

何祚芝 编著

蠕墨铸铁 理论与实践

RU MO ZHU TIE LI LUN YU SHI JIAN

机械工业出版社

蠕 墨 铸 铁

理 论 与 实 践

何祚芝 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书介绍了国内外蠕墨铸铁生产和研究所取得的进展；在分析蠕墨铸铁一次结晶特征的基础上，介绍了蠕墨铸铁性能的特点以及影响性能的某些因素；此外还介绍了蠕墨铸铁的化学成分、蠕化处理工艺、质量控制等，提出了稳定生产蠕墨铸铁件所应采取的工艺措施，最后列出了工业应用的典型实例以供参考。

本书可供从事铸造的工程技术人员、研究单位和有关大专院校师生参考，对研究材料的科技人员，也有一定的参考价值。

蠕 墨 铸 铁
——理论与实践——
何祚芝 编著

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 5 5/8·字数 121 千字

1985年11月北京第一版·1985年11月北京第一次印刷

印数 0,001—3,450 定价 1.40 元

统一书号: 15033·6048

编著者的话

蠕墨铸铁即蠕虫状石墨铸铁，它是在研究球墨铸铁过程中出现的一种新型工程材料。早在1947年英国的莫罗在研究用钒处理球墨铸铁的过程中，就发现了蠕虫状石墨，但是当时主要研究如何获得球状石墨，对蠕虫状石墨没有引起重视，直到1965年才由美国爱斯特斯等人首先提出建议应用蠕墨铸铁，从而发展成一种新的材质。

对于蠕虫状石墨的称呼，在发展的初期曾引起了一些混乱，各国的称呼不一，有称“伪片状”、“准片状”、“厚片状”、“珊瑚状”、“致密状”、“似片状”等等。1977年在国际铸造会议上成立了蠕墨铸铁委员会(简称7.6委员会)，该委员会曾召开了多次会议讨论这种石墨铸铁的命名问题，经过反复讨论，最后决定用蠕虫状/致密状石墨铸铁(Vermicular/Compacted Graphite Cast Iron)，或者单用其中一种也可以，即单用蠕虫状石墨铸铁(Vermicular Graphite Cast Iron)或致密状石墨铸铁(Compacted Graphite Cast Iron)。

蠕虫状石墨形态的特点，是其石墨干部呈表面不平整的短、粗片状，其长与厚的比值比片状石墨小，而石墨端部与球状石墨类似是圆钝的。蠕虫状石墨在共晶团内部是互相联结的，与片状石墨相类似，但是蠕虫状石墨的端部与共晶团边缘有一定的间隔，这点又不同于片状石墨，而又与球状石墨类似。正由于蠕虫状石墨的这些特点决定了蠕墨铸铁的性能既不同于灰铸铁，又不同于球墨铸铁。它具有接近于球墨

铸铁的强度、刚性，一定的韧性，良好的耐磨性、热疲劳性能，又具有接近于灰铸铁的铸造性能和热传导性能。这些独特的综合性能，越来越引起人们的注意。在近十几年内，在英国、美国、奥地利、德意志联邦共和国、苏联、日本、罗马尼亚以及我国都相继开展了大量的研究工作。一方面研究蠕墨铸铁的生产方法，其中包括蠕化剂、处理工艺的稳定性，蠕墨铸铁的性能及质量检验方法等；另一方面，采用了先进的试验方法，例如：深腐蚀、热氧腐蚀、离子轰击等方法，利用电子扫描显微镜深入地研究蠕虫状石墨的形貌及其结晶特征。这些研究作为人们认识及使用蠕墨铸铁创造了极其有利的条件。

到目前为止，蠕墨铸铁已逐步应用于生产，比较典型的铸件有大马力柴油机缸盖、钢锭模、液压件、排气管、机床件、模具等，其中最大的铸件重量已达60t。在经济上已取得比较显著的成效。随着人们对这一材质的认识深化，蠕墨铸铁的应用将会得到更进一步的发展。

