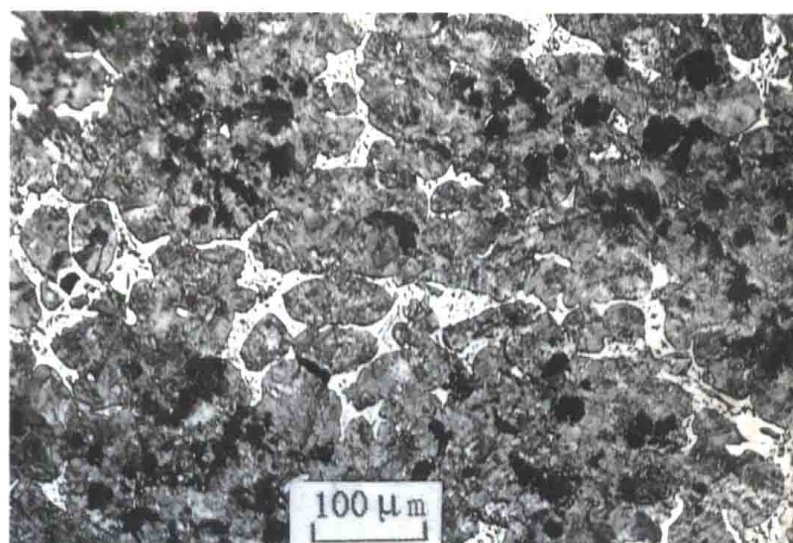
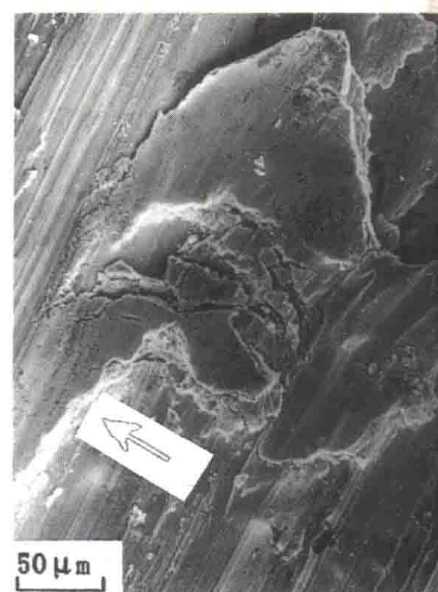
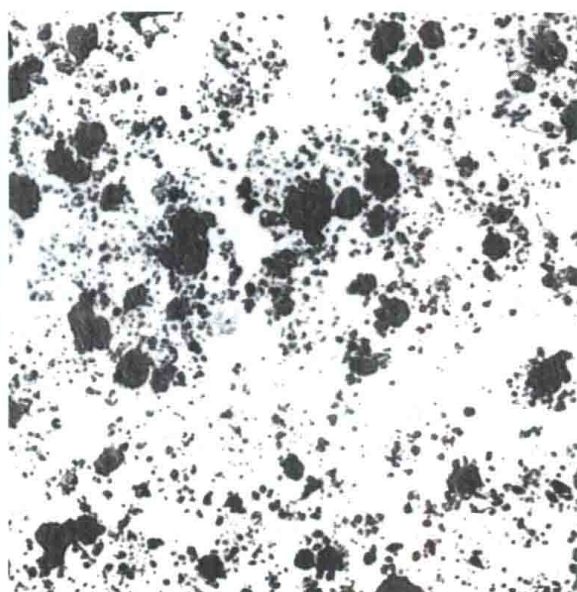
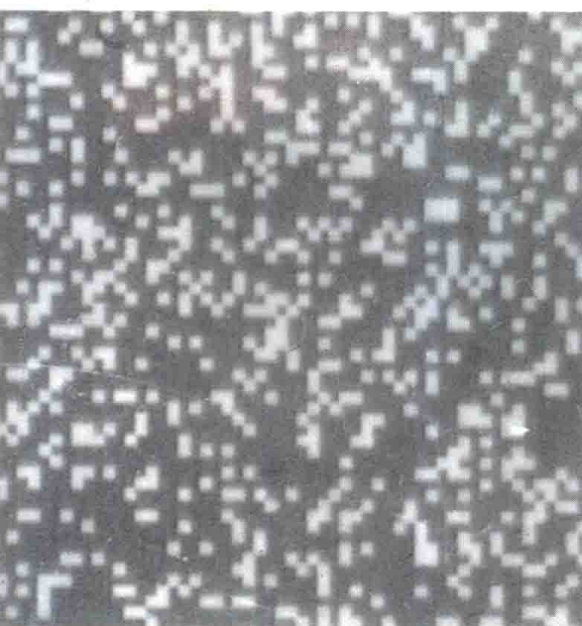


# 蠕墨铸铁的干摩擦

张永振 沈百令 等著



科学出版社

(京)新登字 092 号

## 内 容 简 介

本书以蠕墨铸铁干摩擦性能为主题,分析了蠕墨铸铁的成分、组织和力学性能,讨论了蠕墨铸铁的干摩擦学行为,介绍了材料的化学成分及组织对蠕墨铸铁摩擦性能的影响,并另辟一章介绍了蠕墨铸铁对配副方的磨损。

本书可供冶金、材料以及机械设计、制造、维修等有关专业的工程技术人员参考,也可供科研人员及大专院校相关专业师生参考。

## 蠕墨铸铁的干摩擦

张永振 沈百令 等 著

责任编辑 马长芳 童安齐

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1995 年 7 月第一版 开本: 787 × 1092 1/16

1995 年 7 月第一次印刷 印张: 12 1/4

印数: 1 - 450 字数: 286 000

ISBN 7 - 03 - 004709 - 5/TB·127

定价: 26.00 元

## 前 言

蠕墨铸铁作为一种新型的铸铁材料,其应用领域将越来越广泛。蠕墨铸铁作为制动器的选材,国内外于80年代中期才开始研究。作者自1986年以来,一直从事以火车闸瓦为主要产品的蠕墨铸铁干摩擦研究工作,经过课题组同事们的共同努力,取得了一些研究成果。本书即是在此基础上编写而成的。龙锐教授、贺润桐教授及杨明瑞副教授对于本课题的研究做出了重要贡献;洛阳铁路分局车辆段段长戴宝林高级工程师、总工程师孙格森高级工程师对课题实际运行试验研究结果做了大量工作,在此对他们表示衷心的感谢。

本书以蠕墨铸铁的基本干摩擦学性能——摩擦系数和耐磨性,作为研究指标,较为系统地研究了材料的成分、组织及干摩擦条件对蠕墨铸铁摩擦学性能的影响,探讨了蠕墨铸铁干摩擦的一些基本特性,阐述了干摩擦温度场及干摩擦热所造成的热应力问题,并分析了蠕墨铸铁干摩擦的一些表面现象。

本书共六章,其中§2-1, §2-2, §2-3, 第三章, §4-1, §4-5及第六章由张永振撰写;§2-4, §4-2, §4-3, §4-4, §5-1由沈百令撰写;第一章由陈跃撰写;§5-2, §5-3, §5-4及§5-5由张一民撰写。全书由张永振汇总和统稿。

在本书编写过程中,西安交通大学周庆德教授、饶启昌教授对本书进行了认真的审阅并提出许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加之关于蠕墨铸铁干摩擦学研究可供借鉴的资料较少,因此恳请读者对书中之误批评指正。

