

# 蠕虫状石墨铸铁文集

教学科研参考资料

---

陕西机械学院铸造教研室

一九七九年四月

TF 193  
1  
2

## 前 言

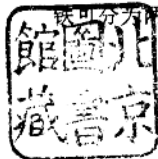
蠕虫状石墨铸铁在国外是近年发展起来的一种新型工程材料，介于片状和球状石墨铸铁之间具有独特的组织和性能。英、美、苏和西德等国已逐渐发展成为一种在商业生产上应用的铸铁材料。

从球墨铸铁问世以来，人们就知道铸铁中存在着蠕虫状石墨形态。但是早期人们往往把它看成为球墨铸铁中石墨衰退的一种形式，或者认为是介于片状石墨和球状石墨之间的一种过渡形式，由于工艺不稳定而没有给予足够的注意。近十年来蠕虫状石墨铸铁却普遍引起世界各国的重视，在英、美、西德、罗马尼亚、苏联、奥地利、加拿大、日本、法国、波兰等国相继开展了大量的研究工作并认为：这种铸铁有突出的优点，它的强度和韧性接近于球墨铸铁，而导热性、吸震性、铸造性能和加工性能等却更接近于灰铸铁，似有公认为一种新型铸铁材料的趋势。例如：1977年10月在美国芝加哥城举办的国际金属材料展览及讨论会，作为新型工程材料展出了这种铸铁，并广为宣传。据报道，英国铸铁研究协会1978年进行了这种铸铁的生产方法、化学成份、基体组织、铸件截面敏感性等重要因素的综合研究，以期指导稳定生产，并建议推广和扩大应用范围。在西德已进行了批量生产，某铸造厂每年生产4200吨蠕虫状石墨铸铁。并有报道已广泛用于船用大马力柴油机缸盖，内燃机齿轮、钢锭模等铸件中。

在我国，早在60年代，不少单位就开始研制稀土灰铸铁，和国外蠕虫状石墨铸铁从石墨类型看实为一类。为了便于和参加这方面研制的有关同志交流和讨论，并积累教学参考资料，我们查阅了一些国外文献，选择部份有代表性的文章，编辑成这本译文集。共21篇译文。

历来在国外文献报道蠕虫状石墨铸铁中蠕虫状一词，所用名称很多，诸如：guasi-flake、Aggregated flake、Chunky、stubby、up-graded、Semi-nodular、Floccular、Worm-like、Vermicular、Compacted、Compacted-flake等等。但归纳起来可分为：七十年代以前的文章多偏重于研究大断面球铁件中蠕虫状石墨的产生和防止，所用名称也较多，而近年来作为一种独特的新型材料以后，命名上已逐渐归纳为Compacted或Compacted-flake及Vermicular两类。前者作者意图尽量反映石墨在三维空间的真实形象，后者形象地反映在光学显微镜下石墨的形态。所以我们保留了原文中的名称以利对作者原意的理解。本译文集均未作统一，而仅在原文为同一词时尽量译成同一语，如“Compacted”译为“紧密”，“Compacted-flake”译为“紧密片状”、“Vermicular”译为“蠕虫状”等等。Compacted一字国内译文中曾有用“致密”或“密集”等，而我们考虑到“紧密”更能准确地反映蠕虫状石墨在三维空间的真实形态。

本译文集在选择译文时尽量选了一些综合论述的文章，也有关于蠕虫状石墨铸铁组织、性能、处理合金、处理方法、质量控制及应用方面的内容。又考虑到国外获得蠕虫状石墨铸铁分为两类方法，一种如英美多采用含Mg、Ti、Ca并有少量Ce的单一加入合金，另一种



A793202

17/5/72

1

如在苏联、西德等国多采用稀土混合金属，故我们力求兼顾了这两个方面的内容。再有蠕虫状石墨铸铁可否推广并扩大应用范围，在很大的程度上取决于能否稳定生产工艺。为此，我们收集部份国外制造蠕虫状石墨铸铁的专利，以供生产单位参考。

关于在大断面球墨铸铁中蠕虫状石墨的产生和防止，沈阳铸造研究所和佛山球铁研究所出版的“球墨铸铁球化和孕育机理”译文集中已有一篇编译文献，所以我们仅选择了一篇译文，以免重复。

郑州纺织机械厂陈农同志热情的为本译文集提供了译文。西安内燃机配件厂技术科为联系译本文集的印刷给予了大力支持，借此机会我们表示衷心的感谢。

由于时间仓促，水平所限，本译文集不论在译文内容选择、译文质量等方面，错误和不当之处在所难免，恳切地希望读者批评指正。

铸造教研室 铸造合金教学组

1979年3月

# 目 录

|                                                |                       |
|------------------------------------------------|-----------------------|
| 前言.....                                        |                       |
| 紧密石墨铸铁的生产及性能..... (1)                          |                       |
| (英) G.F.Sergant 著<br>E.R.Evans                 | 朱锦侠 译<br>王貽青 校        |
| 加入单一合金生产紧密石墨铸铁..... (15)                       |                       |
| (英) E.R.Evans J. V. Dawson 著<br>(美) M.J.Lalich | 王貽青 译<br>黄积荣 校        |
| 关于中间形状(蠕虫状)石墨铸铁结晶特征的一些探讨..... (25)             |                       |
| (罗) L.Sofroni 著<br>I.Riposan<br>I. Chira       | 姜淑艳 译<br>王 琥 校        |
| 铸铁中蠕虫状石墨的结晶与构造..... (37)                       |                       |
| (苏) Н.Н.Александров等著                          | 王 琥 译<br>王家圻 校        |
| 紧密石墨铸铁镁处理效果的稳定性..... (39)                      |                       |
| (罗) I.Riposan 等著                               | 王 琥 译<br>王貽青 校<br>王家圻 |
| 中间形状石墨铸铁的生产..... (47)                          |                       |
| (加拿大) E.Compomanes 著<br>R.Galler               | 姜淑艳 译<br>王 琥 校        |
| 生产蠕虫状石墨铸铁用的稀土复合变质剂..... (60)                   |                       |
| (苏) М.М.Левцтан著                               | 王 琥 译<br>王家圻 校        |
| 从机械性能评价紧密石墨铸铁石墨形态的紧密性..... (62)                |                       |
| (美) N.P.Lillybeck 等著                           | 王貽青 译<br>黄积荣 校        |
| 高强度蠕虫状石墨铸铁的性能和生产工艺..... (69)                   |                       |
| (苏) Н.Н.Александров著                           | 王家圻 摘                 |