本书概括与总结了国内、外蠕墨铸铁的研究及应用情况，介绍了蠕墨铸铁的结晶特征、性能、化学成分、生产工艺及质量检验等。希望本书的出版能对研究或应用蠕墨铸铁有所促进。

本书经清华大学吴德海副教授审校；在编写过程中，得到有关单位和同志的支持，提供资料和照片，特此表示感谢。

由于编者的水平有限，错误的地方一定不少，恳请同志们批评指正。

目 录

编著者的话

第一章 概述	1
一、蠕墨铸铁的产生	1
二、蠕墨铸铁的发展及应用	2
(一) 国外蠕墨铸铁的发展及应用	2
(二) 我国蠕墨铸铁的发展及应用	8
第二章 铸铁的结晶和组织	12
一、铸铁的基本组成相	14
(一) 铁素体	14
(二) 奥氏体	15
(三) 渗碳体	15
(四) 珠光体	15
(五) 石墨	15
二、铁碳状态图	16
三、灰铸铁的一次结晶特征	18
四、球墨铸铁获得球状石墨的条件及一次结晶特征	23
(一) 获得球状石墨的条件	23
(二) 球墨铸铁的一次结晶特征	24
五、蠕墨铸铁的一次结晶特征	24
(一) 蠕墨铸铁的变质特性	24
(二) 获得蠕虫状石墨的方法	27
(三) 蠕墨铸铁的共晶团	27
(四) 蠕墨铸铁的一次结晶特征	35
第三章 蠕墨铸铁的使用性能	40

一、蠕墨铸铁的物理性能	40
(一) 密度	40
(二) 热膨胀系数	40
(三) 热导率	40
二、蠕墨铸铁的机械性能	46
(一) 常温机械性能	46
(二) 高温机械性能	52
(三) 弯曲疲劳性能	53
(四) 吸振性	56
三、蠕墨铸铁的热疲劳性能	57
四、蠕墨铸铁的耐热性	65
五、蠕墨铸铁的耐磨性	67
六、蠕墨铸铁的壁厚敏感性	69
七、蠕墨铸铁的机械加工性能	71
第四章 蠕墨铸铁的化学成分	74
一、碳和硅	74
二、锰	76
三、磷	77
四、硫	78
五、稀土	80
六、镁	85
七、钙	88
八、其它元素	91
(一) 钛	91
(二) 铜	92
(三) 锑和锡	93
(四) 铈	94
第五章 蠕墨铸铁的铸造性能	95
一、流动性	95
二、收缩性	97

(一) 线收缩	97
(二) 体收缩	99
三、白口倾向	102
四、铸造内应力	103
五、衰退性	105
第六章 蠕化 (变质) 剂及蠕化处理工艺	107
一、用少量球化元素处理铁水, 使铁水不完全球化	107
(一) 用稀土混合金属处理铁水	107
(二) 用镁处理铁水	111
二、用复合合金处理铁水	113
(一) 以稀土为基的蠕化剂及蠕化处理工艺	113
(二) 以镁为基的蠕化剂及蠕化处理工艺	121
(三) 以钙为基的蠕化剂及蠕化处理工艺	127
第七章 蠕墨铸铁的质量控制及检验	129
一、蠕墨铸铁的质量控制	129
二、蠕墨铸铁的检验	130
(一) 石墨形态的测定	130
(二) 蠕化率的测定	132
(三) 炉前快速检测	133
(四) 炉后检验	137
第八章 蠕墨铸铁工业应用实例	140
一、液压件	141
二、缸盖	146
三、排气管	149
四、钢锭模	151
五、榨糖机轧辊	154
六、大型机床铸件	155
七、底座、飞轮、操纵器外壳等	157
八、制动闸盘	159

附录

一、西德铸造学会球墨铸铁专业委员会第12号报告:	
铸铁的牌号及性能	165
二、美国蠕墨铸铁标准草案	166
三、国际蠕墨铸铁委员会标准草案	166
四、蠕墨铸铁共晶团显示方法	166
参考文献	167

第一章 概 述

一、蠕墨铸铁的产生

铸铁是现代工业中一种重要的结构材料。它具有良好的铸造性能，可以铸成各种形状复杂的零件，还具有良好的机械加工性能、吸振性、耐磨性及对缺口不敏感性。它生产简便、成本低廉，因此被广泛地应用于机械工业及其它工业。但是灰铸铁的强度比较低，一般抗拉强度在 300N/mm^2 ($30\text{kg}\cdot\text{f/mm}^2$) 以下，它的韧性很低，几乎没有塑性，因此随着生产的发展，灰铸铁越来越适应不了工业日益增长的要求，使它的应用局限于不受冲击负荷，或只承受压力的部件上，因而它的应用范围受到了很大的限制。为此一些重要的零件，不得不采用成本较高的碳钢、合金钢、有色金属等材质。

