

# 三类内应力之间的关系及其对疲劳的作用

白涛<sup>1</sup>, 何家文<sup>2</sup>

(1. 昌宇应力技术(上海)有限公司, 上海 200122; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

**摘要:**系统阐述了三类内应力的分类和内在关系,指出除了业内熟知的残余应力外,微观应力尤其是第二类内应力亦具有重要的工程应用价值,并给出了第二类内应力可能的测试手段——聚焦离子束(FIB)微创法,最后分别对三类内应力对材料疲劳性能的影响及作用进行了详细的分析和阐述。

**关键词:**内应力;残余应力;微观应力;聚焦离子束(FIB);疲劳

中图分类号:N34

文献标志码:A

文章编号:1001-4012(2018)04-0233-06

## Relationship of Three Types of Internal Stresses and Their Effects on Fatigue

BAI Tao<sup>1</sup>, HE Jiawen<sup>2</sup>

(1. Changyu Stress Technology (Shanghai) Ltd., Shanghai 200122, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The classification and internal relations of the three types of internal stresses were systematically described. It is pointed out that in addition to the well-known residual stresses in the industry, the microscopic stress, especially the second type of internal stress, also has important engineering application value. A possible method—the focused ion beam (FIB) minimally invasive method for measuring the second type of internal stress was given. Finally, the effects of the three types of internal stresses on the fatigue properties of the materials were analyzed and elaborated in detail.

**Keywords:** internal stress; residual stress; microstress; focused ion beam (FIB); fatigue

在生产、处理和加工过程中,由于材料的局部区域产生了不均匀的塑性变形,必然会产生内应力。内应力存在于材料内部并自身保持平衡,通常将内应力分成宏观应力和微观应力两类。宏观应力即残余应力,微观应力包含 II 类和 III 类应力,提及时具体指哪一种应力常有不同认识。由于以往谱型分析发表了大量文献,形成的观念是微观应力源于点阵缺陷和位错密度,也即 III 类应力,只有讨论相间应力时才涉及 II 类应力,据此认为 II 类应力只在少数材料中出现,III 类应力则普遍存在。上述观点应用在工程上就成为:I 类残余应力导致谱线位移,III 类应力与位错密度和晶粒度有关,使谱线展宽。进一

步简化形成概念为:谱线位移与应力有关,谱线展宽与强度有关。

实际上,笔者认为三类内应力对材料疲劳性能的影响中,I 类应力和 II 类应力可以叠加并起直接作用,以位错密度为代表的 III 类应力从测量到表征均不确定,对疲劳的作用也应视情况而定。为此,笔者首先理清了三类内应力之间的关系,然后分别讨论了其对疲劳的作用。

### 1 三类内应力之间的关系

#### 1.1 定义

1935 年达维金科夫按照引起 X 射线衍射效应的不同将内应力分成三类:第 I 类应力在宏观尺寸范围内平衡,引起 X 射线衍射谱线位移;第 II 类应力在晶粒尺寸范围内平衡,使谱线展宽;第 III 类应力在单位晶胞内平衡,使衍射强度下降<sup>[1]</sup>。这样定义一方面是未说清楚三类内应力之间的关系,另一

收稿日期:2018-01-03

**作者简介:**白涛(1984—),男,博士,主要从事内应力测试与分析、材料失效分析、微损检测和热处理工艺等方面的研究

**通信作者:**何家文(1933—),男,教授,主要从事 X 射线应力分析、金属材料强度和等离子体表面工程研究,jwhe@xju.edu.cn

方面也发现多相材料不同晶粒间的应力也可以引起谱线位移,与定义不符。

德国科学家马赫劳赫对内应力重新定义如下:第 I 类应力  $\sigma_I$  在材料的宏观范围内平衡,当平衡破坏时有尺寸变化;第 II 类应力  $\sigma_{II}$  在晶粒尺度内平衡,当平衡破坏时有尺寸变化;第 III 类应力  $\sigma_{III}$  存在于原子尺度,平衡破坏时不会发生尺寸变化<sup>[2]</sup>。三类内应力之间的关系如图 1(图中  $x, y$  表示空间位置)所示。

