  或下限  $b$  时,  $\mu_A(x) = 0.1$ 。由于  $e^{-2.25} = 0.1$ , 根据式 (1):

$$e^{-(x-k)^2/0.02} = e^{-2.25} = 0.1$$

如果  $x = b$  时,

$$(b-k)^2/0.02 = 2.25 \Rightarrow \left(\frac{2}{3}\right)^2 = 2.25 \quad (3)$$

根据式 (3),  $x = (2/3 \times 0.2)^2 = 0.02$ ,  $k = 3.3$ , 则  $x = 15\text{mm} \sim 30\text{mm}$  时, 据式 (1), 含 C 量隶属函数为:

$$\mu_A(x) = e^{-(x-3.3)^2/0.02}$$

对  $\mu_A(x)$  的作用见图 4, 当  $x_1 > x_2$  时,

$$\mu_A(x)_1 > \mu_A(x)_2$$

根据图 3, 戒上型隶属函数中的某元素含量

$b\%$  时,  $b$  为极限值,  $a$  为能够达到的最佳值范围的上限。现以 S 含量为例, 据表 1, S

0.12%, 依现有的生产条件, S 最低可以达到

0.08%, 则  $a = 0.08\%$ ,  $b = 0.12\%$ 。据式 (2), 含 S 量隶属函数可确定为:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & (0 \leq x \leq 0.08) \\ \frac{0.12 - x}{0.12 - 0.08} & (0.08 < x < 0.12) \\ 0 & (x \geq 0.12) \end{cases}$$

### 3. HT200 铸铁的各元素隶属函数

按照上述隶属函数参数选择方法, 牌号为 HT200 的铸铁, 以壁厚  $\delta = 15\text{mm} \sim 30\text{mm}$  时的化学成分为准, 构造各元素的隶属函数如下:

$$C: \mu_{A1}(C) = e^{-(C-3.3)^2/0.02} \quad (4)$$

$$\mu_{A2}(Si)_1 = e^{-(Si-1.95)^2/0.1344} \quad (Si < 1.95) \quad (5)$$

$$\mu_{A2}(Si)_2 = e^{-(Si-1.95)^2/0.0278} \quad (Si > 1.95)$$

$$Mn: \mu_{A3}(Mn) = e^{-(Mn-0.8)^2/0.0178} \quad (6)$$

$$P: \mu_{A4}(P) = \begin{cases} 1 & (0 \leq P \leq 0.1) \\ \frac{0.16 - P}{0.16 - 0.1} & (0.1 < P < 0.16) \\ 0 & (P \geq 0.16) \end{cases} \quad (7)$$

$$S: \mu_{A5}(S) = \begin{cases} 1 & (0 \leq S \leq 0.08) \\ \frac{0.12 - S}{0.12 - 0.08} & (0.08 < S < 0.12) \\ 0 & (S \geq 0.12) \end{cases} \quad (8)$$

对于 Si, 由于要求  $Si = 1.8\% \sim 2.1\%$ , 而在各种壁厚时  $Si = 1.4\% \sim 2.2\%$ , 中心值两侧数据不对称, 所以采用两个隶属函数计算。

## 四、化学成分的向量表示

为便于计算, 宜把化学成分转换为向量形式。以在天津电机铸造厂随机抽取的 3 炉试样, 作为被评判的例子, 其成分列于表 5。通过各元素的相应隶属函数计算, 3 个试样的隶属度  $A_{(1)}$ 、 $A_{(2)}$ 、 $A_{(3)}$  表示为:

$$\text{试样 1: } A_{(1)} = \frac{0.61}{C} + \frac{0.70}{Si} + \frac{0.45}{Mn} + \frac{0.66}{P} + \frac{0.32}{S}$$

$$\text{试样 2: } A_{(2)} = \frac{0.61}{C} + \frac{0.85}{Si} + \frac{0.57}{Mn} + \frac{0.66}{P} + \frac{0.32}{S}$$

$$\text{试样 3: } A_{(3)} = \frac{0.16}{C} + \frac{0.18}{Si} + \frac{0.20}{Mn} + \frac{0.33}{P} + \frac{0}{S}$$

