

# 球墨铸铁球化级别的模糊评价模型\*

徐建林

(兰州理工大学有色金属新材料省部共建国家重点实验室 兰州 730050)

陈超

(兰州理工大学机电工程学院 兰州 730050)

**摘要:** 从球化率、球形度、分散度三个方面着手, 首次利用模糊数学建立了球墨铸铁球化等级的评价模型, 借助于“球铁金相图片分析系统”应用软件对 GB9441—1988 球墨铸铁金相检验标准的球化分级图进行了处理和分析, 对模型进行了修正, 得出一个较为科学的、全面的球铁球化等级的模糊评价体系。该方法可扩展应用于材料的组织评定, 对推动定量材料学具有积极作用。

**关键词:** 模糊数学 球墨铸铁 球化等级

**中图分类号:** TG255

## 0 前言

球铁是近 50 年来我国发展起来的重要的铸造金属材料, 主要用于制造受力复杂、负载较大和要求耐磨的零件, 它的诞生是 20 世纪材料科学最重大的技术进展之一<sup>[1]</sup>, 其一出现便得到了广泛地应用。

球铁之所以具有优良的性能, 其原因之一就是球铁中的石墨为球状。研究表明, 石墨球的圆整度、分布和数量对球铁的力学性能均有显著的影响<sup>[2~4]</sup>。在实际生产中通常以石墨球化的效果越好为追求目标, 相应的球铁等级也是越高越好。但是, 到目前为止, 对石墨球化等级的划分仍然不是很明确。当前, 铸造中用于评定石墨球化等级的方法主要有两种。

第一种是经验判别法。该方法通常是把显微镜下观察到的球铁显微组织与国家标准——《球墨铸铁金相检验》(GB9441—1988)中规定的检验项目进行比较, 来确定其球化等级。

第二种是计算机辅助判别法。随着现代图像分析技术的发展, 可用计算机来确定球铁的球化率<sup>[5]</sup>。米歇而根工业大学的 S. Z. Lu 和 A. Hellowell 提出的形状因子法被认为是目前描述石墨球形态较为准确的分析方法<sup>[6]</sup>, 但这种方法不能反映石墨球形状的细节信息(如轮廓的起伏程度等)<sup>[7]</sup>, 同时也不能反映石墨的分布状况。

由此可见, 对于球化等级的划分还没有一个较为满意的方法。即使在国家标准中的一些概念也是

非常模糊的, 如“石墨大部分呈球状”、“石墨呈分散分布”等, 这也使评判球铁的球化等级比较复杂化。根据不兼容原理<sup>[8]</sup>, 当系统的复杂度加大时, 有意识的精确认识能力降低, 系统的模糊性却加强。因此, 可用模糊数学来合理地描述、分析和评价球铁中石墨的形状、分布等。提出并应用模糊数学的方法来进行石墨球化等级的评判, 即对石墨的球化率、圆整度和分散度三个方面来综合确定石墨的球化等级。

## 1 球化等级评判的数学模型

### 1.1 模型构成

评定球铁的球化等级可从三个方面入手, 即石墨的球化率、石墨的形状和石墨的分布。其中石墨形状这些因素, 还需用若干个参数来表征, 因此, 评价模型采用二级模糊评价体系来实现, 图 1 为石墨球化等级判别的树形图。

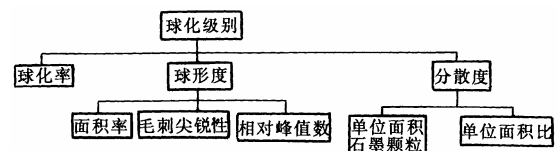


图 1 石墨球化等级判别的树形图

### 1.2 评价因素集

模糊综合评价涉及到影响评判对象的多种因素, 即评价因素集, 记为

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\} \quad U \in \mathbf{R}^n \quad (1)$$

式中  $U$  为影响因素,  $n$  为影响因素种类。评价因素集涉及到评价石墨球化等级时所需要考虑的诸多因

\* 甘肃省科技攻关(GS012-A52-071)和兰州理工大学科研发展基金资助项目。20030419 收到初稿, 20031215 收到修改稿

素, 主要因素如下。

(1) 石墨的球化率。球化率是评定球化级别的重要指标, 它对球铁的强度、硬度、延伸率具有一定的影响, 球化率越高, 球铁的力学性能也越好。所以常用球化率作为评定石墨球化级别的重要参数。

