

# 各种铸铁的机械性能

(译 文 集)

〔英国〕帕尔默 (K.B.Palmer) 等著

郑州机械科学研究所铸造室 编译

第一机械工业部技术情报所

## 编 译 前 言

铸铁是一种重要的工程结构材料，由于它具有良好的铸造性能和工艺性能，生产简便，在机械工业中应用极为广泛。

随着科学技术的发展，铸铁材料的研究和生产也有很大的发展，特别是球墨铸铁的出现，使铸铁性能产生很大的“飞跃”（强度可达150公斤/毫米<sup>2</sup>以上，延伸率可达27~30%），改变了人们对铸铁材料的传统认识。随着各种铸铁材料应用范围的不断扩大，对其提出越来越多的性能要求，除一般常规机械性能外，还有必要了解其疲劳性能、低温性能、高温性能等。为了使大家对铸铁的机械性能有一较全面的认识，根据毛主席“洋为中用”的教导，我们结合工作需要，翻译了1972年在英国召开的“现代铸铁件工程性能会议”上发表的五篇文章，文章分别介绍了各种铸铁（灰铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁）的疲劳性能、低温性能、冲击韧性、高温性能及在拉伸、压缩、剪切、扭转等应力作用下性能的变化情况，供大家参考，由于我们水平有限，错误之处在所难免，恳请批评指正。

一九七六年十二月

## 目 录

|                            |                                    |
|----------------------------|------------------------------------|
| 铸铁的疲劳性能 .....              | 〔英国〕帕尔默 (R. B. Palmer) 著 (1)       |
| 一、灰铸铁的疲劳性能 .....           | (2)                                |
| 二、球墨铸铁的疲劳性能 .....          | (9)                                |
| 三、可锻铸铁的疲劳性能 .....          | (14)                               |
| 四、应力状态对疲劳性能的影响 .....       | (17)                               |
| 五、铸铁的耐蚀疲劳性能 .....          | (21)                               |
| 铸铁的低温性能 .....              | 〔英国〕里卡兹 (P. J. Rickards) 著 (26)    |
| 一、前言 .....                 | (26)                               |
| 二、灰铸铁 .....                | (27)                               |
| 三、球墨铸铁 .....               | (30)                               |
| 四、可锻铸铁 .....               | (36)                               |
| 五、奥氏体铸铁 .....              | (38)                               |
| 关于铸铁的冲击性能 .....            | 〔英国〕吉尔伯特 (G. N. J. Gilbert) 著 (44) |
| 一、引言 .....                 | (44)                               |
| 二、韧性—脆性转变 .....            | (44)                               |
| 三、石墨和基体组织对韧性—脆性转变的影响 ..... | (46)                               |
| 四、铁素体基体球墨铸铁和可锻铸铁 .....     | (47)                               |
| 五、珠光体基体的球墨铸铁和可锻铸铁 .....    | (53)                               |
| 在应力作用下铸铁的性能变化 .....        | 〔英国〕吉尔伯特 (G. N. J. Gilbert) 著 (62) |
| 一、前言 .....                 | (62)                               |
| 二、可锻铸铁和球墨铸铁 .....          | (63)                               |
| 三、普通灰铸铁 .....              | (71)                               |
| 铸铁的高温性能 .....              | 〔英国〕帕尔默 (K. B. Palmer) 著 (79)      |
| 一、生长与剥落 .....              | (79)                               |
| 二、短时高温性能 .....             | (84)                               |
| 三、蠕变和持久性能 .....            | (87)                               |
| 四、推荐采用的最大许用应力 .....        | (98)                               |

# 铸 铁 的 疲 劳 性 能

〔英国〕帕尔默(K.B.Palmer)著

## 疲 劳 断 裂

比一次载荷引起断裂为低的反复载荷下的断裂叫做疲劳断裂。韧性材料在抗拉试验时的断裂伴随着颇大的变形，但是当它们在交变应力作用下却产生脆性断裂。如果低于材料抗拉强度的拉伸应力以及相等的压缩应力交变地作用于试样，在交变应力达到一定周次后就发生疲劳断裂，当应力较低时，引起断裂的应力循环数增加，直至达到无论多少次的循环亦不发生断裂的应力水平。这个应力叫做疲劳极限，以  $S_0$  表示之。

在交变应力循环中，疲劳试验结果经常按引起断裂的应力循环数  $N$  对拉伸应力振幅  $S_a$  来绘制疲劳曲线图。 $N$  值通常用对数值表示，疲劳曲线（或  $S_a/\log N$  曲线）如图 1 所示。这

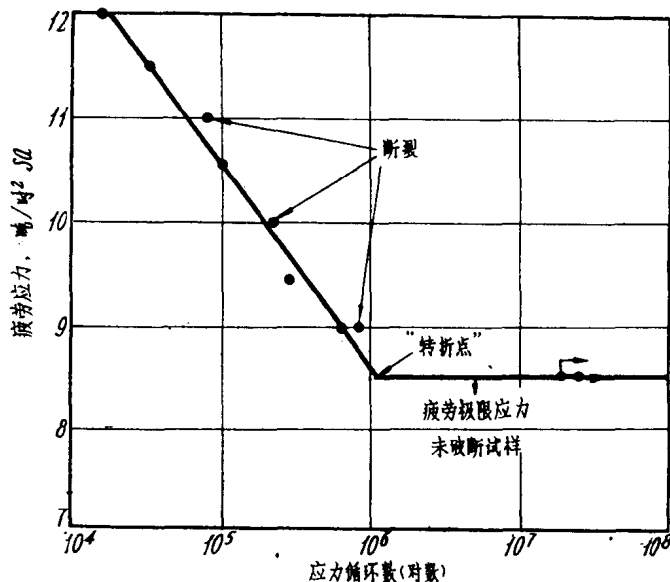


图 1 铸铁的典型疲劳曲线

是铸铁的典型疲劳曲线。斜线表示超越疲劳极限的各种应力引起断裂的应力循环数。水平线表示低于该线的应力不再发生断裂。对于铸铁材料，疲劳曲线的转折点（“knee”）经常出现在  $1 \times 10^6$  和  $10 \times 10^6$  循环数之间，同时大多数研究者已经假定如果试样能够承受  $10 \times 10^6$  次的应力循环，它将能无限次地承受该应力。然而，在回转弯曲疲劳试验中，铸铁的断裂有时候发生在大于  $10 \times 10^6$  循环数以后，从而英国铸铁研究协会将其破坏极限规定到  $20 \times 10^6$  周次。在交变回转弯曲试验中得到对疲劳适用的许多数据（试样承受简单的悬臂载荷，或者通过同一水平的四点加载于整个试样计量长度）。通常，试样直径小于 0.5 吋。除特殊情况外，本文所列举的疲劳数据都是在这样的试验条件下获得的。

必须注意，在特殊条件下，例如在非空气介质中进行试验时不能获得明确的疲劳极限。在这种情况下，就需要以一定的应力循环数来衡量疲劳强度， $S_n$ 。

试验速度

如同对其他许多材料一样，增加应力循环频率到大约30,000转/分，对疲劳强度只产生很小影响。克劳斯 (krouse) 指出：对无缺口非合金灰铸铁试样，在回转弯曲疲劳试验中转速从 10,000转/分增至 30,000转/分，疲劳极限增加 10%，但在有缺口灰铸铁中只是稍微有增加；对合金灰铸铁却略有降低。