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第一章 蠕墨铸铁的组织与性能             | 1   |
| § 1-1 金相组织                 | 1   |
| § 1-2 性能                   | 11  |
| § 1-3 生产工艺                 | 26  |
| § 1-4 应用                   | 33  |
| 参考文献                       | 34  |
| 第二章 材料的干摩擦学性能              | 35  |
| § 2-1 干摩擦副接触表面的接触状态        | 35  |
| § 2-2 摩擦热在干摩擦过程中的作用        | 41  |
| § 2-3 接触压力与摩擦速度在摩擦过程中的作用   | 49  |
| § 2-4 钢铁组织与干摩擦磨损           | 55  |
| 参考文献                       | 61  |
| 第三章 蠕墨铸铁的干摩擦过程             | 63  |
| § 3-1 干摩擦热                 | 63  |
| § 3-2 速度和载荷特性              | 72  |
| § 3-3 干摩擦热应力               | 86  |
| § 3-4 干摩擦火花现象              | 98  |
| 参考文献                       | 99  |
| 第四章 蠕墨铸铁的成分、组织与干摩擦磨损性能     | 100 |
| § 4-1 干摩擦磨损试验方法            | 101 |
| § 4-2 石墨相与蠕墨铸铁的干摩擦学性能      | 106 |
| § 4-3 基体组织与蠕墨铸铁干摩擦磨损性能     | 116 |
| § 4-4 硬质相形成元素与蠕墨铸铁的干摩擦磨损性能 | 120 |
| § 4-5 含磷蠕墨铸铁闸瓦的摩擦磨损性能      | 130 |
| 参考文献                       | 136 |
| 第五章 蠕墨铸铁干摩擦表面行为            | 137 |
| § 5-1 干摩擦表面的研究方法           | 137 |
| § 5-2 干摩擦表面的表面膜            | 140 |
| § 5-3 磨损机制                 | 154 |
| § 5-4 摩擦表面行为               | 167 |
| § 5-5 干摩擦过程中质的转移           | 175 |
| 参考文献                       | 180 |
| 第六章 蠕墨铸铁对配副方的磨损            | 181 |
| § 6-1 配副方-40Cr 钢的磨损特性      | 181 |
| § 6-2 40Cr 钢摩擦表层的组织        | 185 |
| § 6-3 40Cr 钢的磨损形式          | 189 |

## 第一章 蠕墨铸铁的组织与性能

蠕虫状石墨铸铁是 70 年代出现的一种新型工程材料,其独特的综合性能日益受到广大科研人员的关注。国内外从 70 年代后期就已开始了蠕墨铸铁的应用研究、蠕化剂的研制及蠕墨铸铁的研究与开发。我国、日本及欧美一些国家先后将蠕墨铸铁成功地应用于钢锭模、玻璃模具、汽车排气管、液压件及机架等众多产品上。

蠕墨铸铁,在将其作为一种独立的铸铁材料研究之前,人们就早已在球化不良的球墨铸铁件中发现了它,但未被重视,以致人们长时间将蠕墨铸铁看作球墨铸铁的不合格品。1965 年,欧美的几位学者建议将蠕墨铸铁作为一种新的铸铁材料研究,从此蠕墨铸铁引起了广泛的注意和重视,并逐步开始了大量的试验研究工作。

在开始对蠕墨铸铁进行研究的很长一段时间内,蠕墨铸铁在国际上没有统一的名称。直至 1977 年,国际铸造技术委员会(CIAFT)综合了美国、英国及联邦德国等国有关专家的意见,将蠕墨铸铁定名为 Compacted Graphite Cast Iron (紧密型石墨铸铁)和 Vermicular Graphite Cast Iron (蠕虫状石墨铸铁),两名并用。至此,蠕墨铸铁成为独立于片墨铸铁和球墨铸铁的一种新型铸铁材料,并在学术界和工业界开始了广泛的研究和应用。

我国 1984 年制订并颁布了蠕墨铸铁的金相标准(JB3829-84),1987 年又制订了蠕墨铸铁的技术条件(JB4403-87),这对蠕墨铸铁在我国的应用起到了推动作用。我国第二汽车制造厂的东风 EQ-140 汽车蠕墨铸铁排气管生产线的正式投产,标志着蠕墨铸铁在我国已进入了工业应用阶段。

基于蠕墨铸铁具有良好的热疲劳抗力,国外于 1985 年前后开始了将蠕墨铸铁应用于制动器的研究工作。我国亦于 1987 年开始了蠕墨铸铁火车车辆闸瓦的研制。预计在不久的将来,蠕墨铸铁火车车辆闸瓦、火车闸盘及汽车刹车毂等将得到广泛应用。

### § 1-1 金相组织

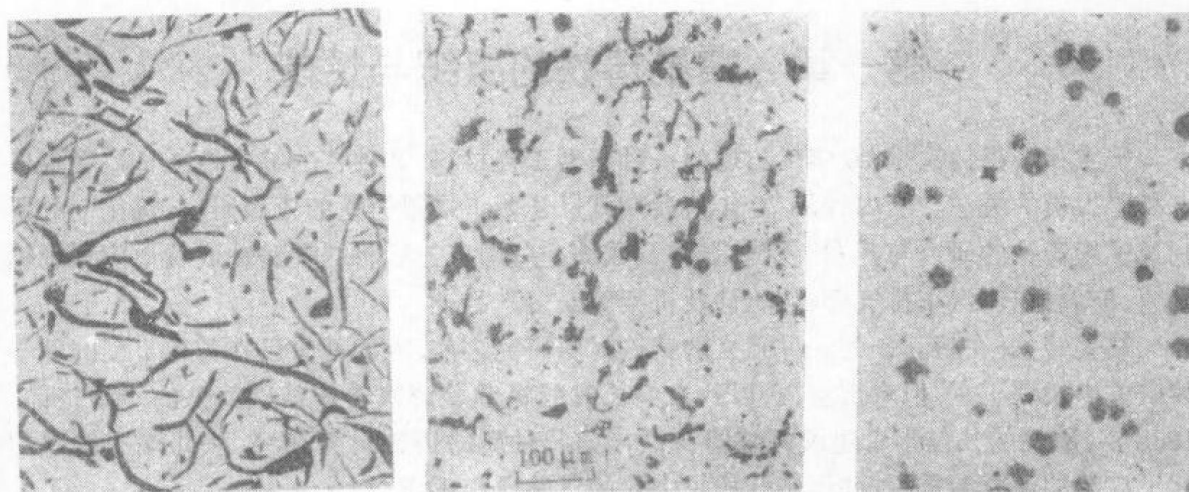
#### 1-1-1 蠕墨铸铁的石墨形态

图 1-1 所示为片墨铸铁、蠕墨铸铁及球墨铸铁的金相组织。可以看出,蠕墨铸铁的石墨形态是处于片状石墨与球状石墨之间的一种过渡状态。与片状石墨相比,蠕虫状石墨短而厚且端部较圆。立体观察表明,蠕墨铸铁中的石墨不像球墨铸铁中的球状石墨那样相互分离而独立存在,而是在一个共晶团内部像片状石墨那样有分支,内部相连。研究表明,蠕墨铸铁的石墨在结晶时是以位错生长机制,以螺位错作为台阶长大的。

##### 1. 石墨形态的表示方法

一般来讲,在处理成功的蠕墨铸铁中,总是伴生有不同量的球状石墨。因此,研究工作者为了对蠕墨铸铁中石墨的蠕虫化程度进行定量分析,提出了一些评价石墨形态的参数。





(a)片墨铸铁

(b)蠕墨铸铁

(c)球墨铸铁

图 1-1 铸铁的组织

#### (1) 面积比法

测量石墨的面积  $S$  及其外接圆的面积  $S_0$ , 用面积百分比  $S'$  评价石墨形态, 即

$$S' = \frac{S}{S_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

统计分析表明, 面积比在 30~60% 之间时为蠕墨铸铁, 小于 30% 为片墨铸铁, 大于 60% 的为球墨铸铁。

#### (2) 轴比法

测量石墨的最大长度  $L$  与厚度  $D$ , 以石墨的长厚比  $R$  (亦称长宽比) 来代表铸铁的石墨形态, 即

$$R = L/D \quad (1-2)$$

一般来讲,  $R$  值在 2~10 之间时, 铸铁中的石墨以蠕虫状为主, 小于 2 的石墨形态以球状、团球状为主; 大于 10 的石墨形态基本上是完全片状石墨。

