

# 钢铁材料的 断裂研究 和失效分析

会议论文集

# Bruchuntersuchungen und Schadenklärung

机械工业出版社

# 钢铁材料的 断裂研究和失效分析

## 会议论文集

阿尔安兹技术中心 编

李家宝 谢宝琛 于维成 译

傅耆寿 校

机械工业出版社

本书收集了1975年11月在西德阿尔安兹技术中心(Allianz-Zentrum für Technik)举办的钢铁材料断裂研究和失效分析讨论会上发表的二十五篇论文,内容涉及疲劳、蠕变、应力腐蚀、氢脆、淬火开裂和焊接开裂等方面。部分论文介绍裂纹萌生和扩展的一般规律,也有不少论文重点讨论组织结构对断裂过程的影响。其中大多数论文采用扫描电镜作为断裂研究和失效分析的工具,获得有价值的论据,值得借鉴。

本文集可供从事材料研究及失效分析工作的技术人员阅读,也可供大专院校师生参考。

# **Bruchuntersuchungen und Schadenklärung**

Probleme bei Eisenwerkstoffen

Allianz Versicherungs-AG München und Berlin 1976

\* \* \*

## **钢铁材料的断裂研究和失效分析会议论文集**

阿尔安兹技术中心 编

李家宝 谢宝琛 于维成 译

傅耆寿 校

\*

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)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 14·字数 337 千字

1983年4月北京第一版·1983年4月北京第一次印刷

印数 0,001—4,900·定价 2.20 元

\*

统一书号: 15033·5477

## 译 者 的 话

本会议论文集原版各部分之后附有与会者对有关论文的讨论发言记录，限于篇幅关系，这部分内容没有译出。

文集的第一至六及八至十二篇由谢宝琛翻译，第七、十六、十九、二十及二十五篇由于维成翻译，第十三至十五、十七、十八及二十一、二十二、二十三、二十四篇由李家宝翻译。译后由傅耆寿同志进行全面校对。

我们在翻译过程中发现，文集的部分文章里有一些错误（作为会议论文集，出现这种情况是难免的）。对于这些错误，我们都尽力作了改正。

由于译者水平所限，难免存在问题甚至错误，恳请各位读者批评指正。

## 序

近年来由于应用了扫描电子显微镜，在断裂研究领域里取得了很大进展。从材料失效分析的实际需要出发，当前普遍要求尽快发表关于断裂过程的最新知识，以及各有关方面的新近研究成果加以检查考验。为了充分利用时间开展讨论，交换思想、交流经验，会议的组织者阿尔安兹技术中心 (Allianz-Zentrum für Technik) 安排以小组讨论的形式进行。在讨论会上，属于一个专题的几篇文章，由一人综合扼要介绍。

会议的一个重要收获是使在断裂领域的各个方面开展工作的、对有关工作成果的实际应用感到兴趣的科学家和工程师会聚一堂，自由交流思想和经验。另一个收获是把研究和应用沟通起来——有助于明确今后研究工作的方向，通过阐明断裂机理，有助于分析失效的原因，从而有效地采取预防措施。

我们应当感谢对会议的成功作出贡献的来宾和同事，我们特别应当感谢提交会议论文的作者和不辞辛劳对同属一个专题的文章作了综合扼要介绍的报告人、各讨论组的会议主持人以及所有积极参与讨论、使会议顺利达到预期目的的与会者。

工学博士 Heinz Braun, 工学博士 Hans-Jürgen Schüller

# 目 录

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 第 I 部分 疲劳断裂与组织                        | 1   |
| 一、调质钢的疲劳断裂                            | 1   |
| 二、用扫描电镜和透射电镜研究片状石墨铸铁的疲劳断裂             | 15  |
| 三、铁素体钢和铁素体-珠光体钢的疲劳裂纹扩展与断裂             | 20  |
| 四、机械加工对弯曲疲劳强度的影响                      | 30  |
| 五、灰口铸铁的疲劳断口                           | 36  |
| 第 II 部分 疲劳断裂与腐蚀                       | 43  |
| 六、透平结构用钢 X 20 Cr 13 的腐蚀疲劳             | 43  |
| 七、钢的腐蚀疲劳                              | 53  |
| 八、腐蚀疲劳和其他特殊腐蚀现象叠加作用下材料的行为             | 72  |
| 九、钢的沿晶腐蚀疲劳                            | 81  |
| 第 III 部分 低周交变载荷作用下的断裂问题               | 88  |
| 十、铁素体耐热钢和奥氏体耐热钢热冲击性能的研究               | 88  |
| 十一、燃气轮机叶轮的低周疲劳                        | 94  |
| 十二、慢速热循环对铝钎钢铸钢蠕变性能的影响                 | 101 |
| 第 IV 部分 热处理时的裂纹形成问题                   | 109 |
| 十三、X 22 CrMoV 12 1 钢淬火裂纹的金相观察和断口显微观察  | 109 |
| 十四、淬火裂纹——现象及成因                        | 114 |
| 第 V 部分 蠕变载荷作用下的裂纹形成问题                 | 130 |
| 十五、有助于定量理解蠕变断裂问题的一些设想                 | 130 |
| 十六、纯度和蠕变行为对 1Cr-1Mo-1/4V 钢晶界空穴若干特征的影响 | 133 |
| 十七、寿命消耗及蠕变损伤对耐热钢已运行构件再工作能力的影响         | 141 |
| 第 VI 部分 焊接件的裂纹形成问题                    | 152 |
| 十八、两种耐热钢的焊接热影响区在蠕变载荷作用下产生的组织损伤        | 152 |
| 十九、用声发射探测应力松弛开裂                       | 157 |
| 二十、1/2CrMoV 钢热影响区的再加热开裂               | 165 |
| 二十一、钢中焊接热裂纹的产生及其成因                    | 174 |
| 二十二、焊接热影响区细晶粒带与未受热影响母材过渡部位上蠕变裂纹的形成    | 181 |
| 第 VII 部分 应力腐蚀和氢脆                      | 192 |
| 二十三、碳钢和低合金钢在碱性介质中的应力腐蚀                | 192 |
| 二十四、氢致开裂的研究                           | 196 |
| 二十五、一种含锰 8% 奥氏体钢的应力腐蚀裂纹               | 203 |
| 内容索引                                  | 211 |

# 第 I 部分 疲劳断裂与组织

## 一、调质钢的疲劳断裂

P. H. Effertz, R. Frank, L. Hagn

对比测量三种调质钢与铁素体、奥氏体和铝合金在空气中的裂纹扩展量。看不出裂纹扩展量和应力比之间有单值的关系。根据恒裂纹张开位移幅度试验的测定，当应力强度因子幅度下降到门槛值  $\Delta K_0$  时，裂纹就处于静止状态。

由断口显微照片计算出裂纹面上的疲劳辉纹数目往往小于外加载荷的循环次数。在最理想的情况下，辉纹的结构才可能正确反映断裂的历程。

### 1. 引言和问题

疲劳断口是失效过程形成的，它可以作为研究失效的重要依据。由断口的宏观图像作出的推断，必须通过研究断口的微观结构来充实，才能正确搞清楚失效的原因<sup>[1, 2]</sup>。

图 1.1 到 3.2 举出三个实例，它们呈现出完全不同的断口，但疲劳断裂的微观结构却相类似。表 1 是疲劳断裂宏观和微观特征的一览表，它反映了人们多年来从事失效分析的经验。