灰 铸 铁 的 疲 劳 性 能

(一) 疲劳比

灰口铸铁的疲劳极限常与抗拉强度有关，疲劳极限：抗拉强度之比（叫疲劳比）在0.33~0.62之间变化，即使超越这范围也是偶然出现。近几年来，影响疲劳比的因素已经了解的更加清楚了。这方面下面还要论述。

好多年来，英国铸铁研究协会做了许多疲劳试验工作，并把某些试验铁水的化学成分列于表 1。使用的无缺口和有 V 形缺口的试样尺寸绘于图 2。

在英国铸铁研究协会的试验中，采用含磷量一般低于0.2%，铸态主要是珠光体的灰铸铁，并且把它铸成875吋和1.2吋直径的断面，以获得高质量工程铸铁的典型片状石墨组织。试验指出，抗拉强度为16吨/吋<sup>2</sup>到大于20吨/吋<sup>2</sup>的铸铁的疲劳比约为0.45 其结果在表 2 铸铁序号 1—5中得到说明。

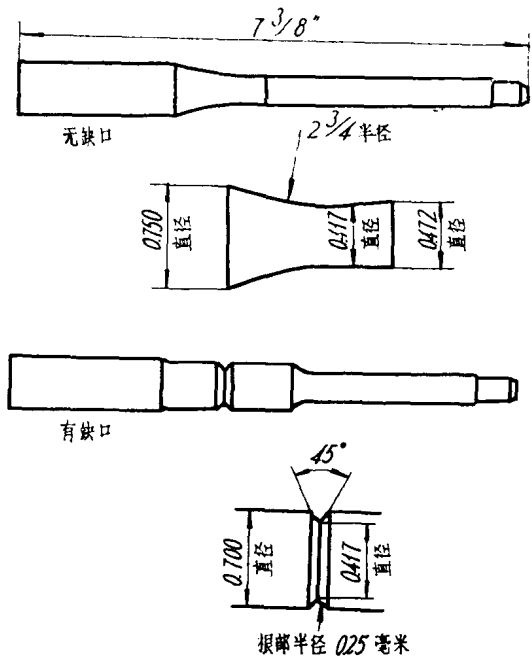


图 2 无缺口的和 V-缺口的疲劳试样

表1 英国铸铁研究协会疲劳试验铁水的化学成分(%)

| 灰铸铁序号 | C    | Si   | Mn   | S     | P     | Ni   | Cu   | Cr   | Mo   | 浇注成断面直径, 吋 | 包内处理 |
|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------------|------|
| 1     | 3.32 | 2.16 | 0.68 | 0.086 | 0.072 |      |      |      |      | 0.875      | 孕育   |
| 2     | 3.13 | 2.31 | 0.69 | 0.141 | 0.67  | 0.12 |      | 0.12 |      | 1.2        | 孕育   |
| 3     | 2.99 | 2.09 | 0.60 | <0.07 | <0.05 |      |      |      |      | 0.875      | 孕育   |
| 4     | 3.02 | 1.57 | 0.87 | 0.096 | 0.17  | 0.16 | 0.11 | 0.10 | 0.57 | 1.2        | 孕育   |
| 5     | 2.56 | 1.63 | 0.76 | 0.043 | 0.036 |      |      |      |      | 0.875      | 孕育   |
| 6     | 3.08 | 2.00 | 0.68 | 0.047 | 0.043 | 2.21 |      |      | 0.71 | 0.875      | 孕育   |
| 7     | 3.09 | 2.19 | 0.64 | 0.055 | 0.042 | 1.58 |      |      | 0.59 | 0.875      | 孕育   |
| 8     | 2.93 | 3.11 | 0.60 | 0.025 | 0.028 | 1.25 |      |      | 0.65 | 0.875      | 孕育   |
| 9     | 2.91 | 2.16 | 0.64 | <0.07 | <0.05 | 1.92 |      |      | 1.10 | 0.875      | 孕育   |
| 10    | 3.43 | 2.10 | 0.70 | 0.102 | 0.22  |      |      |      |      | 3          | 孕育   |
| 11    | 3.36 | 2.01 | 0.70 | 0.106 | 0.26  |      |      |      |      | 3          | 未孕育  |
| 12    | 3.02 | 2.02 | 0.70 | 0.088 | 0.066 |      |      |      |      | 0.875      | 孕育   |
| 13    | 3.26 | 2.18 | 0.56 | 0.028 | 0.097 |      | V    | Ti   |      |            |      |
| 14    | 3.20 | 2.26 | 0.54 | 0.024 | 0.092 |      | 0.18 | 0.20 | 0.57 | 0.875      | 吹氮   |
| 15    | 3.27 | 2.01 | 0.70 | 0.076 | 1.17  |      |      |      |      | 0.875      | 孕育   |
| 16    | 3.25 | 1.87 | 0.54 | 0.026 | 0.54  |      |      |      |      | 0.875      | 孕育   |
| 17    | 3.13 | 1.75 | 0.46 | 0.080 | 0.099 |      |      |      |      | 3          | 孕育   |

抗拉强度约24~30吨/吋<sup>2</sup>的针状基体组织的铸铁其疲劳比约为0.38。当抗拉强度超过30吨/吋<sup>2</sup>疲劳比甚至更低(表2中的铸铁序号6—9)。为了设计的目的,通常可以假定抗拉强度16吨/吋<sup>2</sup>至20吨/吋<sup>2</sup>的疲劳比为0.45,抗拉强度23吨/吋<sup>2</sup>疲劳比为0.42,抗拉强度26吨/吋<sup>2</sup>或更大的疲劳比约为0.38。

表2 基体组织对疲劳比的影响

| 灰铸铁<br>序 号 | 抗拉强度<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 无 缺 口                    |      | 45° V型缺口                 |              |
|------------|--------------------------|--------------------------|------|--------------------------|--------------|
|            |                          | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳比  | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳强度<br>衰减因素 |
| 珠 光 体 铸 铁  |                          |                          |      |                          |              |
| 1          | 16.7                     | 7.5                      | 0.45 | 7.5                      | 1.0          |
| 2          | 18.3                     | 8.5                      | 0.46 | 8.5                      | 1.0          |
| 3          | 18.8                     | 8.5                      | 0.45 | —                        | —            |
| 4          | 21.7                     | 9.5                      | 0.44 | 8.5                      | 1.12         |
| 5          | 23.6                     | 10.5                     | 0.45 | —                        | —            |
| 针 状 铸 铁    |                          |                          |      |                          |              |
| 6          | 28.5                     | 11.0                     | 0.39 | —                        | —            |
| 7          | 29.1                     | 11.0                     | 0.38 | —                        | —            |
| 8          | 29.4                     | 11.5                     | 0.39 | —                        | —            |
| 9          | 33.9                     | 11.5                     | 0.34 | 8.5                      | 1.35         |

## (二) 石墨片大小

表3中的结果指出石墨片的大小显著地影响着疲劳比。铸铁铸成3吋断面的试棒时为粗片状石墨组织同时获得0.39~0.37之间低的疲劳比。断面0.875吋的试棒有较低的含碳量与非常细的石墨组织。疲劳比类似于或更高于铸成1.2吋断面的一般铸铁,在0.45~0.48之间变

动。专门处理极细的过冷石墨铸铁，其疲劳比特别高（0.65~0.66之间）。这些结果指出，随着石墨片尺寸缩小，疲劳比增加。所有上述试验采用 $\phi 0.417$ 吋试样（取自3吋试棒的边缘与中心之间）。