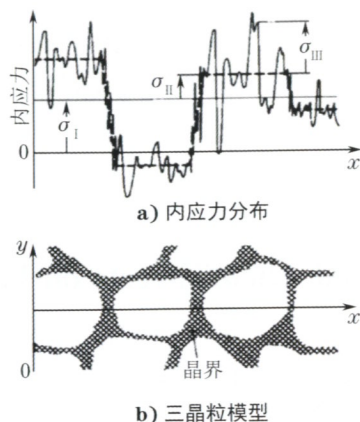


图 1 马赫劳赫定义三类内应力示意图

Fig.1 Schematic diagram of three types of internal stresses defined by MACHERAUCH E:

a) distribution of the internal stresses; b) crystal model with three grains

图 2 用晶粒取向不同表示各晶粒有其自己的内应力,在宏观范围平衡后得到平均的宏观应力是 I 类应力;每个晶粒和平均应力之差为 II 类应力;III 类应力则是一个晶粒内应力的波动。

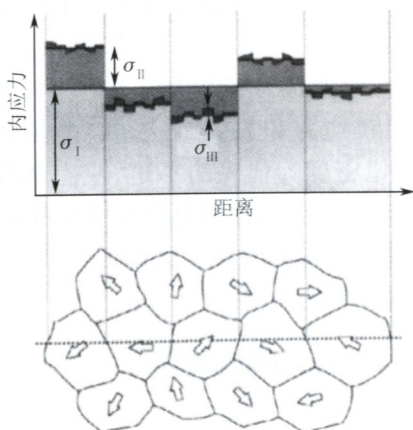


图 2 多晶中三类内应力示意图

Fig.2 Schematic diagram of three types of internal stresses in polycrystals

三类内应力用分布曲线表示如图 3 所示,III 类应力分布曲线上取中值即 II 类应力,II 类应力分布曲线上取中值为 I 类应力。I 类和 II 类应力合成曲线如图 4 所示。

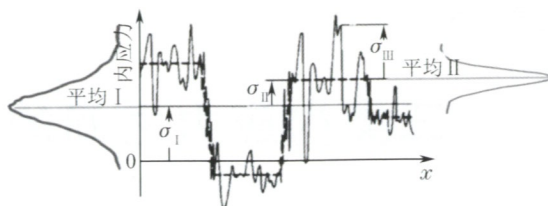


图 3 三类内应力分布曲线关系

Fig.3 The distribution curve relationship of three types of internal stresses

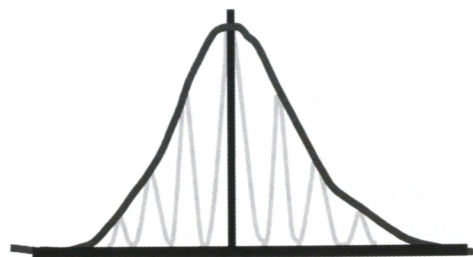


图 4 I 类和 II 类应力合成示意图

Fig.4 Schematic diagram of composition of  $\sigma_I$  and  $\sigma_{II}$

达维金科夫定义三类内应力的依据是 X 射线衍射效应,但未说明三类内应力之间的关系。马赫劳赫描述了材料中三类内应力之间的关系,但无衍射效应。根据达维金科夫按衍射效应分类中 II 类应力使衍射线展宽,则 I 类和 II 类应力之间的关系可以示意如图 4,即 II 类应力分散度影响衍射线宽度。III 类应力由于点缺陷破坏相干散射关系,使衍射强度下降,但对谱型影响不大。

## 1.2 应力和应变分散度

从布拉格公式来分析衍射线组成如图 5 所示,衍射线中值源于面间距中值  $d_{ave}$ ,两端  $d_1$  和  $d_2$  表示参与衍射晶面间距的分散度。 $d_1$  和  $d_2$  对应的应变分别为  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ ,也即在  $\pm\epsilon$  范围内的  $hkl$  晶面都有衍射贡献, $\pm\epsilon$  就是应变分散度。

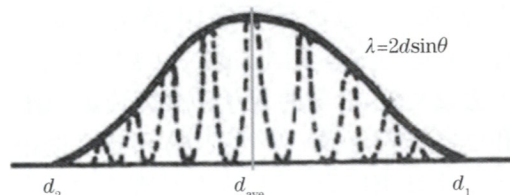


图 5 应变分散度示意图

Fig.5 Schematic diagram of strain dispersity

工程上常用的是应力而非应变,习惯的表述应该是应力分散度  $\pm\sigma$ 。但  $\pm\epsilon$  不能简单地转化为  $\pm\sigma$ ,这是因为  $d_{ave}$  和其他  $d$  值  $hkl$  面的弹性模量不同。宏观应力可以用统计的杨氏模量,不同晶粒在用应变计算应力时,其弹性模量与这个晶粒周围的约束条件有关,需具体计算。