(2) 石墨的球形度。石墨呈球状时对基体的割裂作用比较小, 可提高球铁的力学性能, 因此石墨球越接近理想的球形时越好, 石墨与理想球的接近程度可用球形度来表示, 球形度又从以下三个方面来考虑: ①面积率。面积率为单颗石墨的面积与其外接圆面积的比值, 它反映了石墨整体接近理想球的程度。②毛刺尖锐性。石墨球的边缘有时比较光滑, 有时突起较多。光滑的边缘对基体的割裂作用比较小, 而具有毛刺的边缘部分容易产生应力集中, 使球铁的力学性能下降。毛刺的尖锐性可理解为石墨球的突起部位的尖角效应, 若突起部位越高、越尖, 则尖角效应越明显, 反之则较小。③相对峰值数。石墨球单位周长上所具有的毛刺数称为相对峰值数, 其反映了石墨边缘的起伏状况。

(3) 石墨的分散度。石墨球分布的变化被认为是影响球铁力学性能和基体结构的主要原因之一<sup>[4]</sup>。分散度可用以下两个参量来表征: ①单位面积石墨个数。单位面积石墨个数会对球墨铸铁的力学性能产生影响。当碳当量一定时, 该值过大或过小都会引起球铁力学性能的显著降低。②单位面积比。石墨分布的密集程度可用单位面积内的石墨面积大小来衡量。

从以上分析可看到, 因素集中涉及的因素较多, 故将性质相近的因素分在一组, 即

$$U=\{U_1 \quad U_2 \quad U_3\}=\{S \quad Q \quad F\} \quad (2)$$

式中  $S$ ——石墨的球化率

$Q$ ——石墨的球形度

$F$ ——石墨的分散度

上式且满足:  $U = \bigcup_{i=1}^3 U_i$ , 且当  $i \neq j$  时,  $U_i \cap U_j = \emptyset$ 。

对于每个  $U_i$  有

$$U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{in}\} \quad (3)$$

式中  $U_{in}$ ——每类因素集中的具体影响因素

$in$ ——第  $i$  组因素所含因素的个数  $n$

所以有  $Q = \{M \quad J \quad P\}$

$$F = \{g \quad h\} \quad (4)$$

式中  $M$ ——面积率

$J$ ——毛刺尖锐性

$P$ ——相对峰值数

$g$ ——单位面积石墨个数

$h$ ——单位面积比

### 1.3 评价等级集

评判结果视评判工作的具体要求可用若干个不同的等级来表示, 由它们组成评价集, 即

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \quad V \in \mathbf{R}^m \quad (5)$$

式中  $v_1 \sim v_m$ ——代表球化级别的等级

所以有  $V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

### 1.4 评价权重集

在评价因素集中, 各个因素对评价时所起的作用程度各不相同, 所以对每个因素  $u_i (i=1, 2, \dots, n)$  赋予权重  $a_i$ , 由  $a_i$  表示  $u_i$  在综合评判中的作用程度, 即得到权重集

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \quad A \in \mathbf{R}^n \quad (6)$$

且  $A$  满足量纲一化条件, 即  $\sum_{i=1}^n a_i = 1$

### 1.5 综合评价

使用二级综合评价模型, 首先进行第一级的综合评价。在评价中, 应建立单因素评价矩阵, 即确定评价集中的各元素对因素集中各元素的隶属度, 表示为

$$R_i = \begin{bmatrix} f(u_1) \\ f(u_2) \\ \vdots \\ f(u_n) \end{bmatrix} = \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{matrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $f(u_i) (i=1, 2, \dots, n)$  表示单独用  $u_i$  因素进行评价的结构,  $r_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; 0 \leq r_{ij} \leq 1)$  表示  $v_j$  元素对  $u_i$  元素的隶属度。 $R_i (i=1, 2, 3)$  是对因素集  $U_i$  的单因素评价矩阵, 第一级的评价结果为

$$B_i = A_i \circ R_i \quad (8)$$

式中  $A_i$  是  $U_1, U_2, U_3$  中各因素的权重, 即

$$A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}) \quad i=1, 2, 3 \quad (9)$$

第二级综合评价时单因素评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \circ R_1 \\ A_2 \circ R_2 \\ A_3 \circ R_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

评价结果为

$$B = A \circ R \quad (11)$$

式中  $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ , 对于模糊评价结果的选择以最大隶属度为原则<sup>[9]</sup>, 即

$$b_{j_0} = \max_j b_j \quad j=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