表 3 石墨片大小对疲劳性能的影响

| 灰铸铁<br>序 号    | 抗拉强度<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 无 缺 口                    |      | 45° V 型缺口                |              |
|---------------|--------------------------|--------------------------|------|--------------------------|--------------|
|               |                          | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳比  | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳强度<br>衰减因素 |
| 断面3吋珠光体铸铁     |                          |                          |      |                          |              |
| 10            | 13.0                     | 5.0                      | 0.39 | 5.0                      | 1.00         |
| 11            | 13.5                     | 5.0                      | 0.37 | 5.0                      | 1.00         |
| 断面0.875吋珠光体铸铁 |                          |                          |      |                          |              |
| 1             | 16.7                     | 7.5                      | 0.45 | 7.5                      | 1.00         |
| 12            | 20.9                     | 10.0                     | 0.48 | 7.0                      | 1.43         |
| 过 冷 石 墨 铸 铁   |                          |                          |      |                          |              |
| 13            | 14.4                     | 9.5                      | 0.66 | 5.0                      | 1.90         |
| 14            | 18.4                     | 12.0                     | 0.65 | 5.0                      | 2.40         |

表 4 灰铸铁的疲劳结果

| 铸 件                    | 抗拉强度<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 布氏硬度<br>HB10/3000 | 无缺口疲劳                    |      |
|------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|------|
|                        |                          |                   | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳比  |
| 壁厚1吋的缸套<br>壁厚3 1/4吋的缸套 | 14.1                     | 148               | 4.7                      | 0.33 |
|                        | 13.0                     | 138               | 4.5                      | 0.35 |
|                        | 11.3                     | 132               | 4.0                      | 0.36 |
|                        | 12.5                     | 139               | 4.5                      | 0.36 |
| 25吨的圆筒形铸件              | 9.5                      | 89                | 3.1                      | 0.33 |
|                        | 9.3                      | 91                | 3.2                      | 0.35 |
|                        | 9.1                      | 88                | 3.5                      | 0.38 |

莫尔（Moore）、莱昂（Lyon）和英格尔斯（Inglis）用 $\phi 0.35$ 吋试样（取自如表4所示的大铸件）进行疲劳试验。这些铸件由于在型中冷却缓慢持有粗片状石墨组织，壁厚1吋和 $3\frac{1}{4}$ 吋的缸套主要是珠光基体组织，而25吨的圆筒形铸件主要是铁素体基体组织。表4中的疲劳试验结果指出，疲劳比在所有试验中均较低，这样再次证实了随着石墨片的粗大使疲劳比值降低。

（三）含磷量

表5中的结果指出，疲劳比随含磷量的增加而增加；含磷1%的铸铁疲劳比为0.64，低磷铸铁疲劳比为0.45。含磷0.54%的铸铁可得到0.50的中间疲劳比。这些结果绘于图3。

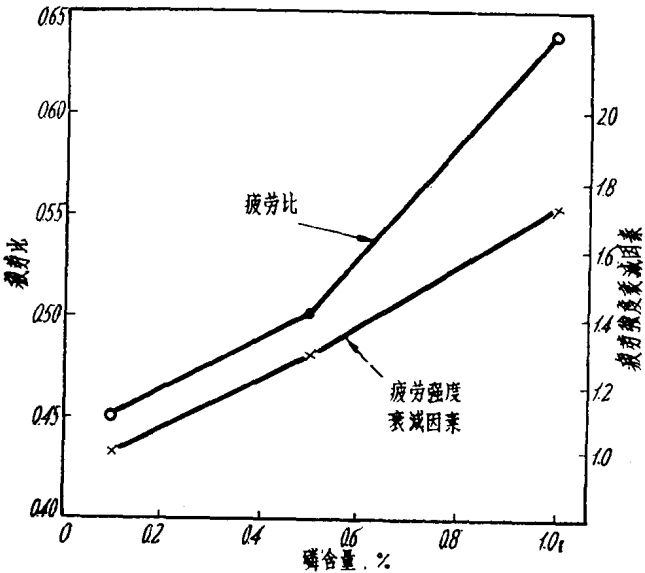


图 3 磷含量对灰口铸铁疲劳性能的影响

表5 含磷量的影响

| 铁<br>序号 | 含磷量<br>% | 抗拉强度<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 无 缺 口                    |      | 有 缺 口                    |              |
|---------|----------|--------------------------|--------------------------|------|--------------------------|--------------|
|         |          |                          | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳比  | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳强度<br>衰减因素 |
| 1       | 0.072    | 16.7                     | 7.5                      | 0.45 | 7.5                      | 1.00         |
| 16      | 0.54     | 18.1                     | 9.0                      | 0.50 | 7.0                      | 1.29         |
| 15      | 1.17     | 15.0                     | 9.5                      | 0.64 | 5.5                      | 1.73         |

美国材料试验协会的科默尔斯 (Kommers) 对铸铁进行的研究结果同样指出了磷的这一影响, 他对含磷量通常在 0.04~0.75% 范围内的铸铁做试验, 同时所有这些铸铁铸成  $\phi 1.4$  吋的试棒。疲劳比从低含磷量的 0.45 增加到含磷量 0.75% 的 0.50, 如图 4 所示。

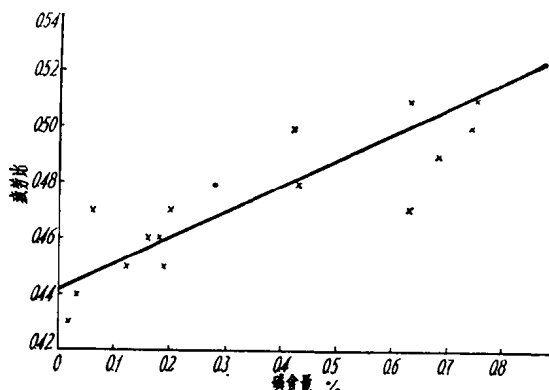


图4 磷含量对疲劳比的影响

注: 美国材料试验协会数据

#### (四) 缺口敏感性

钢的最佳疲劳性能只有在充分研磨试样以除去缺口后方能获得。表面光洁度对灰铸铁而言没有如此重要, 因为在它的表面由于有片状石墨早已存在着缺口, 所以它们对应力集中 (如像加工的缺口、槽或直孔等) 不很敏感。然而表 2 中的结果指出疲劳缺口敏感性随着抗拉强度的提高而提高。科默尔斯的研究结果证实了这一点, 他指出抗拉强度从 9 吨/吋<sup>2</sup> 提高到 19 吨/吋<sup>2</sup> 疲劳强度衰减因素从 1.0 提高到 1.3。

表 3 中的结果指出, 缺口敏感性主要决定于石墨结构。在无缺口条件下具有低疲劳比的断面直径为 3 吋的试棒, 在有缺口的条件下不降低疲劳极限, 这是由于粗片状石墨具有像加工缺口那样的缺口效应。在 0.875 吋断面上石墨较细, 加工缺口通常降低高强度铸铁的疲劳极限。因为缺口比石墨的存在有更大的影响。当出现非常细的过冷石墨组织时, 因这石墨非常小, 如有任何缺口效应或加工缺口, 将显著地降低疲劳极限。在这些结果的基础上可以假定疲劳缺口敏感性通常随着抗拉强度的提高而提高, 这是由于高强度铸铁有更细的石墨组织, 表 3 和表 5 指出, 借助细化石墨组织或增加含磷量的办法所提高的疲劳极限, 如该零件在有缺口的疲劳条件下工作将得不到什么好处, 这是因为它具有更高的缺口敏感性之故。