铸铁和钢都是铁碳合金，然而两者的性能却有很大的差别，这是因为金属材料的机械性能和它的显微组织有密切的关系。铸铁含碳量高 ($>2.0\%$)，有相当一部分的碳以自由石墨的形式镶嵌在金属基体里。钢含碳量低，基体中没有石墨。石墨的机械性能极低，抗拉强度只有 $5.0\sim 10.0\text{N/mm}^2$ ($0.5\sim 1.0\text{kg}\cdot\text{f/mm}^2$)^[1]，几乎没有塑性，因而在基体中减少了铸铁承受负荷的能力。另外在灰铸铁中石墨以片状形式存在，它的端部呈尖角形，分布在基体中相当于裂口，在尖端处形成了应力集中，大大地降低了铸铁的机械性能。

为了提高铸铁的机械性能，以满足工业发展的要求，几十年来开展了大量的试验研究工作。孕育铸铁通过孕育的方法，虽然细化了共晶团，改善了石墨大小及分布，使抗拉

强度提高到 400N/mm^2 ($40\text{kg}\cdot\text{f/mm}^2$), 但是并没有改变石墨的形状, 因而延伸率仍接近于零。球形石墨对基体的割裂作用最小, 而且还可以使基体的韧性及塑性充分利用, 因此世界各国都努力研制球状石墨铸铁。1947年英国莫罗(Morrogh)研究用铈处理铁水使石墨球化。1948~1949年苏联及美国均试验成功用镁作球化剂使石墨成球形的方法, 使机械强度提高到 600N/mm^2 ($60\text{kg}\cdot\text{f/mm}^2$)以上, 而且有相当的韧性及塑性, 因此球墨铸铁一经试验成功, 就迅速地得到了推广应用。

最近十几年来, 随着球墨铸铁的研究及推广应用, 在铸铁材料方面又出现了一种介于球墨铸铁与灰铸铁之间的新材料, 即蠕虫状石墨铸铁(简称蠕墨铸铁)。蠕虫状石墨是介于球状与片状之间的一种过渡型石墨, 因而使这种铸铁的材质性能也介于球墨铸铁与灰铸铁之间。简要地说, 蠕墨铸铁具有接近于球墨铸铁的强度、刚性, 一定的韧性, 良好的耐磨性; 另一方面, 它又具有接近于灰铸铁的铸造性能和热传导性能。因此这种铸铁材料愈来愈引起人们的注意, 并且已开始在生产上获得了应用。

二、蠕墨铸铁的发展及应用

(一) 国外蠕墨铸铁的发展及应用

早在1947年英国莫罗在研究用铈处理球墨铸铁的过程中, 就发现了蠕虫状石墨。但是莫罗当时及以后的很多研究工作主要集中于研究怎样获得球状石墨及球墨铸铁的性能。而蠕虫状石墨则被认为是处理球墨铸铁失败的产物, 是在球化剂加入量不足、球化衰退或球铁厚大断面中出现的变态石墨, 认为没有实用价值, 因此没有引起重视。

1965年由美国的爱斯特斯(J. W. Estes)及史奈顿温得

(R. Schneidenwind) 首次提出建议采用蠕虫状石墨铸铁, 1966 年又由谢林(R. D. Schelleng)继续提出应用蠕墨铸铁。虽然他们已提出蠕墨铸铁的优良性能及应用范围, 但是用碳化钙-氧化镁-稀土混合物、或用镁(或稀土)附加干扰元素钪的处理方法在当时由于在炉前还不能快速而准确的测定原铁水中的硫量, 因此并没有得到广泛的应用。

自从用镁处理成功球墨铸铁以后, 稀土已不再是唯一的变质剂。虽然用铈处理能得到球墨铸铁, 但是它要求原铁水具有过共晶成分, 而且当时价格昂贵, 因此用铈处理球墨铸铁实际上没有使用。铈仅仅是为了消除球铁中有害元素而以微量附加到球化剂中。奥地利的研究工作者在60年代研究了稀土对球铁原铁水的影响, 从中得到了生产蠕墨铸铁的可靠方法, 于1968年获得奥地利专利。自此, 奥地利大量生产铁素体蠕墨铸铁卡车及拖拉机零件。