## 2 模型的实现与应用

评定石墨球化等级所涉及有关石墨几何形态和分布的参数可利用“球墨铸铁金相图片分析系统”来完成几何参量的测量<sup>[5]</sup>，在此基础上进一步确定模型中的各参数。

### 2.1 评价因子参数的确定

(1) 球化率的确定。计算球化率时首先求出每个石墨球的外接圆，然后算出单个石墨的面积率，石墨的实际面积  $S_G$  除以石墨的最小外接圆面积  $S_C$  定义为  $T$ ，则

$$T = S_G / S_C \quad (13)$$

根据石墨面积率就可正确确定球状修正系数，如表 1 所示。球化率的计算公式如下

$$S = \frac{n_{1.0} + 0.8n_{0.8} + 0.6n_{0.6} + 0.3n_{0.3}}{n_{1.0} + n_{0.8} + n_{0.6} + n_{0.3} + n_0} \quad (14)$$

其中  $n_{1.0}$ ,  $n_{0.8}$ ,  $n_{0.6}$ ,  $n_{0.3}$ ,  $n_0$  分别表示 5 种球状修正系数的石墨颗粒。石墨球数量用区域统计的方法计算得出。

表 1 石墨面积率和球状修正系数对照表

石墨面积率 $M$	$\geq 0.81$	$0.80 \sim 0.61$	$0.60 \sim 0.41$	$0.40 \sim 0.21$	$< 0.21$
球状修正系数	1.0	0.8	0.6	0.3	0

(2) 面积率的确定。由球化率分析中可知面积率为石墨颗粒面积与其外接圆面积的比值  $T$ 。

(3) 毛刺尖锐性的确定。一根毛刺的尖锐性可由轮廓与平均圆半径组成的高度与面积之比确定，如图 2 所示。整个石墨毛刺的尖锐性可用下式计算

$$J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{A_i} \quad (15)$$

式中  $L_i$ ——单个峰顶或峰谷与平均圆半径之差  
 $A_i$ ——单个峰顶或峰谷和平均圆半径所围面积  
 $n$ ——石墨轮廓峰顶数目

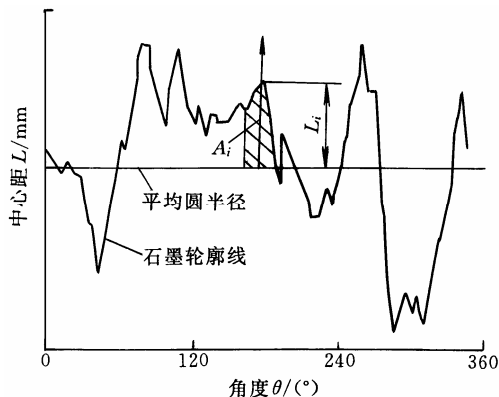


图 2 毛刺尖锐性示意图

(4) 相对峰值数。相对峰值数可由下式确定

$$P = \frac{n}{s} \quad (16)$$

式中  $n$ ——石墨颗粒边缘总的峰值数

$s$ ——石墨颗粒的周长

(5) 单位面积石墨个数。单位面积石墨个数可由下式确定

$$g = \frac{N}{F} \quad (17)$$

式中  $N$ ——视野内石墨的个数

$F$ ——视野的面积

(6) 单位面积比。单位面积比可由下式确定

$$h = \frac{F_s}{F} \quad (18)$$

式中  $F_s$ ——视野内石墨的面积

$F$ ——视野的面积

### 2.2 评价权重集的确定

评价权重集的确定顺序是先人为确定，然后在实际中应用来调整，最终确定为

$$A = \{0.5 \quad 0.3 \quad 0.2\}$$

$$A_2 = \{0.5 \quad 0.3 \quad 0.2\}$$

$$A_3 = \{0.5 \quad 0.5\}$$

式中  $A$  为第二级球化等级评价权重集，集合中元素依次对应为球化率、球形度和分散度； $A_2$  为第一级评价中球形度各因子的权重，元素分别对应为面积率、毛刺尖锐性和相对峰值数； $A_3$  为第一级评价中分散度各因子的权重，元素分别对应为单位面积石墨个数和单位面积比。

