

文章编号:1000-582X(2005)11-0110-04

具有片层状结构珠光体团的有限元分析*

李卫国,彭向和

(重庆大学资源与环境科学学院,重庆 400030)

摘要:实验表明具有片层状微结构珠光体钢是一种结构敏感材料,其细观结构尺寸——层间距对其疲劳寿命影响显著.作者从对具有不同片层间距的珠光体团的有限元分析结果出发,定性分析了层间距对其力学性能及疲劳寿命的影响机制.进而说明了定量建立材料微观结构与微观结构对宏观响应的关系之间的关系的必要性,以及在材料本构行为的描述中引入微观结构和微观机理影响的重要性.

关键词:珠光体团;有限元分析;片层间距;微观结构;疲劳寿命

中图分类号:TG142.21

文献标识码:A

随着复相材料在工程中的广泛应用,人们已经认识到这类材料的力学性能取决于其内部微细观组织结构.材料各组分的特性及其相互作用、微结构几何特征及其变化等对材料宏观响应特性的影响等已成为目前的研究热点.

具有典型细片层状微结构的珠光体钢具有较高的强度、耐磨性和抗接触疲劳能力,被广泛地用作重轨钢,其微观组织是渗碳体和铁素体薄片交替叠合而成的珠光体组织.研究表明,尽管在珠光体钢中渗碳体的体积百分比仅约为百分之十三,但是它的存在和分布对珠光体钢的主要力学性能有极大的影响.通过对由攀枝花钢铁公司提供的根据不同工艺生产的PD₃钢轨钢进行的接触疲劳寿命实验发现,在相同材料成分下,采用特殊热处理工艺所获得的钢轨钢的平均接触疲劳寿命为普通热轧态钢轨钢在相同实验条件下的七倍.进一步的分析表明其硬度、表面及亚表面塑性变形、微裂纹萌生及扩展的位置及形态等都存在明显的不同.对其不同层次的微观组织结构的观察表明两种材料的珠光体团尺寸接近而主要的差别在于前者的珠光体团具有较小的片层间距^[1-7].虽然描述珠光体的响应规律的工作已经取得了很大的进展^[8-11],但仍难于回答具有相同组分和层状结构而具有不同细观结构尺寸的珠光体材料何以在力学性能上存在明显的差异;为何片层间距 D 越小,具有越好的损伤容限和疲劳寿命等

特性.

传统的连续介质力学方法是建立一组联系内应力和变形即应变的数学关系.假设这些关系对任意体积的材料体都有效,这意味着质点的相互作用是局部的,或者是在任意无限小范围内的.这种假设使得在整个物体内部和边界上可应用微分学的极限概念进行计算.因此,对于某一类型的材料只要做一些光滑性的假设就可能导出一组通用的本构关系,而无须追究其材料的微观结构和变形的微观机理.但连续介质假设在有限大小的细微观结构尺度上不再适用.对于大多数单相金属材料这种有限尺度很可能是晶粒尺寸的量级,或者在聚合物情况下,是晶体分子的量级.在多相材料中,例如纤维复合材料,这种有限尺度是纤维直径或层厚的量级.不管是怎样的有限尺度都必须掌握材料微观结构和变形微观机理的全面知识,只有如此才能在材料本构行为的描述中保持这种微观结构和微观机理的重要影响.合适的非弹性分析将取决于特殊的材料微观结构及其与载荷之间的相互作用上.一种直接的方法是在合适的尺度上考虑具有恰当微观结构的材料.这里需要一个高度超静定结构的细观力学模型,它必须根据作用在其上的特殊载荷来进行分析.为了在材料本构关系中充分考虑微观结构的影响,需对新发展的与传统连续介质假设有关的方法作必要的修改^[12].

* 收稿日期:2005-05-30

基金项目:国家自然科学基金(10472135);教育部“跨世纪优秀人才”基金项目

作者简介:李卫国(1976-),男,山东巨野人,重庆大学博士,主要从事材料本构关系及材料损伤方面的研究.