#### (五) 试样大小的影响

通常认为材料的疲劳极限随试样尺寸的增大而降低,并且只有当试样直径大于1吋左右时才保持恒定值。表6将试样直径 $\phi 0.417$ ,  $\phi 1$ 与 $\phi 2$ 吋的回转弯曲疲劳极限数据作了比较。 $\phi 0.417$ 和 $\phi 1$ 吋的试样取自断面直径3吋试棒的边缘与中心之间,同时用类似于疲劳试样直径的抗拉试棒作了疲劳比计算。

表6 试样大小的影响

| 铁<br>序号 | 疲劳试样<br>直径, 吋 | 抗拉强度<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 无 缺 口                    |      | 有 缺 口                    |              |
|---------|---------------|--------------------------|--------------------------|------|--------------------------|--------------|
|         |               |                          | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳比  | 疲劳强度<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳强度<br>衰减因素 |
| 17      | 0.417         | 17.3                     | 7.0                      | 0.41 | 7.0                      | 1.00         |
|         | 1.000         | 16.9                     | 6.4                      | 0.38 | 4.9                      | 1.31         |
|         | 2.000         | 16.4                     | 5.6                      | 0.34 | 3.6                      | 1.55         |

当直径从0.417吋增至2吋时,无缺口疲劳极限值的稍微减小使疲劳比从0.41降到0.34。所有试块的缺口轮廓是相同的(如图2所示),也就是持有根部半径为0.010吋的45°缺口。在较大试样中出现的较大的缺口敏感性是同直径增加、缺口严重性也增加相对应的。几何形状相似的缺口可以用作直接比较。然而结果指出,大断面灰铸铁零件与其用较大的缺口敏感性来表示还不如用从大铸件切取的小型疲劳试样所得的结果来表示。

伊根(Egan)从 $\phi 6.75$ 吋和 $\phi 8$ 吋的缸套切取 $\phi 1$ 吋的疲劳试样作试验,这些铸铁铸态组织是珠光体,其疲劳比为0.35(如表7所列铸铁之一)。这些高强度铸铁虽然铸成大断面尺寸,但有比较低的碳含量和好的石墨结构;这些使不出现象通常大断面铸件那样的低的疲劳比。所以,低的疲劳比认为主要是采用了大的疲劳试样的缘故。

表7 热处理对灰铸铁疲劳性能的影响

| 组 织   | 抗拉强度<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳比  | 由于热处理抗<br>拉强度提高<br>% | 由于热处理疲<br>劳极限提高<br>% |
|-------|--------------------------|--------------------------|------|----------------------|----------------------|
| 铸态    | 22.6                     | 7.7                      | 0.35 | —                    | —                    |
| 针状组织  | 28.3                     | 7.7                      | 0.28 | 25                   | 无                    |
| 马氏体组织 | 29.8                     | 8.0                      | 0.27 | 32                   | 3                    |

#### (六) 热处理的影响

大家知道,为提高钢的抗拉强度进行的热处理不能以同样的比例提高疲劳极限,这时铸铁也是这样。对于灰铸铁不常采用影响整个断面组织的强化热处理,但可用合金化来提高铸铁的强度。伊根研究了热处理对取自巨大断面铸件的低合金珠光体铸铁试棒的影响。对这些试样进行各种热处理以提高它们的抗拉强度与获得从珠光体到马氏体的各种不同的基体组织。

对 $\phi 1$ 吋试棒做疲劳试验,表7中的典型结果指出,热处理降低疲劳比,同时热处理显著地提高了抗拉强度但并没有按比例提高疲劳极限。

软化热处理(如退火得到铁素体)发现疲劳比升高(如表8所示)。这方面它们同强化热处理的效果相反。然而它们略微增加了疲劳的缺口敏感性。由于通常要求铸铁有较高的强度,

因此不常采用铁素体化退火或软化退火处理。

表 8 退火对灰铸铁的影响

| 铁 序 号 | 抗拉强度<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 无 缺 口                    |       | 有 缺 口                    |              |
|-------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|--------------|
|       |                          | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲 劳 比 | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳强度<br>衰减因素 |
| 1 铸态  | 16.7                     | 7.5                      | 0.45  | 7.5                      | 1.00         |
| 1 退火  | 9.8                      | 5.5                      | 0.56  | 4.0                      | 1.37         |
| 12 铸态 | 20.9                     | 10.0                     | 0.48  | 7.0                      | 1.43         |
| 12 退火 | 11.3                     | 5.5                      | 0.49  | 4.5                      | 1.22         |

### (七) 欠载应力与过载应力

在疲劳试验中, 循环应力低于疲劳极限叫材料承受欠载应力。反之, 应力大于疲劳极限叫承受过载应力。许多工作者从钢试样的过载与欠载应力疲劳试验中得知, 疲劳极限不是一固定值, 而取决于试样以前的应力史。逐渐地提高欠载应力可以提高疲劳极限, 而少量的短时期的过载可以产生损伤, 其结果降低疲劳极限同时这损伤随应力与循环次数而增大。这种损伤如果不太严重可以用逐渐提高试样的欠载应力来修补。用这种方法, 材料可以恢复或者超过它原来的疲劳极限。

**欠载应力** 英国铸铁研究协会对  $\phi 0.417$  吋试样在悬臂加载回转弯曲中加欠载应力。这些试样在疲劳试验之前用低于疲劳极限  $0.5$  吨/吋<sup>2</sup> 的应力作  $20 \times 10^6$  次的应力循环, 以测定多少欠载应力对疲劳极限有影响。对高强度和低强度铸铁所作的试验结果指出, 欠载应力对疲劳极限没有影响。

科默尔斯报导, 欠载应力能显著地提高疲劳极限。科默尔斯对抗拉强度  $8.9$  吨/吋<sup>2</sup> 铸铁所取得的结果绘于图 5。其疲劳极限随着欠载应力循环数增加而增加, 直到增加 25% 的最大值。该铸铁的原来疲劳极限是  $4.15$  吨/吋<sup>2</sup>, 欠载应力采用  $4.02$  吨/吋<sup>2</sup>。

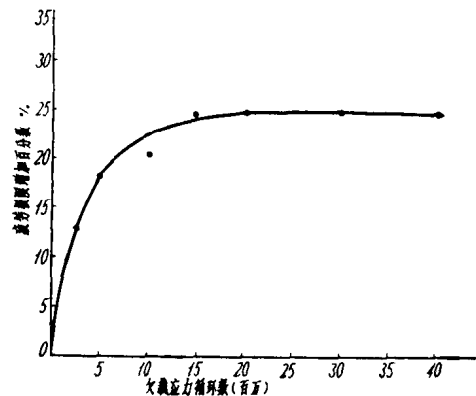


图 5 铸铁欠载应力循环的效应

注: 引自科默尔斯 (kommers)

莫尔, 莱昂和英格尔斯采取通常所说的“抚慰”(coaxing)的方法对抗拉强度  $9.3$  吨/吋<sup>2</sup> 的铸铁作了欠载应力试验, 用约  $0.25$  吨的增加量来增加加在试样上的应力同时各应力增加量之间运转数百万循环次, 用这工艺他们使疲劳强度增加了 43%。