疲劳断裂的过程一般分为裂纹萌生阶段和裂纹扩展阶段。

关于材料中裂纹萌生的机理，很多书刊上已有介绍<sup>[3~9]</sup>。影响裂纹萌生最主要的因素是：

- (1) 材料的组织和强度；
- (2) 工艺条件产生的内应力、加工硬化和缺口；
- (3) 外加载荷引起的应力状态和应力比；
- (4) 环境介质。

因为难以证明失效时裂纹萌生的机理，所以试图根据裂纹扩展行为来测定断裂的过程。很多刊物上都遵循这样的观念，认为每一次载荷循环中，裂纹在断口上扩展的距离就是两条疲劳辉纹的间距，于是，裂纹扩展量就成为可测的了<sup>[10~17]</sup>。为了将断口上的疲劳辉纹充分显现出来，当分辨率为  $100 \text{ \AA}$  时，通用的扫描电镜只能看清楚每次载荷循环最小的裂纹扩展量为  $10^{-5}$  毫米。例如铝合金，当应力强度因子幅度比钢的小时，就已显示出这样的距离。因此，对于塑性好的面心立方铝合金来说，只要考虑到随着剩余截面积减小，应力逐渐升高，在断口的一定深度，测量出的裂纹扩展距离与断口上疲劳辉纹间距大多数相当符合。但对于钢，则不大符合。根据疲劳辉纹测出的裂纹扩展量往往大于宏观上裂纹扩展的量，因为每次载荷循环不一定都出现疲劳辉纹。

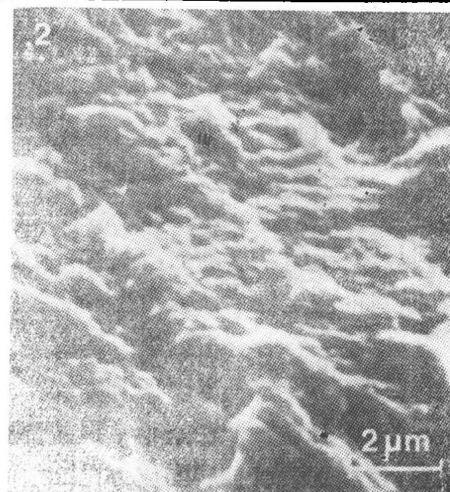
对于普通机器制造中常用的调质钢，很少有人进行过这方面的测定。因此，本文将报告有关这类钢裂纹扩展与应力比  $R$  之间关系的试验，同时也讨论疲劳辉纹间距与裂纹长度的关系。

表1 疲劳断裂的特征

| 宏观特征                         | 可能原因                                      |
|------------------------------|-------------------------------------------|
| 断口较平滑<br>断口面较碎               | 平面应力状态<br>多轴或交变应力状态                       |
| 静断区大<br>静断区小                 | 高载荷<br>低载荷                                |
| 断口齐平<br>断口倾斜                 | 主要为单轴载荷<br>多轴载荷                           |
| 断口均匀穿透                       | 均衡的应力状态占优势                                |
| 裂开面                          | 交变载荷的状况                                   |
| 粗晶粒(亮)断口<br>细晶粒(暗)断口         | 粗晶粒组织或解理断口, 裂纹扩展快<br>细晶粒组织, 穿晶, 裂纹扩展慢     |
| 单个断裂原点<br>多断裂原点(断口有阶梯)       | 载荷最高的点, 缺口<br>有大量机械的或腐蚀的缺口                |
| 休止线对断裂进展方向无偏离<br>休止线偏离断裂进展方向 | 加载方向、应力状态、介质、频率均无变化的静态<br>加载方向、应力状态有变化的静态 |
| 微观特征                         | 可能原因                                      |
| 疲劳断裂结构                       | 组织的影响、微小的塑性形变皆不明显                         |
| 断裂路径, 辐射状断裂                  | 裂纹在不同平面或不同组织区域扩展                          |
| 垂直于主裂纹的支裂纹                   | 裂纹尖端上应力较高                                 |
| 裂纹穿晶扩展                       | 交变应力                                      |
| 裂纹沿晶扩展                       | 晶界脆弱, 晶界滑动应力状况, 介质的影响                     |
| 垂直于裂纹扩展方向的疲劳辉纹               | 每当载荷循环变化, 裂纹就扩展                           |
| 疲劳辉纹中的滑移阶梯, 亚结构              | 同一滑移平面上发生交变滑动                             |
| 辉纹的排列中形成蜂窝状                  | 载荷幅度或应变幅度较高                               |
| 外来物的效应(例如轮胎印痕)               | 粒子的摩擦运动, 形成碎屑                             |