|                                   |       |           |       |
|-----------------------------------|-------|-----------|-------|
| 稀土对铸铁组织和性能的影响.....                | (72)  |           |       |
| (美) M·J·Lalich 著                  |       | 时胜利 王家忻 摘 |       |
| 紧密石墨铸铁在内燃机铸件上的应用.....             | (74)  |           |       |
| (美) R·R·Oathout 著                 |       | 黄积荣 译     | 王貽青 校 |
| Д50型发动机缸套用蠕虫状石墨铸铁.....            | (78)  |           |       |
| (苏) Ф·К·Бобилев 等著                |       | 王 琬 译     | 王家忻 校 |
| 蠕虫状石墨高强度铸铁在柴油机零件上的应用.....         | (80)  |           |       |
| (苏) Н·Н·Алехсендров 著             |       | 王家忻 摘     | 王 琬 校 |
| Б·С·Милвиан                       |       |           |       |
| 球墨铸铁的厚大铸件.....                    | (82)  |           |       |
| (瑞士) H·Mager 著                    |       | 黄积荣 摘     | 王貽青 校 |
| 铸铁中块状石墨及其形成机理的一些看法.....           | (84)  |           |       |
| (奥地利) P·Strizik 等著                |       | 黄积荣 摘     | 王貽青 校 |
| 高强度铸铁制法.....                      | (93)  |           |       |
| (日) 开放特许                          |       | 陈 农 译     |       |
| 制玻璃型用的铸铁.....                     | (95)  |           |       |
| (日) 开放特许                          |       | 陈 农 译     |       |
| 紧密石墨铸铁的制法.....                    | (96)  |           |       |
| 美国专利                              |       | 陈 农 译     |       |
| 一种制造细晶粒蠕虫状石墨铸铁的方法.....            | (101) |           |       |
| 英国专利                              |       | 陈 农 译     |       |
| 供铸铁增加强度用的含N <sub>2</sub> 添加剂..... | (106) |           |       |
| 美国专利                              |       | 陈 农 译     |       |
| Foote公司生产的紧密石墨铸铁铸件.....           | (112) |           |       |
| (美) Foote公司报导                     |       | 黄积荣 译     | 王貽青 校 |

# 紧密石墨铸铁的生产及性能

〔英〕 G.F. Sergeant, E.R. Evans

## 〔摘 要〕

紧密石墨铸铁具有介于片状和球状石墨铸铁之间的组织和性能,虽然多年来在实验范围内它们已以不同的名字为人们所了解,但仅在近几年才发展成为一种商业上的应用材料。本文叙述了这些铁及其可能是可靠的生产方法,并对使用将钼、钛和铈综合在一起的处理合金作了详细说明。

高强度、一定的韧性和良好导热性的结合使得紧密石墨铸铁对一些工程用途,特别是对于抗热疲劳铸件例如:钢锭模和刹车部件有吸引力,同时用它铸造高强度的复杂形状铸件比用球铁容易铸出健全的铸件。本文介绍了若干说明机械、物理和铸造性能的试验结果,并记述了一些适宜的质量控制方法和非破坏性试验方法。

## 紧密石墨铸铁是什么?

近年来一组新材料已加入到商业生产铸铁的系列中来了,它们通称为紧密石墨铸铁,具有介于片状和球状石墨铸铁之间的性能,并且像那些材料一样,由于有独特的石墨结构而被赋予一定特点,这种独特的石墨结构可以在显微镜下明显地辨认出来,如图1所示由具有园端的短厚片石墨组成并由此得名为紧密状石墨。只有用深腐蚀的试样在显微镜下鉴别它的三维形状才能充分评价这种石墨结构的真正特征。图2表明:借助

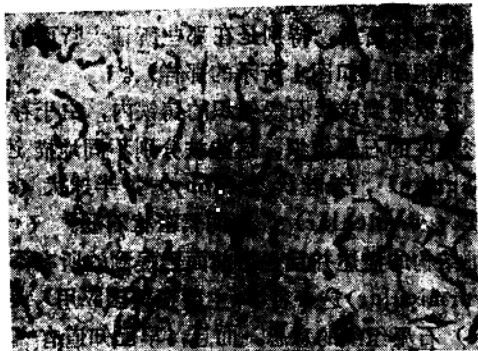


图1 紧密石墨铸铁未腐蚀的显微组织

扫描电镜观察,紧密状石墨的颗粒是联成为一枝叉的结构——有点类似灰铸铁中的片状石墨——而不像球铁石墨球那样互相分离。为了进行比较,图3示出普通片状石墨铸铁试样在扫描电镜下的形貌,这种石墨也具有明显的枝叉骨架,但为更宽且更像板状的枝叉。

紧密状石墨组织不是什么新东西,多年前已用不同方法试验地制得,并且过去曾用许多不同的名字来称呼它。1948年研究用铈生产球铁的Morrogh<sup>1</sup>将该元素加到亚共晶和过共晶铸铁中都制得过紧密状石墨并称其为“类片状”石墨组织。如用加镁法制球铁的发明者们所说明的那样:当铸铁中含有有限的镁,其含量将不足以形成球状石墨时也可能形成紧密状

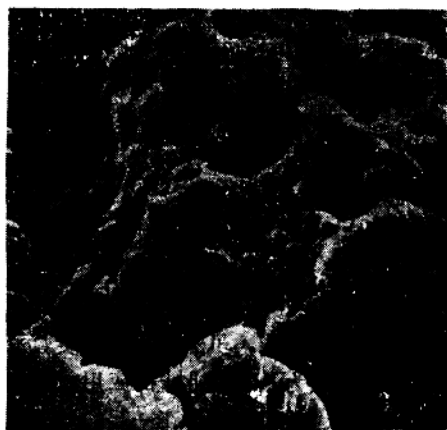


图2 经深腐蚀在扫描电镜下观察到的紧密状石墨结构。×2150

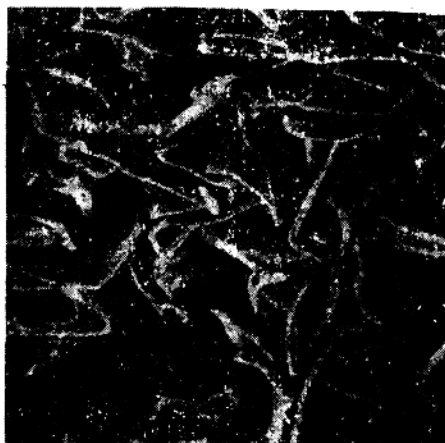


图3 经深腐蚀在扫描电镜下观察到的普通片状石墨的结构。×125

石墨，他们称其为“紧密片状”石墨<sup>2</sup>。Morrogh也描述过这种组织<sup>3</sup>，而Day<sup>4</sup>较迟但能说明用不同方法制得的紧密状石墨的三维形貌与图2所示类似。1953年Dowson和其他一些人<sup>5</sup>在增高含氮量的铁内也观察到了紧密状石墨，从此广泛地报导了在高氮铁内存在各种程度的紧密状石墨，特别是在那些所谓大断面的铸件内存在<sup>6</sup>，在大断面铸件内可以产生充分生长的组织（如图1所示的那样）。

