

基于可拓学的球墨铸铁石墨形态识别

陈智斌¹, 余永权¹, 杨少敏²

(1. 广东工业大学计算机学院智能工程研究所, 广州 510090;

2. 广东工业大学材料与能源学院, 广州 510640)

[摘要] 根据石墨的形态特征, 运用物元分析方法建立起关于石墨形态识别的物元模型, 提出了可拓分类树方法, 讨论了可拓分类树的构造和实现途径, 并将其应用于石墨形态的类型判别; 给出了典型的实验结果, 并对该方法与现有识别方法作出比较。

[关键词] 物元模型; 可拓分类树; 石墨形态; 球墨铸铁

[中图分类号] TP391.4; N94 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)03-0084-06

1 引言

球墨铸铁是一种广泛应用于各种机械零件和结构部件的金属材料。在产品的加工制造中, 球墨铸铁的综合机械性能对产品的整体性能有很大影响。石墨形态是判断球墨铸铁是否合格, 是否具备一定机械性能的关键指标之一。在生产过程中对球墨铸铁材料的评价, 往往是通过分析材料试样金相中不同形态类型的石墨数量及分布来进行的^[1]。因此, 实现按不同的形态类型对石墨进行自动识别与提取, 在球墨铸铁的设计及生产中有着实际意义。

利用可拓学和可拓工程方法, 在不同的领域中对实际事物对象进行评价、分析、识别和分类, 是近年来一种新兴的工程应用方法^[2], 然而在材料科学与工程上运用可拓学解决实际问题至今尚未有具体的应用。本文运用物元分析理论, 建立起球墨铸铁中各类石墨形态识别的物元模型, 并以此为基础对石墨的自动识别与提取作出相关的研究。

2 石墨形态识别的物元模型

2.1 石墨形态特征提取

球墨铸铁是指铁液经过球化剂处理而不是经过热处理, 使石墨大部或全部呈球状, 有时少量为团状等形态石墨的铸铁^[3]。根据球墨铸铁的金相组织特点, 球墨铸铁的石墨形态主要为球状, 同时允许有少量的团状、片状和蠕虫状等石墨形态出现。在实际情况中, 也存在许多形状极不规则的石墨形态, 本文统称其为絮状。

不同类型的石墨形态可以通过一定的几何形状特征来区分。根据球墨铸铁中石墨形态的特点, 笔者选取了似圆度、形状参数^[4]、球状性、圆形性、矩形度^[5]和迂曲度^[6]共6个几何形态特征作为分类特征。

对球墨铸铁金相图像进行二值化处理后, 可提取单一石墨区域进行特征量的计算。设有待识别石墨对象 p , 度量 p 的矩形区域面积为 A_R , 其中 p 所占面积为 A_0 。对 p 进行轮廓跟踪^[7], 得出一组互相连接的石墨边界点 (x_k, y_k) , ($1 \leq k \leq N$, N 为边界点数目), 石墨 p 的周长 L 按如下公式计

[收稿日期] 2004-04-01; **修回日期** 2004-06-30

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(60272089)

[作者简介] 陈智斌(1980-), 男, 广东广州市人, 广东工业大学硕士研究生; 余永权(1947-), 男, 广东台山市人, 广东工业大学教授, 博士生导师

算：

$$L = \sum_{k=1}^{N-1} \sqrt{|x_k - x_{k+1}| + |y_k - y_{k+1}|}$$

同时通过这组边界点求出边界上任意两点间的最大直线长度 l_{\max} ，以及此两点间的曲线长度 S_{\max} 。求出石墨 p 的区域重心为 (\bar{x}, \bar{y}) ，则可得重心到边界点的最短和最长距离为 r_{\min} 和 r_{\max} ，并可求出重心到边界点的平均距离 μ ，以及重心到边界点距离的均方差 σ 。各特征量的计算公式为：似圆度 $4A_0/\pi l_{\max}^2$ ；形状参数 $L^2/4\pi A_0$ ；球状性 r_{\min}/r_{\max} ；圆形性 μ/σ ；矩形度 A_0/A_R ；迂曲度 S_{\max}/l_{\max} 。

