

HRB500 高强钢筋拉压疲劳性能研究及断口分析^{*}

RESEARCH ON TENSION FATIGUE PERFORMANCE OF HRB500 HIGH-STRENGTH REBAR AND FRACTOGRAPHY ANALYSIS

陆鹏雁^{**1} 刘煜² 吴华杰¹ 刘纲²

(1. 北京科技大学 冶金工程研究院, 北京 100083)

(2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

LU PengYan¹ LIU Yu² WU HuaJie¹ LIU Gang²

(1. Engineering Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

摘要 通过轴向拉压疲劳试验得到 HRB500 钢筋在应力比 $R=0.1$ 时 10^7 周次的疲劳强度 $\sigma_{0.1}=587.5$ MPa, 远高于一般碳素结构钢的疲劳强度; 再利用三参数幂函数法非线性回归得到 $S-N$ 曲线方程为 $\lg(N_f)=7.092-1.1447\lg(\sigma_{\max}-586.3)$; 并研究发现直径大小对钢筋的疲劳强度基本没影响, 疲劳强度主要与材料的成分、组织及夹杂物有关。还利用扫描电镜与能谱仪分析试样的疲劳断口, 得到 HRB500 钢筋的疲劳破坏均属于表面基体起裂, 与钢中脆性夹杂物有关; 疲劳裂纹呈放射状在基体中扩展, 呈现比较明显的片层状结构, 以准解理裂纹扩展为主; 瞬断区呈韧性断裂, 出现大量韧窝状组织, 主要由于夹杂物引起微孔聚集断裂。

关键词 HRB500 拉压疲劳 疲劳性能 断口分析

中图分类号 TG142.1

Abstract By the means of tension fatigue test at stress ratio $R=0.1$, it was found that the fatigue strength of HRB500 high-strength rebar for 10^7 cycles was 587.5 MPa, which was much higher than that of the common carbon structural steel. The curve function $\lg(N_f)=7.092-1.1447\lg(\sigma_{\max}-586.3)$ was also obtained by nonlinear regression with the method of three parameters power function. The study also found that the diameter size of rebar hardly impacted fatigue strength. Fatigue strength was mainly related to material composition, microstructure and inclusion. Furthermore, the fatigue fracture surfaces of the specimen were analyzed by using SEM and EDS. HRB500 rebars were all damaged by crack initiation from surface substrate which was associated with brittle inclusions in steel; Fatigue crack radially extended in the matrix and revealed the obvious layered structure, which was mainly based on quasi-cleavage; Transient breaking area exhibited ductile fracture mechanism and appeared a large number of dimples, mainly due to many inclusions contained in steel, which caused microporous gathered fracture.

Key words HRB500; Tension fatigue; Fatigue performance; Fracture analysis

Corresponding author: LU PengYan, E-mail: lupengyan0819@163.com, Tel: +86-10-62332598

Manuscript received 20131224, in revised form 20140224

引言

热轧带肋钢筋是钢筋混凝土结构中必不可少的材料, 在高强度钢筋研制上^[1], 中国与发达国家还有一定差距, 发达国家钢筋强度在 400 MPa 以下的品种已经基本不再生产和使用, 而中国混凝土结构设计规范中钢筋最高使用强度仅为 400 MPa, 随着我国建筑工业的飞速发展, 研制开发高强度、综合性能好的钢筋是我国热轧带肋钢筋的发展趋势。

目前, 国内开始推广强度更高的 HRB500 钢筋^[2], 它比 HRB400 理论上可节约材料 10%, 创造了良好的经济效益, 同时给施工带来便利。HRB500 钢筋中 C、Si、Mn 等成分和 HRB400 钢筋基本相同, 主要通过添加 V、Nb 等合金元素和控轧控冷技术^[3,4], 达到细晶强化的作用。