在欲得到球状石墨组织的铸铁内，由于存在干扰元素或由于镁或铈量不足而观察到不同紧密程度的石墨组织，这些被分别不同地描述为：聚集片状（aggregate flake），块状（chunky），禾茬状（stubby），半球状（semi-nodular），絮片状（floccular）和蠕虫状（vermicular）。然而紧密状石墨”（compacted graphite）这个名称，由于它是三维结构的描述并且包括前面已提到的所有不同紧密程度而被提出来。特别指出的是蠕虫状（vermicular）这个名字（主要在美国应用）是一个使用不当的名称，含有蚯蚓状（worm-like）石墨组织的意思。而且，早已知道有一种纯粹为蚯蚓状石墨的组织（它完全不同于紧密状石墨），它是在极低含硫量的铁中以适当迅速的冷却条件凝固时产生的<sup>7</sup>。那种真正的蠕虫状石墨形式已由Lux<sup>8</sup>和Day<sup>9</sup>充分地说明过了。BCIRA Broadsheet No.138<sup>10</sup>已做出一个紧密状石墨和真实的蠕虫状石墨显微组织的比较（在抛光试样和为说明三维形貌的深腐蚀试样上观察），它重点强调它们完全不同的性质。因此推荐应将蠕虫（vermicular）这个名字保留给那种纯粹蠕虫状石墨组织，虽然它也曾被称作“珊瑚状石墨”<sup>8</sup>。

与片状石墨铸铁相比，紧密石墨铸铁提高了强度而接近于球铁这一点很快被认识到了。然而，它们还具有近于片状石墨铸铁那么高的导热率，因此当要求良好的强度和良好的导热性的综合性能时，它们就具有超越于球铁的优点<sup>11</sup>。所以，早期注意力在于用它们来制造钢锭模<sup>12</sup>和包括刹车另件、汽缸以及其它小另件在内的汽车铸件<sup>13</sup>。后来人们认识到紧密石墨铸铁可能只需要较小的补缩系统并且比球铁容易解决缩松问题，因此对紧密石墨铸铁产生了

很大的全面的性趣，并且近年来对它们的商业生产方法已有了探讨和叙述。这些方法主要建立在用镁、铈（或其它稀土元素）或钆的基础上。这些元素各有优缺点，虽然有些还继续单独使用铈或其它稀土元素<sup>13</sup>，但近年来的趋势是镁与极少的铈（或其它稀土元素）同时使用。

## 紧密石墨铸铁的商业生产

单独使用镁只能在一个很窄的含镁量范围内制得完好的紧密石墨铸铁，使得生产控制很难以致于不实际。过大的加镁量导致生成球状石墨，而当镁量太低时组织中又将仅仅含有普通的片状石墨<sup>5,11</sup>，这点由图4的上面一根曲线说明。1966年提出了一个方法<sup>14</sup>，这个方法是用镁和少量铈（或其他稀土元素）处理铁水而通过含有0.15~0.5%钛所产生的作用防止生成球状石墨。然而，更近一些时候已证明镁与钛以及微量铈综合使用能以很低的含钛量（0.08~0.1%）和0.015~0.03%的含镁量可靠地制得良好的紧密石墨组织。

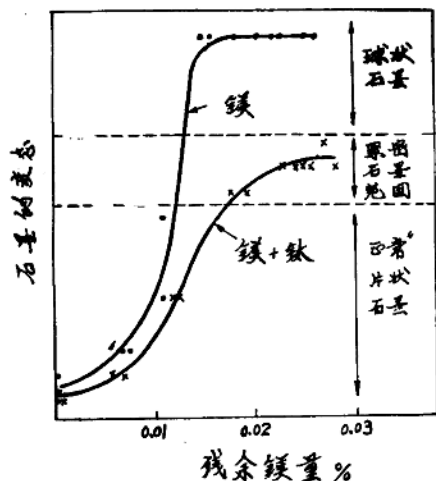


图4 制取紧密石墨组织的含镁量范围

图4说明单独用镁来制造几乎接近不可能，而镁与钛结合使用有能稳定地制得紧密石墨铸铁的优点。虽然综合添加这些元素需要高级的操作控制（实际上有些困难），但是由于BCIRA已发明了一种以适当比例配制的含有镁、铈和钛的单一添加合金而使操作控制大大地容易了<sup>11,15</sup>。由于镁和铈二者都与硫化合，为了节约添加量和尽量减少生成渣子则希望原铁水含硫0.035%或更少。这点通常可用电炉熔炼低硫炉料或将冲天炉炼的含硫较高的原铁水进行脱硫处理来达到。另一种办法，可以通过适当地增加添加剂的加入量来处理含硫较高的铁水，但是这将是一种浪费的方法。为生产紧密石墨铸铁而做的单一合金可以含有多种添加元素<sup>16</sup>以增进它们的功用，例如使得合金在一个较宽的原始含硫量范围内都有效。它们为紧密石墨铸铁的铸造生产提供了一个最便利的方法。

这种商业的单一合金一般用于包内处理或按照适合于球铁的任何处理方法来使用。这种合金的配制使得在1400℃处理含硫量为0.03%的铁水需要近1.0%的加入量以达到0.025%残留镁量。该合金有这样的优点，即：假若原铁水的硫低于0.03%，同样添加量的合金中含有足够的钛防止由于残留镁量较高而产生球状石墨。一般的这种商业合金中都含有钙，它可以在含硫量范围较宽的铁水内制得良好的紧密石墨组织。但是若铁水温度为1350℃或更低，用这种合金处理时也可能产生球状石墨（如图5所示），所以用这种合金处理时必须小心以保证铁水有足够的温度。