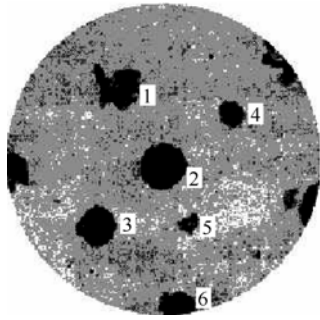
### 2.3 隶属度函数的确定

隶属度函数代表评价因子对评价等级的隶属度，确定隶属度的方法很多，先根据统计试验，然后利用理论概括来综合确定。

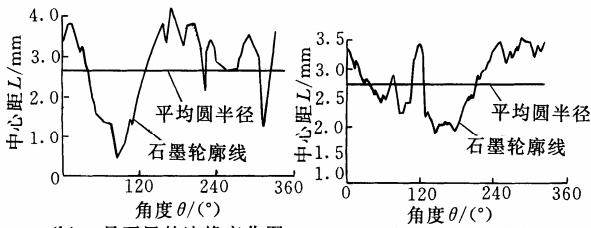
统计试验采用 GB9441—1988 国家标准提供的标准图片( $\times 100$ )进行分析，算出各评价因子参数。如图 3a 为球化等级为 3 级的球铁金相图片，图 3b、c、d、e、f、g 分别为图 3a 中所标注石墨的边缘与平均圆的关系图，表 2 为对该标准图片的统计结果。用同样的方法可确定从 1 级到 6 级球铁中各评价因子的统计数值。

根据表 3 建立各因素对球化等级的隶属度函数，该函数采用梯形分布函数，但在不同的球化级别时略有差异。在球化级别为 1 级时其隶属度函数为降半梯形，其表达式为

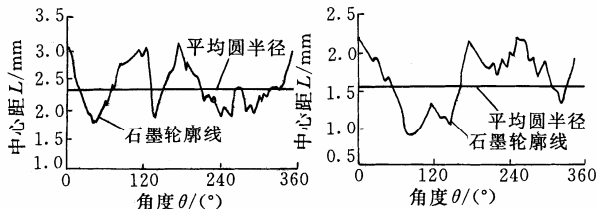
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_1 \\ (a_2 - x)/(a_2 - a_1) & a_1 < x \leq a_2 \\ 0 & x > a_2 \end{cases} \quad (19)$$



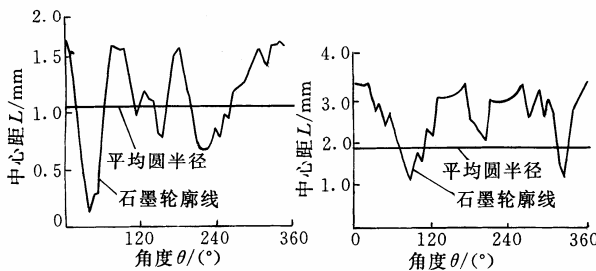
(a) 3级球铁的金相图片 ×500



(b) 1号石墨的边缘变化图 (c) 2号石墨的边缘变化图



(d) 3号石墨的边缘变化图 (e) 4号石墨的边缘变化图



(f) 5号石墨的边缘变化图 (g) 6号石墨的边缘变化图

图3 3级球铁石墨边缘变化示意图

表2 3级球铁标准图片的统计结果

石墨	毛刺尖锐性 $J/mm^{-1}$	相对峰值数 $P/mm^{-1}$	面积率 $M/\%$
1	3.674	1.002	81.49
2	3.639	1.489	83.67
3	6.274	1.740	86.85
4	3.745	0.949	84.37
5	4.189	1.241	82.60
6	3.183	0.890	75.40
平均数	4.117	1.218	82.40

表3 球化等级为1~6级的评价因子

球化等级	球化率 $S/\%$	面积率 $M/\%$	毛刺尖锐性 $J/mm^{-1}$	相对峰值数 $P/mm^{-1}$	单位面积石墨个数 $g$	单位面积比 $h/\%$
1	$\geq 95$	$> 80\%$	$\leq 3.5$	$\leq 1.1$	$\geq 3.0$	$\geq 12$
2	90~95	80~72	3.5~4.0	1.1~1.2	2.5~3.0	12~11
3	80~90	72~54	4.0~4.5	1.2~1.3	2.0~2.5	11~10
4	70~80	54~36	4.5~5.0	1.3~1.5	1.5~2.0	10~9
5	60~70	36~18	5.0~6.0	1.5~1.6	1.0~1.5	9~8
6	$\leq 60$	$< 18$	$\geq 6.0$	$\geq 1.6$	$< 1.0$	$\leq 8$