这仅是一种表达方式, 并非分数相加。隶属度的分布情况见图 5, 以元素 C、Si、Mn、P、S 为顺序, 写成向量式为:

$$\text{试样 1: } A_{(1)} = (0.61, 0.70, 0.45, 0.66, 0.22)$$

$$\text{试样 2: } A_{(2)} = (0.61, 0.85, 0.57, 0.66, 0.32)$$

$$\text{试样 3: } A_{(3)} = (0.16, 0.18, 0.20, 0.33, 0)$$

归一化处理后:

$$\text{试样 1: } A_{(1)} = (0.22, 0.26, 0.16, 0.24, 0.12)$$

$$\text{试样 2: } A_{(2)} = (0.20, 0.28, 0.19, 0.22, 0.11)$$

$$\text{试样 3: } A_{(3)} = (0.18, 0.21, 0.23, 0.38, 0)$$

表 5 试样的化学成分 (质量分数, %)

Table 5 Chemical composition of the samples					
	C	Si	Mn	P	S
试样 1	3.40	2.05	0.92	0.12	0.11
试样 2	3.20	1.80	0.90	0.12	0.11
试样 3	3.49	1.47	0.97	0.14	0.12

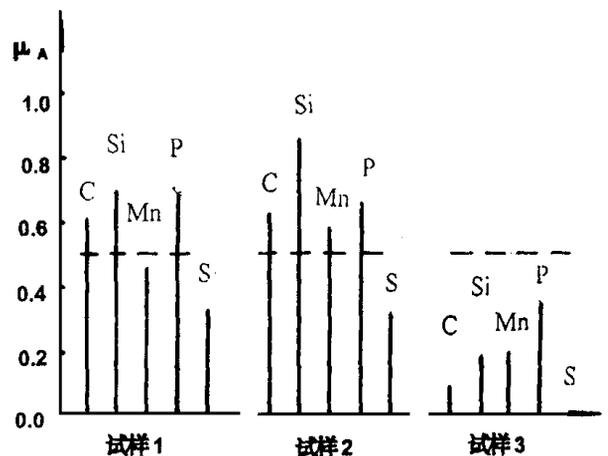


图 5 函数值分布状态

Fig. 5 Distribution of functions

## 五、综合评价

### 1. 评价计算

对 HT200 铸铁化学成分综合评价, 采用模糊变换形式来计算, 一般形式是:

$$AoR = B \quad (9)$$

式中 A —— 被评价试样向量

R —— 变换矩阵

通过“o”运算可以得到评价向量 B。“o”运算的具体公式是:

$$AoR = (a_1, a_2, \dots, a_n) \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix}$$

$$= ((a_1 \quad r_{11}) \quad (a_2 \quad r_{21}) \quad \dots \quad (a_n \quad r_{n1}), \dots, (a_1 \quad r_{1m}) \quad (a_2 \quad r_{2m}) \quad \dots \quad (a_n \quad r_{nm}))$$

$$= (b_1, b_2, b_3, \dots, b_m) = B$$

“o”计算即是“ ”和“ ”的计算“ ”表示二者取极小值,“ ”表示二者取极大值,“o”称为( , )算子。以第 1 炉试样为例, 模糊变换计算过程是:

$$(0.22, 0.26, 0.16, 0.24, 0.12) \circ \begin{pmatrix} 0.38 & 0.44 & 0.12 & 0.06 & 0 \\ 0.56 & 0.25 & 0.13 & 0 & 0.06 \\ 0.50 & 0.25 & 0.06 & 0.13 & 0.06 \\ 0.06 & 0.25 & 0.37 & 0.19 & 0.13 \\ 0 & 0.13 & 0.50 & 0.25 & 0.12 \end{pmatrix}$$

$$= ((0.22 \quad 0.38) \quad (0.26 \quad 0.56) \quad \dots \quad (0.12 \quad 0), \dots, (0.22 \quad 0), \dots, (0.22 \quad 0) \quad (0.26 \quad 0.06) \quad \dots \quad (0.12 \quad 0.12)) = (0.22 \quad 0.26 \quad \dots \quad 0, \dots, 0 \quad 0.06 \quad \dots \quad 0.12) = (0.26, 0.25, 0.24, 0.19, 0.13) = B$$