图1.1 30 CrNiMo 8 材料的泵轴扭转断裂的宏观照片



1.2 疲劳断裂的微观结构

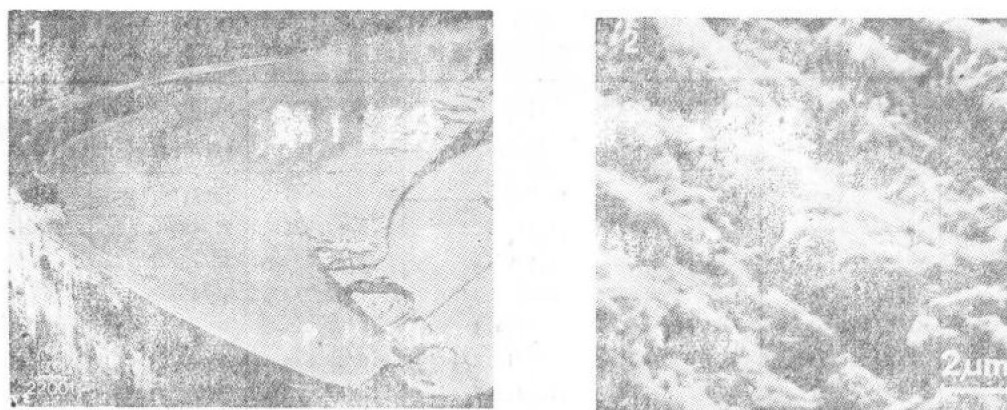


图2.1 26 NiCrMoV 85钢的汽轮机主轴弯曲疲劳断裂 2.2 疲劳断裂的微观结构

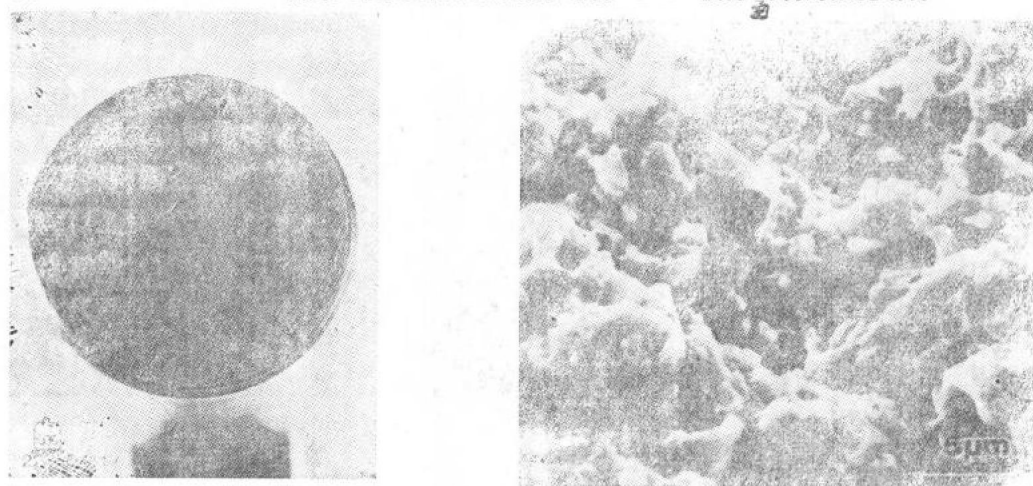


图3.1 注油器压杆拉压疲劳断裂的宏观照片 3.2 疲劳断裂的微观结构

## 2. 试验材料

三种不同组织状态的调质钢与铁素体钢（工业纯铁）、奥氏体钢和铝合金（表2和表3）进行试验对比。材料的组织如图4.1到图5.3所示。

表2 试验材料的化学成分（百分比重量）

| 元 素 | X 20 Cr 13 | 42 CrMo 4 | Ck 45/I | Ck 45/II | AlMgSi 0.5 | 工业纯铁    | X 6 CrNi 18 9 |
|-----|------------|-----------|---------|----------|------------|---------|---------------|
| C   | 0.18       | 0.44      | 0.45    | 0.45     | —          | 0.01    | 0.03          |
| Si  | 0.40       | 0.27      | 0.20    | 0.24     | 0.42       | 0.007   | 0.29          |
| Mn  | 0.43       | 0.77      | 0.84    | 0.68     | <0.10      | 0.06    | 1.55          |
| P   | 0.026      | 0.018     | 0.015   | 0.009    | —          | 0.007   | —             |
| S   | 0.016      | 0.016     | 0.018   | 0.033    | —          | 0.009   | —             |
| Fe  | 其余         | 其余        | 其余      | 其余       | 0.2        | 其余      | 其余            |
| Cr  | 13.6       | 1.1       | 0.04    | 0.11     | <0.05      | 0.015   | 18.4          |
| Mo  | <0.01      | 0.24      | <0.01   | 0.03     | —          | 0.003   | 0.38          |
| Ni  | 0.16       | —         | 0.1     | 0.07     | —          | 0.015   | 10.7          |
| Cu  | 0.045      | —         | —       | 0.13     | <0.07      | 0.022   | —             |
| Al  | 0.062      | —         | —       | —        | 其余         | 0.003①  | —             |
| V   | —          | —         | —       | <0.01    | —          | —       | —             |
| Ti  | —          | —         | —       | —        | <0.02      | <0.001  | <0.01         |
| Zn  | —          | —         | —       | —        | 0.1        | —       | —             |
| Mg  | —          | —         | —       | —        | 0.78       | —       | —             |
| N   | 0.60①      | —         | —       | —        | —          | 0.0075① | —             |

① 酸性溶解法。

表3 试验材料的室温机械性能

| 材 料          | 屈服点 $\sigma_{0.2}$<br>(牛顿/毫米 <sup>2</sup> ) | 拉伸强度 $\sigma_b$<br>(牛顿/毫米 <sup>2</sup> ) | 延伸率 $\delta_5$<br>(%) | 收缩率 $\psi$<br>(%) | DVM①冲击韧性 $a_K$<br>(焦耳/厘米 <sup>2</sup> ) | 硬 度<br>(6次测量平均)<br>(HB2.5/187.5) |
|--------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|
| X 20 Cr 13   | 590/649                                     | 740/828                                  | 19.8/21.6             | —                 | 140/174                                 | 244/266                          |
| 42 CrMo 4    | 699/732/739                                 | 891/909/909                              | 16/17/17.2            | 49.6/57.8/59.1    | 81/88/94                                | 276 $\pm$ 4                      |
| Ck 45/I      | 266/275                                     | 580/601                                  | 26.0/25.6             | 43.7/42.2         | 42/43/48                                | 178 $\pm$ 2                      |
| Ck 45/II     | 320/322/381                                 | 671/676/680                              | 18.8/20.4/21.6        | 31.1/32.7/37.5    | 39/40/45                                | 205 $\pm$ 3                      |
| Ck 45/II 调质  | 432/453                                     | 669/667                                  | 24.2/24.4             | 61.5/61.5         | —                                       | 203 $\pm$ 2                      |
| AlMgSi 0.5   | 246/247/248                                 | 264/263/264                              | 13.2/14.2/14.0        | 50.9/49.5/49.5    | 26/26/21                                | 86 $\pm$ 2                       |
| 工业纯铁         | 144/160/177                                 | 276/279/284                              | 31.4/43.2/42.2        | 85.6/87.1/87.1    | 273/282/283                             | 86 $\pm$ 2                       |
| X 6 CrNi18 9 | 228/229/229                                 | 557/557/552                              | 81.4/80.2/81.0        | 84.0/84.0/83.1    | 385/380/381                             | 137 $\pm$ 9                      |

① DVM 为德国工业材料试验联合会的简称——译者。

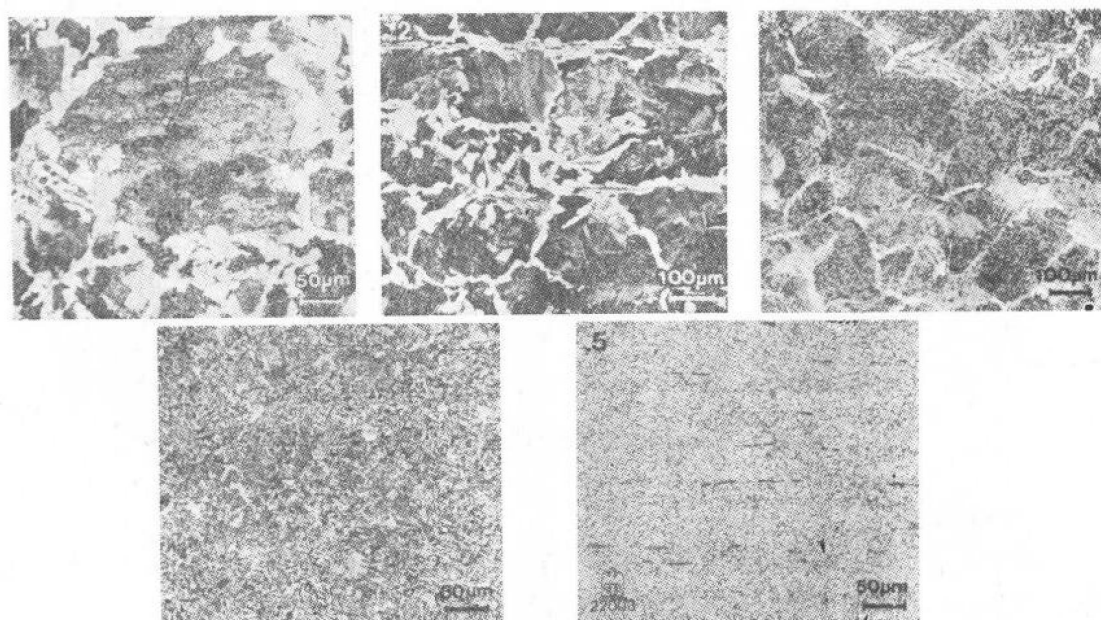


图4 调质钢的组织状态(纵剖面磨片)

4.1 Ck 45/I 4.2 Ck 45/II 常化 4.3 Ck45/II 调质 4.4 42 CrMo 4 4.5 X 20 Cr 13

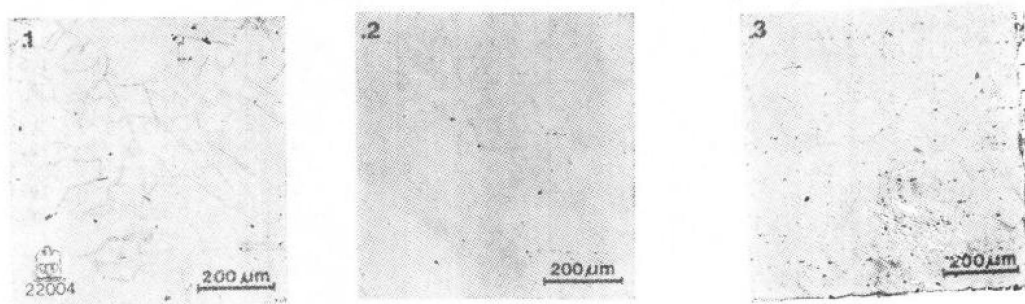


图5 对比材料的组织状态(纵剖面磨片)