也可用含5%或10%镁的硅铁镁合金在包内处理含钛的铁水来制取紧密石墨铸铁。钛以钛铁或含钛废钢的形式预先加入冲天炉或电炉炉料内，钛的回收率不低于80%。铸铁或钛金



图 5a 处理温度1400℃

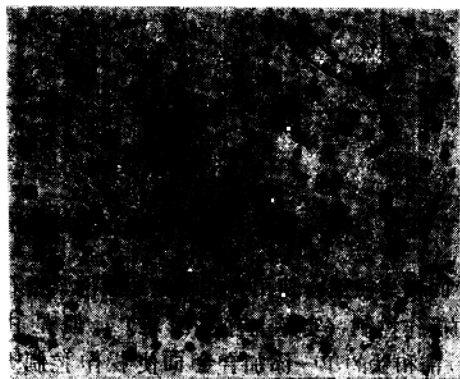


图 5b 处理温度1280℃

图5a和5b当用高钙一次合金处理铁水时，处理温度对形成石墨球的影响

量相联系，而为了使这些铸铁具有一些韧性提出含磷量低于0.06%。

当用镁——钛法生产紧密石墨铸铁的时候，有一点必须记住，即在这样的回炉料中将含有0.08~0.1%的钛，在生产球铁时，它可能妨碍形成良好的球墨组织，而在生产片状石墨铸铁时，则它又将促使产生过冷石墨，与其相联系的铁素体可能引起磨损问题。将不同的铸铁废料分类始终是很必要的工作，与此相似，为了避免成份污染问题，紧密石墨铸铁废料应与其它类铸铁废料分开也是很重要的。

属碎片在大容量电炉内可以直接加入铁液中，但不推荐加入包内，因为回收率不可靠。镁合金一般含有足够的钕以满足过程的需要。按照生产球铁时所用的任何一种手段将其加入包内，不过由于获得紧密状石墨需要的残余镁量较少，所以合金加入量要少些，一般为0.8~1%，如此则具有重要的优点：温度损失和烟气均较少。

用含硅孕育剂进行最终孕育对紧密石墨铸铁有好处，其添加量可到0.2~0.5%。视存在少量促进珠光体元素而定，紧密石墨铸铁可以有珠光体或铁素体基体组织。如在其它类型铸铁中一样，锰、锡、铬、铜、铈、铈促进珠光体。可以通过将促进珠光体元素保持在一个低值（预先选择适宜的炉料）或通过铁素体化热处理（例如在900℃保温4~8小时随后在650℃保温8~16小时）来促使形成铁素体基体（它使铸铁硬度降低而具有一些韧性）。

在片状和球状石墨铸铁通常所用的碳、硅、锰量范围内均可获的完好的紧密石墨组织。至少在碳当量从3.7%到4.5%的整个范围内（3.1~3.9%C，1.7~2.9%Si，0.1~0.6%Mn）已表现出它们的特性。制造紧密石墨铸铁的镁和钕含量和与低于0.02%的最终含硫

## 紧密石墨铸铁的性能

已从多种铸件例如，刹车毂、液压伐和钢锭模的生产中获得了关于紧密石墨铸铁性能方

面的经验；另外，在 BCIRA 已着手施行一个研究计划，它包括生产方法和金属成份、基体组织以及铸造断面尺寸对许多最重要性能的影响。对于一种生长完好的紧密石墨组织，它所达到的性能与处理该铁的方法是没关系的。本文评论一些得到的典型资料。

#### 强度和应力/应变性能：

紧密石墨铸铁的机械性能介于高级工程灰铁和相似基体球铁之间。这是由于它的石墨颗粒是紧密的并且有圆的端部，使它比同样成份的片状石墨灰铸铁有较高的强度，在断裂时有较大的应变和显著的韧性。但另一方面，由于石墨还是互相连接着的，所以它们的强度和韧性都不如球铁。表 I 说明具有不同基体组织且浇成不同尺寸试棒的几种碳当量的紧密石墨铸铁的抗拉性能。

表 I 截面 30mm 到 200mm 范围内的紧密石墨铸铁的性能

|                         | 碳当量 | 基体组织 | 铸造截面尺寸 mm |         |           |         |
|-------------------------|-----|------|-----------|---------|-----------|---------|
|                         |     |      | 30        | 53      | 44.5 Keel | 200     |
| 抗拉强度<br>$N/mm^2$        | 4.3 | 铁素体  | 365       | 325     | 310       | 285     |
|                         | 4.0 | 铁素体  | 400       | 350     | 330       | 300     |
|                         | 4.3 | 珠光体  | 400       | 370     | 360       | 320     |
|                         | 4.0 | 珠光体  | 460       | 390     | 385       | 340     |
| 0.1% 条件屈服极限<br>$N/mm^2$ | 4.3 | 铁素体  | 260       | 230     | 210       | 190     |
|                         | 4.0 | 铁素体  | 285       | 250     | 235       | 220     |
|                         | 4.3 | 珠光体  | 305       | 270     | 240       | 210     |
|                         | 4.0 | 珠光体  | 340       | 280     | 265       | 230     |
| 0.2% 条件屈服极限<br>$N/mm^2$ | 4.3 | 铁素体  | 290       | 270     | 225       | 200     |
|                         | 4.0 | 铁素体  | 325       | 295     | 265       | 240     |
|                         | 4.3 | 珠光体  | 330       | 300     | 295       | 255     |
|                         | 4.0 | 珠光体  | 370       | 330     | 310       | 260     |
| 0.5% 条件屈服极限<br>$N/mm^2$ | 4.3 | 铁素体  | 325       | 300     | 230       | 225     |
|                         | 4.0 | 铁素体  | 365       | 340     | 290       | 255     |
|                         | 4.3 | 珠光体  | 365       | 325     | 340       | 250     |
|                         | 4.0 | 珠光体  | —         | 365     | 330       | 290     |
| 模量<br>$GN/m^2$          | 4.3 | 铁素体  | 162       | 162     | 162       | 162     |
|                         | 4.0 | 铁素体  | 169       | 165     | 162       | 165     |
|                         | 4.3 | 珠光体  | 165       | 159     | 165       | 155     |
|                         | 4.0 | 珠光体  | 165       | —       | 162       | 155     |
| 延伸率<br>%                | 4.3 | 铁素体  | 4.5       | 4.5     | 5.5       | 4.5     |
|                         | 4.0 | 铁素体  | 2.0       | 2.5     | 3.0       | 3.0     |
|                         | 4.3 | 珠光体  | 1.5       | 1.0     | 2.0       | 2.0     |
|                         | 4.0 | 珠光体  | 1.0       | 1.0     | 2.0       | 1.5     |
| 硬度<br>$HB_{10/3000}$    | 4.3 | 铁素体  | 140-155   | 135-150 | 120-130   | 120-130 |
|                         | 4.0 | 铁素体  | 180-205   | 170-180 | 135-145   | 130-140 |
|                         | 4.3 | 珠光体  | 225-245   | 175-245 | 195-205   | 160-180 |
|                         | 4.0 | 珠光体  | 210-260   | 175-240 | 195-215   | 160-190 |