2.2 经典域与节域确定

关于球墨铸铁石墨形态的分类评定至今尚未有标准可参考。在实际研究和生产中，往往根据典型的球墨铸铁金相图谱，结合专家的知识 and 生产工人的经验，对具体金相中的石墨形态进行判定。笔者根据各类工业手册所给出的球墨铸铁金相图谱及评价，对各种形态类型的石墨分别提取上述6个特征量并加以总结，得出这些特征量的实际数据范围，从而确定各个特征对应于不同形态类型的石墨所具有的经典域 X_{0i} ($i=1, 2, \dots, 6$) 及其本身的节域 X_{pi} ($i=1, 2, \dots, 6$)^[8]。

通过对不同形态类型的石墨进行物元分析，可建立起石墨形态识别的物元模型。对于每种形态类型的石墨可用一个特定的石墨物元来表示，如设球墨铸铁中全体石墨为 N_p ，描述 N_p 的物元为 R_p ，同时设球状石墨为 N_1 ，描述 N_1 的物元为 R_1 ，则 R_p 和 R_1 可表示为：

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p, & c_1, & \langle 0.0, 1.0 \rangle \\ & c_2, & \langle 1.0, 8.0 \rangle \\ & c_3, & \langle 0.0, 1.0 \rangle \\ & c_4, & \langle 0.0, 60.0 \rangle \\ & c_5, & \langle 1.0, 10.0 \rangle \\ & c_6, & \langle 1.0, 3.0 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1, & c_1, & \langle 0.7, 1.0 \rangle \\ & c_2, & \langle 1.0, 1.5 \rangle \\ & c_3, & \langle 0.7, 1.0 \rangle \\ & c_4, & \langle 12.0, 60.0 \rangle \\ & c_5, & \langle 1.0, 1.5 \rangle \\ & c_6, & \langle 1.4, 1.8 \rangle \end{bmatrix}$$

其中 c_1 —似圆度， c_2 —形状参数， c_3 —球状性，

c_4 —圆形性， c_5 —矩形度， c_6 —迂曲度。

3 石墨形态的判别

3.1 关联函数及关联度的计算

有界区间 $X = \langle a, b \rangle$ 的模定义为 $|X| = |b - a|$ ，则某点 x 到区间 $X = \langle a, b \rangle$ 的距离为： $\rho(x, X) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{1}{2}(b-a)$ 。

设有待识别石墨对象 p ，测得 p 中特征 c_i ($1 \leq i \leq 6$) 的量值为 v_i ，则 p 表示为待识别物元 R 有：

$$R = \begin{bmatrix} p, & c_1, & v_1 \\ & c_2, & v_2 \\ & c_3, & v_3 \\ & c_4, & v_4 \\ & c_5, & v_5 \\ & c_6, & v_6 \end{bmatrix}$$

设 R_0 为描述某一形态类型的石墨物元， X_{0i} 为 R_0 中特征 c_i 的经典域，且 X_{pi} 为特征 c_i 的节域，则计算关联函数值有：

$$k(v_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_i, X_{0i})}{|X_{0i}|}, & v_i \in X_{0i} \\ \frac{\rho(v_i, X_{0i})}{\rho(v_i, X_{pi}) - \rho(v_i, X_{0i})}, & v_i \notin X_{0i} \end{cases}$$

关联度 $k(v_i)$ 从特征 c_i 的角度反映了 p 对该形态类型的石墨的隶属程度。

3.2 可拓分类树方法判别石墨形态

3.2.1 可拓分类树的提出 球墨铸铁石墨形态识别是一个多类别分类的问题，在实际分类过程中，往往难以通过某一种算法或一条规则去把多个类别一次分开。同时对于石墨形态的6个特征，每一个特征对形态刻画的角度不同，对判别的贡献也不尽相同。特征集合中，对于某一形态类型的判别能力很强的特征，对于其他类型的判别能力就可能很弱^[9]，这为确定特征的权系数带来困难，同时也降低了实际分类的精度。

笔者提出了可拓分类树方法对每个具体的石墨对象进行形态类型判别。在可拓分类树中，描述类事物的物元由某一结点所表示，该结点称为物元结点，而对应的物元称为结点物元。物元结点是可拓分类树的基本结构单元。每一个物元结点包含了该类事物的名称 N ，特征 c 和量值 v 。