5.1 X 6 CrNi 18 9 5.2 工业纯铁 5.3 AlMgSi 0.5

### 3. 试验

在室温与空气条件下, CT1 试样 (ASTM E399-72) 在液压脉冲试验机上, 以 75 赫兹的频率进行脉动拉伸加载, 作出裂纹扩展曲线。使用放大 30 倍的带游标的光学显微镜来测量裂纹长度。大部分试验为不同应力比  $R$  的恒应力幅的结果 (表 4.1 及表 4.2), 其中

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_0} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$$

少数试样在裂纹萌生后保持恒裂纹张开位移幅度。第一种试验, 随着裂纹深度的增加, 应力强度因子幅度和裂纹张开位移以及扩展速率也增加, 但应力比保持不变。第二种试验则随着裂纹深度的增加, 应力强度因子幅度、应力比和裂纹扩展速率减少, 但裂纹张开位移的幅度保持不变。

表 4.1 裂纹扩展试验

| 材 料      | 试样号  | 组 织     | 0.2%<br>屈服点<br>$\sigma_{0.2}$<br>(牛顿/毫米 <sup>2</sup> ) | 应力比<br>$R$ | 平均应力① + $\sigma_m$                           |                                             | 应力强度因子<br>幅度 $\Delta K$<br>(牛顿·毫米 <sup>-3/2</sup> ) | 应力强度因子<br>最大值<br>$K_{\max}$<br>(牛顿·毫米 <sup>-3/2</sup> ) | 应力强度因子<br>最小值<br>$K_{\min}$<br>(牛顿·毫米 <sup>-3/2</sup> ) |
|----------|------|---------|--------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|          |      |         |                                                        |            | 0.15 $\sigma_{0.2}$<br>(牛顿/毫米 <sup>2</sup> ) | 0.2 $\sigma_{0.2}$<br>(牛顿/毫米 <sup>2</sup> ) |                                                     |                                                         |                                                         |
| CK45/I   | Q3   | 细条状珠光   | 268                                                    | 0.05       | 40.2                                         | —                                           | 331.8                                               | 350.1                                                   | 18.3                                                    |
|          | Q5   | 体与网状铁   | 268                                                    | 0.05       | 40.2                                         | —                                           | 331.8                                               | 350.1                                                   | 18.3                                                    |
|          | Q4   | 素体      | 268                                                    | 0.15       | 40.2                                         | —                                           | 272.2                                               | 320.3                                                   | 48.1                                                    |
|          | Q2   |         | 268                                                    | 0.3        | 40.2                                         | —                                           | 198.8                                               | 283.7                                                   | 84.8                                                    |
|          | L1   |         | 268                                                    | 0.05       | 40.2                                         | —                                           | 331.8                                               | 350.1                                                   | 18.3                                                    |
| CK45/II  | Q33  | 铁素体与珠光  | 333                                                    | 0.05       | 50.0                                         | —                                           | 413.4                                               | 435.8                                                   | 22.5                                                    |
|          | Q32  | 体       | 333                                                    | 0.15       | 50.0                                         | —                                           | 339.2                                               | 398.7                                                   | 59.6                                                    |
|          | Q20  | 铁素体与贝氏  | 441                                                    | 0.05       | 66.2                                         | —                                           | 546.2                                               | 576.5                                                   | 30.2                                                    |
|          | Q22  | 体       | 441                                                    | 0.15       | 66.2                                         | —                                           | 449.0                                               | 527.9                                                   | 78.8                                                    |
|          | Q23  |         | 441                                                    | 0.3        | 66.2                                         | —                                           | 328.2                                               | 467.4                                                   | 139.3                                                   |
|          | Q30  | 调质      | 441                                                    | 0.05       | 66.2                                         | —                                           | 546.2                                               | 576.5                                                   | 30.2                                                    |
|          | Q30  | 铁素体-珠光体 | ~300                                                   | 0.05       | 45                                           | —                                           | 368.4                                               | 390.4                                                   | 22                                                      |
|          | Q21  | 调质      | 441                                                    | 0.05       | 66.2                                         | —                                           | 546.2                                               | 576.5                                                   | 30.2                                                    |
|          | Q21  | 调质      | 441                                                    | 0.05       | —                                            | 88.3                                        | 727.8                                               | 768.5                                                   | 40.8                                                    |
|          | Q21  | 铁素体-珠光体 | ~300                                                   | 0.05       | —                                            | 88.3                                        | 727.8                                               | 768.5                                                   | 40.8                                                    |
| 42CrMo 4 | Q101 |         | 725                                                    | 0.05       | (100)                                        | —                                           | 824                                                 | 870.2                                                   | 46.3                                                    |
|          | Q104 |         | 725                                                    | 0.15       | 108.8                                        | —                                           | 737.8                                               | 867.5                                                   | 129.7                                                   |
|          | Q102 | 调质组织    | 725                                                    | 0.3        | 108.8                                        | —                                           | 538                                                 | 767.6                                                   | 229.6                                                   |
|          | Q103 |         | 725                                                    | 0.5        | 108.8                                        | —                                           | 329.0                                               | 663.1                                                   | 334.1                                                   |
| X20Cr13  | Q205 |         | 618                                                    | 0.05       | 92.7                                         | —                                           | 668                                                 | 704.8                                                   | 36.8                                                    |
|          | Q203 |         | 618                                                    | 0.15       | 92.7                                         | —                                           | 548                                                 | 644.8                                                   | 96.8                                                    |
|          | Q204 | 调质组织    | 618                                                    | 0.3        | 92.7                                         | —                                           | 400                                                 | 570.8                                                   | 170.8                                                   |
|          | Q202 |         | 618                                                    | 0.05       | —                                            | 123.6                                       | 889.6                                               | 939.2                                                   | 49.6                                                    |