工程中标注的数值都带有误差或分散度±,但残余应力值无±,这是由于只有应变分散度,不能写成应力分散度的缘故,这种现象不能误解为残余应力测定值准确,误差或分散度小。另一种误解是,衍射谱线中不提应力分散度后,其宽度就只与晶粒度和位错密度有关,也即展宽仅与 III 类应力有关了。

1.3 II 类应力的测定

I 类应力即残余应力的测定方法非常成熟,并已经获得了广泛的工程应用,如 X 射线法、盲孔法等。而 II 类应力的测定,目前在工程应用上尚存在一定的难度。II 类应力处于晶粒尺度,早期测定有较大的难度,只有双相材料、硬质合金等测过 II 类应力,测定的数值也是统计平均值而非某一微区的应力值。电子束散射衍射(EBSD)及聚焦离子束(FIB)技术的发展,使测定某微区的应力值成为可能。图 6 是采用环芯法将试样切成岛状,测定应力释放前后标定点的位移,计算微区应力<sup>[3]</sup>。图 7 是在西安交大用聚焦离子束在硅片的 2.6 μm 铜膜上试验盲孔法。

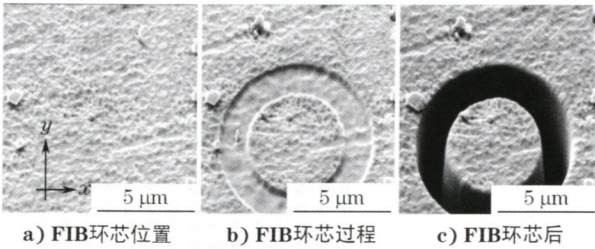


图 6 FIB 环芯法

Fig.6 Ring core method with FIB:

- a) FIB ring core position; b) FIB ring core process; c) FIB ring core finish

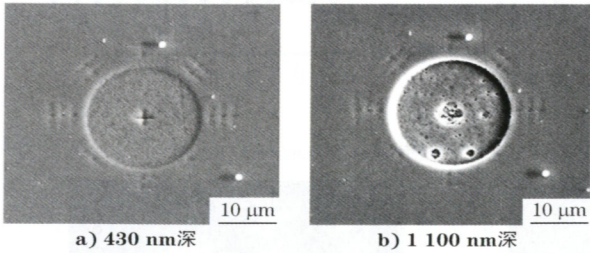


图 7 FIB 盲孔法

Fig.7 Hole drilling method with FIB:

- a) 430 nm depth; b) 1 100 nm depth

II 类应力测定的区域在微米量级,X 射线法难以满足多晶条件,故采用机械法。因其损伤只在微米尺度,国际上在有损和无损之外,为之增加一种分类,称之为微创法。

就测试方法可以看出测得的应力应该属于微区内的宏观残余应力,相当于图 1 中从零坐标计算的

II 类应力,而不是与宏观应力之间的差值。即单独测定 II 类应力,而非围绕宏观应力上下的波动值,而是其绝对值。

1.4 半高宽和硬度的相关性

如果认定半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)只与晶粒度和位错密度有关,则可以认为半高宽就只与硬度相关,因而业界普遍将半高宽的变化作为硬度变化的标识。这个认识也表现在图 8 中不同喷丸强度半高宽的变化上,喷丸后半高宽下降即认为硬度降低;提高喷丸强度,表面硬度会再次提高<sup>[4]</sup>。实际上当时国内就有质疑,李家宝等<sup>[5]</sup>通过表层屈服强度的测定表明喷丸后是强化,如图 9 所示,得到的结论如下:半高宽下降并非硬度降低,而是微观应力减小的原故,但注意到此文重要性的人员很少。直接比较中碳钢滚压表层的半高宽和硬度,如图 10 所