如图1所示，对于石墨形态的识别问题，可拓

分类树中的根物元结点代表了球墨铸铁中的全体石墨 R_p ，其余物元结点分别代表了某种形态类型下的石墨物元，其中叶物元结点表示了石墨形态判别的最终确定结果。每一个物元结点本身表示了石墨形态识别问题上某一方面的知识和数据，可拓分类树就是层次化地组织这些知识和数据的结构形式。

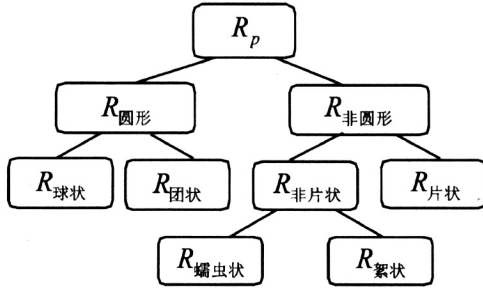


图1 用于石墨识别形态的可拓分类树
Fig.1 Extension classification tree used to identify the graphite morphology

3.2.2 可拓分类树的构造 根据树的基本概念^[10]，可拓分类树中各物元结点的关系有根物元结点与叶物元结点的关系，同一层次中各物元结点之间的关系以及双亲物元结点与孩子物元结点的关系。由此笔者提出了三个关于可拓分类树的命题。

命题1 设根结点物元 R_{root} 代表所有类型的全体事物，树中叶结点物元总个数为 n ，其中叶结点物元 R_{leafi} ($1 \leq i \leq n$) 代表某一类型的事物，则有：

$$R_{root} = R_{leaf1} \oplus R_{leaf2} \oplus \dots \oplus R_{leafn}$$

命题2 设树的深度为 l ，第 i 层的结点物元个数

为 n 。若 $1 < i < l$ ，则有：

$$R_{root} = R_{i1} \oplus R_{i2} \dots \oplus R_{in}$$

命题3 设双亲结点物元为 R_{parent} ，其孩子结点物元个数为 n ，则有：

$$R_{parent} = R_{child1} \oplus R_{child2} \oplus \dots \oplus R_{childn}$$

根据上述三个命题，从根结点物元开始自上而下地作出分解变换，能从不同角度生成判别石墨形态的类物物元结点，这些被生成的物元结点又可以进一步作出分解变换产生新的物元结点，从而构造出完整的可拓分类树（图1）。

可拓分类树包含了一个解决矛盾问题的重要思想，即将原来复杂的甚至难以解决的分类型问题，通过物元变换而划分成多个不同层次上的、较为简单的可解决的判别子问题的思想。同时这些不同层次上的判别子过程，又是通过可拓分类树组织成一个解决具体分类问题的方法。

3.2.3 可拓分类树的实现 可拓分类树可直接通过具体的数据结构形式存储到计算机中并加以应用。对用于识别球墨铸铁石墨形态的可拓分类树，笔者采用链表结构对其存储。可拓分类树的每一个物元结点与一个链表结点相对应。如表1所示，链表结点中包含了结点序号、事物名称、特征和量值，并且存放了对应的双亲结点序号以指示其双亲物元结点在链表中的位置。根据结点序号，非叶子物元结点可遍历整个链表找出其左右孩子物元结点。结点序号为0的链表结点存储了可拓分类树的根物元结点，因而其双亲物元结点序号为NULL。

表1 以链表结构存储可拓分类树

Table 1 The extension tree stored by linked list structure

结点序号	事物名称	似圆度	形状参数	球状性	圆形性	矩形度	迂曲度	双亲结点序号
0	石墨全体	<0.0, 1.0>	<1.0, 8.0>	<0.0, 1.0>	<0.0, 60.0>	<0.0, 1.0>	<1.0, 3.0>	NULL
1	圆形石墨	<0.6, 1.0>	<1.0, 2.0>	<0.6, 1.0>	<4.0, 60.0>	<0.5, 1.0>	<1.4, 1.8>	0
2	非圆形石墨	<0.0, 0.6>	<2.0, 8.0>	<0.0, 0.6>	<0.0, 4.0>	<0.0, 0.5>	<1.0, 3.0>	0
3	球状石墨	<0.6, 1.0>	<1.0, 2.0>	<0.7, 1.0>	<12.0, 60.0>	<0.5, 1.0>	<1.4, 1.8>	1
4	团状石墨	<0.6, 1.0>	<1.0, 2.0>	<0.6, 0.8>	<4.0, 12.0>	<0.5, 1.0>	<1.4, 1.8>	1
5	非片状石墨	<0.0, 0.6>	<2.0, 8.0>	<0.07, 0.6>	<0.0, 4.0>	<0.0, 0.5>	<1.3, 3.0>	2
6	片状石墨	<0.0, 0.6>	<2.0, 8.0>	<0.0, 0.1>	<0.0, 4.0>	<0.0, 0.5>	<1.0, 1.5>	2
7	蠕虫状石墨	<0.0, 0.4>	<4.0, 8.0>	<0.07, 0.6>	<0.0, 4.0>	<0.0, 0.4>	<1.3, 3.0>	5
8	絮状石墨	<0.4, 0.6>	<2.0, 4.0>	<0.07, 0.6>	<0.0, 4.0>	<0.4, 0.5>	<1.3, 3.0>	5