由于英国铸铁研究协会的试验是在悬臂加载试样上进行的, 而其他工作者却是用四点加载的方式进行的。这也许能够解释为什么英国铸铁研究协会用欠载应力没有出现疲劳强度的改善而其他工作者却说提高了。虽然英国研究协会对抗拉强度  $20$  吨/吋<sup>2</sup> 的铸铁用四点加载方式做了一些试验, 然而这只是部分地证实了这一点。欠载应力以后疲劳极限约从  $8.25$  吨/吋<sup>2</sup> 增至  $9.0$  吨/吋<sup>2</sup>, 相当于增加 9% 左右, 而比别的工作者所报导的还小得多。英国铸铁研究协

会的试验采用比较高强度的铸铁而别的工作者采用低强度的粗片状石墨铸铁。由于缺乏更多的报导，可以假定欠载应力对灰口铸铁的疲劳无影响而设计时仍取通常的疲劳极限。

**过载应力** 科默尔斯对铸铁所作的一系列试验发现过载应力到疲劳极限的1.3倍时引起损伤。由于过载造成的损伤可以用疲劳极限改变的百分数来估值，对抗拉强度15吨/吋<sup>2</sup>无缺口铸铁试样当过载10%时疲劳极限降低2%左右，过载3%时降低15%左右。这疲劳极限的降低随着过载应力循环次数的增而增加。在有缺口的试验中，科默尔斯实际上发现由于过载应力，疲劳极限略有增加（约4%）。

从这些结果，科默尔斯推断铸铁有承受过载应力的显著本能同时，他的结果亦被拉塞尔（Russell）与韦尔克（Welcker）充分地证实，然而这些工作者对抗拉强度23吨/吋<sup>2</sup>钼处理的铸铁所作的试验指出，该铸铁对承受过载应力的能力很小。所以合理的结论是：灰铸铁对承受过载应力而无损伤的能力，随抗拉强度的提高而降低。

#### （八）高温性能

铸态灰铸铁通常不用于400℃以上的高温，所以高于该温度的疲劳性能很少有实用意义。众所周知，灰铸铁短时间的高温，抗拉强度能维持到400℃，但是在更高的温度就很快下降。科林斯（Collins）与史密斯（Smith）指出，疲劳性能同样可以维持到400℃，疲劳比直到温度400℃没有显著的改变。这些疲劳结果绘图表示于图6。

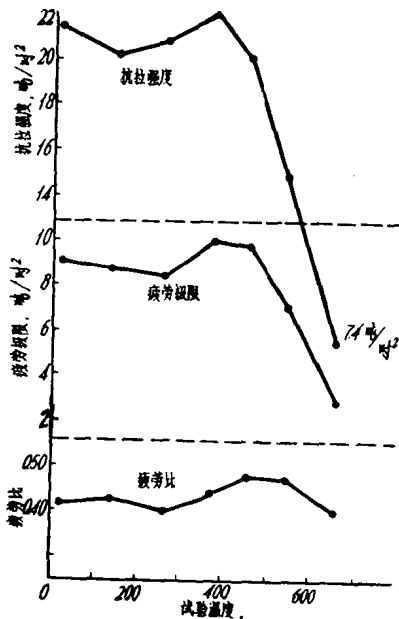


图6 高温疲劳性能  
注：引自柯林斯和史密斯

科林斯（Collins）指出，奥氏体铸铁有优越的高温性能。他试验 Ni—Cu—Cr 奥氏体铸铁（14.9%Ni, 6.9%Cu, 2.1%Cr）到62.5℃，这种铸铁室温时的疲劳极限为6.3吨/吋<sup>2</sup>，在625℃时仅降到5.4吨/吋<sup>2</sup>。但在中间温度其值是非常不规则的；另一方面，抗拉强度从室温的15.8吨/吋<sup>2</sup>降到625℃时的8.9吨/吋<sup>2</sup>，这样室温时疲劳比为0.37，625℃时为0.60。同非合金铸铁比较这些性质，他发现奥氏

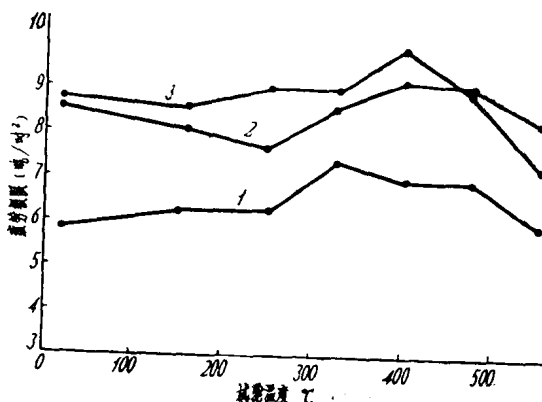


图7 随温度变化的三种铸铁的疲劳极限

- 1 — 未合金化                      抗拉强度15.6吨/吋<sup>2</sup>
- 2 — 1.5%Mn 0.4%P              抗拉强度19.2吨/吋<sup>2</sup>
- 3 — 1.4%Ni 0.4%Mo              抗拉强度21.0吨/吋<sup>2</sup>

注：引自菲茨乔治和波普

体铸铁在625℃时的疲劳极限为室温时的90%，而非合金铸铁为40%。

关于高效率内燃机活塞和汽缸头的损坏，菲茨乔治（Fitzgeorge）与波普（Pope）对一些铸铁作了升温的疲劳试验，三种铸

铁疲劳极限随温度的变化示于图 7。这些曲线指出，灰铸铁疲劳极限随温度变化的典型情况是：通常，当温度初次升到约 200℃ 时疲劳极限略有下降，其后在 400℃ 左右又慢慢升到最大值。在这些方面，这些曲线同通常得到的抗拉与温度的关系相类似。超过 400℃，疲劳极限降低了，但是和拉件强度的变化不一样。疲劳极限-温度曲线的形状提示了 400℃ 以内疲劳比同室温时差不多。

(九) 低温性能

只有一篇文章论及了在室温以下进行的疲劳试验。这项工作是由布恩 (Boone) 和威沙特 (Wishart) 对二种铸铁在温度从 +27℃ 到 -45℃ 变化的“冷室”里进行的。含磷 0.5% 的 1 号铸铁和含磷 0.1% 的 2 号铸铁，它们的疲劳试验结果列于表 9。灰铸铁的抗拉强度随温度的降低而增加，同时疲劳试验结果指出，疲劳极限也同样增加。虽然布恩和威沙特没有给出抗拉试验结果，但已有理由可以推测，随着温度的降低其疲劳比基本上保持不变。这些铸铁在室温疲劳中没有缺口敏感性，同时在低温时亦没有发现缺口敏感性有任何显著的增加。

表 9 灰铸铁的低温疲劳性能  
(引自布恩和威沙特)

| 温度<br>°C | 铁 1 (0.5% P)                |                  |              | 铁 2 (0.1% P)                |                  |              |
|----------|-----------------------------|------------------|--------------|-----------------------------|------------------|--------------|
|          | 疲 劳 极 限<br>吨/吋 <sup>2</sup> |                  | 疲劳强度<br>衰减因素 | 疲 劳 极 限<br>吨/吋 <sup>2</sup> |                  | 疲劳强度<br>衰减因素 |
|          | 无缺口                         | 有 45° V 型<br>缺 口 |              | 无缺口                         | 有 45° V 型<br>缺 口 |              |
| 27       | 4.02                        | 4.46             | 0.90         | 9.38                        | 8.93             | 1.05         |
| -12      | 4.02                        | 4.46             | 0.90         |                             |                  |              |
| -29      | 4.24                        | 4.24             | 1.00         | 10.28                       | 9.82             | 1.05         |
| -40      | 5.13                        | 6.02             | 0.85         |                             |                  |              |