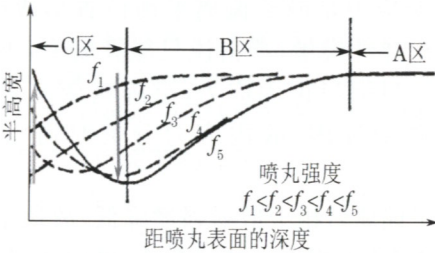
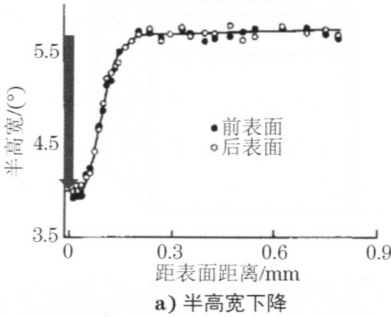
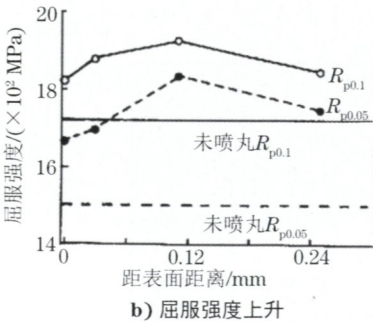


图 8 喷丸强度与半高宽关系

Fig.8 The relationship between shot peening intensity and FWHM



a) 半高宽下降



b) 屈服强度上升

图 9 喷丸表层半高宽和屈服强度的变化曲线

Fig.9 The change curves of FWHM and yield strength of the peened surface:

- a) FWHM decreasing; b) yield strength increasing

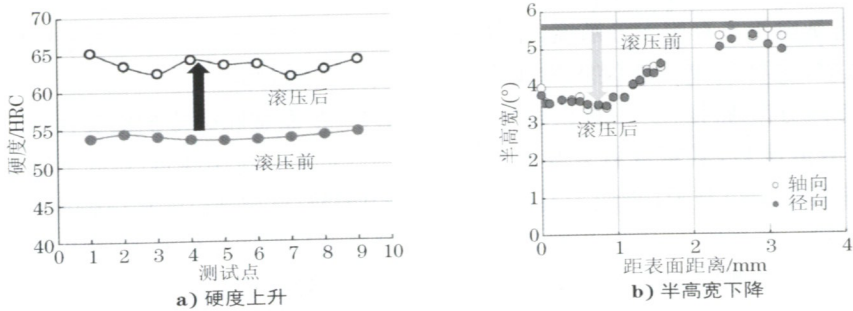


图 10 滚压表层硬度和半高宽的变化曲线

Fig. 10 The change curves of hardness and FWHM of the rolled surface: a) hardness increasing; b) FWHM decreasing

示,清楚地显示出两者并不相关<sup>[6]</sup>。而且硬度稳定于一定数值时,半高宽有不同的值。

试验事实表明,半高宽不能只看成与硬度相关,还取决于微观应力的分散度。

1.5 III 类应力

III 类应力是原子偏离平衡位置形成的应变,由于缺乏弹性模量,严格说只能算畸变,不能称之为应力。只因讨论内应力,点阵畸变又是产生内应力的重要原因,故内应力分类时需将其包含在内。

原子偏离后相干散射强度降低,故达维金科夫以此定义 III 类应力。其后在 20 世纪 40 年代研究

冷加工变形的 X 射线谱型时发现,晶粒度和点阵畸变都影响线宽,并给出了定量分析<sup>[7]</sup>。谱型分析的数理分析非常精彩,形成了长期的研究热潮。即使 1954 年试验证实了位错的存在,许多人仍试图将位错纳入模型作修正。但位错状态复杂多变,谱线提供的信息少、效果差,到 20 世纪 90 年代,谱型分析测定晶粒度和位错密度的研究及应用才逐渐平息。

图 11a)为模型中的点阵畸变  $\Delta d/d$ ,图 11b), c)为实际存在的刃位错和螺位错,可见两者明显不同。谱型分析适用的晶粒度小于 100 nm,金属晶粒只有在强烈变形后才可能细化到此尺度,但变形后的结构如图 12b), c)中所示的亚晶或不同形式的位