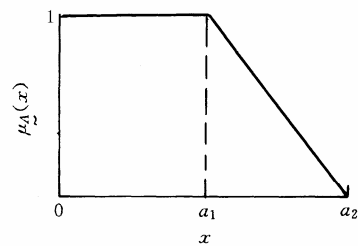
图形见图4a。球化级别为6级时其隶属度函数为升半梯形，其表达式为

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ (x - a_1)/(a_2 - a_1) & a_1 < x \leq a_2 \\ 1 & x > a_2 \end{cases} \quad (20)$$

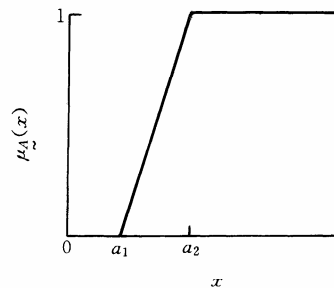
图形见图4b。球化级别2~5级时其隶属度函数为非对称梯形，其表达式为

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a - a_2 \\ (a_2 + x - a)/(a_2 - a_1) & a - a_2 < x \leq a - a_1 \\ 1 & a - a_1 < x \leq a + a_1 \\ (a_3 - x + a)/(a_3 - a_1) & a + a_1 < x \leq a + a_3 \\ 0 & x > a + a_3 \end{cases} \quad (21)$$

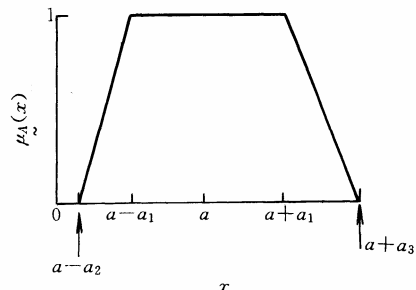
图形见图4c。公式中各特征参数(如  $a, a_1, a_2, a_3$ )可根据表3来确定。如确定球化率对球化级别的隶属度函数时，可得出各梯形的拐角对应的参数为60, 70, 80, 90, 95。



(a) 降半梯形



(b) 升半梯形



(c) 非对称梯形

图4 隶属度分布函数

### 2.4 模型的应用

根据以上分析对图5所示的球铁进行球化等级的评定。表4为测定的各评价因子的数据。

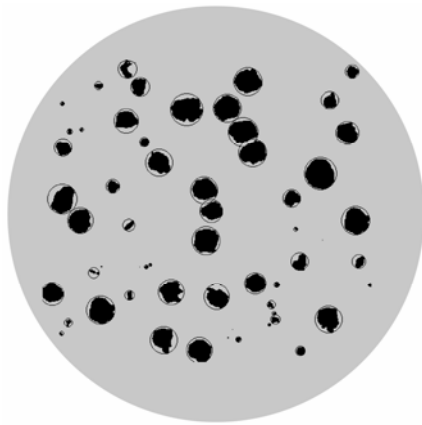


图 5 某球铁的金相图片 ×500

表 4 各评价因子的平均值

球化率 <i>S</i> /%	面积率 <i>M</i> /%	毛刺尖 锐性 <i>J</i>	相对峰 值数 <i>P</i>	单位面积石 墨个数 <i>g</i>	单位面积比 <i>h</i> /%
94.57	82.49	1.66	0.83	4.13	11.76

根据隶属度函数可确定球形度的隶属度为

$$R'_Q = \begin{bmatrix} 1 & 0.88 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.40 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.71 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

分散度的隶属度为

$$R'_F = \begin{bmatrix} 1 & 0.76 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.76 & 1 & 0.26 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

且已知权重分配

$$A'_Q = [0.5 \quad 0.3 \quad 0.2]$$

$$A'_F = [0.5 \quad 0.5]$$

对  $R'_Q$  和  $R'_F$  量纲一处理后，得

$$B'_Q = A'_Q \circ R'_Q = [0.5 \quad 0.47 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$B'_F = A'_F \circ R'_F = [0.5 \quad 0.5 \quad 0.12 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.91 & 1 & 0.09 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.47 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.12 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对  $R$  进行量纲一处理，得

$$R = \begin{bmatrix} 0.455 & 0.5 & 0.045 & 0 & 0 & 0 \\ 0.52 & 0.48 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.446 & 0.446 & 0.018 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = A \circ R =$$

$$[0.5 \quad 0.3 \quad 0.2] \begin{bmatrix} 0.455 & 0.5 & 0.045 & 0 & 0 & 0 \\ 0.52 & 0.48 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.446 & 0.446 & 0.018 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.455 \quad 0.5 \quad 0.108 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