本文拟建立一种能计及微观特征尺度的珠光体团本构关系模型,利用 ABAQUS 软件研究了特殊载荷下珠光体团的力学性能与微观特征尺度层间距 D 之间的关系,并定性分析具有相同组分和层状结构而具有不同微观结构尺寸的珠光体材料何以在疲劳性能上存在明显的差异. 进一步解释为何片层间距 D 越小,珠光体材料具有越好的损伤容限和疲劳寿命等特性. 同时从有限元结果分析要想建立合适的珠光体团的本构关系必须在材料本构关系中充分描述细观结构的影响. 从而为以后定量描述微观结构、了解微观结构对载荷是如何响应及失效、为进一步建立能计及微观结构的本构关系模型打下了基础.

1 对珠光体团的有限元分析

1.1 有限元单元

珠光体团具有由渗碳体薄片和铁素体薄片相互交叠而成的典型层状结构,二者的体积比约为 1:7. 从珠光体钢的透射电镜相片图 1 中可清楚地看出珠光体团的片层状结构,在图中黑色部分是渗碳体,白色部分是铁素体.

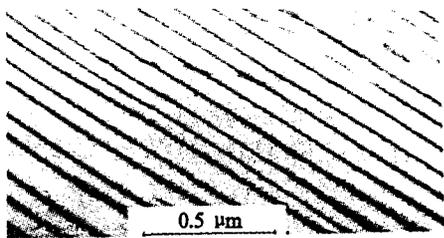


图 1 珠光体团的微观结构^[13]

根据珠光体团的对称性,为减小计算量,取珠光体团的四分之一作为研究对象,珠光体团的材料单元如图 2 所示.

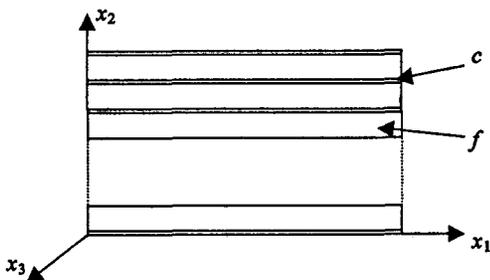


图 2 珠光体团材料单元

建立如图所示坐标系,令 x_1x_3 平面与层面平行, x_2 轴平行于层面的法向.

由于珠光体团的典型尺寸为 $10 \mu\text{m}$ 及以上,同时为消除尺寸效应的影响,取模型的长为 $5 \mu\text{m}$,高为 $4.8 \mu\text{m}$;为便于比较层间距在 $0.08 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 之间的变化;采用四边形四节点等参单元,纵向两相材料均采用均匀网格每相分为 120 等份;由于中心区域应力梯

度较小,网格划分可相对较粗,而珠光体团的垂直于片层方向的表面附近应力梯度较大,故网格的划分应较密集,以保证能正确反映出应力变化. 因此横向采用等比率网格,比率为 100,节点个数为 200,由左往右逐渐加密,网格如图 3 中所示.

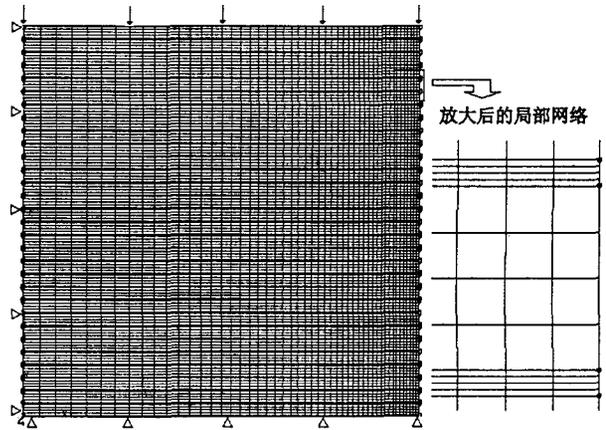


图 3 有限元网格及其边界条件 ($D=0.16 \mu\text{m}$)

1.2 材料特性

假设各相材料初始均匀和各向同性. 材料常数的选取: 由于渗碳体和铁素体两者的弹性性质相差很小,两者的杨氏模量 E 均取为 $213\ 105 \text{ MPa}$,泊松比均取为 0.267;渗碳体屈服应力: $3\ 300 \text{ MPa}$;铁素体屈服应力: 430 MPa ,材料的塑性特性由表 1 中的参数描述.