#### (3) 蠕化率法

测定铸铁组织中蠕虫状石墨的个数  $N_{cv}$  以及球状石墨的个数  $N_{sg}$ , 则蠕化率  $V$  为

$$V = \frac{N_{cv}}{N_{cv} + N_{sg}} \times 100\% \quad (1-3)$$

与蠕化率法相反, 也有用球化率法表示石墨形态的。

#### (4) 形状系数法

测定石墨的面积  $S$  和周长  $L$ , 用形状系数  $K$  来表示石墨形态, 即

$$K = 4\pi S/L^2 \times 100\% \quad (1-4)$$

统计分析证明,  $K$  值在 20~70% 之间时的铸铁为蠕墨铸铁,  $K$  值大于 70% 的为球墨铸铁, 小于 20% 的为片墨铸铁。

上述各种表示石墨形态的参数虽然在定义上有所差别, 但在实际应用中只要随机大量地进行统计分析, 特别是应用图象分析仪, 这些按不同参数定义所得到的数据之间还是

存在着良好的一致性,它们与铸铁的各种性能之间存在着良好的对应关系。用它们来描述铸铁的石墨形态还是可行的。

## 2. 影响石墨形态的因素

在蠕墨铸铁中,影响石墨形态的因素以化学成分及工艺因素为主。

### (1) 铸铁的碳当量

英国铸铁研究协会用 CG 单一合金进行蠕化处理所得报告指出,高碳当量促进了球状石墨的形成(图 1-2)。国内亦有学者研究证明,当碳当量在 4.5~5.0% 范围内变化时,碳当量越高,球化越容易,蠕化率随之降低(图 1-3)。

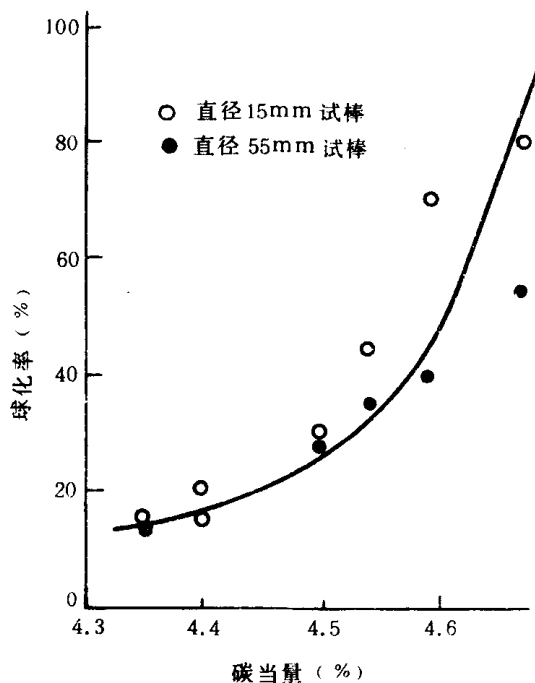


图 1-2 碳当量对球墨数目的影响<sup>[1]</sup>

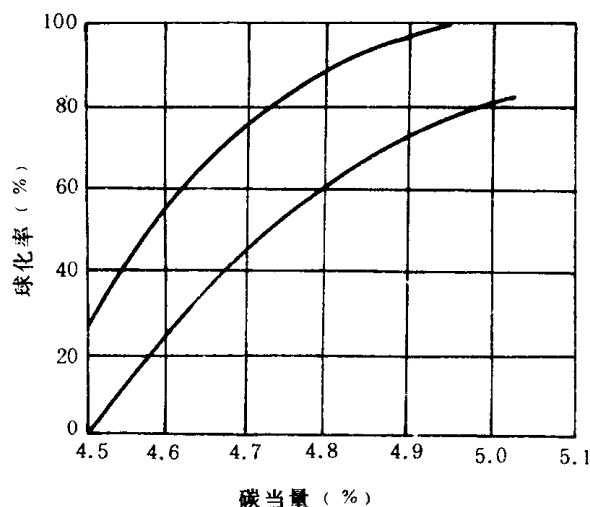


图 1-3 碳当量对球化率的影响<sup>[2]</sup>

有关高碳当量促进蠕墨铸铁中球状石墨形成的观点已被众多的研究者所认可,其主要原因在于高的碳当量将产生大量的过共晶石墨,由于过共晶石墨是在液相中直接形核与长大,故易生长成为球状,特别在厚大断面的铸铁件中,初生的石墨球往往造成了严重的石墨漂浮。

H.H. Cornell 和 C.R. Loper, Jr. 的研究报告指出,碳和硅能显著提高铁水中硫的活度,碳当量愈高,铁水中硫的活度系数愈高(图 1-4),这预示着在高碳当量条件下,脱硫过程更容易进行,脱硫效果将更加显著,因而在一定的蠕化剂加入量条件下所形成的球墨数目必然增加。

### (2) 硫

在蠕墨铸铁中,加入蠕化剂的主要目的与球墨铸铁相同,即为脱氧及除硫。因此,在保证蠕化的前提下,原铁水中硫量的提高必然减少球状石墨的数目,提高蠕墨铸铁的蠕化率。国内研究者用型内蠕化方法研究硫对石墨形态的影响后认为,硫能使蠕墨铸铁蠕化

率提高, 这表明在蠕墨铸铁生产时, 原铁水中含有适量的硫对提高蠕化率有一定的有利作用。

需要指出, 由于蠕墨铸铁生产时合适蠕化剂加入量的范围较窄, 而蠕化剂加入量对原铁水的硫含量又非常敏感, 因此不宜将调整硫量作为提高蠕化率的措施之一。

### (3) 钛

在蠕墨铸铁中, 钛的加入有抑制球状石墨形成, 扩大蠕化剂加入量范围的作用。为此, 许多商品化的蠕化剂中均含有一定量的钛。在完全蠕化的条件下, 为了研究钛对蠕墨铸铁蠕化率的影响, W.E. Duckworth 等用无钛合金处理蠕墨铸铁, 将钛作为合金元素加入, 在薄壁件上( $\phi 15\text{mm}$  试棒)进行了石墨形态的组织观察。结果证明, 即使在铸件壁厚较小, 形成球墨倾向较大的条件下, 钛的加入可明显减少组织中球状石墨的数量, 提高蠕墨铸铁的蠕化率(图 1-5)。

### (4) 铸件壁厚

铸件壁厚对蠕墨铸铁石墨形态的影响实际上表征铸件凝固速度的影响。随着铸件凝固速度的降低, 蠕墨铸铁中的球状石墨数目减少, 这与球墨铸铁中的球化衰退有类似之处。表 1-1 为一组型内蠕化处理条件下所测得的不同厚度阶梯试样的蠕化率。