与标准片状石墨铸铁不一样（它的应力/应变曲线从低应力值开始弯曲），紧密石墨铸铁在整个应力范围内的弹性情形与大多数工程材料相类似。它们的比例极限低于球铁的。铸成适当厚度截面，碳当量为4.35，基体为珠光体+铁素体的紧密石墨铸铁在拉伸和压缩时的应力/应变曲线示于图6<sup>17</sup>。

与片状石墨铸铁相比，紧密石墨铸铁的机械性能对碳当量的变化不很敏感，甚至当碳当量接近4.3时，珠光体和铁素体紧密石墨铸铁都会有比低碳当量高牌号非合金片状石墨铸铁高的强度。图7把用30mm直径铸造试棒测出的紧密石墨铸铁与片状和球状石墨铸铁的抗拉强度进行比较。

在低应力下用共振频率测量<sup>18</sup>所确定的紧密石墨铸铁的弹性模量在155~170GN/M<sup>2</sup>的窄范围内。它高于片状石墨铸铁的弹性模量E。而低于通常所报导的球铁的弹性模量170~175GN/M<sup>2</sup>。弹性模量略受截面尺寸和碳当量的影响，碳当量高和截面厚时其值低一些。

如图8所示，对于各种碳当量的珠光体和铁素体基体的紧密石墨铸铁来说，其强度都随截面尺寸增加而降低，这种情形与片状石墨铸铁的类似，而且随截面尺寸增加强度下降比例减小的情形也与其相似。这意味着设计者将必须考虑铸件的截面厚度，但是正如片状石墨铸铁一样，我们总希望为任一种铸铁的常态性质作一个由30mm直径试棒代表标准截面厚度的报告。

本文所引证的性能是公认生长完好的典型的紧密石墨组织铸铁所具有的性能。在石墨不很紧密的铸铁内，这些性质将接近于片状石墨铸铁；而在组织中石墨球的比例增加，则这些性质又将接近于球墨铸铁。通过适当的控制可以避免这两种情况，但是要注意，减小截面尺寸或增加冷却速度都将有助于形成石墨球，特别是如果钛不足或钒过多或存

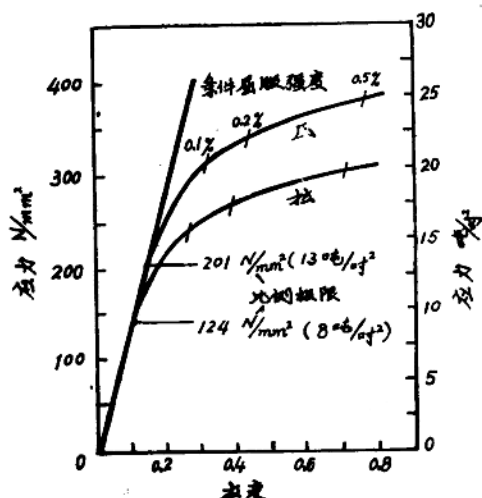


图6 紧密石墨铸铁在拉、压时的应力/应变曲线。

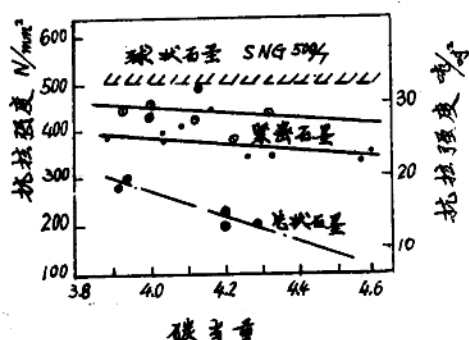


图7 碳当量对30mm直径试棒的片状、紧密状和球状石墨铸铁抗拉强度的影响。

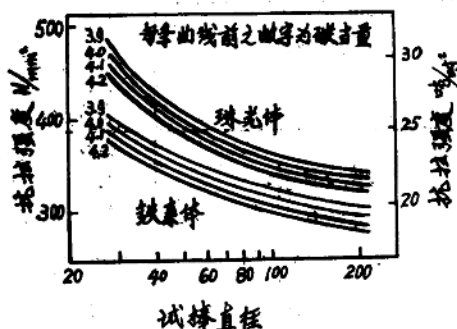


图8 各种碳当量珠光体和铁素体的紧密石墨铸铁抗拉强度随铸造截面尺寸的变化。所画曲线表明变化中心带在 $\pm 30 \text{ N/mm}^2$ 强度内 ( $\pm 2 \text{ 吨/厘米}^2$ )。

在其它稀土元素的时候。若组织中球状石墨量大于10%，那么图8的曲线将被移到较高的值，特别是在截面尺寸最小之处，这时该处表现出最大截面敏感性的假象。

表 2. 在整个强度范围内紧密石墨铸铁的平均冲击值(带V形缺口)

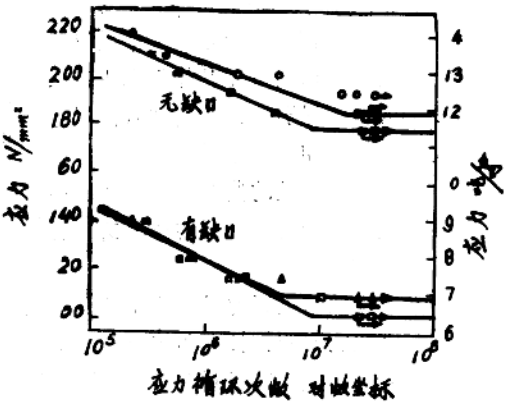
| 铸造截面 基体组织         | 平均冲击值/F |      |     |      |      |      |       |      |       |             |
|-------------------|---------|------|-----|------|------|------|-------|------|-------|-------------|
|                   | -60℃    | -20℃ | 0℃  | +10℃ | +20℃ | +40℃ | +60℃  | +80℃ | +100℃ | +160℃ +200℃ |
| 44.5mm基尔试块<br>铁素体 | 4.1     | 4.8  | 5.4 | 5.4  | 6.1  | 6.8  | 6.8   | 6.8  | 6.8   |             |
| 200mm直径试棒<br>铁素体  | 4.1     | 5.4  | 6.8 | 6.8  | 6.8  | 6.8  | 7.5   | 7.5  | 7.5   |             |
| 44.5mm基尔试块<br>珠光体 |         | 2.7  |     |      | 2.7  |      | 3.4   |      | 4.1   | 4.8 4.8     |
| 200mm直径试棒<br>珠光体  |         | 2.7  |     |      | 3.4  |      | 4.1   |      | 4.1   | 5.4 5.4     |
| 试验铸铁的成份%，         | C       |      | Si  |      | Mn   |      | Mg    |      | Ti    |             |
| 铁素体               | 3.9     |      | 2.0 |      | 0.13 |      | 0.023 |      | 0.108 |             |
| 珠光体               | 3.6     |      | 1.7 |      | 0.34 |      | 0.020 |      | 0.052 |             |