①  $\sigma_m = (P \cdot Y) / (B \cdot W)$ , 其中  $Y = f(a/W)$ 。

表4.2 裂纹扩展试验

| 材 料        | 试样号   | 组 织                                   | 0.2%<br>屈服点<br>$\sigma_{0.2}$<br>(牛/毫米 <sup>2</sup> ) | 应力比<br>R | 平均应力① + $\sigma_m$                         |                                           | 应力强度因子<br>幅度 $\Delta K$<br>(牛·毫米 <sup>-3/2</sup> ) | 应力强度因子<br>最大值<br>$K_{max}$<br>(牛·毫米 <sup>-3/2</sup> ) | 应力强度因子<br>最小值<br>$K_{min}$<br>(牛·毫米 <sup>-3/2</sup> ) |
|------------|-------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|            |       |                                       |                                                       |          | $0.15\sigma_{0.2}$<br>(牛/毫米 <sup>2</sup> ) | $0.2\sigma_{0.2}$<br>(牛/毫米 <sup>2</sup> ) |                                                    |                                                       |                                                       |
| AlMgSi0.5  | Alu11 | $\alpha$ 固溶体与<br>Mg <sub>2</sub> Si沉淀 | 247                                                   | 0.15     | 37.1                                       | —                                         | 252                                                | 296                                                   | 44                                                    |
|            | Alu10 |                                       | 247                                                   | 0.3      | 37.1                                       | —                                         | 183.2                                              | 261.7                                                 | 78.4                                                  |
|            | Alu12 |                                       | 247                                                   | 0.5      | 37.1                                       | —                                         | 113.3                                              | 226                                                   | 112.8                                                 |
|            | Alu2  |                                       | 247                                                   | 0.15     | —                                          | 49.4                                      | 234.6                                              | 393.6                                                 | 59.1                                                  |
|            | Alu1  |                                       | 247                                                   | 0.3      | —                                          | 49.4                                      | 244.8                                              | 348.7                                                 | 104.0                                                 |
|            | Alu3  |                                       | 247                                                   | 0.5      | —                                          | 49.4                                      | 149.1                                              | 361.0                                                 | 131.7                                                 |
| X6CrNi18 9 | Aus2  | 奥氏体                                   | 229.5                                                 | 0.034    | —                                          | 45.9                                      | 393.2                                              | 466.9                                                 | 13.7                                                  |
|            | Aus3  |                                       | 229.5                                                 | 0.05     | —                                          | 45.9                                      | 378.6                                              | 399.6                                                 | 21.1                                                  |
|            | Aus1  |                                       | 229.5                                                 | 0.15     | —                                          | 45.9                                      | 310.7                                              | 365.7                                                 | 55                                                    |
| 工业纯铁       | Nr.2  | 铁素体                                   | 160                                                   | 0.02     | —                                          | 32                                        | 281.3                                              | 287.3                                                 | 6.0                                                   |
|            | Nr.4  |                                       | 160                                                   | 0.05     | —                                          | 32                                        | 263.8                                              | 278.5                                                 | 14.7                                                  |

①  $\sigma_m = (P \cdot Y) / (B \cdot W)$ , 其中  $Y = f(a/w)$ .

#### 4. 结果讨论

按照关系式  $da/dN = C_0 \cdot \Delta K^2$ , 对于所研究的材料, 测出的裂纹扩展速率与 应力强度因子幅度的关系, 依赖于应力比, 如图 6~11 所示[18].

在可以对比的  $\Delta K$  值范围内, 珠光体-铁素体组织 (图 6 和 7) 和纯铁素体组织 (图 11) 裂纹扩展比调质组织的裂纹扩展 (图 8 和 9) 要慢。奥氏体钢 (图 10) 介于两者之间, 而铝合金裂纹扩展则显得快 (图 12)。