从这些灰铸铁在低温和高温所作的试验结果已经清楚说明，设计者可以假定疲劳比和缺口疲劳强度的减小因素在 -40℃ 和 400℃ 范围内保持不变。而且设计中可以室温数据为依据。然而如需要，疲劳强度随温度的任何细小的变化可以从指定的温度作快速的抗拉试验来推算。

## 二 球墨铸铁的疲劳性能

在含有疲劳应力的用途中通常采用珠光体球墨铸铁，铸态的或正火状态的均可，但也有采用退火铁素体状态的。化学成分中的许多元素影响这些铸铁的机械性能，除不同的硅含量足以说明对性能变化的影响外，加入合金可以改变强度性能。图 8 说明硅对铸态珠光体球墨铸铁性能的影响，图 9 表示该元素对退火铁素体球墨铸铁性能的影响。

英国铸铁研究协会采用图 2 所示的有缺口和无缺口试样尺寸对铸态和退火球墨铸铁作了许多回转变曲疲劳试验。随着硅含量的增加，一系列球墨铸铁的典型抗拉和疲劳性能列如表 10。

(一) 不同成分的影响：

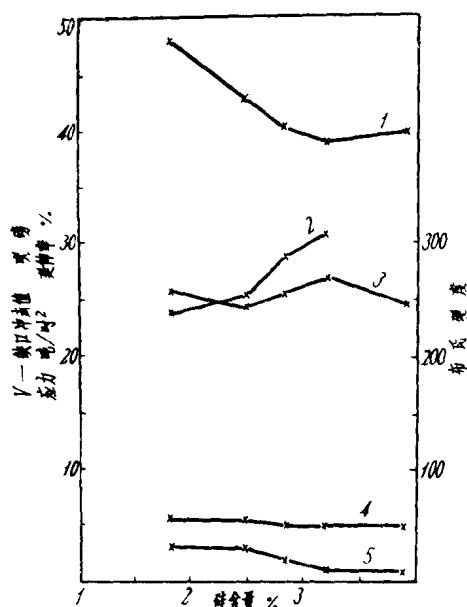


图8 硅对铸态球墨铸铁性能影响

1—抗拉强度； 2—0.05%试验应力；  
3—布氏硬度； 4—V—缺口冲击值；  
5—延伸率

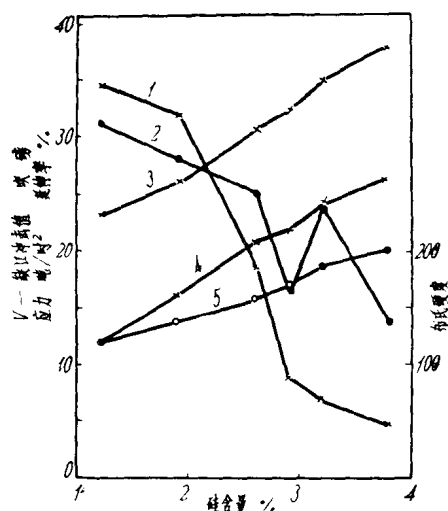


图9 硅对热处理后铁素体球墨铸铁机械性能的影响

1—V缺口冲击值； 2—延伸率； 3—抗拉强度；  
4—0.05%试验应力； 5—布氏硬度

表10 球墨铸铁的抗拉和疲劳性能

| 硅含量<br>% | 抗拉强度<br>吨/时 <sup>2</sup> | 无 缺 口                    |       | 有 缺 口                    |              |
|----------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|--------------|
|          |                          | 疲劳极限<br>吨/时 <sup>2</sup> | 疲 劳 比 | 疲劳极限<br>吨/时 <sup>2</sup> | 疲劳强度<br>衰减因素 |
| 铸 态      |                          |                          |       |                          |              |
| 1.8      | 48.0                     | 18.0                     | 0.38  | 11.5                     | 1.57         |
| 2.5      | 42.7                     | 17.0                     | 0.40  | 8.0                      | 2.13         |
| 2.8      | 40.5                     | 18.5                     | 0.44  | 10.5                     | 1.76         |
| 3.2      | 38.9                     | 19.0                     | 0.49  | 10.0                     | 19.0         |
| 3.9      | 39.8                     | 17.5                     | 0.44  | 9.5                      | 1.89         |
| 退 火      |                          |                          |       |                          |              |
| 1.2      | 23.0                     | 11.5                     | 0.50  | 9.0                      | 1.28         |
| 1.9      | 26.9                     | 13.5                     | 0.50  | 8.5                      | 1.59         |
| 2.6      | 30.6                     | 12.5                     | 0.41  | 7.5                      | 1.67         |
| 2.9      | 32.3                     | 14.0                     | 0.43  | 9.5                      | 1.47         |
| 3.2      | 35.0                     | 14.0                     | 0.41  | 8.0                      | 1.81         |
| 3.8      | 37.8                     | 15.5                     | 0.41  | 9.5                      | 1.63         |

## (二) 疲劳极限和缺口敏感性:

在退火铁素体球墨铸铁中, 硅含量增加使抗拉强度 and 无缺口疲劳极限增加, 如图10所示。然而疲劳极限不同于抗拉强度以同样的比例增加, 结果是随着硅含量的增加疲劳比下降。

铸态球墨铸铁的疲劳极限不因任何途径加入的硅量有所变化, 而且不论其强度多少疲劳极限在17~19吨/时<sup>2</sup>之间。这是工业生产化学成分范围内的以珠光体为主的铸态球墨铸铁的

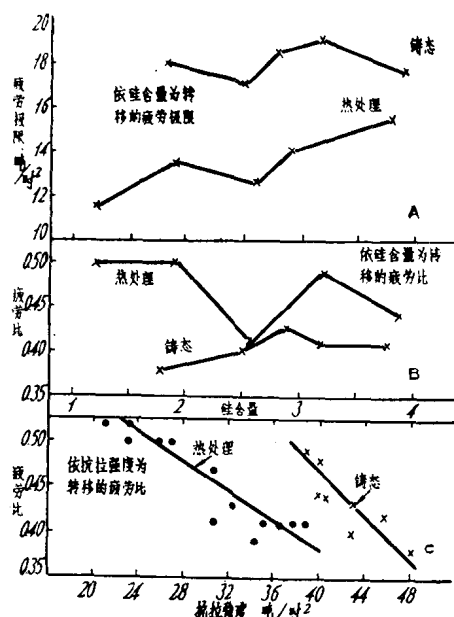


图10 疲劳性能同硅含量和抗拉强度的关系

减少 0.004 左右。在铸态条件下或部分退火后生成珠光体和铁素体混合基体的条件下可以获得中间强度的球墨铸铁。对于这些球墨铸铁，其抗拉强度在 32 吨/时<sup>2</sup>时疲劳比为 0.45 是合适的，而且抗拉强度每增加 1 吨/时<sup>2</sup> 疲劳比约减少 0.005，因此以珠光体为主的抗拉强度在 42 吨/时<sup>2</sup> 的球墨铸铁，其疲劳比约为 0.40。

球墨铸铁比灰铸铁有更大的缺口敏感性。当硅含量增加时，疲劳强度衰减因素也增加，如图 11 所示，无论是退火铁素体球墨铸铁还是铸态珠光体球墨铸铁，其关系都相类似。在铁素体球墨铸铁中，随着抗拉强度的增加疲劳强度衰减因素也增加。然而在铸态条件下，高硅低抗拉强度的球墨铸铁有着最大的疲劳强度衰减因素。