冲击性能：

表 I 说明用10mm带V形缺口的试样测出的珠光体和铁素体基体紧密石墨铸铁的冲击性能。这些铁显现出一个韧性到脆性的转变。随着由韧性断裂变为脆性断裂，紧密石墨铸铁断口表面的外观由深灰色变为淡灰色，在这方面这种铸铁较片状石墨铸铁更接近于球铁。图9(译者删去)说明从-75℃到+200℃的试验温度范围内两种紧密石墨铸铁的这种变化。铁素体铸铁的转变温度范围经试验在0℃和+15℃之间，它类似于铁素体球铁；而对于珠光体铸铁来说，在铸铁100℃以下发生逐渐转变，这也与球铁的情形相似。不过，在韧性范围内铁素体紧密石墨铸铁的冲击值为6.8~7.5J，低于一般测得的铁素体球铁的冲击值16.3~19J。这些结果表明紧密石墨铸铁有可用的冲击韧性，甚至在韧性温度范围内，无缺口的试样可以得到34J这样比较高的冲击值<sup>17</sup>。

断裂性能：

图10说明有缺口和无缺口珠光体紧密石墨铸铁在反复弯曲情况下的断裂性能。正如其它类型铸铁一样，紧密石墨铸铁的断裂强度也与它们的抗拉强度有关<sup>17</sup>。耐久率（无缺口断裂强度与抗拉强度之比）近似为0.45，且不受基体组织变化的影响，类似于用球铁



|    | C   | Si   | Mn   | S     | P     | Mg    | Ti    |
|----|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|
| ○△ | 3.5 | 2.31 | 0.5  | 0.012 | 0.015 | 0.016 | 0.094 |
| □■ | 3.6 | 2.18 | 0.32 | 0.013 | 0.009 | 0.024 | 0.084 |

图10 珠光体紧密石墨铸铁的断裂曲线。

和低磷工程片状石墨铸铁所得到的耐久率。

在断裂试样上有根半径为0.25mm的V形缺口则降低紧密石墨铸铁之断裂强度。典型的强度下降因子(无缺口断裂强度/有缺口断裂强度)为1.75——这与球铁相似。然而,对于球铁根部半径超过5mm的缺口其断裂强度则不降低,并且预期对紧密石墨铸铁也将证明如此。紧密石墨铸铁内不含有尖角石墨片(它在片状石墨铸铁内存在且起内部缺口的作用),所以它没有表现出像片状石墨铸铁那样的缺口不敏感性。

导热性:

由于紧密石墨铸铁内有相互连接的网状石墨,所以它的导热性仅略低于相似成份的片状石墨铸铁。表Ⅱ示出各种碳当量和不同石墨结构的珠光体铸铁在100℃到500℃间的导热率。像在片状石墨铸铁内一样,增加碳当量紧密石墨铸铁的导热率也就增加。随着温度增加,导热率在大约200℃时达到最大值——球墨铸铁也表现出这种影响,但片状石墨铸铁则不然,它的导热率随温度升高而连续下降。与其它类型铸铁一样,当以铁素体基体取代珠光体基体时导热率就会增加。

减震性:

|                  | 减震性       |    |     |      |     |     |
|------------------|-----------|----|-----|------|-----|-----|
|                  | 铸造截面尺寸/mm |    |     |      |     |     |
| CE               | 15        | 30 | 53  | 44.5 | 200 |     |
| 基尔(keel)         |           |    |     |      |     |     |
| 减震性              | 4.0       | 4  | 4.6 | 5    | 5   | 7.3 |
| $\times 10^{-4}$ | 4.3       | 4  | 4.3 | 4.3  | 5   | 6.3 |

长大和脱皮倾向，

紧密石墨铸铁的良好的导热性和较高的强度的结合使它们的应用包括了在较高温度下工作的零件,因此它们的抗长大和抗脱皮(生锈皮)的能力是重要的。将厚大截面铸件在空气中连续加热32周的试验已表明在500℃温度下长大和脱皮不显著,这与相似成份的片状石墨的表现不同。在600℃下紧密石墨铸铁的长大亦小于片状石墨铸铁,同时它的抗脱皮能力也是优越的——如图11所示。

加工性:

石墨形式的变化可能从许多方面影响加工性,而这种加工性在制造大量的必须高速切削

**表3** 片状、紧密状及球状石墨铸铁的导热率

| 石墨结构 | 导热率 W/(mh) |       |       |       |       |       |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 碳当量  | 100℃       | 200℃  | 300℃  | 400℃  | 500℃  |       |
| 片状   | 3.8        | 50.24 | 48.99 | 45.22 | 41.87 | 38.52 |
| 片状   | 4.0        | 53.59 | 50.66 | 47.31 | 43.12 | 38.94 |
| 球状   | 4.2        | 32.34 | 34.75 | 33.08 | 31.40 | 29.31 |
| 紧密状  | 3.9        | 38.1  | 41.0  | 39.4  | 37.3  | 35.2  |
| 紧密状  | 4.1        | 43.54 | 43.12 | 40.19 | 37.68 | 35.17 |
| 紧密状  | 4.2        | 41.0  | 43.5  | 41.0  | 38.5  | 36.0  |

**表 4** 珠光体紧密石墨铸铁的声学减震性

|                  |     | 铸造截面尺寸/mm |     |     |      |     |             |
|------------------|-----|-----------|-----|-----|------|-----|-------------|
| CE               |     | 15        | 30  | 53  | 44.5 | 200 |             |
| 基尔(keel)         |     |           |     |     |      |     |             |
| 减震性              | 4.0 | 4         | 4.6 | 5   | 5    | 7.3 | 珠<br>光<br>体 |
| $\times 10^{-4}$ | 4.3 | 4         | 4.3 | 4.3 | 5    | 6.3 |             |