表 1 材料的塑性特性

塑性应变	应力/MPa	
	铁素体	渗碳体
0	430	3 300
0.1	450	3 500
0.2	500	4 000

1.3 边界条件

边界条件如图 3 中所示,下表面与左表面均分别固定其法向位移,右表面为自由表面,对各种计算模型均在上表面施加相同的位移边条,位移为 $0.24 \mu\text{m}$.

1.4 软件及计算结果

在等温与小变形的假设条件下采用 ABAQUS 有限元分析软件对层间距在 $0.08 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 之间变化时的模型进行了分析,得出如下主要曲线:

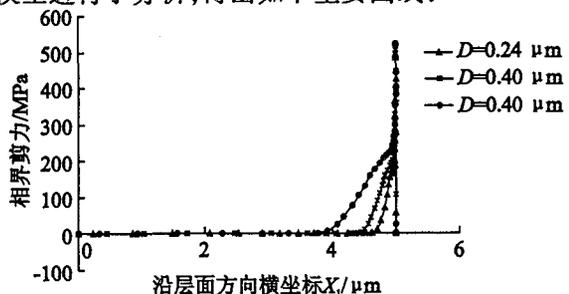


图 4 相同位移边条(5%压应变)下界面剪力分布图

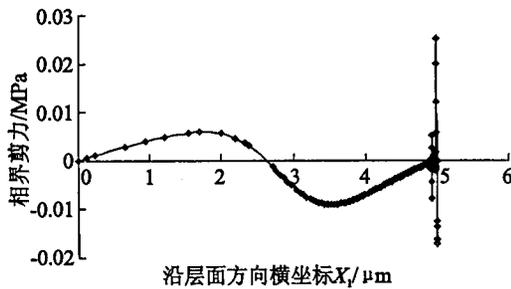
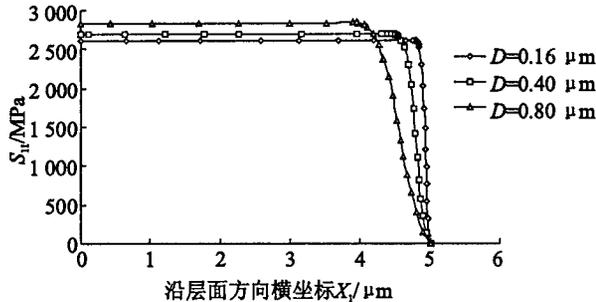
图5 相同位移边条(5%压应变)下界面剪力分布图($D=0.08\ \mu\text{m}$)

图6 相同位移边条(5%压应变)下渗碳体层中的应力分布图

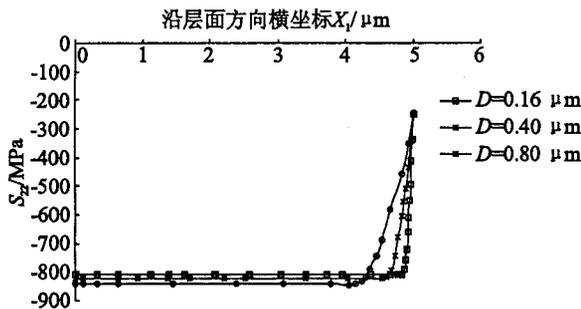


图7 相同位移边条(5%压应变)下铁素体层中的应力分布图

3 珠光体材料的损伤观察及层间距对疲劳寿命影响分析

珠光体材料的基本单元珠光体团由铁素体薄片和渗碳体薄片相互交错而成.对材料进行循环加载,然后用透射电镜对珠光体钢中的细观结构观察,损伤主要表现为:

- 1) 渗碳体片的脆断.
- 2) 铁素体中微空洞的萌生和扩展.
- 3) 沿渗碳体和铁素体界面发生解理断裂.