在大批生产的球墨铸铁中，硅含量通常在 2.0% 和 2.5% 之间，并且抗拉强度小于 26 吨/时<sup>2</sup> 的铁素体球墨铸铁，假设采用与现行试验中相类似的具有圆周 45°V 型缺口的小疲劳试样是正常合理的，则其疲劳极限大约为无缺口疲劳极限的 0.63 倍。其后抗拉强度每增加 1 吨/时<sup>2</sup> 这个比值约减少 0.007，直到抗拉强度约 32 吨/时<sup>2</sup> 时该比值为 0.60。当抗拉强度进一步提高和球墨铸铁变成珠光体基体时，其比值保持不变。0.63 和 0.60 的比值分别相当于疲劳强度衰减因素 1.59 和 1.67。

### (三) 断口外观

在灰铸铁里从断口外观来区分是由于疲劳破断还是由于拉伸中单纯过载而引起的破断，

典型数据。既然疲劳极限没有明显的变化，但是抗拉强度却随硅含量的增加而下降，因此，在高硅铸铁中可以获得最高的疲劳比（图 10B）。

铸态铁素体球墨铸铁和退火铁素体球墨铸铁二者的疲劳比均随抗拉强度的增加而下降，如图 10C 所示。

通常设计者可以假定抗拉强度在 26 吨/时<sup>2</sup> 以下的退火铁素体球墨铸铁的疲劳比为 0.5，然后对抗拉强度超过 26 吨/时<sup>2</sup> 的，其抗拉强度每增加 1 吨/时<sup>2</sup>，疲劳比约减少 0.01。在珠光体球墨铸铁中，对于抗拉强度在 48 吨/时<sup>2</sup> 以下的铸铁，可假定其疲劳比大致为 0.4。这个抗拉强度值大概是铸态球墨铸铁所能获得的最大值，也是硅含量不超过 2.5% 左右工业生产球墨铸铁的典型数值。正火珠光体球墨铸铁可以获得超过 48 吨/时<sup>2</sup> 的抗拉强度，抗拉强度在 48 吨/时<sup>2</sup> 以上而每超过 1 吨/时<sup>2</sup> 时，其疲劳比则从 0.4

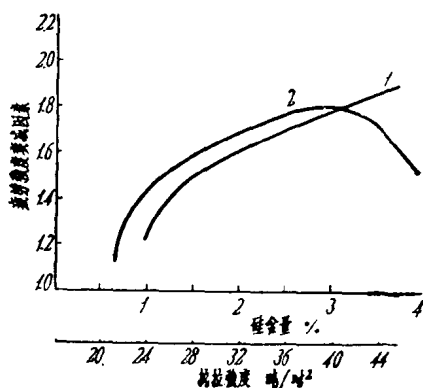


图11 疲劳强度衰减因素和硅含量及抗拉强度的关系  
1—硅含量；2—疲劳强度

通常是不可能的。因为得不到明显特征的疲劳断口，这对比较差的灰铸铁尤其如此。但是在球墨铸铁中，疲劳破断常常有不同于其它方式产生破断的明显外观。

一系列有缺口和无缺口球墨铸铁试样的疲劳断口示于图12。硅含量3.2%以下的无缺口经过热处理的试样（图12a）主要具有细亮的结晶断口，并在试样一侧的边缘有一黑暗区，毗连这黑暗区的试块表面呈现明显的变形。硅含量3.8%球墨铸铁的断口是一半明亮和一半粗亮的结晶。经过热处理的有缺口的试棒在边缘与中心之间有一环状的细光亮区，它随硅含量的增加其外观从暗黑向粗亮的结晶变化，这二区域之间的分界在高硅球墨铸铁中是很不明显的。

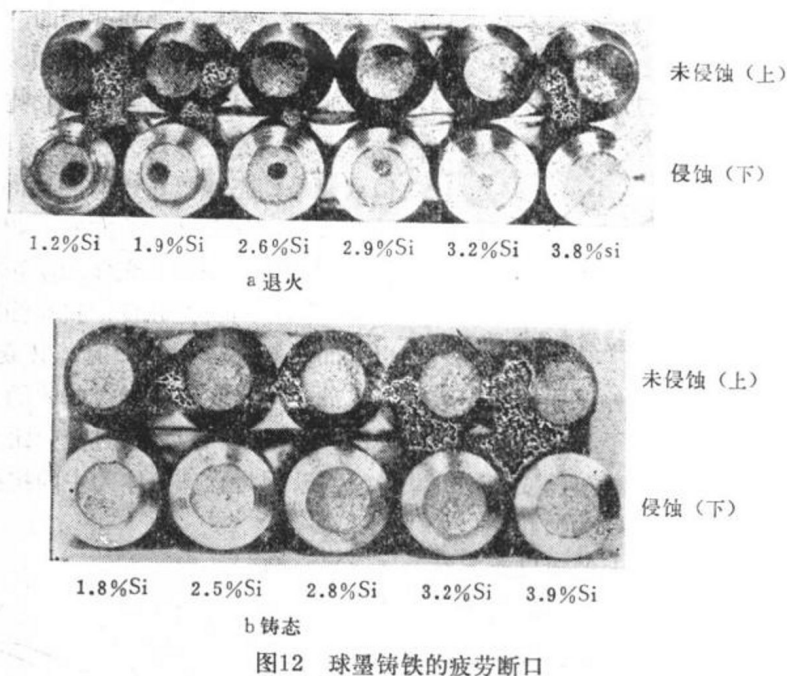


图12 球墨铸铁的疲劳断口

含硅量3.2%以下的铸态无缺口球墨铸铁的断口（图12b）与经过热处理的高硅球墨铸铁的断口相类似，但是粗亮断口的比例随着硅含量的增加而增加。与之对应的有缺口的试棒则有粗亮和细亮的断口区，在低硅材料中粗糙断口集中于试样中心与经过热处理的球墨铸铁向黑暗区集中的理由相同。

#### （四）热处理的影响

退火铁素体球墨铸铁常用于要求有最大韧性的场合。然而在疲劳受载场合中通常需要高的抗拉强度，而在损坏（failure）以前高的延伸率不是最主要的。为了获得高强度球墨铸铁，就要求珠光体基体组织，为了保证珠光体组织更加均一，经常采用加热到约900°C然后空冷的正火热处理工艺。这种处理工艺通常获得比铸态具有较高强度和硬度的更细的珠光体组织。为了特殊的用途，球墨铸铁也可采用调质处理而获得高的强度。但不是所有铸件都能应用，因为有开裂的危险。

对正火的和调质的较高强度的球墨铸铁作了疲劳试验以估量通过热处理后抗拉强度增加对疲劳极限增加的程度。正火试棒是采用加热到900°C保温1小时然后空冷。调质处理的球铁则在900°C保温1小时而后油淬。一些淬火试棒在600°C回火2小时而另一些则在550°C回火2小

时。其疲劳性能列于表11，正火球墨铸铁的疲劳曲线示于图13和14。这些结果指出，提高抗拉强度的热处理并不是成比例地提高疲劳极限，其疲劳比也相应地有所下降，而且热处理后疲劳强度衰减因素往往略有提高。