的另件时可能是相当重要的，一般说来片状石墨铸铁加工性最好。但是，这方面的比较与加工条件有关，关于这方面（指加工性）的全部资料仅仅取自加工车间积累的经验。通过钻直径8mm深16mm的盲孔而后测量钻身的磨损来比较紧密状、球状和片状石墨组织铸铁的加工性。图12示出这些结果，并表明紧密石墨铸铁与球墨铸铁十分相似，磨损量比钻片状石墨铸铁时多。虽然如此，但是生产经验告诉我们只要我们正确选择加工条件，加工这些材料没有问题。

### 铸造特性

用紧密石墨铸铁生产优质的健全铸件的可能性在许多方面与其它铸铁类似，但这种材料与其它铸铁比也有一些特色。看来它的流动性和制造一个尖角清晰铸件的可能性与具有相同碳当量的任何一种铸铁都很相似，并且虽然依然没有可利用的实验数据，但似乎与其它铸铁一样，按常规确定的流动性将取决于碳硅含量和浇注温度<sup>19</sup>。这样与正常经验一致：流动性与最终石墨结构无关。

由于高碳当量的紧密石墨铸铁比许多低碳当量高牌号灰铁的强度高，所以紧密石墨铸铁获得高强度与良好铸造性能之综合优点是可能的，而对普通片状石墨铸铁来讲，良好的铸造性能通常是与高碳当量和较低的强度联系在一起的。

#### 铸件的致密性：

用紧密石墨铸铁获得致密铸件（无内外缩孔）比球铁容易而比片状石墨铸铁略难。这是由于发生型壁移动（意指补缩量——译者注）的倾向也介于片状和球状石墨铸铁之间。图13表明用76mm直径的球形试样证明这些影响的试验结果。由测量表面喇叭口的体积而得到的缩孔量和试样最终尺寸都小于球铁而大于片状石墨铸铁。

与其它类型铸铁一样，紧密石墨铸铁件的致密性可以通过提高铸型的硬度而得到改善，例如：将潮砂模改为CO<sub>2</sub>硬化水玻璃砂或自硬砂型<sup>20</sup>。避免不必要的高浇注温度也可改善致密性。一般当接近于共晶成份时，铸铁件可达到最好的致密性，而这对于紧密石墨铸铁也是

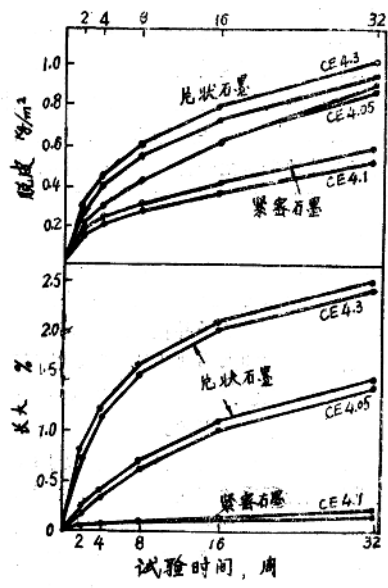


图11 厚大截面的片状和紧密石墨铸铁在600℃的长大情形。

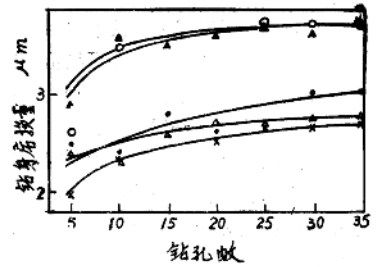


图12 钻头在片状、紧密状和球状石墨铸铁上的磨损。钻速：每分钟780转，进给率72mm/分。

正确的。

虽然，许多时候按照片状石墨铸铁设计的浇、冒口系统也铸出了致密的紧密石墨铸铁件<sup>11</sup>，但仍建议为紧密石墨铸铁件设计的浇、冒口系统应与生产球铁所用的相似。然而与其他铸造合金一样，能最大限度地生产出致密铸件的浇注系统还是一个经验积累的事情。

形成夹渣的倾向：

镁、铈和钙等反应元素的存在增加了在浇注时可能形成渣滓并在随后可能产生与在球铁件中遇到的那类缺陷的危险。由于紧密石墨铸铁残余镁量较低，一般来说这些缺陷不像在球铁中那么严重。

用矩形试样进行了试验（类似于Fuller为球铁试验所用的那些试样<sup>21</sup>），这些试验表明：恰如在球铁中出现的情况一样，原铁水中碳当量和硫量增高导致夹渣增加，如图14所示。已发现用分别加镁和钍，用铈或用不含钙的单一添加合金处理与用含钙的单一添加合金处理相比形成夹渣的敏感性较小，证明钙促使形成渣滓。这些结果启示我们，促使生成渣滓的因素与在球铁中的相同，因此为了得到无夹渣缺陷的铸件可能希望用低的浇注温度并避免使用在充填铸型时会引起飞溅的紊流的浇注系统<sup>21, 22</sup>。

在评述和建立有效的生产控制时，控制和避免夹渣缺陷是一个要注意的事情。许多生产球铁件的人都有这样的经验：严重的夹渣缺陷倾向时有时无（有点捉摸不定），并且不是由一个单一原因引起的而是某一些变量控制一时失败的累积结果。

白口倾向：

紧密石墨铸铁在薄断面上形成白口的敏感性大于片状石墨铸铁而小于球铁。这一点由表V说明，该表给出用薄板铸件试验所得的结果。与其它铸铁一样，增加碳当量或用含Si孕育剂进行最终孕育会减少在薄截面和锐角处形成白口的倾向。铈和其它稀土元素含量过高也促进紧密石墨铸铁组织中的白口倾向和形成不希望的碳化物。

孕育与在片状石墨铸铁中增加共晶团的数量或在球铁中增加石墨球数量相联系，有据可证，对紧密石墨铸铁来说这也是真实的，但是由于它的含硫量低，显示出紧密石墨铸铁共晶团的轮廓并计算出共晶团数量是很困难的。