疲劳破坏是钢筋破坏的主要方式, 由于钢筋在交变载荷作用下的断裂应力远低于一次加载下的断裂应力^[5]; 而国内关于 HRB500 疲劳性能的研究较少, 为了

^{*} 20131224 收到初稿, 20140224 收到修改稿。

^{**} 陆鹏雁, 男, 1989 年 8 月生, 江西省鹰潭市人, 汉族。在读硕士研究生, 研究方向为钢中夹杂物控制。

给工业生产和工程结构设计提供依据,因此研究 HRB500 钢筋的疲劳性能,并分析得到疲劳断裂机理具有重要意义。

1 试验内容与方法

首先采用轴向拉压疲劳试验方法研究 HRB500 钢筋的疲劳性能,同时分析直径大小对疲劳强度的影响,并利用升降法和三参数幂函数法分别得到条件疲劳强度和 $S-N$ 曲线方程;然后对比分析不同直径的 HRB500 钢筋组织与洁净度,并利用扫描电镜与能谱仪研究试样断口,得出 HRB500 钢筋疲劳断裂机理。

1.1 轴向拉压疲劳试验

表 1 HRB500 钢筋主要化学成分 (%) 和力学性能

Tab.1 Chemical composition (%) and mechanical properties of HRB500 steel bar

试样 Specimen	C	Mn	Si	S	P	V	N	T(O)	屈服强度 Yield strength	抗拉强度 Tensile strength/MPa	延伸率 Elongation
1	0.22	1.55	0.64	0.021	0.021	0.115	0.015	0.01	568	732	21.43%
2	0.23	1.45	0.65	0.025	0.027	0.103	0.013	0.015	550	710	23.75%

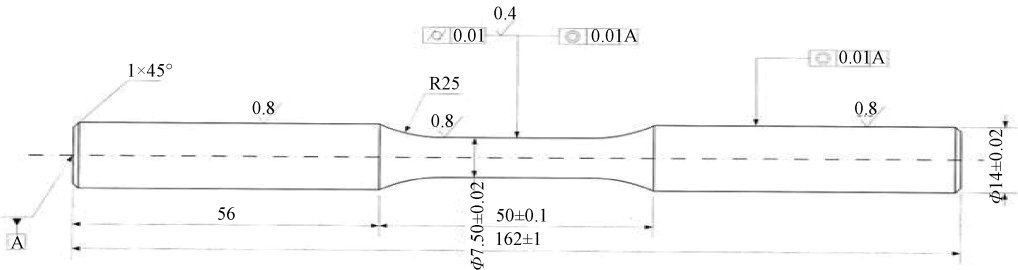


图 1 疲劳试样图

Fig.1 The figure of fatigue specimen

1.1.1 升降法求材料的条件疲劳强度

用升降法测定材料的条件疲劳强度,根据上一根试样的试验结果(失效或通过),决定下一根试样的试验应力水平(降低或升高),直至完成全部试验。对第一次出现相反结果以前的试验数据,如在以后试验数据的波动范围之外,则予以舍弃;如在上述波动范围之内,则作为有效数据加以利用,即在试验过程中,陆续将它们平移到第一对相反结果之后,作为该试样所在应力水平下的第一个有效数据;并且破裂前后的一对数据是两个有效数据。

条件疲劳强度 $\sigma_{0.1}$ 计算公式

$$\sigma_{0.1} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n V_i \sigma_i \tag{1}$$

式中, m ——有效实验的总次数; n ——试验应力水平级数; σ_i ——第 i 级应力水平; v_i ——第 i 级应力水平下的试验次数。

1.1.2 三参数幂函数法拟合应力疲劳 $S-N$ 曲线

利用三参数幂函数法非线性拟合应力疲劳 $S-N$ 曲线的方程,其疲劳寿命模型^[6]

采用轴向拉压疲劳试验来测定材料应力疲劳 $S-N$ 曲线,高应力段、中等寿命区在给定应力水平下用成组法试验,低应力段、长寿命区在给定循环寿命下用升降法试验,为了避免钢筋边部脱碳层的影响,从钢筋中心处取疲劳试样 25 根,试样尺寸如图 1 所示。