疲劳破坏机理:

1) 疲劳裂纹形核机理:材料中疲劳裂纹的起始或萌生,也称为疲劳裂纹成核.疲劳裂纹形成后,将在使用载荷的作用下继续扩展,直至发生断裂.疲劳裂纹成核处,称为裂纹源,裂纹源起源于高应力处.

2) 疲劳裂纹扩展机理:疲劳裂纹在高应力处由持久滑移带成核,是由最大剪应力控制的.形成的微裂纹与最大剪应力方向一致.

疲劳破坏与静载破坏相比:静载荷下的破坏,取决于结构整体.疲劳破坏则由应力或应变较高的局部开始,形成损伤并逐渐积累,导致破坏发生.可见,局部性是疲劳的明显特点.疲劳破坏是局部损伤累积的结果,应力集中对疲劳寿命影响很大,而静载破坏是瞬间发生的应力集中对极限承载能力影响不大,另一个显著不同是即使是延性材料,疲劳破坏也没有明显的塑性变形.因此疲劳研究所关心的应该是这些由几何形状变化,几何不连续或材料缺陷等引起应力集中的局部细节,要研究这些细节处的应力应变.

疲劳破坏主要取决于作用应力的大小(外因)和材料抵抗疲劳破坏的能力(内因)两者,故疲劳破坏通常发生在高应力区或材料缺陷处.

由上面的有限元分析结果可以看出珠光体团的力学响应存在着严重的不均匀性,应力集中程度随层间距变化显著,结合疲劳破坏的特点可以看出:

1) 由图4、图5:界面剪力 S_{12} 在中心大部分区域几乎为零,靠近四周迅速增大, D 愈小 S_{12} 接近为零的区域愈大,且 S_{12} 的总体水平愈小; D 愈大 S_{12} 的最大值愈大,因此在疲劳载荷下 D 越大越易在界面上发生剪切裂纹;同时,由图4可知 D 越大高剪力区的体积比重越大,存在缺陷并由此引发裂纹萌生的可能性也越大,所以疲劳强度越低.此外, D 越小界面的结合强度越高,因此疲劳强度也越高.

2) 由图6: S_{11} 沿 x_1 方向由中心向边缘处逐渐减小,中心段变化幅度很小,越靠近四周处变化幅度越大, D 越大 S_{11} 的变化越大,越不均匀.实验表明珠光体钢中渗碳体薄片层的开裂都接近其中心段,这支持纤维加载断裂的说法:作用在薄片表面的界面剪力由其中的拉伸力平衡,显然愈近中心段总拉力愈大,因而也愈易开裂^[14].同时在我们关心的尺寸范围内, D 愈大界面剪力愈大,中心段总拉力愈大,有平均拉应力对疲劳寿命的影响可知,疲劳寿命越短,渗碳体薄片层也愈易开裂,即 D 越大,珠光体材料的疲劳性能越差.

3) 由图7: S_{22} 沿 x_1 由中心向四周逐渐减小,中心段变化幅度很小,越靠近四周处变化幅度越大, D 越大 S_{22} 的变化幅度、不均匀区域及 S_{22} 的最大值愈大. D 越小越有利于渗碳体和铁素体更好地共同工作,更大限度地发挥材料性能;因此,相同的应力水平作用下, D 越小疲劳强度越高.

另由涨落型尺度效应理论,材料的尺度越大,由于缺陷的涨落效应,材料的统计强度越低^[15].强度不仅与微裂纹的平均密度和平均长度有关,还与微裂纹的长度和密度的涨落有关.所以,珠光体团的片层间距 D 越小,其初始缺陷尺度越小,疲劳强度越高.

4 结论与建议

由疲劳破坏的机理、影响材料疲劳寿命的因素以及对珠光体团的有限元计算分析可知,珠光体团的变形和破坏的局部化现象显著;要想建立恰当的诸如珠光体材料这类结构敏感材料的本构关系时,特别要想能准确描述珠光体材料的疲劳寿命与珠光体层间距之间的关系时,必须在材料本构关系中充分描述珠光体团由于结构原因造成的应力集中,即必须在材料本构关系中充分描述细观结构的影响.为了在材料本构关系中充分描述细观结构的影响,需对所发展的与传统连续介质假设有关的方法作重要的修改,以前那种在代表性单元内对各组成相的物理参量取平均值的做法是不可取的.