从表中可以看出, 随着铸件壁厚的增加, 蠕墨铸铁的蠕化率明显提高。用成分 A 的蠕墨铸铁铁水浇注后, 3mm 处的金相组织实际上为球墨铸铁。

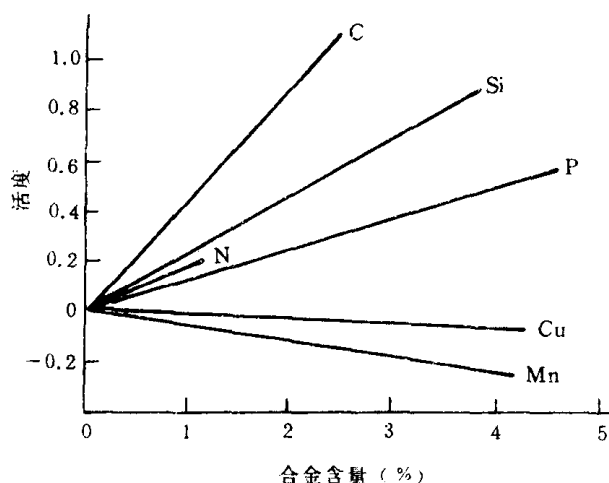


图 1-4 合金加入量与铁水中硫的活度系数<sup>[3]</sup>

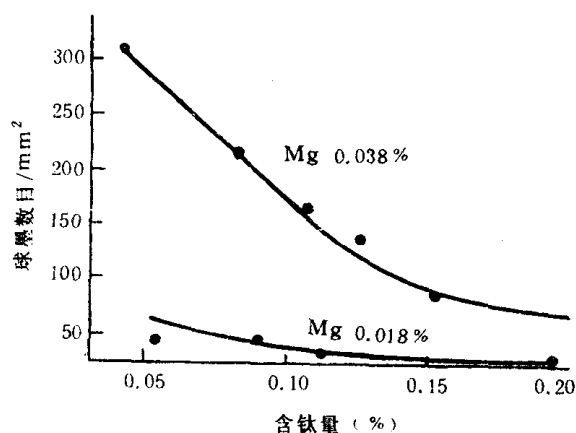


图 1-5 钛量对蠕墨铸铁中球墨数目的影响<sup>[1]</sup>

表 1-1 铸件壁厚与蠕化率(CG% + SG%)<sup>[4]</sup>

| 铸件壁厚(mm) | 3       | 6       | 12      | 25      | 50      |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 成分 A     | 0 + 100 | 40 + 60 | 70 + 30 | 85 + 15 | 85 + 15 |
| 成分 B     | 20 + 80 | 70 + 30 | 90 + 10 | 95 + 5  | 95 + 5  |

注: CG% 蠕虫状石墨数量百分比; SG% 球状石墨数量百分比。



本书作者用型内蠕化方法对两组含硫量铁水进行蠕化试验,结果证明,铸件壁厚增加,蠕虫状石墨有向片状石墨发展的趋势(表1-2)。其原因实际上是由于铸件壁厚的增加,延长了铸件的凝固时间,造成蠕化的衰退,在引起球状石墨向蠕虫状发展的同时,也使得蠕虫状石墨向片状石墨发展。因此,在蠕墨铸铁的生产中,对于薄壁铸件,容易出现蠕化率过低,球状石墨过多的问题;对于厚壁铸件,则容易使石墨呈片状而使蠕化失败。

表1-2 铸件壁厚与石墨形态(L/D)

| 铸件壁厚(mm) | 15   | 30   | 45    | 60    |
|----------|------|------|-------|-------|
| 含硫0.06%  | 8.03 | 8.38 | 10.30 | 13.10 |
| 含硫0.09%  | 7.40 | 9.93 | 10.80 | 10.10 |

#### (5) 孕育处理

孕育处理可以有效地减小蠕化处理后铁水的白口倾向,增加石墨的成核核心,使石墨的成核率增加,因而必然使石墨的球化倾向增加。

表1-3为本书作者在型内蠕化条件下,采用不同的孕育剂加入量所获得的铸铁石墨形态的试验结果。可以看出,随着孕育剂加入量的增加,石墨长宽比减小,即石墨形态向球状发展。对长宽比为2左右的铸铁而言,其组织中80%以上的石墨实际上已为球状石墨。因此,在蠕墨铸铁的生产过程中,过大的孕育剂加入量实际上不利于蠕虫状石墨的获得。

表1-3 孕育剂加入量与石墨的长宽比(L/D)

| 孕育剂加入量(%) | 0.3  | 0.5  | 0.7  | 0.9  | 1.1  |
|-----------|------|------|------|------|------|
| 成分A       | 5.87 | 3.69 | 3.11 | 2.74 | 2.98 |
| 成分B       | 4.85 | 4.33 | 2.11 | 2.66 | 2.25 |

注:孕育剂:75-硅铁;蠕化剂:Re-Mg-Ti-Ca合金。

### 1-1-2 蠕墨铸铁的共晶团

在蠕墨铸铁的共晶团内部,其石墨的立体结构与片墨铸铁相似,多分支而又相互连接。但在共晶团之间,石墨并不连接,每个共晶团由各自相互独立的核心所长大形成。在片墨铸铁中,由于片状石墨的生长线速度较快,因而一个共晶团内石墨片的尖端往往嵌入其它共晶团内,即在片墨铸铁中,片状石墨往往贯通于共晶团之间。上述已被深腐蚀组织观察所证实。这一点是蠕墨铸铁共晶团与片墨铸铁共晶团的不同点之一。

蠕墨铸铁共晶团与其它铸铁共晶团不同之处还在于其尺寸大小。从表1-4可以看出,单位面积蠕墨铸铁共晶团数目处于片墨铸铁与球墨铸铁之间;同时,在蠕墨铸铁中,随着蠕化率的降低,组织中球状石墨数目的增加,其共晶团逐渐细化。

表1-4 不同铸铁的共晶团数目(个/cm<sup>2</sup>)<sup>[6]</sup>

| 材 质 | 片墨铸铁  |       | 蠕墨铸铁(不同蠕化率%) |        |        | 球墨铸铁    |
|-----|-------|-------|--------------|--------|--------|---------|
|     | HT200 | HT250 | V100         | V60~80 | V30~50 |         |
| 共晶团 | 10~20 | 20~30 | 20~40        | 30~50  | 50~80  | 100~110 |

孕育处理是细化蠕墨铸铁共晶团最有效的措施之一。加强孕育效果,增加石墨的成核核心,能使蠕墨铸铁的共晶团得到细化,石墨尺寸也相应减小。

硫含量是影响蠕墨铸铁共晶团大小与石墨尺寸的因素之一。本书作者用型内蠕化方法研究不同含硫量蠕墨铸铁石墨尺寸后认为,在保证蠕化的前提下,硫有明显使石墨尺寸减小的倾向(表1-5)。这表明铁水中经蠕化处理所产生的硫化物对蠕虫状石墨的形核有一定的促进作用。表1-5的试验结果也说明,铸件壁厚的增加会导致石墨的粗化,使蠕墨铸铁的共晶团尺寸变大。因此,从细化组织的角度,对大断面蠕墨铸铁件加强孕育效果尤为重要。

表1-5 不同铁水硫量及铸件壁厚条件下蠕虫状石墨尺寸( $\text{mm}^2 \times 10^{-4}$ )

| S(%)  | 壁 厚 (mm) |      |      |      |
|-------|----------|------|------|------|
|       | 15       | 30   | 45   | 60   |
| 0.026 | 26.0     | 32.7 | 34.9 | 30.7 |
| 0.060 | 20.5     | 21.7 | 25.4 | 27.9 |
| 0.090 | 22.1     | 23.6 | 23.5 | 24.0 |

### 1-1-3 蠕墨铸铁的基体组织

由于铸铁一次结晶对二次结晶的影响,蠕墨铸铁在铸态具有较高的铁素体含量(40~50%)。如何获得珠光体基体的蠕墨铸铁,一靠合金化,二靠合适的热处理。

#### 1. 化学成分对蠕墨铸铁基体组织的影响

##### (1) 硅与锰

硅作为强烈的石墨化元素其含量的提高必然增加蠕墨铸铁的铁素体量,而锰的加入则可在一定程度上抑制石墨化,促进珠光体的形成。H. H. Cornell 和 C. R. Loper Jr. 系统研究了硅与锰共同作用与基体组织的关系(图1-6)。从试验结果可以看出,要获得80%以上的珠光体基体,其硅锰比必须小于1,这就预示着需要加入约2.5%的锰量才能获得以珠光体为主的基体组织,因此,单独依靠锰作为合金元素,要获得完全珠光体的蠕墨铸铁是困难的。