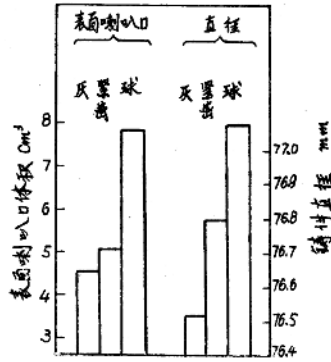


图13 在潮模砂型内铸造的片状、紧密状和球状石墨铸铁件的缩孔及尺寸的比较。

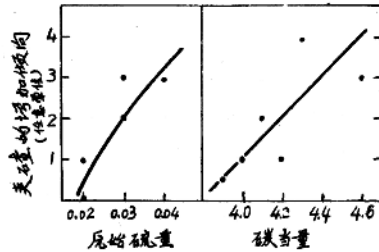


图14 原始含硫量和碳当量对形成夹渣缺陷的影响。

表 5

在片状、紧密状和球状石墨铸铁内的白口 + 麻口的深度

| 碳 当 量              | 组织和断面厚度 |      |      |       |      |      |      |      |      |
|--------------------|---------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
|                    | 片 状     |      |      | 紧 密 状 |      |      | 球 状  |      |      |
|                    | 3 mm    | 6 mm | 9 mm | 3 mm  | 6 mm | 9 mm | 3 mm | 6 mm | 9 mm |
| 固定的浇注温度: 1340℃     |         |      |      |       |      |      |      |      |      |
| 4.3                | 灰       | 灰    | 灰    | 18mm  | 3 mm | 灰    | 白    | 14mm | 3 mm |
| 4.1                | 灰       | 灰    | 灰    | 21mm  | 8 mm | 灰    | 22mm | 16mm | 灰    |
| 3.8                | 灰       | 灰    | 灰    | 白     | 15mm | 灰    | 白    | 白    | 3 mm |
| 在高于液相线150℃的一定温度下浇注 |         |      |      |       |      |      |      |      |      |
| 4.3                | 灰       | 灰    | 灰    | 18mm  | 3 mm | 灰    | 白    | 14mm | 3 mm |
| 4.1                | 灰       | 灰    | 灰    | 12mm  | 3 mm | 灰    | 白    | 白    | 4 mm |
| 3.8                | 灰       | 灰    | 灰    | 白     | 15mm | 灰    | 白    | 白    | 6 mm |

### 铸件质量的控制

优质紧密石墨铸铁件的生产在车间内需要类似于球铁和高牌号片状石墨铸铁生产过程控制的方法。一些基本要求是:

(1) 选择适宜的原材料: 控制到较低的含硫量, 使用低磷材料, 当需要铸态铁素体组织时要避免稳定珠光体的微量元素。

(2) 选择适宜的碳、硅含量以保证需要的碳当量和机械及物理性能。一般, 应使碳当量接近于4.3%的共晶值。

(3) 准确地掌握原铁水重量及其含硫量。

(4) 按原铁水重量和含硫量计算并准确地称量添加合金的重量。

(5) 控制处理温度, 太高的温度使镁的吸收率降低, 太低的处理温度可能导致夹渣和球状石墨组织。

(6) 使用高硬度的优质型、芯并且提供足够的补缩金属。

(7) 区分不同成份的回炉料。

非破坏性试验:

推荐用单个铸造试棒作为预报铸铁性质的手段, 而与可以对一些经选择的铸件做破坏性试验的同时, 我们希望有一些允许铸件在投入使用之前被预先试验的非破坏性试验技术。共振频率(声学试验)和超声速度测量(它们早已被广泛地用于球铁件生产中)对于紧密石墨铸铁也是可用的, 并提供了确定铸件性质的可靠方法。图15说明在这个方法中抗拉强度可能与超声速度或共振频率有一定关系, 它提供了确定石墨是否为紧密状的并将紧密石墨与片状或球状石墨相区别的手段, 该曲线图是用30mm直径的试棒做出来的。超声速度直接在试棒上确定, 而共振频率则在加工成直径19mm长190mm的试棒上确定。

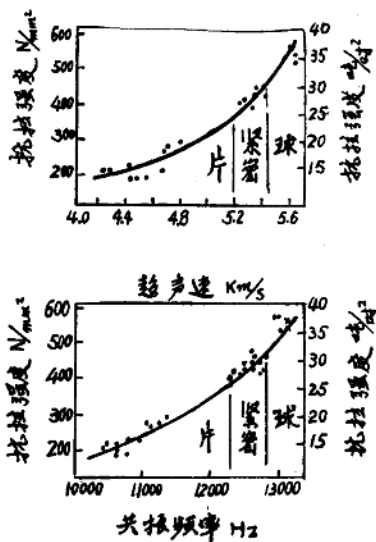


图15 在各种石墨组织的铸铁中，抗拉强度与超声速度及共振频率的关系。

当这些试验被用到铸件上时，对紧密状石墨组织来讲，超声速度与铸件形状无关但应与截面厚度有一个对应标准，例如对于30mm 直径试棒来讲，与紧密石墨铸铁相联系的超声速度范围是5.2~5.45千米/秒，而对于很大的截面（例如钢锭模）来讲，与良好的紧密石墨组织相对应的超声速度则是在4.85~5.1千米/秒之间。另外，对于一个特定设计的铸件，其声学试验必须预先定出标准，为此，良与不良组织的标准样品必须预先校验出来。

选用什么非破坏性试验方法好将取决于铸造车间的生产类型。当生产许多同类小件时，大约要采用声学试验，而在所有其它情况下，测量超声速度将是一个更方便的试验方法。不论所选择的试验方法如何，每一个铸造车间都需要建立一套自己的关系。而且，当铸造车间是生产珠光体，铁素体以及混合基体的铸铁以满足用户提出的各种性能

要求时，超声速和共振频率测量必须与一个对基体变化敏感的辅助测量结合起来。适宜的试验可包括首先进行硬度，涡流或磁矫顽力的测量以估计其基体组织，随后通过声学 and 超声速度测量来估计其石墨结构。这类试验的一个例子是由Lovett和Carter<sup>23</sup>提供的，他们综合共振频率和硬度的测量以预报具有各种基体组织铸铁的强度。

紧密石墨铸铁的新用途将包括新的质量要求，同时为了它的需要可能将采用其它类型的破坏和非破坏性试验。例如：对用作液压元件的渗漏试验以及为了确保重要部位无孔洞的常规超声波试验。

## 紧密石墨铸铁的现状

一种过去不可能的具有综合性能的新型工程材料，现在已成为有用的材料，并且在商业上将变的日趋重要。其生产方法（虽然包括一些在只生产片状石墨铸铁的铸造车间内是不熟悉的处理技术）要求类似在球铁生产中广泛采用的操作与控制。没有用镁处理经验的铸造车间在一个短暂的小规模试生产之后，已成功地推广了紧密石墨铸铁的生产。虽然由于钛的存在会在生产其它类铸铁时引起问题而应将废铁、浇口、冒口以及其它紧密石墨铸铁回炉料分开堆放，但是对于那些曾生产球铁的车间不需要增加投资。对于其它铸造车间必须准备合适的处理包，最好有茶壶咀并且需要一些将铁脱硫到0.035%或更低的装置。当生产规模小时，在一个多孔塞包内可得到很成功的脱硫，并且那些用电炉熔炼的车间经过选择合适的炉料也可能达到这样低的含硫量。