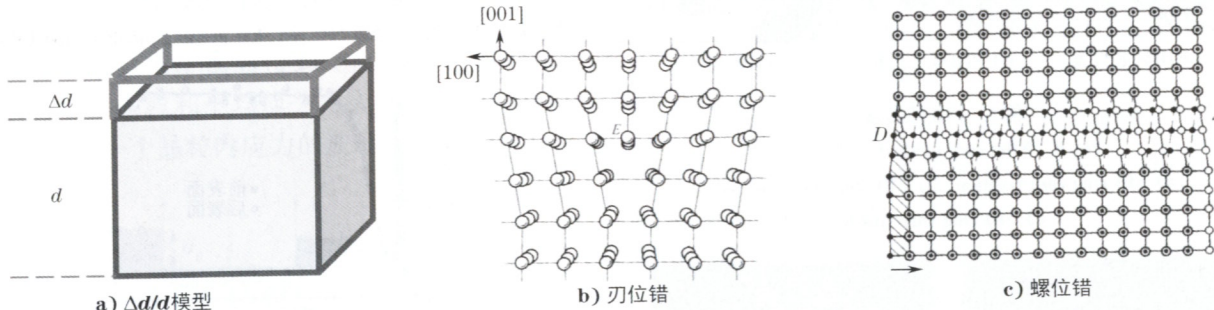


图 11 点阵畸变及位错模型

Fig. 11 The lattice distortion and dislocation model:

a)  $\Delta d/d$  model; b) edge dislocation; c) screw dislocation

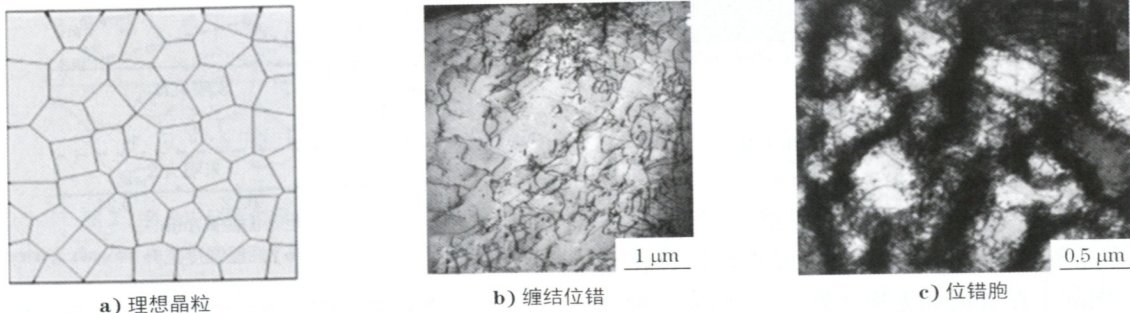


图 12 理想多晶和实际变形结构

Fig. 12 The ideal grains and actual distortion structure:

a) ideal crystalline; b) tangled dislocation; c) dislocation cell



错组态,与图 12a)中的理想晶粒有很大的区别。

分析变形金属时,由于物理模型与实际结构的差距如此之大,因此华丽的数学处理只能如同建在沙漠上的高楼,只有在无位错的陶瓷粒度分析上,谱型分析才能取得较好的效果。

## 2 三类内应力对疲劳的作用

### 2.1 I类应力对疲劳的作用

国内有文献认为 I 类应力即宏观应力或残余应力,可以和外载应力取代数和,即压应力直接抵消疲劳应力。但残余应力是静应力,而疲劳应力为动应力,两者之间的关系如图 13 中平均应力和交变应力的关系。残余应力可以看成为平均应力,疲劳应力是交变应力。静、动应力间应该用 Goodman 关系表述,如图 14 所示,用数学公式表达如下

$$\sigma_m^{-1} = \sigma^{-1} - m\sigma_m \quad (1)$$

式中: $\sigma_m^{-1}$  为平均应力  $\sigma_m$  对应的弯曲疲劳极限; $\sigma^{-1}$  为弯曲疲劳强度; $m$  为斜率,即转换系数; $\sigma_m$  为平均应力。

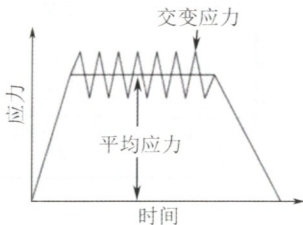


图 13 交变应力与平均应力的关系曲线

Fig. 13 The relationship curves of alternating stress and mean stress

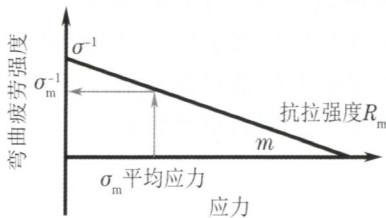
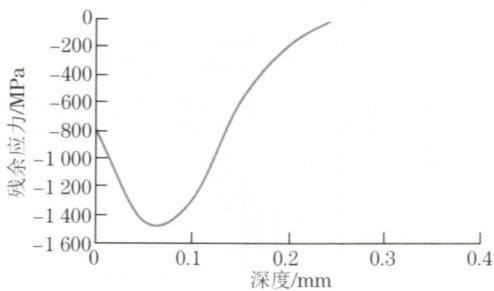