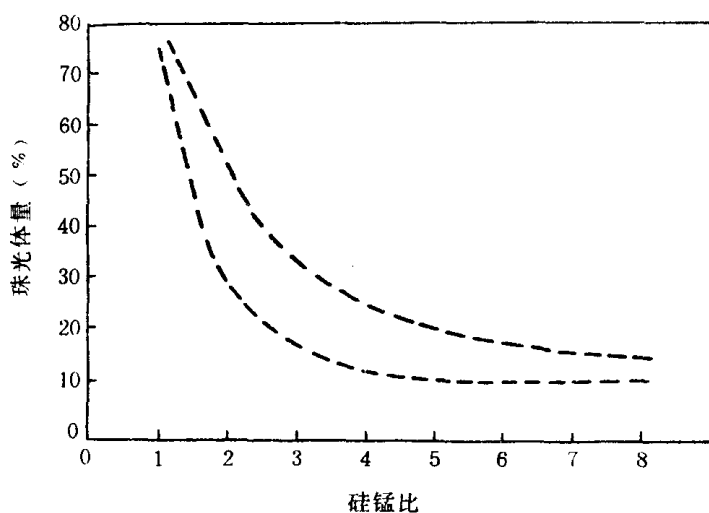


图1-6 硅锰比与基体珠光体量<sup>[3]</sup>

##### (2) 铈

表1-6所列试验结果表明,铈作为强烈的反石墨化元素,可以有效地增加蠕墨铸铁中的珠光体数量,微量铈的加入在一定壁厚范围内可以获得全部珠光体组织,但过量铈的

加入会导致蠕墨铸铁石墨形态的恶化。因此,用铈作为合金元素来稳定珠光体其适量范围仍需进一步研究。

表 1-6 铈及铸件壁厚对铸态蠕墨铸铁基体组织的影响<sup>[4]</sup>

| Sb(%) | 基体组织(P% + F%) |           |           |           |           |
|-------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|       | 3mm           | 6mm       | 12mm      | 25mm      | 50mm      |
| 0     | 25K + 75P     | 80P + 20F | 30P + 70F | 25P + 75F | 25P + 75F |
| 0.005 | 30K + 70P     | 80P + 20F | 70P + 30F | 60P + 40F | 50P + 50F |
| 0.008 | 30K + 70P     | 75P + 25F | 70P + 30F | 60P + 40F | 50P + 50F |
| 0.011 | 25K + 75P     | 30P + 20F | 70P + 30F | 70P + 30F | 60P + 40F |
| 0.017 | 25K + 75P     | 85P + 15F | 80P + 20F | 80P + 20F | 70P + 30F |
| 0.023 | 20K + 80P     | 90P + 10F | 85P + 15F | 90P + 10F | 85P + 15F |
| 0.029 | 15K + 85P     | 100P      | 100P      | 95P + 5F  | 95P + 5F  |
| 0.035 | 20K + 80P     | 100P      | 100P      | 100P      | 95P + 5F  |
| 0.100 | 20K + 80P     | 100P      | 100P      | 100P      | 100P      |

注:K 为碳化物含量(%);P 为珠光体含量(%);F 为铁素体含量(%)。

铸件壁厚在一定程度上也影响蠕墨铸铁的基体组织。由于铸件壁厚的增加将使铸件的冷却速度减缓,从而使固态石墨化进行的更加充分,因而使得基体组织中的铁素体量增多,珠光体量减少。

### (3) 碳当量

碳和硅都促进铸铁的石墨化,故碳当量的提高,使基体中的珠光体量减少。图 1-7 为用生产中的统计数据所得碳当量与蠕墨铸铁珠光体量的关系。

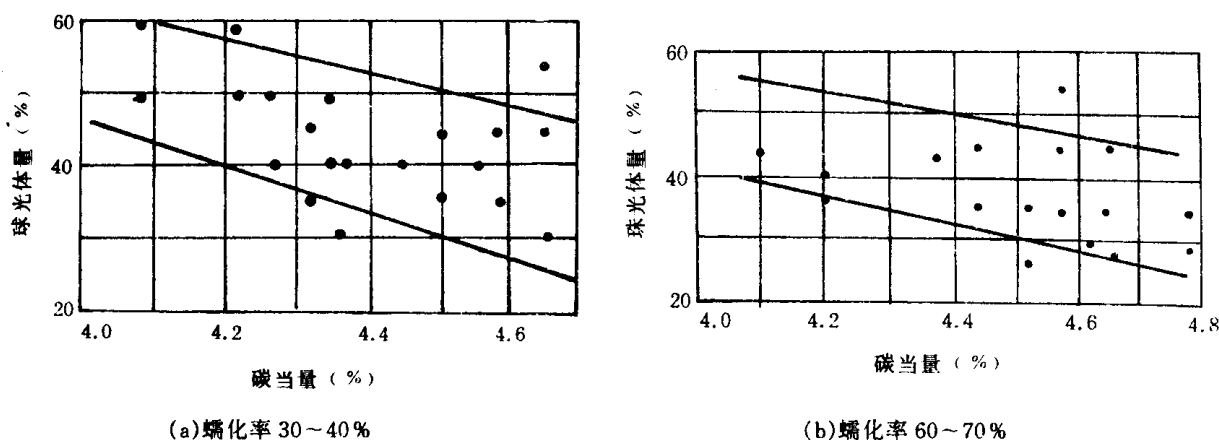


图 1-7 碳当量对蠕墨铸铁珠光体量的影响<sup>[2]</sup>

## 2. 蠕墨铸铁的热处理

正火处理是获得珠光体基体的有效途径之一。其中正火温度的合理选择是关键因素之一。图 1-8 为正火温度和保温时间对蠕墨铸铁珠光体量的影响。可以看出,正火温度的提高及在一定范围内保温时间的延长均可显著提高基体中的珠光体量。研究结果也证明,若正火温度低于 900℃,无论保温时间怎样延长,都很难得到珠光体量大于 80% 的基体组织。因此,对蠕墨铸铁而言,合适的正火温度应选择在 950℃ 以上。