3.2.4 石墨形态的判别过程 不同形态类型的石墨物元具有不同的特征元。特征元分为本质特征元和非本质特征元^[11]。一物的本质特征元具有独有性，用于与其他类物相区别。对于球墨铸铁石墨形

态识别问题，其可拓分类树呈二叉树型结构，每个石墨对象的形态识别过程由树中若干层次上的判别子过程组成，对同一层次上具有相同双亲结点物元的左右孩子结点物元 $R_{lechild}$ 和 $R_{rechild}$ ，应选取在量

值上存在差异的特征作为本质特征。本质特征量值的取值范围即为经典域。 R_{lchild} 和 R_{rchild} 的本质特征与相应的经典域构成了各自的本质特征元，以用于该层次上的石墨形态类型判别。

设在可拓分类树中，第 i ($i > 1$) 层上有结点物元 R_{lchild} 和 R_{rchild} 分别表示两种不同形态类型的石墨 N_{lchild} 和 N_{rchild} 。 R_{lchild} 和 R_{rchild} 具有同一双亲结点物元，其本质特征个数为 m ($1 \leq m \leq 6$)。对于待识别石墨对象 p 在第 i 层上的形态判别，使用之前所述的关联度计算方法，并查找可拓分类树链表中存储 R_{lchild} 和 R_{rchild} 的结点，根据所得的经典域及节域分别计算 p 对 N_{lchild} 和 N_{rchild} 的隶属程度

$K_j(p)$ ($j=1,2$)，则有 $K_j(p) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \kappa_j(v_i)$ ($i=1, \dots, m$)，其中 λ_i 为关联度 $\kappa_j(v_i)$ 的权系数， $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$ 。选 $K(p)$ 值较大的一方作为判别结果。若 $K_1(p) \leq 0$ 且 $K_2(p) \leq 0$ ，则 p 不在可识别石墨

范围中。石墨 p 的形态判别过程，就是从可拓分类树的根物元结点出发，在每个层次上判别所属石墨类别，直至叶物元结点的过程。

4 实验结果及评价

4.1 实验结果 在对金相石墨的识别前首先进行预处理。为突出主要的石墨形态分布，设定最小石墨面积阈值，将图像中低于面积阈值的石墨颗粒清除。与图像边界相连的石墨，由于无法得知它们真实形态也将其清除。在识别前预处理及识别后分类结果显示都需要对单个石墨进行提取，笔者采用区域生长方法加以实现。

图2是一组典型球化不良的球墨铸铁金相显微图像及其判别分类后的结果，可以看到对球墨铸铁机械性能有利的球状和团状石墨数量较少且分布分散，而对其机械性能有不利影响的其他形态类型石墨数量较多且分布集中。