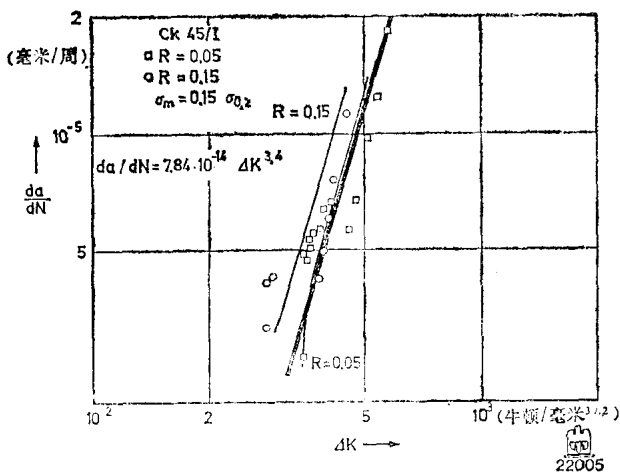


图 6 Ck 45/I 钢的裂纹扩展速率

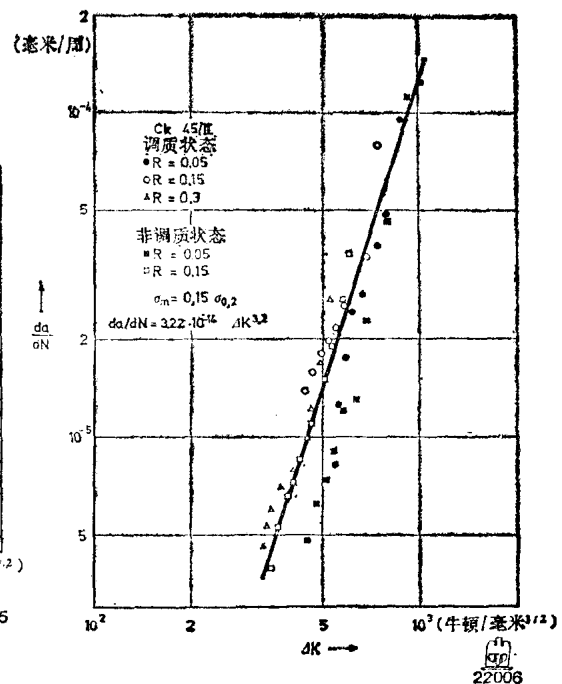


图 7 Ck 45/I 钢的裂纹扩展速率

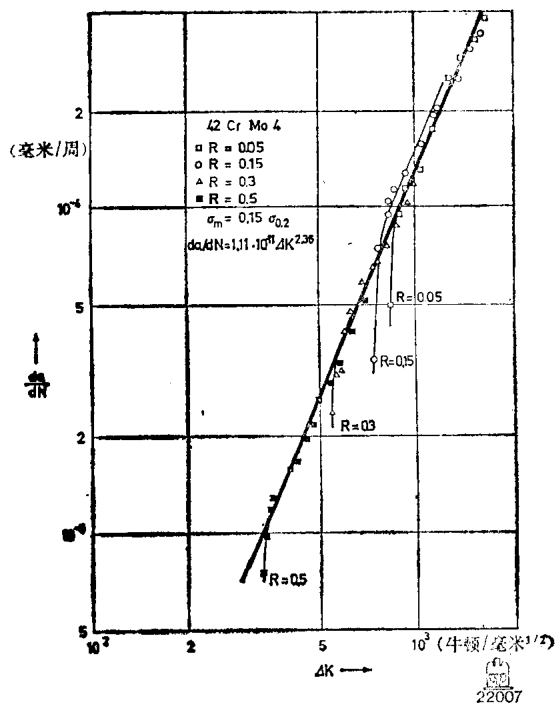


图 8 42 CrMo 4钢的裂纹扩展速率

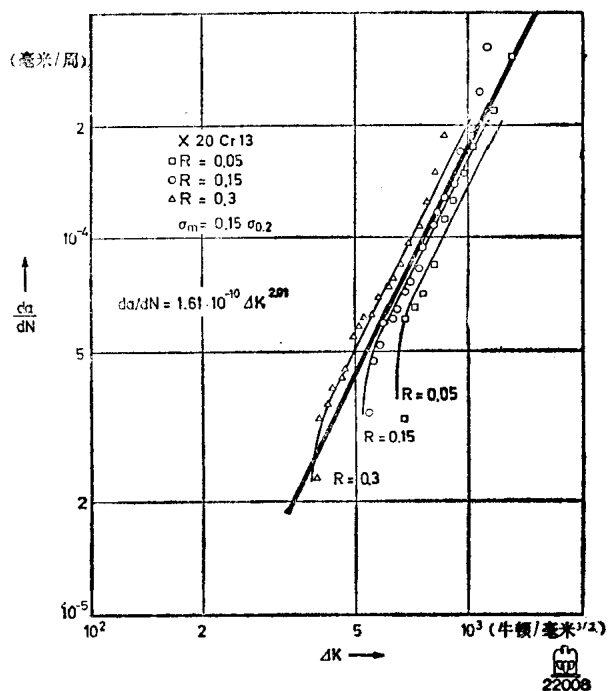


图 9 X 20 Cr 13钢的裂纹扩展速率

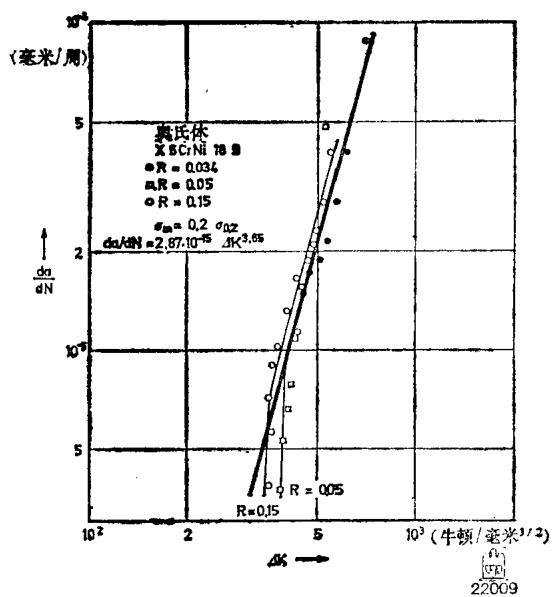


图 10 X 6 CrNi 18 9钢的裂纹扩展速率

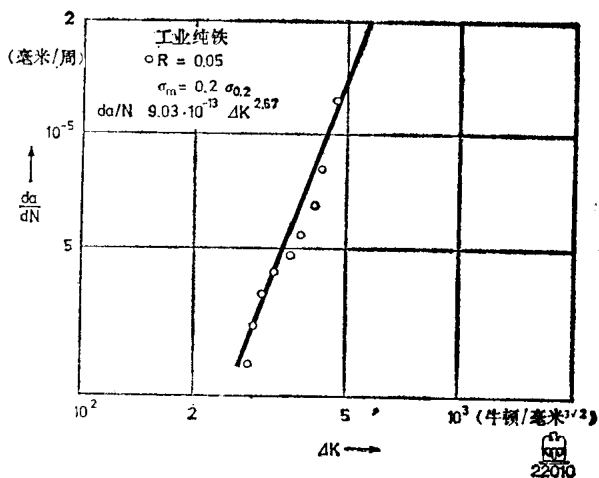


图 11 工业纯铁的裂纹扩展速率

具有不同强度的珠光体-铁素体组织, 裂纹扩展行为相接近 (图 6 和 7)。调质到相同强度, 尽管组织中已有贝氏体 (图 4.2 和 4.3), 裂纹扩展行为也没有多大变化 (图 7)。应力

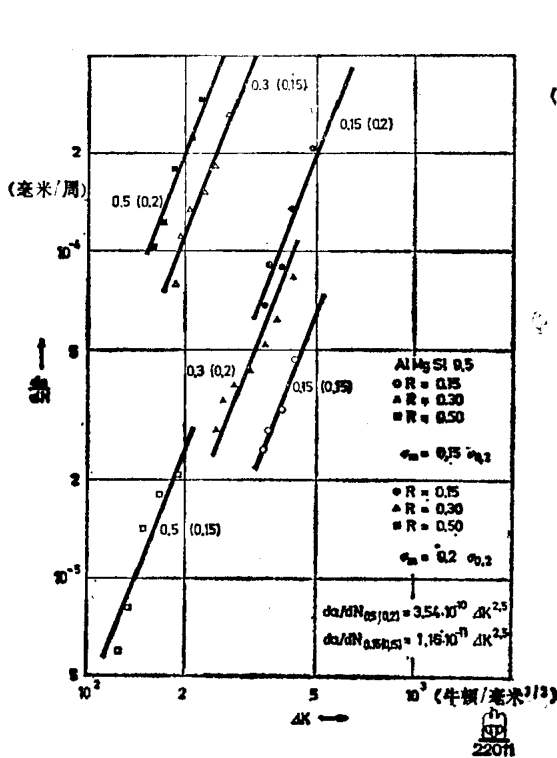


图12 应力比对AlMgSi 0.5材料裂纹扩展速率的影响

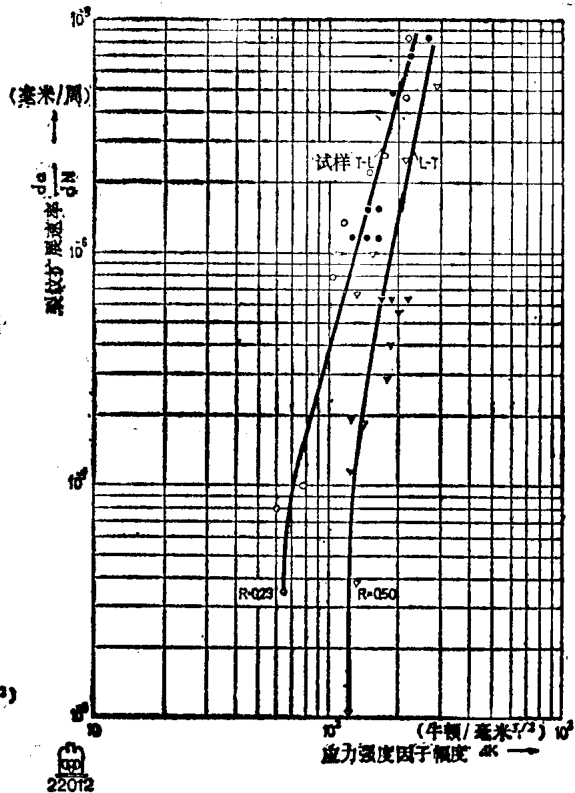


图13 X 20 Cr 13钢裂纹扩展速率与应力强度因子幅度的关系 (恒裂纹张开位移试验)

强度因子幅度相同时, 塑性好的不锈钢 X 20 Cr 13 裂纹扩展比之 42 CrMo 4 要快, 但前者裂纹扩展曲线的直线部分上升得最平坦 (图 8, 图 9 及表 5)。

作对比用的奥氏体和纯铁素体组织, 原定各次试验使用低平均应力, 即是屈服应力  $\sigma_{0.2}$  的 15%, 结果不产生裂纹, 因此, 不得不将平均应力提高到屈服应力  $\sigma_{0.2}$  的 20%。这样, 大多数组织状态, 只要很低的应力比就产生裂纹。用 AlMgSi 固溶体组织来作转变成不同载荷等级的模拟试验, 结果每次都有裂纹扩展 (图 12 和表 4.2)。这种铝合金裂纹扩展行为与外加应力比的关系最显著, 但没有统一的排列顺序 (图 12)。粗略估计, 所有测得的裂纹扩展曲线都可能在一个宽的分散带中, 这说明, 只有当裂纹扩展速率很慢时 (例如调质组织), 与 R 的关系才有显著的差别 (图 8 和 9)。曲线向下弯曲部分有时仅一个点, 在应力是可调节的试验中, 这个点可由裂纹开始扩展的长度算出, 但其结果稍高些, 因此必须小心估算。

从恒裂纹张开位移的裂纹扩展试验可以得到准确的值, 这种试验的曲线如图 13 所示。由于随着裂纹长度增加, 裂纹扩展减慢, 所以裂纹扩展速率减慢到最后, 就达到应力强度因子幅度的门槛值  $\Delta K_0$ , 这个门槛值的大小似乎与材料本身以及应力比有关, 减低到这个门槛值, 裂纹就不扩展 [19~33]。对于受一定循环载荷的机器零件, 由门槛值可得出一个裂纹不能继续扩展的临界缺陷尺寸。进一步的试验似乎必须证明  $\Delta K_0$  对 R 的关系。