对蠕墨铸铁而言,能否像球墨铸铁一样通过淬火处理获得针状基体组织来大幅度提高材质的性能,目前的研究甚少,但已有研究报道测定了蠕墨铸铁的C曲线。

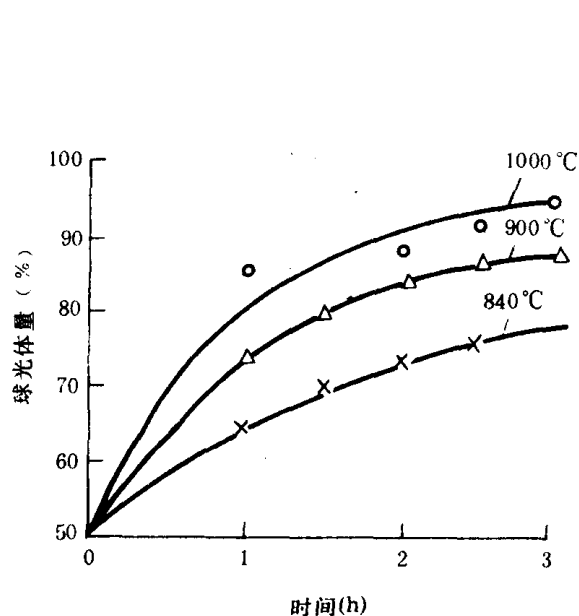


图 1-8 正火温度、保温时间与珠光体量<sup>[6]</sup>

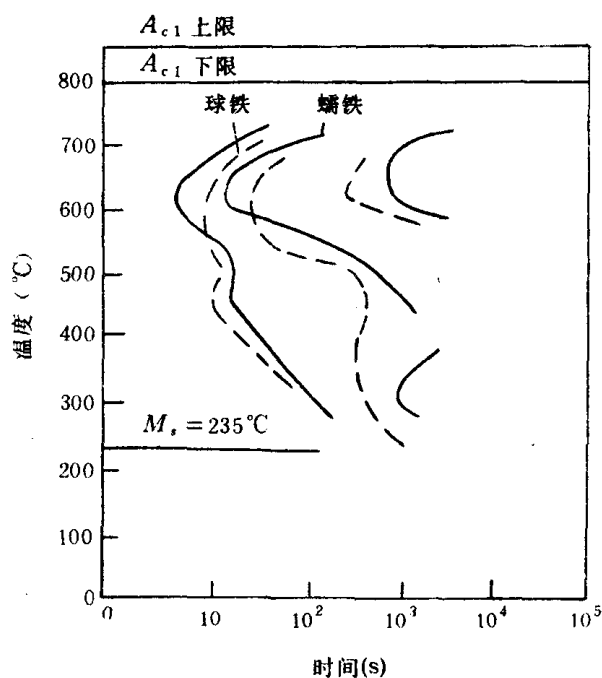


图 1-9 蠕墨铸铁和球铁的C曲线<sup>[6]</sup>

图 1-9 为山东机械设计研究院用金相硬度法及膨胀法所测得的蠕墨铸铁的临界点及C曲线,所采用蠕墨铸铁的化学成分为 C:3.58%, Si:3.02%, Mn:0.65%, P:0.095%, S:0.018%。

与球墨铸铁C曲线相比,蠕墨铸铁C曲线鼻尖部分左移,转变终了线右移。从临界转变温度来看,球墨铸铁和蠕墨铸铁相近,蠕墨铸铁的临界温度略高于球墨铸铁的临界温度(表 1-7)。

表 1-7 球墨铸铁和蠕墨铸铁的临界转变温度(°C)<sup>[6]</sup>

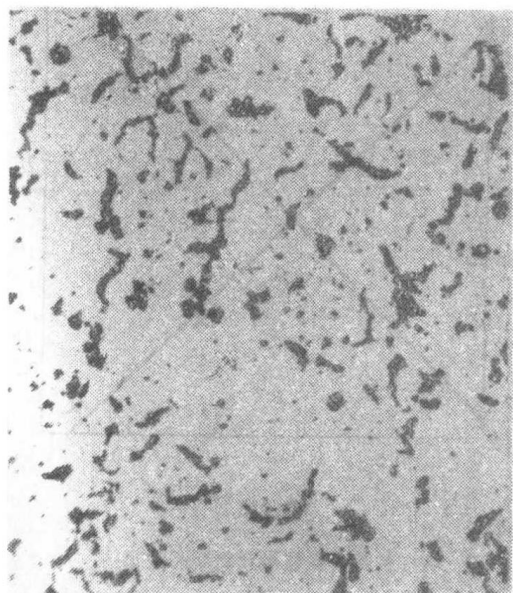
| 材 质  | $A_{c1}$ 上限 | $A_{c1}$ 下限 | $A_{r1}$ 上限 | $A_{r1}$ 下限 |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 蠕墨铸铁 | 860         | 805         | 805         | 720         |
| 球墨铸铁 | 850         | 790         | 775         | 725         |

#### 1-1-4 含磷蠕墨铸铁的组织

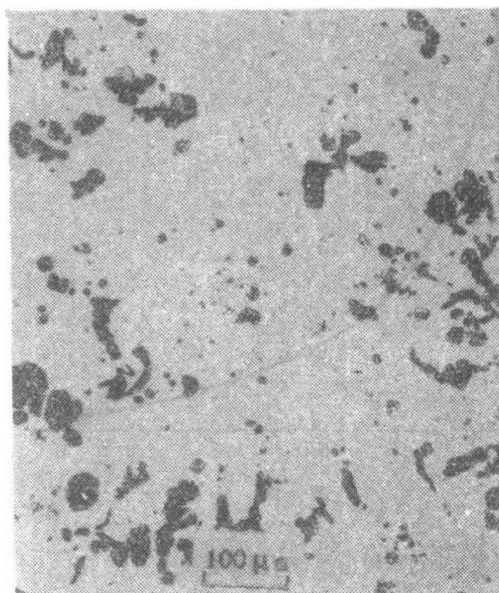
作为制动材料,通常加入相当数量的磷(0.5~2.5%)以改善其摩擦学性能。由于磷含量高,含磷蠕墨铸铁有其独特的组织特点。

磷在铸铁中的溶解度极低,且常以磷共晶的形式偏聚,而磷共晶又属低熔点共晶。因此在磷含量比常规蠕墨铸铁高出许多的含磷蠕墨铸铁中,大量磷共晶的析出必然会明显影响蠕虫状石墨的形核与长大,从而影响石墨的形态、大小及分布。

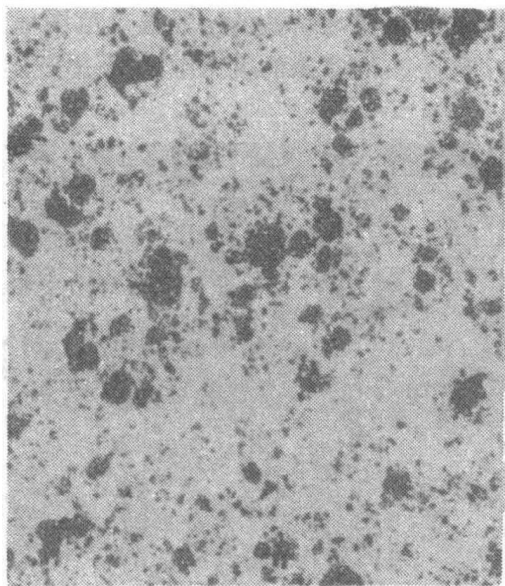
图 1-10 为不同含磷量蠕墨铸铁的金相组织。磷对蠕墨铸铁石墨相的影响主要表现在石墨数量及石墨形态上。本书作者经定量分析得出,在一定蠕化剂加入量的条件下,随着磷含量的提高,蠕墨铸铁石墨的长宽比减小,即石墨向球状发展;同时,石墨数量减少,磷共晶数量增加(图 1-11,图 1-12)。