试验设备采用 AmslerHFP5000 试验机,试验温度为室温,试验频率为 140 Hz,应力比 $R=0.1$,疲劳寿命极限设为 10^7 周次,具体试验操作执行标准 GB/T3075-2008,试验材料为直径 $\Phi=32$ mm(1 号)和 $\Phi=20$ mm(2 号)的 HRB500 螺纹钢筋,其主要化学成分和力学性能如表 1 所示。

$$N_f(\sigma_{\max} - \sigma_0)^m = C \tag{2}$$

两边取对数可得

$$\lg N_f = B_1 + B_2 \lg(\sigma_{\max} - B_3) \tag{3}$$

式中, B_1 、 B_2 、 B_3 为材料常数, $B_1 = \lg C$, $B_2 = -m$, $B_3 = \sigma_0$, σ_0 为拟合得到的理论疲劳极限, $\sigma_{\max}$ 为最大应力, N_f 为疲劳寿命。

$S-N$ 曲线高应力段、中等寿命区是在给定应力水平下用成组法试验,得到不同应力级别条件下的平均对数疲劳寿命,然后将升降法求得的条件疲劳强度作为 $S-N$ 曲线达到水平段的拟合点,以对数疲劳寿命 $\lg N_f$ 为函数,循环应力 $\sigma_{\max}$ 为自变量,根据式(3)进行非线性拟合,得到 $S-N$ 曲线的曲线方程。

1.2 材料组织与洁净度分析

疲劳断裂一般是从机件表面应力集中处或材料缺陷处开始的^[7],或者是从二者结合处发生的。材料和机件的疲劳强度不仅与材料成分、组织结构及夹杂物有关,而且受载荷条件、工作环境及表面处理条件的影响。

1.2.1 材料组织分析

从钢筋疲劳试样断裂的夹持部位截取长度为 10

mm 的金相试样,经打磨抛光后,利用 4% 硝酸酒精腐蚀钢筋金相试样;再通过光学显微镜和维氏硬度计,得到不同直径大小的钢筋的金相组织形貌及其硬度。

1.2.2 材料洁净度分析

钢筋金相试样经打磨抛光后,利用 ZEISSULTRA55 场发射扫描电镜结合能谱仪中 INCAFeature 模块对不同直径大小的钢筋中夹杂物的数量、尺寸和成分进行对比分析。INCA Feature 是通过 BSE 产生颗粒物与基体之间的灰度差异来辨别夹杂物^[8],结合 EDSX-ray 可以对夹杂物的成分含量、大小、形状及位置进行分析统计。Feature 分析的核心和基础是灰度阈值设定,用于区分不同夹杂物,作为后续分析的基础。

1.3 断口分析

两种直径的钢筋在不同应力下的疲劳断裂试样各挑选 1 个,用扫描电镜与能谱仪研究其断口形貌,再结合材料的组织、硬度和洁净度,分析 HRB500 钢筋的疲劳断裂机理。

2 试验结果与分析

2.1 拉压疲劳试验结果

疲劳试验原始数据如表 2 所示,可知直径大小对 HRB500 的疲劳强度基本没有影响,疲劳寿命极限为 10^7 周次时,两者疲劳强度都落在 575 MPa ~ 600 MPa 之间。

表 2 疲劳试验结果
Tab.2 Fatigue test results

试样编号 Sample number	σ_{max}/MPa	疲劳寿命 Fatigue life N_f	备注 Remark
1-1	600	3.71×10^5	失效 Failure
1-2	575	$>1.0 \times 10^7$	通过 Pass
1-3	600	7.18×10^5	失效 Failure
1-4	575	$>1.0 \times 10^7$	通过 Pass
1-5	600	1.09×10^6	失效 Failure
1-6	575	$>1.0 \times 10^7$	通过 Pass
1-7	660	3.8×10^4	
1-8	660	9.6×10^4	
1-9	660	9.8×10^4	
1-10	720	3.1×10^4	
1-11	720	5.8×10^4	
1-12	720	8.8×10^4	
2-1	575	$>1.0 \times 10^7$	
2-2	575	$>1.0 \times 10^7$	
2-3	600	2.03×10^5	
2-4	600	5.14×10^5	
2-5	660	8.4×10^4	
2-6	660	6.3×10^4	
2-7	720	7.5×10^4	
2-8	720	4.2×10^4	