图 14 Goodman 关系示意图

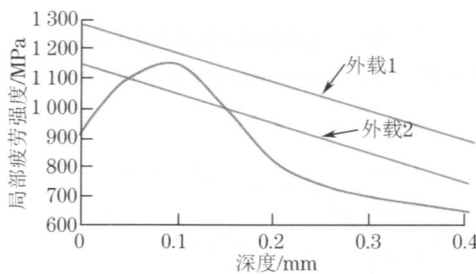
Fig. 14 Schematic diagram of Goodman relationship

马赫劳赫提出用 Goodman 关系将残余压应力转化为疲劳强度<sup>[8]</sup>,由于残余应力沿深度方向呈梯度分布,因此转化成弯曲疲劳强度也应该是沿深度方向呈梯度分布,称之为局部疲劳强度,如图 15 所示。

将残余应力换算成局部疲劳强度后,如图 15b)所示,此时的应力坐标已是动强度,材料的动强度可以和疲劳的交变应力比较。载荷 1 的疲劳裂纹萌生于表面,降载为载荷 2 后,裂纹萌生于表下,因此可根据该图选择载荷及判断裂纹萌生部位。



a) 残余应力



b) 局部疲劳强度

图 15 残余应力和局部疲劳强度沿深度的分布曲线

Fig. 15 The distribution curves of a) residual stress and

b) local fatigue strength along depth direction

### 2.2 II类应力对疲劳的作用

疲劳裂纹萌生常起源于缺陷,早期扩展也有高度选择性,只有裂纹伸展长度达到百微米量级时,其扩展途径才受控于断裂力学,与微观结构的关系减少。图 16 是疲劳裂纹的早期扩展途径,是驱动力和抗力博弈的结果,即外载驱动力和此处材料的局部疲劳强度的对比<sup>[9]</sup>。一般将 I 类应力和 II 类应力进行叠加,裂纹路径的大角度转折往往与微观应力有关。图 17 所示的短裂纹扩展速率变化也显示外载交变应力与包含 I 类+II 类应力的局部强度对抗的波动情况<sup>[10]</sup>。

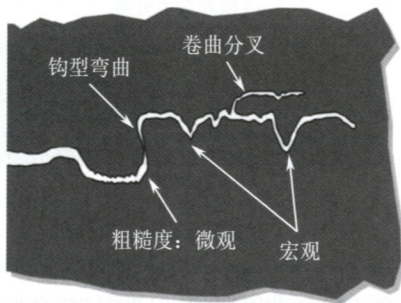


图 16 疲劳裂纹扩展示意图

Fig. 16 Schematic diagram of fatigue crack growth

由于命名为微观应力,常见的错误观点是应力很小。图 18 是含夹杂物滚珠钢的应力分布曲线。由于夹杂物的屈服强度低于马氏体基体的,故其周边发生应力松弛,两者之间的差值可达 GPa 量

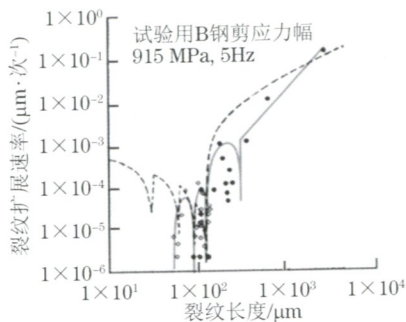


图 17 疲劳裂纹扩展速率变化曲线

Fig. 17 Velocity variation curve of fatigue crack growth

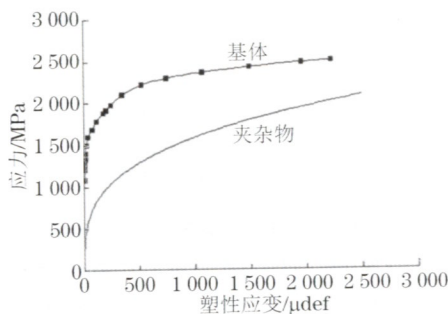


图 18 夹杂物附近的应力分布

Fig. 18 Stress distribution close to the inclusion

级<sup>[10]</sup>。即使成分均匀的单相合金,只要有晶界,其微观应力也有很大的波动幅度,如图 19(图中 I ~ V 分别表示 5 个不同取向的晶粒)所示<sup>[11]</sup>。