在民主德国大型柴油机生产中, 为了使高压零件安全可靠, 要求灰铸铁的抗拉强度超过 300N/mm^2 , 延伸率超过 2%, 以满足大型柴油机缸头输出功率的需要。设计者经过试验研究, 认为蠕墨铸铁是比较合适的材质。1970年开始成功地生产船用柴油机缸盖。到1976年按铈-稀土混合金属方法 (Ce-Re方法) 进行系列的生产。1979年日本 UBE 机器厂也采用了这一工艺过程。

美国在1965年的一项专利中提到, 通过加入一种合金使铁水含 0.05~0.06% 镁、0.15~0.50% 钪、0.001~0.015% 稀土金属就能得到蠕虫状石墨组织。到1976年美国矿业公司将这些主要元素按一定比例配制成 Mg-Ti 系合金, 作为商品供应市场, 称为“Foote”合金。这样才使蠕墨铸铁在近几年内有了比较多的应用。

为了使蠕墨铸铁有良好的性能，国外一般认为必须保证蠕虫状石墨含量达到80~90%。这种蠕虫状石墨按VDG-Merkblatt P441标准(德国铸造协会标准P441，见图1)为Ⅲ形石墨，按美国材料试验协会ASTM A247为Ⅳ形石墨(图2)。蠕虫状石墨的命名在1961年由多诺赫(C.K. Donoho)在他的石墨分级表中业已提出，1962年被美国铸造协会在其“球墨铸铁金相组织”中所采用。

但是在1969年，由基伯特(G.N.J. Gilbert)及戴依(M. G. Day)引起了一些混乱，他们用“蠕虫状”来称呼类似D型的细小片状石墨。这种细小片状石墨是在含硫量非常低($S < 0.002\%$)的情况下通过快速冷却得到的(见图3)。这种石墨从放大三千倍的三维形态看上去象蠕虫状，因此有些人称这种石墨为蠕虫状石墨。

但是，路克斯(B. Lux)及其合作者通过深腐蚀，在4000倍下观察了这种细小的片状石墨(见图4)，确定它是有高度分叉但不是蠕虫的片状石墨，所以只能称为珊瑚状石墨。同时用锆处理铁水也可以得到这种石墨。珊瑚状石墨的命名也为其他铸造工作者所接受。

1974年英国铸铁研究学会(BCIRA)在研究图1所示的Ⅲ形石墨的铸铁时，选用了新的命名——致密状石墨铸铁(Compacted Graphite Cast Iron)以代替蠕虫状石墨铸铁(Vermicular Graphite Cast Iron)，这是因为他们已经把这种细小片状石墨称为蠕虫状石墨了。

总之，在国际上对蠕虫状石墨的命名引起了一定的混乱。随着蠕墨铸铁的发展，1977年在第44届国际铸造年会上正式成立了“蠕墨铸铁委员会”(即7.6委员会)。会上首先讨论了石墨命名的问题，经过多次磋商确定了蠕虫状与致密状并