根据最大隶属度原则，该球铁球化等级为二级。

### 3 结论

(1) 球墨铸铁球化等级的评价受多种因素的影响，其中许多评价因素具有模糊性，因此，利用模糊数学的原理和方法来处理是必要的。

(2) 利用模糊数学对球铁的球化等级进行全面、准确地综合评价是可行的，并具有实际意义。

(3) 该方法可用于其他材料某些组织或相的评定工作，对推动定量材料学的发展具有积极作用。

### 参 考 文 献

- 1 房贵如，王云昭. 现代球墨铸铁的诞生、应用及技术发展趋势——20 世纪材料科学重大的技术进展之一. 现代铸铁, 2000, 17(1): 3~11
- 2 Guo X, Stefanescu D M, Chuzhong L, et al. A mechanical properties model for ductile iron. AFS Transactions, 1997, 105: 47~54
- 3 Ruff G F, Doshi B K. Relation between mechanical properties and graphite structure in cast irons, part II-ductile iron. Modern Casting, 1980, 79(7): 70~74
- 4 Barton R. Graphite-nodule number and distribution-their effects on nodular-graphite iron castings. Foundry Trade Journal, 1985, 28(2): 117~126
- 5 徐建林. 球墨铸铁金相图片分析系统. 钢铁研究学报, 2001, 13(1): 73~76
- 6 Lu S Z, Hellowell A. Fractal method of nodularity measurement in ductile iron. AFS Transactions, 1999, 107: 757~762
- 7 李建明，林汉同，朱光喜，等. 基于分形的铸铁石墨颗粒形态的评定方法. 铸造, 1997, 46(6): 16~18
- 8 Zadeh L A. The Content of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning. American Elsevier Publishing Company Inc., 1975
- 9 张曾科. 模糊数学在自动化技术中的应用. 北京: 清华大学出版社, 1997

### FUZZY EVALUATION MODEL FOR THE NODULIZING GRADE OF NODULAR CAST IRON

Xu Jianlin

(State Key Laboratory of Gansu New Non-ferrous Metal  
Materials, Lanzhou University of Science & Technology, Lanzhou 730050)

Chen Chao

(College of Mechanic-Electronic Engineering,  
Lanzhou University of Science & Technology,  
Lanzhou 730050)

**Abstract:** Analyzing nodularity, sphericity and dispersivity, a fuzzy evaluation model for the nodulizing grade of nodular cast iron is firstly set up by means of fuzzy mathematics. In order to modify and verify the model, many microstructure of all kind nodulizing grade of China state standard (GB9441—1988) are analyzed and summarized by the system of image analysis of the microstructure of nodular cast iron. Finally, a scientific and

overall fuzzy evaluation model for the nodulizing grade of nodular cast iron is acquired. The method can be used to evaluate microstructure of other materials, and the result showed that the system has an important effect for pushing on quantitative metallography.

**Key words:** Fuzzy mathematics

Nodular cast iron

Nodulizing grade

作者简介: 徐建林, 男, 1970 年出生, 副教授, 博士研究生。主要从事材料科学与计算机应用研究工作, 发表论文 30 余篇。获省级科技进步二等奖 1 项, 三等奖 2 项。

E-mail: xujl@lut.cn



## 我国机械工程师资格认证和资格考试工作全面启动

为适应我国加入 WTO 后社会经济发展的需要, 促进我国机械工程师资格认证与国际接轨和国际互认, 中国机械工程学会经中国科协批准, 决定在我国开展对机械工程师的资格认证工作。2004 年 4 月 2 日, 中国机械工程学会和教育部考试中心在北京联合举行“中国机械工程师资格认证和资格考试”新闻发布会, 正式启动这项工作。中国科协、教育部考试中心有关领导、有关全国性学会、企业以及十几个省、自治区、直辖市专业组织的代表等出席了会议。

据了解, 在我国各类企业, 包括国有企业、三资企业、股份制企业和民营企业工作的机械工程类科技人员, 只要符合条件都可向中国机械工程学会指定的组织报名, 参加有关培训和教育部考试中心举办的机械工程师“综合素质与技能”考试, 成绩合格者就可获得中国机械工程学会颁发的机械工程师资格证书。

机械工程师资格认证采用的是由资格考试、业绩考核和同行评议相结合的对专业技术人才的评价方法, 其显著特点是突出职业工程师的知识结构符合现代制造技术发展的要求; 突出职业工程师的质量水平和适应企业工作需要的业务能力; 突出职业工程师理论联系实际的能力。