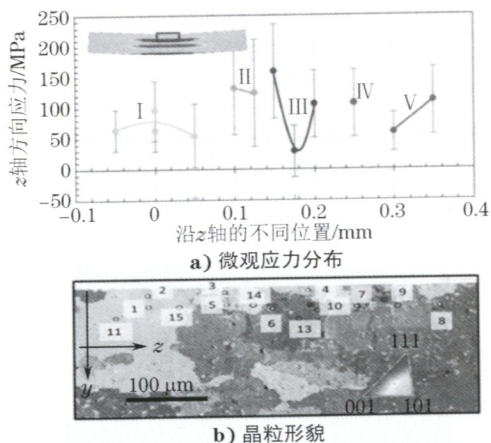


图 19 单相镍基合金的应力分布

Fig. 19 The stress distribution of single phase nickel-base alloy:

a) microstress distribution; b) grain morphology

### 2.3 III 类应力对疲劳的作用

III 类应力既是畸变,又属标量,不能与应力矢量叠加。残余压应力无论是 I 类或 II 类都对疲劳起正面作用,即提高疲劳强度。III 类应力的作用表现在材料强度上,形变强化后的材料是以韧性换取强度的,即强度增加,韧性下降。相应地这有利于构件

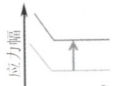
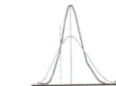
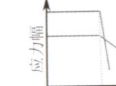
的高周疲劳强度,却不利于构件的低周疲劳强度,会使其疲劳寿命下降。

如果微观应力仅是 III 类应力,只与晶粒度和位错密度相关,在高周疲劳条件下,谱线宽化即硬度增加,故其对构件疲劳强度是有利的。但 II 类应力的分散度也影响谱线宽度,疲劳破坏从最薄弱处萌生,谱线越宽,分散度越大,使疲劳损伤的概率上升。这样谱线宽化就不能看成都是正面效应了。

综上,对三类应力进行归纳,着重于明确两类微观应力的不同含义,如表 1 所示。

表 1 三类内应力的比较

Tab. 1 Comparison of three types of internal stresses

| 项目     | 宏观应力/<br>残余应力                                                                       | 微观应力                                                                                 |                                                                                      |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|        |                                                                                     | 微区应力                                                                                 | 点阵畸变                                                                                 |
| 分类     | I 类                                                                                 | II 类                                                                                 | III 类                                                                                |
| 尺度     | 零件                                                                                  | 晶粒                                                                                   | 原子                                                                                   |
| 弹性模量   | 杨氏模量                                                                                | 模型计算                                                                                 | —                                                                                    |
| 表述     | 应力                                                                                  | 应力                                                                                   | 应变                                                                                   |
| 测定     | 定量                                                                                  | 定量                                                                                   | 定性                                                                                   |
| 对疲劳的作用 |  |  |  |
| 影响变形   | 有                                                                                   | 有                                                                                    | 无                                                                                    |

### 3 结束语

阐明三类应力之间的关系以及各自对疲劳的作用有助于理解以下两个方面的问题。

(1) 半高宽与分散度有关,不能等同于硬度。

(2) 微观应力的值可能接近于宏观应力,对疲劳早期的微裂纹扩展有重要影响。

### 参考文献:

- [1] 张定铨,何家文.材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用[M].西安:西安交通大学出版社,1999.
- [2] MACHERAUCH E. X-ray stress analysis[J]. Experimental Mechanics,1966,6(3):140-153.
- [3] SALVATI E, LUNT A J G, YING S, et al. Eigenstrain reconstruction of residual strains in an additively manufactured and shot peened nickel superalloy compressor blade[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 320: 335-351.
- [4] 王仁智,李向斌,殷源发,等.金属材料表面喷丸应变层内组织结构的研究[J].航空材料,1981(1):30-38, 101-102.

(下转第 275 页)