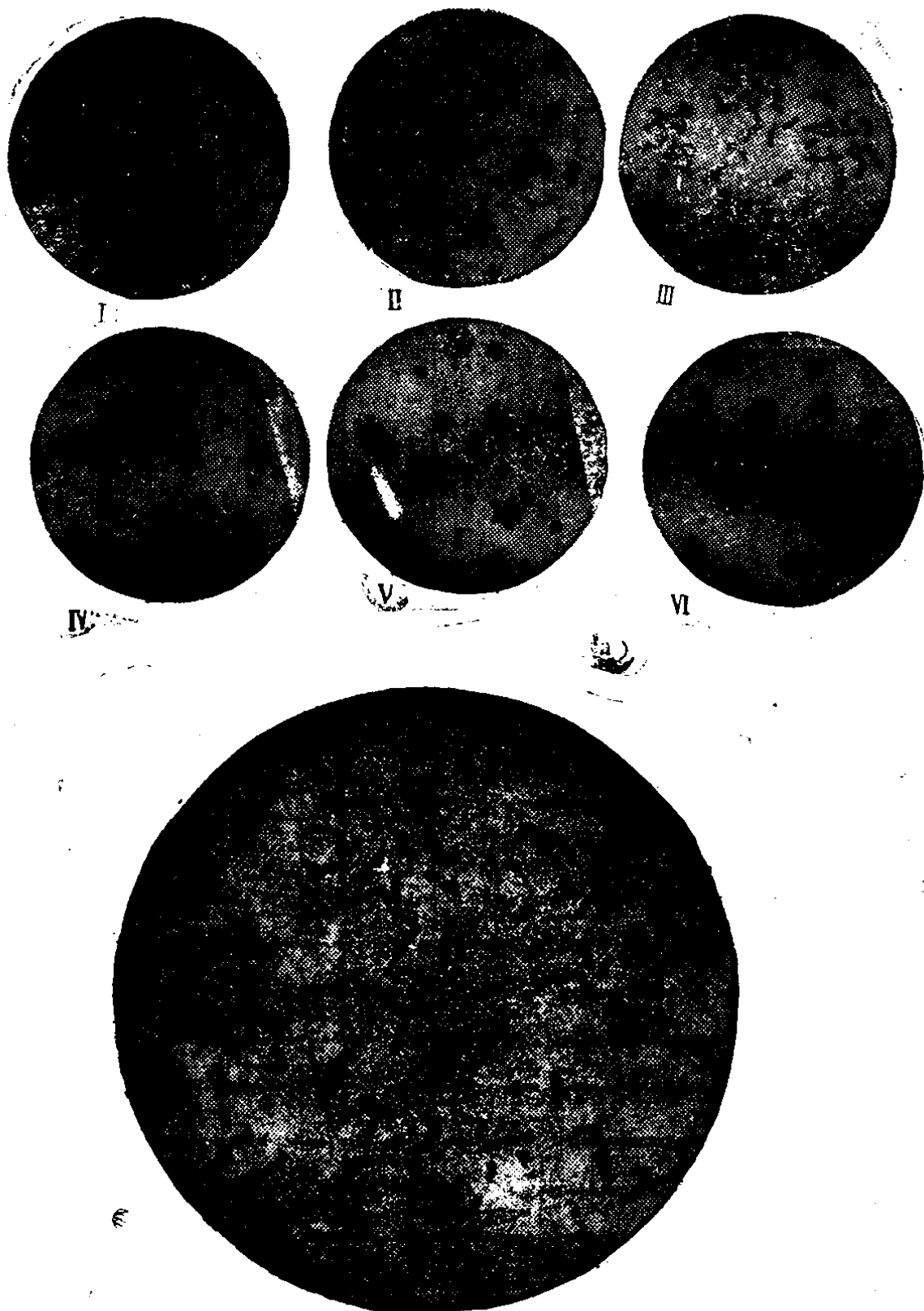


图1 德国VDG——Merkblatt P441石墨形状分级图
 a) I ~ VI形石墨形状图 b) Ⅱ形石墨

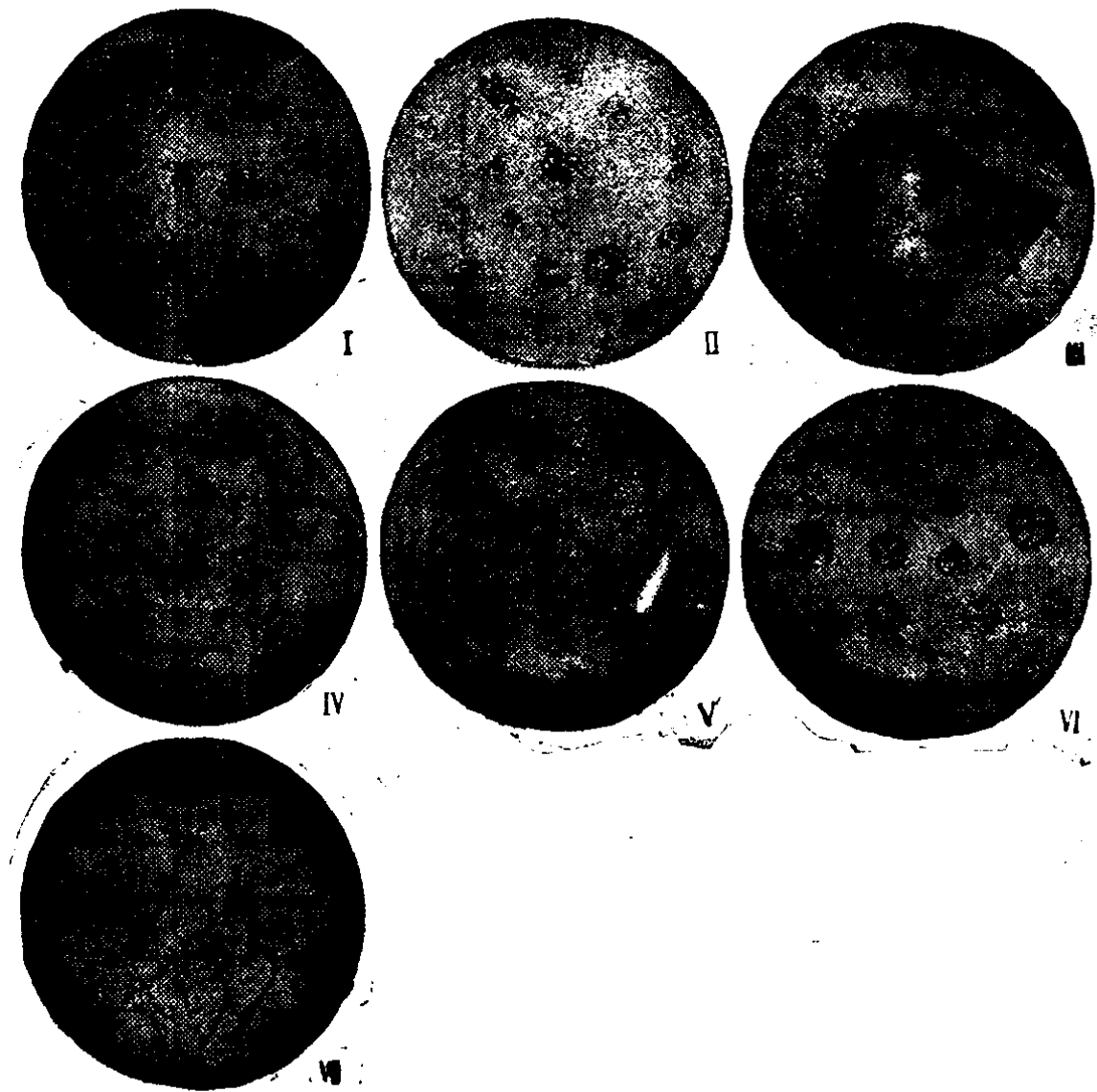


图2 美国ASTM 技术标准石墨形状分级图

用的命名，即单独用蠕虫状石墨铸铁或致密状石墨铸铁；或并用均可。到目前为止，用蠕虫状石墨铸铁命名的有奥地利、民主德国、德意志联邦共和国、法国、荷兰、意大利、挪威、罗马尼亚、瑞士、苏联、瑞典、捷克及匈牙利。用致密石墨铸铁命名的有美国、英国、巴西和日本^{〔2〕}。