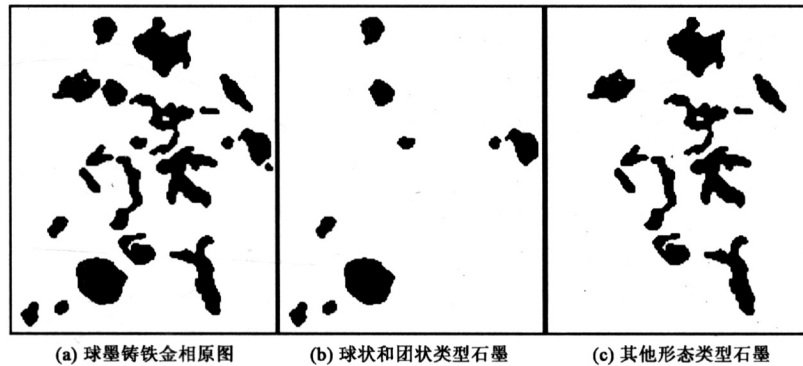


图2 球化不良的球墨铸铁石墨数量及分布

Fig.2 The amount and distribution of abnormal nodularizing graphite

图3是一组典型机械性能良好的球墨铸铁金相显微图像及其判别分类后的结果，结果显示石墨大

部分呈团状分布，一部分呈球状分布，两种石墨分布都较为分散。

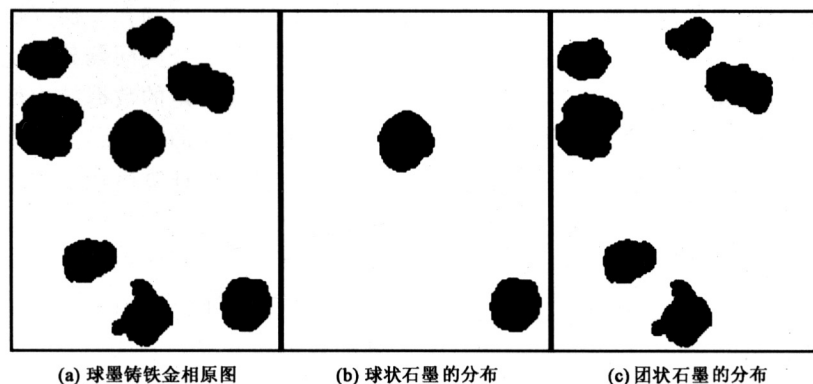


图3 球状石墨及团状石墨的数量及分布

Fig.3 The amount and distribution of spherical and agglomerate graphite

上述两幅测试金相图像均采自文献[12], 实验所得的分类结果与文献中对该两幅金相图像的评价基本一致。

由实验结果可以看到, 图像的分类结果能清晰地准确地反映各种形态类型的石墨数量及分布的情

况, 有效地辅助了实际球墨铸铁生产研究中的分析和设计。图3中球状和团状石墨的形态特征量及相应形态类型的关联度计算结果如表2所示, 石墨是从上到下, 从左到右地编号的。

表2 石墨的形态特征量及关联度计算结果

Table 2 The computing results of graphite morphology features and dependent degrees

石墨	特征量						关联度			
	似圆度	形状参数	球状性	圆形性	矩形度	迂曲度	圆形	非圆形	球状	团状
1	0.76	1.15	0.57	7.36	0.73	1.61	0.14	-0.38	-0.36	0.32
2	0.70	1.22	0.51	6.68	0.70	1.52	0.09	-0.29	-0.41	0.24
3	0.83	1.23	0.63	10.66	0.72	1.62	0.22	-0.45	-0.12	0.17
4	0.87	1.09	0.77	15.66	0.72	1.58	0.26	-0.61	0.11	-0.12
5	0.62	1.37	0.48	4.50	0.68	1.56	0.06	-0.14	-0.56	0.01
6	0.75	1.17	0.60	7.35	0.78	1.62	0.15	-0.38	-0.35	0.34
7	0.69	1.63	0.42	5.54	0.58	1.83	0.08	-0.13	-0.51	0.09
8	0.86	1.08	0.71	14.13	0.79	1.55	0.22	-0.57	0.04	-0.01

4.2 与现有识别方法的比较

传统的模式识别理论中, 分类器的构造需要采集大量的样本和长时间的学习训练, 因而对于如球墨铸铁石墨形态识别等特定的工程领域应用来说, 往往缺乏设计的简单性和实现的高效性。运用可拓学方法对球墨铸铁石墨形态识别, 其设计和实现的过程主要集中在建立石墨形态识别的物元模型上, 因而识别问题在设计和实现上得到了简化, 这在工程领域应用上有着实际意义。

在工程应用上, 模糊模式识别方法也是一种较为常用的识别方法。为对比可拓识别方法与模糊识别方法在球墨铸铁石墨形态识别中的差异, 笔者构造了用于识别石墨形态的隶属函数, 并运用最大隶属函数原则对图3中的球状和团状石墨进行形态识别^[13], 隶属度计算结果如表3所示。