各种材料裂纹扩展方程的常数 C<sub>0</sub> 和 n 的对数图线成为近乎直线的关系 (表 5 和图 18)。

表 5 各种金属材料的裂纹扩展方程

| 材 料           | 应 力 比<br>R | 平均应力<br>$\sigma_m$<br>(牛顿/毫米 <sup>2</sup> ) | 裂纹扩展速率<br>da/dN<br>(毫米/周) | 应力强度因子幅度<br>$\Delta K$<br>(牛顿·毫米 <sup>-3/2</sup> ) | 裂纹扩展方程<br>da/dN = C· $\Delta K^n$<br>(毫米/周) |
|---------------|------------|---------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Ck 45/I       | 0.05到0.3   | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 1·10 <sup>-5</sup>        | 470                                                | 7.84·10 <sup>-14</sup> ΔK <sup>3.2</sup>    |
|               |            | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 3·10 <sup>-6</sup>        | 360                                                |                                             |
|               |            | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 9·10 <sup>-7</sup>        | 230                                                |                                             |
| Ck 45/II      | 0.05到0.3   | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 1·10 <sup>-4</sup>        | 900                                                | 3.22·10 <sup>-14</sup> ΔK <sup>3.2</sup>    |
|               |            | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 5·10 <sup>-6</sup>        | 360                                                |                                             |
| 42 CrMo 4     | 0.05到0.5   | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 1·10 <sup>-4</sup>        | 900                                                | 1.11·10 <sup>-11</sup> ΔK <sup>2.36</sup>   |
|               | 0.05       | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 5·10 <sup>-5</sup>        | 850                                                |                                             |
|               | 0.15       | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 3.5·10 <sup>-5</sup>      | 740                                                |                                             |
|               | 0.03       | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 2.5·10 <sup>-5</sup>      | 550                                                |                                             |
|               | 0.5        | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 1·10 <sup>-5</sup>        | 340                                                |                                             |
| X 20 Cr 13    | 0.05到0.3   | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 1·10 <sup>-4</sup>        | 780                                                | 1.61·10 <sup>-10</sup> ΔK <sup>2.01</sup>   |
|               | 0.05       | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 3.5·10 <sup>-5</sup>      | 680                                                |                                             |
|               | 0.15       | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 3.5·10 <sup>-5</sup>      | 540                                                |                                             |
|               | 0.3        | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 3.5·10 <sup>-5</sup>      | 420                                                |                                             |
| X 6 CrNi 18 9 | 0.034到0.15 | 0.2· $\sigma_{0.2}$                         | 1·10 <sup>-4</sup>        | 780                                                | 2.87·10 <sup>-15</sup> ΔK <sup>3.65</sup>   |
|               | 0.05       | 0.2· $\sigma_{0.2}$                         | 5·10 <sup>-6</sup>        | 400                                                |                                             |
|               | 0.15       | 0.2· $\sigma_{0.2}$                         | 5·10 <sup>-6</sup>        | 350                                                |                                             |
| 工业纯铁          | 0.05       | 0.2· $\sigma_{0.2}$                         | 2·10 <sup>-5</sup>        | 580                                                | 9.03·10 <sup>-13</sup> ΔK <sup>2.67</sup>   |
|               | 0.05       | 0.2· $\sigma_{0.2}$                         | 3·10 <sup>-6</sup>        | 275                                                |                                             |
| AlMgSi 0.5    | 0.5        | 0.2· $\sigma_{0.2}$                         | 1·10 <sup>-4</sup>        | 155                                                | 3.54·10 <sup>-10</sup> ΔK <sup>2.5</sup>    |
|               | 0.3        | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 1·10 <sup>-4</sup>        | 190                                                |                                             |
|               | 0.15       | 0.2· $\sigma_{0.2}$                         | 1·10 <sup>-4</sup>        | 380                                                |                                             |
|               | 0.5        | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 3·10 <sup>-5</sup>        | 220                                                |                                             |
|               | 0.3        | 0.2· $\sigma_{0.2}$                         | 3·10 <sup>-5</sup>        | 260                                                | 1.16·10 <sup>-11</sup> ΔK <sup>2.5</sup>    |
|               | 0.15       | 0.15· $\sigma_{0.2}$                        | 3·10 <sup>-5</sup>        | 360                                                |                                             |

通过进一步试验补充,有可能用它来对材料进行相对的评价。

采用放大7000倍的扫描电镜显微照片上距裂纹口等距离处的疲劳辉纹间距作为断口上裂纹扩展的量度(图14和15)。可能任何一种所研究的材料宏观上和微观上测出的每次载荷循环中裂纹扩展量都不一致(表6)。疲劳辉纹间距为裂纹扩展量的2到10倍。当裂纹扩展速率大于10<sup>-4</sup>毫米/周时,真实的裂纹扩展量与测量值相近。

相邻的开裂区测量出的疲劳辉纹间距之差达50%左右。这说明相邻的不同组织区域,按其塑性可能有不同的裂纹扩展量。由辉纹间距断定裂纹扩展较快,是因为整个断口上的辉纹数目比实际上引起开裂的载荷循环次数少得多。在应力可调节的试验中,相应于裂纹扩展速率随裂纹长度增加而增加的辉纹间距变宽现象,都不可能观察到。这些间距都分散处在 da/dN-a 曲线附近一定宽度的散布带中,而且同一裂纹深度,间距各不相同,视材料而定。珠光体-铁素体两相结构中,辉纹间距往往比片状珠光体的小0.8到1微米。