参考文献:

- [1] JOHNSON K L. Aspects of Contact Mechanics[A]. Proc Int Conf on Tribology[Z]. C246187, 1987. 919 - 923.
- [2] CLAYTON P. The Relations Between Wear Behavior and Basic Material Properties for Pearlitic Steels[J]. Wear, 1980, 60:75 - 93.
- [3] HELLER W, SCHWEITAER R. Hardness Microstructure and Wear Behaviors of Rail Steel[A]. Proc 2 nd Int Heavy Haul Railways Conf[Z]. Chicago, 1982. 282 - 286.
- [4] KALOUSEK J, FEGREDO D, LAUFER E. The Wear Resistance and Worm Metallography of Pearlite Bainite and Tempered Martensite Rail Steel Microstructure of High Hardness[J]. Wear, 1985, 105:199 - 222.
- [5] HODSON W H, PRESTON R R. Production Processes to Yield Superior Rail Steel [J]. Transp Rec, 1988, 1 774: 150 - 162.
- [6] ICHINOSE H, TAKEHARA J. An Investigation on Contact Fatigue and Wear Resistance Behaviors of Rail Steel[A]. Proc Heavy Haul Conf[C]. Chicago, 1982. 113 - 121.
- [7] SUGINO K K, AGEYAMA K, MASUMOTO H. Development of Weldable High Strength Steel[A]. Proc Int Heavy Haul Conf[C]. Chicago, 1982. 113 - 121.
- [8] ARMSTRONG R J, FREDERICK C O. A Mathematical Representation of the Multi-axial Bauschinger Effect[Z]. Report/RD/B/N 731. Central Electricity Generating Board, 1996.
- [9] BOWER A F, JOHNSON K L. The Influence of Strain Hardening on Cumulative Plastic Deformation in Rolling and Sliding Line Contact[J]. J Mech Phys Solids, 1989, 37(4): 471 - 493.
- [10] PENG X, PONTER A R S. A Constitutive Law for a Class of Two-phase with Experimental Verification[J]. Int J Solid Structures, 1994, 31(8): 1 099 - 1 111.
- [11] FAN J. A Micro/macrosocopic Analysis for Cyclic Plasticity of Dual-phase Materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 1999, 66(5): 124 - 136.
- [12] 孔园波. 细观力学细观结构与力学的纽带[J]. 力学进展, 1990, 20(3): .
- [13] SHENG GUANGMIN. Investigation of Contact Fatigue Behavior and Its Mechanism of PD3 Rail Steel [D]. Chongqing: Chongqing University, 1999.
- [14] KUANGZHENBANG, GUHAIDENG, LIZHONGHUA. Mechanics Behavior of Material [M]. Beijing: Higher Education Publishing Company, 1998.
- [15] ZHANG S L, LI T, YANG W. Statistical Strength of Brittle Solids with Strongly Interacted Microcracks[J]. Int J Solids Structs, 1998, 35:995 - 1 008.

Finite Element Analysis of Single Pearlitic Colony with Layer Meso-structure

LI Wei-guo, PENG Xiang-he

(College of Resource and Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A great number of experiments show that pearlitic steel with Layer Meso-structure depend greatly on its structure. Its fatigue life is marked influenced by the interlamellar spacing. Based on the finite element analysis of single pearlitic colony with different interlamellar spacings, the reason of the interlamellar spacing is investigated, which plays an important role in the mechanics behavior of single pearlitic colony. It is necessary to establish the relationship between the microstructure and the mechanics behavior of the pearlitic material, and the importance of the interlamellar spacing is introduced into the constitutive equation of Single Pearlitic Colony.

Key words: pearlitic colony; the finite element analysis; interlamellar spacing; Meso-structure; fatigue life