表3 石墨形态的隶属度计算结果

Table 3 The computing results of fuzzy memberships about the graphite morphology

形态类型	1	2	3	4	5	6	7	8
圆形	0.67	0.61	0.69	0.90	0.44	0.66	0.36	0.88
非圆形	0.16	0.19	0.13	0.06	0.26	0.15	0.26	0.08
球状	0.36	0.40	0.48	0.73	0.29	0.41	0.37	0.69
团状	0.93	0.87	0.79	0.46	0.57	0.86	0.45	0.50

两种方法的分类结果相同, 但是计算结果所代表的意义却有所不同。在模糊识别中, 隶属函数的

取值范围为 $[0, 1]$, 用于描述事物具有某种性质的程度。然而在可拓识别中, 关联函数的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$, 则既可以描述事物具有某种性质的程度, 也可以描述事物不具有某种性质的程度。对于某一个待识别石墨对象, 关联度能从正反两方面反映它属于或不属于某一形态类型的程度, 而对于多个待识别石墨对象, 同一形态下的关联度也能比较出多个石墨对象间的形态差异, 因此, 在计算结果上关联度所代表的意义比隶属度更为丰富和深刻。

5 结语

通过物元分析建立物元模型, 能简洁地表示某一工程领域的知识和经验。利用可拓集合和关联函数, 把事物的性质定量地描述出来, 可以对某一类事物进行识别。以物元变换方法建立起来的可拓分类树, 把复杂的分类问题分解成若干层次的简单判别子问题, 其特定的数据结构形式为具体的计算机实现提供了可靠的保证。

各种材料的计算机辅助分析与设计是材料科学中的一个重要的研究内容, 它综合了材料科学、计算机科学、人工智能与模式识别、图像处理与分析等多门学科的不同方面的应用。可拓学系统解决问题的理论和方法, 为这一方面的研究提供了一种新的思路和途径, 同时该方法具有一定的工程价值, 可直接应用到各种实际的金相分析系统中。

参考文献

- [1] 姜传海,安万远. 铸铁中石墨形态及其分布的定量研究[J]. 物理测试,1989,(1): 8~12
- [2] 蔡文,杨春燕,林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学出版社,1997. 202~206
- [3] 中国机械工程学会铸造专业委员会. 铸造手册[M]. 北京:机械工业出版社,1993. 251~255
- [4] 章毓晋. 图像处理和分析基础[M]. 北京:高等教育出版社,2002
- [5] 朱志刚,林学闯,石定机. 数字图像处理[M],北京: 电子工业出版社,1998. 427
- [6] 张远鹏,董海,周文棱. 计算机图像处理技术基础[M]. 北京:北京大学出版社,1996. 213~215
- [7] 何斌,马天予,王运坚,等. Visual C++ 数字图像处理[M]. 北京:人民邮电出版社,2001. 435~444
- [8] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1992. 267~269
- [9] 吴逸飞. 模式识别——原理、方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2002. 124~125
- [10] 严蔚敏,吴伟民. 数据结构[M]. 北京:清华大学出版社,1997. 118~121
- [11] 蔡文,杨春燕,何斌. 可拓逻辑初步[M]. 北京: 科学出版社,2003. 24~25
- [12] 李炯辉,施友方,高汉文. 钢铁材料金相图谱[M]. 上海:上海科学技术出版社,1981. 175~195
- [13] 李洪兴,汪群,段钦治,等. 工程模糊数学方法及应用[M],天津:天津科学技术出版社,1991. 195~224

Recognition of Graphite Morphology in Nodular Cast Iron Based on Extenics

Chen Zhibin¹, Yu Yongquan¹, Yang Shaomin²

(1. *Institute of Intelligent Engineering, Faculty of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China*; 2. *College of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510640, China*)

[Abstract] The basic types of graphite morphology in nodular cast iron is introduced. According to the graphite morphological features, matter-element analysis theory is applied to establish the matter-element model for graphite morphology recognition. In this paper, extension classification tree is proposed. The way of construction and realization of extension classification tree is given. Extension classification tree is used to identify the graphite morphology. The typical experiment results are given. The method is compared with other current recognition methods.

[Key words] matter-element model; extension classification tree; graphite morphology; nodular cast iron