(a) P% = 0.05



(b) P% = 0.5



(c) P% = 1.55

图 1-10 不同含磷量蠕墨铸铁的石墨形态

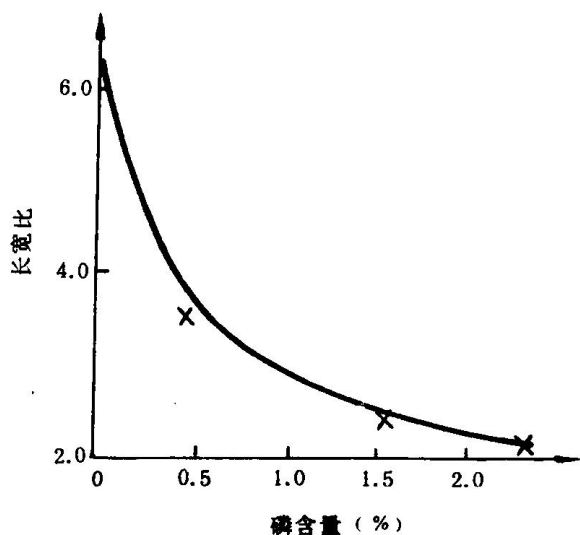


图 1-11 磷含量与石墨长宽比<sup>[7]</sup>

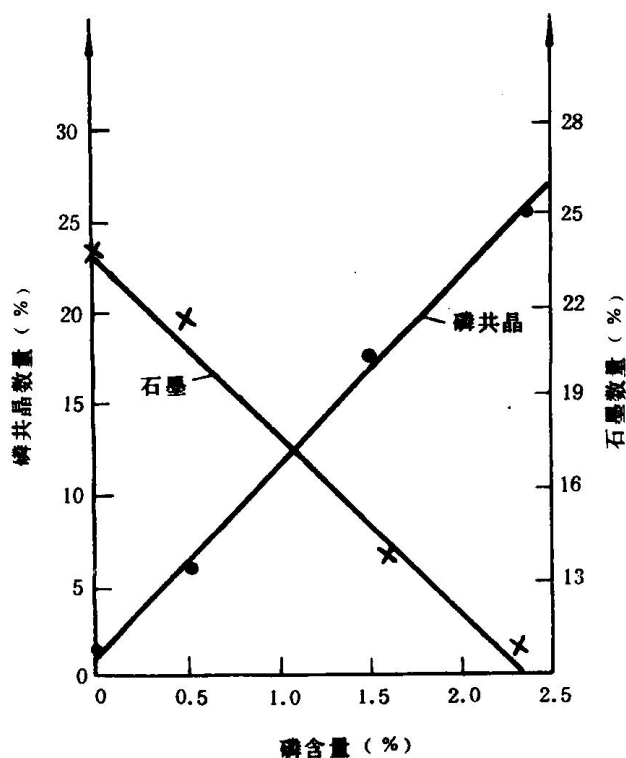


图 1-12 磷含量与石墨数量及磷共晶数量<sup>[7]</sup>

经蠕化处理后的铁水具有较大的过冷倾向,故在含磷铸铁中形成的磷共晶以三元磷共晶( $\text{Fe}_3\text{P} + \text{Fe}_3\text{C} + \text{Fe}$ )为主(图 1-13),随磷含量的增加,磷共晶数量增加,以  $\text{Fe}_3\text{C}$  化合碳析出的碳量增加,以石墨相析出的碳量必然减少,故蠕墨铸铁的石墨数量必然减少。同时,随着蠕墨铸铁中磷含量的增加,蠕墨铸铁的结晶温度范围增大,使其凝固过程发生变化,从而影响蠕墨铸铁的石墨形态。在富磷的铁水中,当石墨-奥氏体共晶结晶时,由于溶

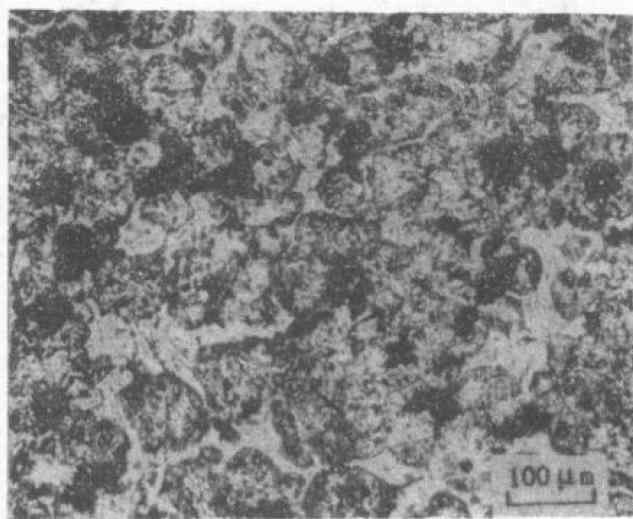


图 1-13 含磷铸铁的磷共晶(P% = 1.5)硝酸酒精腐蚀



质再分布之故,大量的磷富聚于石墨-奥氏体生长界面的前沿,抑制了石墨的长大。磷含量越高,存在于石墨-奥氏体晶粒之间将以三元磷共晶形式析出的富磷液体金属越多,对石墨-奥氏体共晶体生长的抑制作用越强,蠕虫状石墨越难于长大。本书作者在试验中发现,含磷 2.5% 的铁水几乎不能成功地处理为蠕墨铸铁,此时所得的石墨全部为点状石墨。因此,用过高磷量的铁水生产蠕墨铸铁似乎很困难。

## § 1-2 性 能

### 1-2-1 蠕墨铸铁的常规力学性能

#### 1. 应力-应变曲线特点及强度性能

图 1-14 为典型的铁素体和珠光体蠕墨铸铁的拉伸应力-应变曲线。从应力-应变曲线来看,蠕墨铸铁同其它大多数工程材料一样,在一定的应力下表现为线弹性,而片墨铸铁从低应力起它的应力-应变曲线就表现出弯曲;与球墨铸铁相比,蠕墨铸铁的比例极限较低。在拉伸性能上,蠕墨铸铁介于高强度片墨铸铁与球墨铸铁之间(表 1-8)。

表 1-8 不同铸铁的强度<sup>[9]</sup>

| 分 类             | 碳当量(%) | 屈服强度(MPa) | 拉伸强度(MPa) | 延伸率(%) |
|-----------------|--------|-----------|-----------|--------|
| 片墨铸铁(ASTM 标准牌号) |        |           |           |        |
| A48-74 No. 25   | 4.4    | 105       | 175       | <1     |
| A48-74 No. 30   | 4.2    | 140       | 211       | <1     |
| A48-74 No. 45   | 3.6    | 175       | 316       | <1     |
| 蠕墨铸铁            | 4.2    | 232~288   | 337~401   | 3~5    |
| 球墨铸铁            | 4.2    | 267~330   | 422~492   | 7~12   |

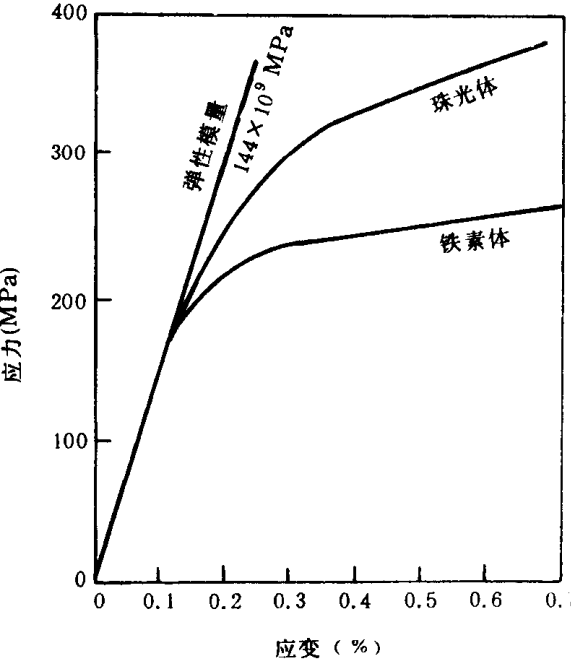


图 1-14 不同基体蠕墨铸铁拉伸状态的应力-应变曲线<sup>[8]</sup>

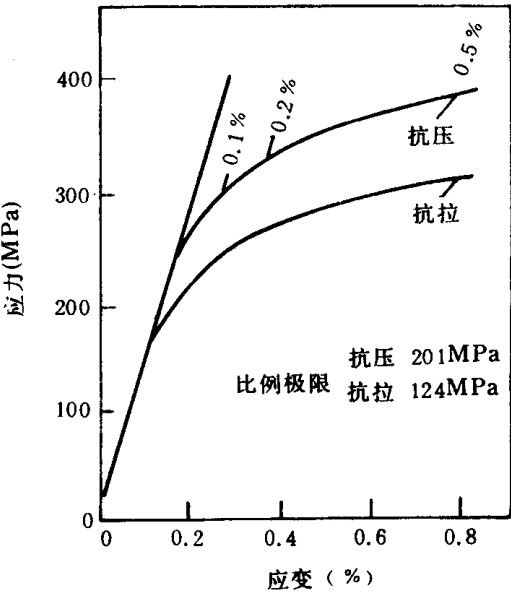


图 1-15 蠕墨铸铁拉伸与压缩状态的应力-应变曲线<sup>[8]</sup>

图 1-15 为蠕墨铸铁拉伸应力 - 应变曲线与压缩应力 - 应变曲线。在压缩条件下, 蠕墨铸铁在一定的应力下也表现出弹性。就强度水平而言, 其抗压屈服强度显著高于抗拉屈服强度, 抗压强度极限可达抗拉强度的 3 倍以上(表 1-9)。