表11 热处理对球墨铸铁疲劳性能的影响

| 处 理          | 抗拉强度<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 无 缺 口<br>疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲 劳 比 | 有 缺 口<br>疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳强度<br>衰减因素 |
|--------------|--------------------------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|--------------|
| 铸 态          | 42.7                     | 19.5                              | 0.46  | 13.5                              | 1.44         |
| 正 火          | 67.3                     | 22.0                              | 0.33  | 13.5                              | 1.63         |
| 铸 态          | 43.0                     | 18.0                              | 0.42  | 11.5                              | 1.56         |
| 油 淬 火        |                          |                                   |       |                                   |              |
| 回 火          | 60.1                     | 22.0                              | 0.37  | 13.5                              | 1.63         |
| 600°C × 2 小时 |                          |                                   |       |                                   |              |
| 油 淬 火        |                          |                                   |       |                                   |              |
| 回 火          | 66.7                     | 22.0                              | 0.33  | 12.5                              | 1.76         |
| 550°C × 2 小时 |                          |                                   |       |                                   |              |

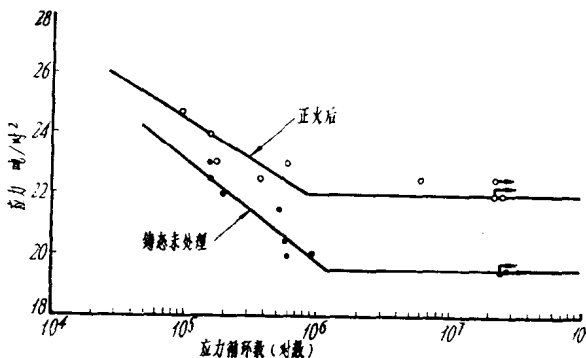


图13 正火后球墨铸铁一无缺口试样的疲劳性能

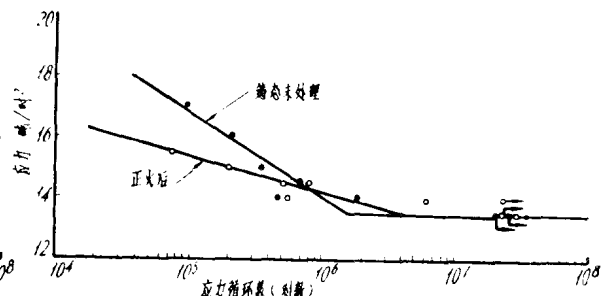


图14 正火后球墨铸铁一缺口试样的疲劳性能

在这些方面球墨铸铁与钢类似。由于小断面经过热处理和空冷或油淬中冷却速度高因而可以得到高的抗拉强度，但实际上铸件的热处理往往冷却速度较慢，尤其是正火铸件不是单个地而经常是成批地冷却，所以抗拉强度低于55吨/吋<sup>2</sup>。这类球墨铸铁不致因热处理而降低其疲劳比如表11所示。可以假定，抗拉强度小于48吨/吋<sup>2</sup>的球墨铸铁的疲劳比为0.40，则抗拉强度大于48吨/吋<sup>2</sup>的，其强度每增加1吨/吋<sup>2</sup>，疲劳比减少0.004。工业生产中正火的和调质的球墨铸铁的疲劳强度衰减因素通常约为1.67。

#### (五) 高温性能

菲茨乔治 (Fitzgeorge) 和波普 (pope) 对珠光体和铁素体球墨铸铁作了高温试验，其结果指出，随着温度的上升疲劳极限出现少量的均匀的下降，其数据载于表12。虽然没有进行短时间的高温抗拉试验，但是根据其它低磷球墨铸铁试验的情况可以预期，在温度400°C以下疲劳极限的下降与抗拉强度的下降是成比例的，所以对灰铸铁而言，有理由可以假定疲劳比在温度400°C以下保持恒定，而疲劳极限则可根据室温疲劳数据和短时间高温抗拉试验结

果加以估算。

(六) 试样尺寸的影响

伊根 (Eagan) 采用0.35, 0.75 和 1 吋直径的试样对铸态和退火的球墨铸铁作了回转弯曲疲劳试验。试验的试样是取自大型铸件和直径 8 吋、长12吋、壁厚 2 吋的试验缸套。有代表性的结果载于表13。所有大试样的平均疲劳比为0.34, 而所有小试样的平均疲劳比为0.46。

表12 球墨铸铁高温疲劳性能  
(非茨乔治和波普)

| 性 能                         | 温 度 °C | 铸 态  | 退 火  |
|-----------------------------|--------|------|------|
| 抗拉强度<br>(吨/吋 <sup>2</sup> ) | 20     | 37.9 | 32.9 |
| 疲劳极限<br>(吨/吋 <sup>2</sup> ) | 20     | 14.7 | 12.1 |
|                             | 250    | 13.4 | 12.1 |
|                             | 400    | 11.6 | 8.7  |
|                             | 550    | 11.2 | 8.7  |

表13 试样尺寸的影响 (伊根)

| 状 态 | 试样直径<br>(吋) | 抗拉强度<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳极限<br>吨/吋 <sup>2</sup> | 疲劳比  |
|-----|-------------|--------------------------|--------------------------|------|
| 铸 态 | 0.35        | 34.0                     | 15.2                     | 0.45 |
| 退 火 | 0.35        | 29.5                     | 12.5                     | 0.43 |
| 铸 态 | 0.75        | 30.7                     | 10.7                     | 0.35 |
| 退 火 | 0.37        | 30.1                     | 9.6                      | 0.32 |
| 铸 态 | 1.00        | 38.5                     | 13.8                     | 0.36 |
| 火 退 | 1.00        | 31.9                     | 10.7                     | 0.34 |

由于所有试验是在与型内冷却相类似的铸件上进行的, 因而在大试样上获得的低疲劳值表明了试样尺寸的真实影响, 而且清楚地指出比较大的试样的疲劳极限是下降的。因为大多数的疲劳数据是适用于直径小于 0.5 吋的试样, 那末由于试样尺寸增加可以在小试样数据的基础上加一适当的安全系数来计算。

(七) 欠载应力与过载应力

欠载应力 英国铸铁研究协会采用上述灰铸铁类似的工艺对球墨铸铁做的试验指出: 低于正常疲劳极限0.5吨/吋<sup>2</sup>的欠载应力作20 × 10<sup>6</sup>次的循环, 其疲劳极限没有变化。由于试样没有四点负载下的试验结果, 因此就不知道球墨铸铁是否像灰铸铁那样在欠载应力下会提高疲劳极限。在缺乏这种报导的情况下设计者可以假定欠载应力不提高疲劳极限。

过载应力 虽然没有球墨铸铁对过载应力影响的报导, 但是图12中的疲劳断口表明, 当应力超过疲劳极限时, 疲劳裂纹逐渐发展。所以, 如果超出疲劳极限而进行充分的应力循环, 过载应力就会损伤球墨铸铁。由于缺乏数据, 建议设计人员采用迈纳尔 (Miner) 的直线损伤规律。这个规律对有些钢作了系统的阐述, 并且叙述了在特殊应力情况下过载应力的循环数与在这个应力时材料寿命的关系。波普 (Pope) 和福雷斯特 (Foppest) 对迈纳尔的规律作了详细的研讨。

三、可 锻 铸 铁 的 疲 劳 性 能

许多可锻铸铁铸件在使用中承受着疲劳应力, 但是对可锻铸铁的疲劳性能只有少量的报导。铁素体和珠光体可锻铸铁在回转弯曲疲劳试验中, 据报导其疲劳比在0.6~0.4之间, 低强度铁素体可锻铸铁取其上限。

英国铸铁研究协会的结果是在φ0.875吋 × 9吋水平浇注的试棒上获得的。疲劳试样用图2中所示的φ0.417吋的。对0.399吋的试样获得的抗拉试验结果包括疲劳结果列于表14。其