将疲劳断口的微观结构与各个组织成分结合起来研究,不仅采用磨光断口的方法,而且也采用腐蚀方法。

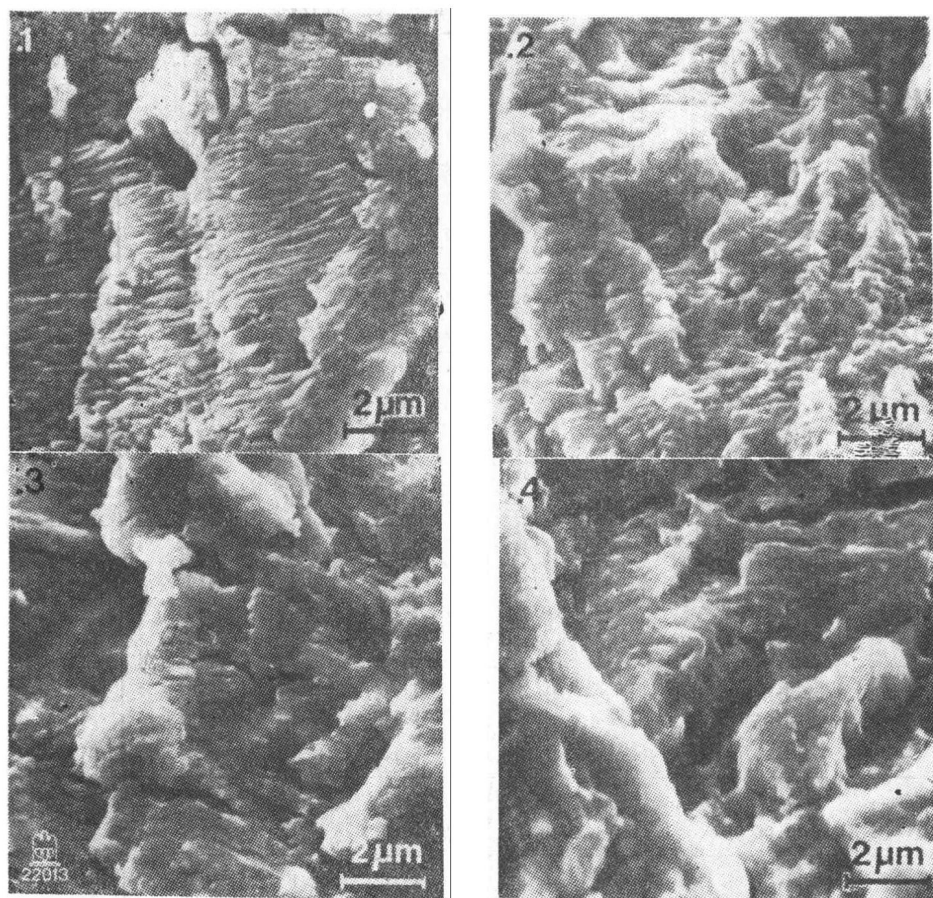


图14.1 Ck 45/Ⅰ<sub>常化</sub>钢的疲劳断裂微观结构, 距裂纹起点.4 毫米,  $R = 0.15$ ,  $\sigma_m = 0.15\sigma_{0.2}$  14.2 Ck 45/Ⅰ调质钢的疲劳断裂微观结构 14.3 42 CrMo 4钢的疲劳断裂微观结构 14.4 X 20 Cr 13钢的疲劳断裂微观结构

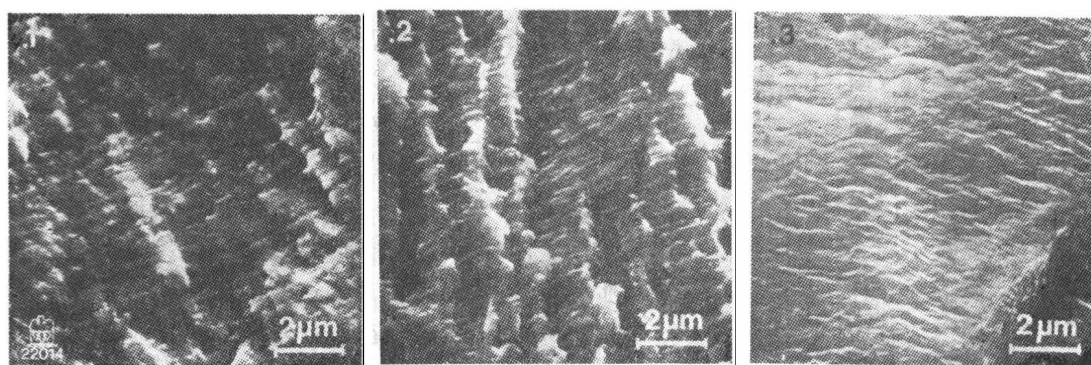


图15.1 X 6 CrNi 18 9钢的疲劳断裂微观结构, 距裂纹起点 4 毫米,  $R = 0.034$ ,  $\sigma_m = 0.2\sigma_{0.2}$  15.2 工业纯铁的疲劳断裂微观结构,  $R = 0.05$  15.3 AlMgSi 0.5材料的疲劳断裂微观结构,  $R = 0.15$

表 6 各种金属材料的应力比、平均应力、裂纹长度、微观疲劳辉纹间距及  
每次循环中裂纹的宏观扩展量

| 材 料            | 应 力 比<br>R | 平 均 应 力<br>$\sigma_m$<br>(牛顿/毫米 <sup>2</sup> ) | 裂纹长度<br>(毫米) | 微观疲劳<br>辉纹间距<br>(微米) | 裂纹每周的<br>宏观扩展量<br>(微米) |
|----------------|------------|------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------------------|
| Ck 45/Ⅱ<br>常 化 | 0.15       | $0.15 \cdot \sigma_{0.2}$                      | <1           | 0.15                 | <0.004                 |
|                | 0.15       | $0.15 \cdot \sigma_{0.2}$                      | 4.3          | 0.25                 | 0.008                  |
|                |            |                                                | 8.5          | 0.33                 | 0.025                  |
| Ck 45/Ⅱ<br>调 质 | 0.15       | $0.15 \cdot \sigma_{0.2}$                      | <1           | 0.18                 | 0.013                  |
|                |            |                                                | 4            | 0.24                 | 0.022                  |
|                |            |                                                | 8            | 0.26                 | 0.08                   |
| X 20 Cr 13     | 0.15       | $0.15 \cdot \sigma_{0.2}$                      | 2.2          | 0.18                 | 0.065                  |
|                |            |                                                | 4.4          | 0.24                 | 0.09                   |
|                |            |                                                | 6.5          | 0.22                 | 0.14                   |
| 42 CrMo 4      | 0.15       | $0.15 \cdot \sigma_{0.2}$                      | 2.3          | 0.1                  | 0.09                   |
|                |            |                                                | 4.5          | 0.28                 | 0.12                   |
|                |            |                                                | 9.0          | 0.14                 | 0.2                    |
| X 6 CrNi 18 9  | 0.15       | $0.15 \cdot \sigma_{0.2}$                      | 4            | 0.39                 | 0.01                   |
|                |            |                                                | 6            | 0.46                 | 0.014                  |
|                |            |                                                | 10           | 0.25                 | 0.03                   |
| 工业纯铁           | 0.05       | $0.2 \cdot \sigma_{0.2}$                       | 2.3          | 0.29                 | 0.004                  |
|                |            |                                                | 4.6          | 0.29                 | 0.006                  |
|                |            |                                                | 9.2          | 0.29                 | 0.01                   |
| AlMgSi 0.5     | 0.15       | $0.25 \cdot \sigma_{0.2}$                      | 2.1          | 0.25                 | 0.01                   |
|                |            |                                                | 4.25         | 0.33                 | 0.025                  |
|                |            |                                                | 6.5          | 0.34                 | 0.033                  |

若制备垂直于断口的金相磨片，则用断口与磨片的交界棱边在扫描电镜下可以同时研究断口表面和组织（图 16.2）。制备磨片棱边的难处在于不允许将它磨圆。对于调质钢 Ck 45，已经证实塑性好的铁素体特别容易出现清晰的疲劳辉纹（表 1），但是贝氏体的断裂结构似乎受到掉下来的唇片和毛刺所冲刷。

直接腐蚀断口，将原始的断口表面除去，显示出下面的组织（图 17.1~17.4）。对照腐蚀前（图 17.1 和 17.2）和腐蚀后（图 17.3 和 17.4）的扫描照片，就可以得出推断。这里必须指出，只有铁素体区才呈现清楚的疲劳辉纹，较脆的珠光体区，则呈现不规则的岭和沟，还有次级裂纹。因此，只有断口的铁素体区才能得到对辉纹的分析结果。根据这方面研究得出的经验，不经腐蚀也可能判别断口上的铁素体区和珠光体区，如图 16.1 所示。

将奥氏体、铁素体与铝合金的组织进行比较，结果表明，整个裂纹前沿线都均匀扩展，仅在通过起岭处或夹杂和碳化物处才停止下来。

进一步的研究应该包括沿晶的疲劳断裂成分，但它在我们的试验中没有发现。此外，这里也没有考虑环境介质的影响。

关于均匀调质组织的特殊腐蚀方法，例如对原始晶粒间界的腐蚀，有待进一步叙述。

## 5. 总结

只有 AlMgSi 0.5 的裂纹扩展试验，裂纹扩展速率与应力比才有单值的关系〔26, 32, 33〕。