目前国外生产中使用效果较好的蠕墨铸铁件有大马力柴油机缸盖、钢锭模、排气管、液压件、壳体、刹车盘、飞轮、

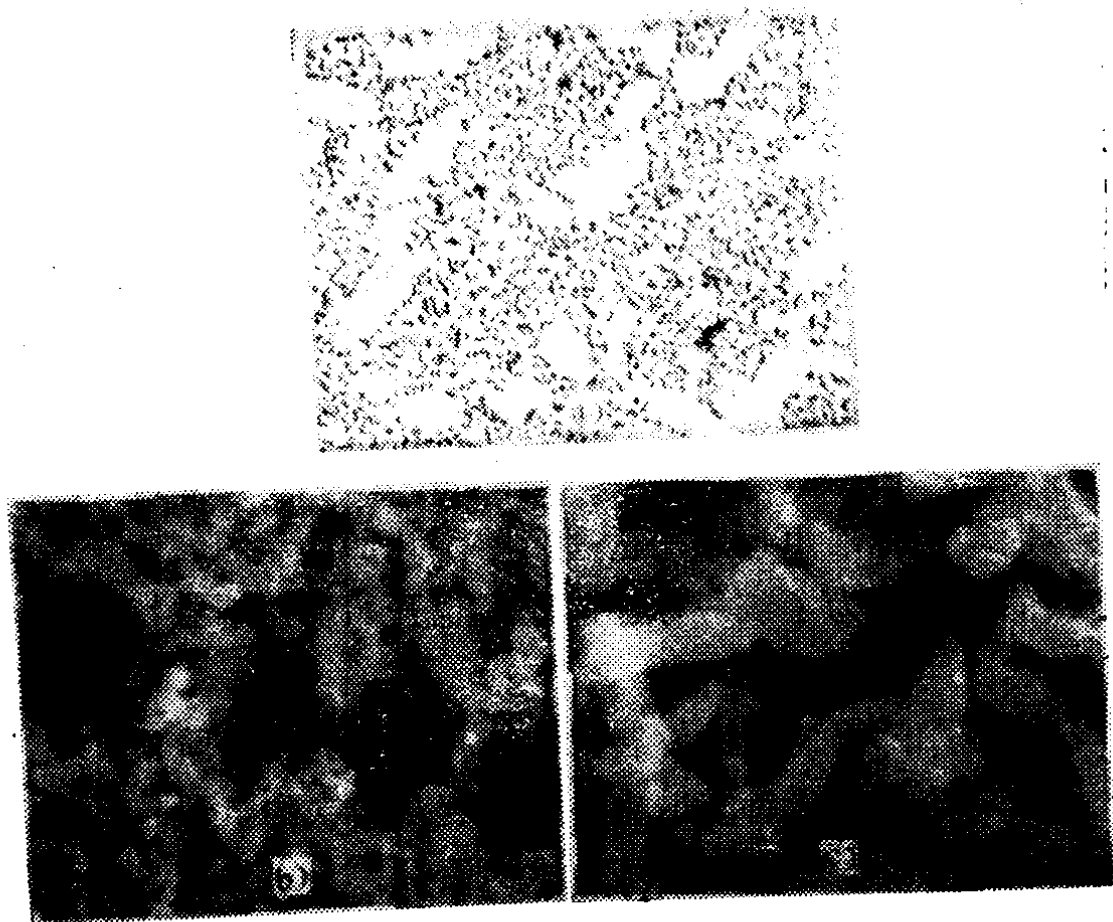


图3 珊瑚状石墨

a) 光学显微镜照片 $\times 200$ b) 扫描电镜照片 $\times 1000$
c) 扫描电镜照片 $\times 3000$



图4 路克斯观察到的细小片状石墨，即珊瑚状石墨
(光学显微镜照片)

8
滑轮、齿轮等。最大的铸件是钢锭模，重达60t。但是，总的来说，它还正处在试生产和小批生产阶段。目前国外研究工作正集中在寻找更合适的变质剂、稳定的生产工艺、蠕墨铸铁的质量检验方法等。

（二）我国蠕墨铸铁的发展及应用

我国从1965年开始研究稀土高强度铸铁，但是早在这之前，在生产球墨铸铁的过程中，由于球化不良或球化衰退，已经发现蠕虫状石墨，当时人们取名为“厚片状石墨”，在球墨铸铁金相标准中也采用这一名称。到1975年随着国外蠕墨铸铁的发展，为了统一称呼，我国也开始引用蠕虫状石墨这一名称。

从我国蠕墨铸铁的发展来看，可以分为两个阶段：

第一阶段为代替废钢生产高强度灰铸铁的阶段。1965年我国废钢短缺，出现了供不应求的情况。大家知道，高强度灰铸铁的生产需要大量废钢，一般炉料中要配入25~40%。一些机床厂、材料试验机厂、起重机器厂等单位有不少高强度灰铸铁的生产任务，由于废钢短缺，极大地影响着生产计划的完成。为了解决这一矛盾，最早由山东省机械设计研究院与有关工厂协作，利用我国丰富的稀土资源，研究稀土在铸铁中的应用。经过反复试验，总结出不加废钢，用稀土处理铁水生产高强度灰铸铁（即蠕墨铸铁）的生产工艺，并建立了稀土加入量的概算式，为稀土灰铸铁的应用打下了基础。在这基础上，山东省机械设计研究院与济南材料试验机厂、济南机床铸造厂协作成功地生产了30t、60t材料试验机底座、M114磨床床身、T611卧式镗床床身等铸件。

与此同时，武汉重型机床厂开始试制并生产了稀土灰铸铁件。最大件是B21500洗刨床工作台，重约40t。该工作台