表 1-9 蠕墨铸铁抗拉与抗压强度(MPa)<sup>[8]</sup>

| 珠光体蠕墨铸铁 | $\sigma_{0.1}$ | $\sigma_{0.2}$ | 极限强度 |
|---------|----------------|----------------|------|
| 抗压强度    | 321            | 347            | 1212 |
| 抗拉强度    | 246            | 272            | 380  |

在低应力下, 测定的蠕墨铸铁的弹性模数在 138~165MPa 之间, 该数值高于一般片墨铸铁的弹性模量, 但低于球墨铸铁的弹性模数。研究表明, 随着蠕化率的降低, 其弹性模数值增加, 同时, 碳当量的提高, 铸件壁厚的加大, 都会使基体中的铁素体量增多, 使弹性模数有所减小。

## 2. 影响蠕墨铸铁强度的因素

### (1) 化学成分

化学成分对蠕墨铸铁抗拉强度的影响总体来讲与球墨铸铁类似, 随着碳当量的增加, 蠕墨铸铁的抗拉强度有所降低, 但这种影响的敏感程度远低于片墨铸铁(图 1-16)。因此, 在比较宽的碳当量范围内, 蠕墨铸铁具有高的强度, 即使碳当量高达 4.4% 的蠕墨铸铁, 其强度也高于低碳当量的高强度片墨铸铁。

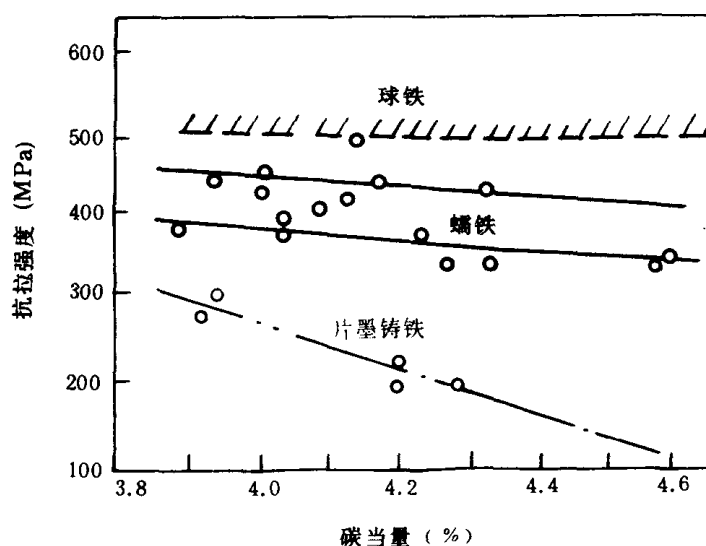


图 1-16 碳当量对铸铁强度性能的影响<sup>[9]</sup>

在基体组织基本相同的条件下, 硅的固溶强化作用在一定程度上使蠕墨铸铁拉伸性能提高。对铸态和退火态的蠕墨铸铁而言, 随着硅量的提高, 其抗拉强度和屈服强度都有一定程度的提高, 但对于退火态铁素体基体的蠕墨铸铁, 其延伸率有一定程度的降低(图 1-17)。

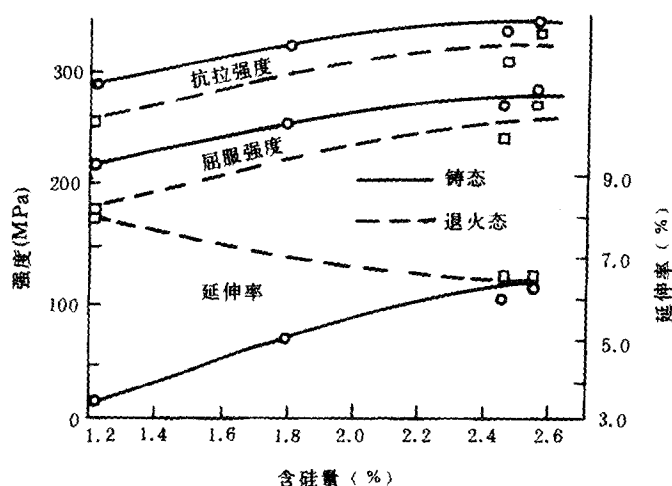


图 1-17 含硅量对蠕墨铸铁拉伸性能的影响<sup>[8]</sup>

在蠕墨铸铁中,硅与锰对基体中的珠光体量在一定程度上可起到调节作用,因而硅和锰交互作用的结果对蠕墨铸铁的拉伸性能会产生一定的影响。硅锰比的提高使基体中的铁素体量增加,因而使其强度性能降低,但延伸率有所提高(图 1-18)。

#### (2) 石墨形态

在蠕墨铸铁中,随着蠕化率的降低,蠕墨铸铁的抗拉强度与延伸率随之提高(图 1-19)。蠕化率对蠕墨铸铁的影响并非线性关系,研究报道,当球化率增加到 60% 后,即蠕虫状石墨的数目小于 40% 之后,球化率再提高时,蠕墨铸铁强度、延伸率的提高速度大大减小。

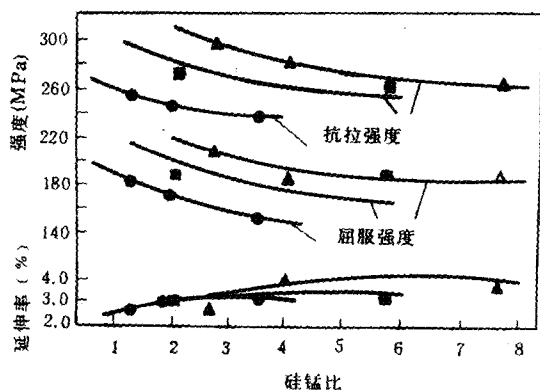


图 1-18 Si/Mn 对蠕墨铸铁  
拉伸性能的影响<sup>[9]</sup>

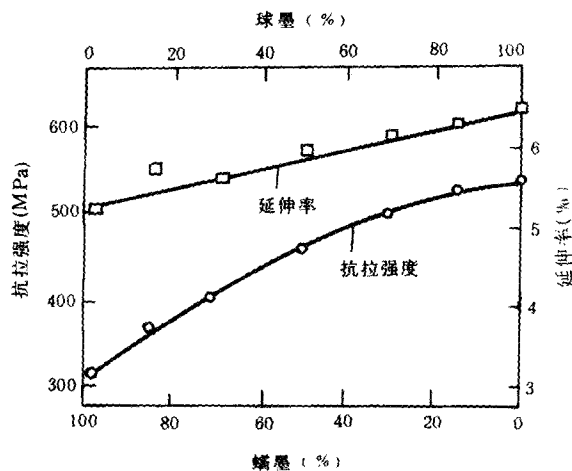


图 1-19 球墨数量对蠕墨铸铁  
拉伸性能的影响<sup>[8]</sup>

在蠕墨铸铁中,若出现片状石墨至少少量过冷石墨,其强度性能会大幅度降低,这种降低转变是突变的,而与蠕墨铸铁向球墨铸铁的逐渐变化不同(图 1-20)。