写成评价向量形式:

$$B = (0.26, 0.25, 0.24, 0.19, 0.13)$$

归一化处理:

$$B = (0.25, 0.23, 0.22, 0.18, 0.12)$$

### 2. 评价结果确定

按照上述模糊变换方法, 对所抽取的 3 炉铁水试样, 经过( , )算子计算, 得出 3 个评价向量为:

$$B_1 = A_{(1)} \circ R = (0.26, 0.25, 0.24, 0.19, 0.13)$$

$$B_2 = A_{(2)} \circ R = (0.28, 0.25, 0.22, 0.19, 0.13)$$

$$B_3 = A_{(3)} \circ R = (0.23, 0.25, 0.37, 0.19, 0.13)$$

归一化处理:

$$B_1 = (0.25, 0.23, 0.22, 0.18, 0.12)$$

$$B_2 = (0.26, 0.23, 0.21, 0.18, 0.12)$$

$$B_3 = (0.20, 0.21, 0.32, 0.16, 0.11)$$

以试样 1 评价向量  $B_1$  为例, 属于“优”的可能性占 25%, 属于“良”的可能性占 23%, 属于“中”的可能性占 22%, 以下依此类推。

取隶属度最大的那个等级作为评价结果, 第 1 炉属于“优”, 隶属度为 0.25; 第 2 炉也属于“优”, 隶属度为 0.26, 二者相比,  $0.26 > 0.25$ , 所以第 2 炉铁水成分比第 1 炉好, 更符合壁厚 = 15mm ~ 30mm 时的要求。两炉铁水“良”等级的隶属度均为 0.23, 与 0.25 相差 0.02, 所以第 1 炉铁水评为优良较恰当。第 3 炉铁水评为“中”, 其隶属度为 0.32。“良”和“差”的隶属度分别为 0.21 和 0.16, 它们于 0.32 相比差距较大, 所以第 3 炉铁水确认为“中”。

### 3. 关于变换矩阵 R

变换矩阵是根据生产现场的数据统计出来的, 只代表目前的生产水平, 但是, 由于技术的进步和组织管理的改善, 应根据新的技术资料, 对变换矩阵做不断更新。同一炉铁水成分, 若使用新的变换矩阵来衡量, 其等级会有所下降。这说明新的变换矩阵指标提高了, 也代表着整个技术和水平的提高。

### 4. 模糊评价与直观分析

把表 5 所列的随机抽取 3 炉试样的化学成分, 对照表 1 中 15mm ~ 30mm 壁厚铸件成分要求, 进行直观分析, 除了第 3 炉试样 Si 超限外, 其余成分均在要求范围内, 分析结果: 第 1 ~ 第 3 炉均属可以, 但第 3 炉稍差。

从上述“模糊评价”结果来看, 第 2 炉第级为“优”, 第 1 炉等级为“优良”, 第 3 炉等级为“中”。

两种评价的差别是, 直观分析难度大, 用估计确定“优”、“劣”, 无“量”的概念。“模糊评价”精确、细致, 等级划分严格、数字化、有“量”的概念。用图 5 所示的分布状态图协助分析、观测, 各炉情况一目了然。综合指标超限时发出警告(等级为最差)! 总之, 一切结论来自“计算”结果, 并根据离散度反馈控制信息。

### 5. 质量反馈控制

以表 5 所示的 3 炉试样为例, 评价结果为“优良”、“优”、“中”。对照图 5 隶属函数分布状态, 第 1、第 2 炉无需调整, 第 3 炉 5 大元素隶属函数平均值在 0.2 ~ 0.3 之间(一般隶属函数平均值在 0.2 以下才需调整), 可不调整。若希望调整, 其元素偏差计算公式为:

某元素偏差值 = 某元素实际值 - 某元素中心值以第 3 炉为例,

$$C \text{ 偏差} = 3.49 - 3.3 = +0.19$$

$$Si \text{ 偏差} = 1.47 - 1.95 = -0.48$$

$$Mn \text{ 偏差} = 0.97 - 0.8 = \pm 0.17$$

S 和 P 的隶属函数为戒上型, 不再赘述, 此偏差可以反馈到配料计算解决。

特别应指出的是, 连续抽取几个试样, 模糊评价的结果, 等级集中为“优”或“良”, 有较小的离散度, 此时无需信息反馈。若等级偏低, 则表明炉况稳定, 信息可反馈到配料解决。若连续抽样, 模糊评价离散度较大, 首先反馈到管理措施, 若无问题, 再反馈到配料解决, 若以上两方面均无问题, 最后鉴定炉况稳定性, 逐一寻找原因, 待减小离散度后, 再提高评价等级。

## 六、结论

(1) 将模糊数学概念引入铸造, 对铸铁成分的优劣等级进行评价, 是可行并有实际意义的。

(2) 向量 A, B 及矩阵 R 在计算过程中必须做归一化处理。

(3) 评判等级必须以最大隶属度为原则。

(4) 由于技术进步和组织管理的改善, 变换矩阵要重新计算。同一炉铁水成分, 若使用新的变换矩阵来衡量, 其等级应有所降低。

## 参 考 文 献

- 1 陆文华. 铸铁及其熔炼. 北京: 机械工业出版社, 1981
- 2 青义学. 模糊数学. 上海: 知识出版社, 1987
- 3 吴望名. 应用模糊集方法. 北京: 北京师范大学出版社, 1985
- 4 张世英等. 层次的模糊排序. 天津大学学报, 1991 (4)
- 5 董明等. 并行设计过程的一种矩阵规划方法. 天津大学学报, 1997 (4)
- 6 王春琪. 铸铁理论与实践. 天津: 天津大学出版社, 1991

(编辑: 田世江)

# ZG06Cr16Ni5Mo 中 铁素体对弯曲性能的影响

沈阳铸造研究所 (沈阳 110021) 张瑛洁 赵芳欣 王宝存 徐 超 尹绍奎 胡振艳 王大威

**【提要】**研究了 ZG06Cr16Ni5Mo 铸钢中 铁素体形态和分布对铸钢塑性、韧性和弯曲性能的影响; 探讨了 铁素体的分布在材料弯曲变形时的作用; 同时提出了改善 铁素体形态和分布的措施。

**关键词:** 铁素体 弯曲性能 不锈钢 铸钢

## Effect of $\alpha$ -ferrite on the Bending Properties of ZG06Cr16Ni5Mo Cast Steel

Zhang Yingjie, Zhao Fangxin, Wang Baocun, Xu Chao, Yin Shaokui, Hu Zhenyan, Wang Dawei  
(Shenyang Research Institute of Foundry)

### Abstract

The effect of morphology and distribution of  $\alpha$ -ferrite on the plasticity, toughness and bending properties of ZG06Cr16Ni5Mo cast steel has been investigated, and the relationship between the distribution of  $\alpha$ -ferrite and bending deformation was discussed, hence putting forward some measures to improve the morphology and distribution of  $\alpha$ -ferrite in the cast steel.

ZG06Cr16Ni5Mo 铸钢 (以下简称 16 - 5) 是用于水轮机过流部件上的一种超低碳马氏体不锈钢。由于水轮机过流部件一般要承受一定的弯曲载荷, 因此诸多水轮机过流部件的验收标准中除了要求拉伸、冲击和硬度指标外, 还要求弯曲指标。受该材料的成分和铸件生产工艺等诸多因素的影响, 在实际生产中铸件中易出现 铁素体。我们研究了 铁素体的形态和分布对于铸钢弯曲性能的影响, 并分析了 铁素体在材料弯曲变形时的作用机制。

## 一、试验内容和方法

对两组 16 - 5 试样进行了力学性能测试和显微组织分析; 对于弯曲断裂的一组试块进行了 3 种工艺的热处理试验, 并且进行了力学性能和组织检测。

## 二、试验结果与分析

### 1. 化学成分分析和力学性能测试

表 1 为试样的化学成分分析结果; 表 2 为力学性能测试结果。从表 2 可见, 在拉伸和冲击性能接近的情况下, 弯曲性能差别很大。

### 2. 金相试验

各组试样的夹杂情况见表 2, 从表可见 3 号试样

1999 年 7 月 16 日收到初稿, 1999 年 8 月 13 日收到修改稿。