2.1.1 疲劳升降图

本试验用升降法求疲劳强度 $\sigma_{0.1}$,以 $N_f = 10^7$ 周次为疲劳寿命极限;应力增量 $\Delta\sigma = 25 \text{ MPa}$,直径 $\Phi = 32 \text{ mm}$ 的 HRB500 钢筋疲劳升降图如图 2 所示。将试验数据代入式(1)得 $\sigma_{0.1} = 587.5 \text{ MPa}$,远高于一般碳素结构钢的疲劳强度,由于 HRB500 钢筋通过添加微合金元素 V 和控轧控冷技术,达到细晶强化,材料组织分析也可知 HRB500 钢筋的平均晶粒度在 10 级以上。

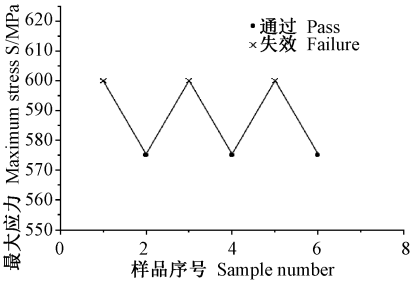


图 2 疲劳升降图
Fig.2 Lifting figure of fatigue test

2.1.2 应力疲劳 S-N 曲线

本试验在直径 $\Phi = 32\text{mm}$ 的 HRB500 钢筋高应力段设计了 3 组不同应力级别,每组应力级别分别做 3 次;将试验原始数据进一步处理,得到不同应力级别下的平均对数疲劳寿命,处理结果详见表 3,然后将升降法求得的条件疲劳强度作为 S-N 曲线达到水平段的拟合点,根据式(3)进行非线性拟合即可得到曲线方程,如式(4)所示。

$$\lg N_f = 7.092\,0 - 1.144\,7\lg(\sigma_{max} - 586.3) \quad (4)$$

表 3 不同应力级别下的平均对数疲劳寿命

Tab.3 The average logarithmic fatigue life under different stress level

σ_{max}/MPa	平均疲劳寿命 Average fatigue life N_f	平均对数疲劳寿命 Average logarithmic fatiguelife $\lg N_f$
720	54 090	4.7331
660	70 970	4.8511
600	662 000	5.8208

根据式(4)可画出应力疲劳 S-N 曲线,如图 3 所示。由图可知拟合的曲线与试验数据点吻合较好。

2.2 材料组织和洁净度分析结果

2.2.1 材料组织分析结果

不同直径的 HRB500 钢筋金相组织形貌和硬度测定值如图 4 及表 4 所示,可知钢筋的组织都是是铁素体加珠光体,除局部有粗大的珠光体外,组织较均匀,直径 $\Phi = 32 \text{ mm}$ (1 号)钢筋平均晶粒度达到 10.5 级,而直径 $\Phi = 20 \text{ mm}$ (2 号)钢筋平均晶粒度达到 11 级,另外 1 号的硬度值稍大于 2 号。从金相组织分析可知两种不同直径的钢筋组织、晶粒度及硬度值很相近。

表 4 HRB500 钢筋维氏硬度 (HV)
Tab. 4 The Vickers hardness of HRB500 steel bar (HV)

试样 Specimen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值 Average
1	277.2	298.5	265.7	260.3	254.6	286.1	250.6	264.8	254.7	284.8	269.73
2	268.3	254.8	253.6	247.5	270.9	286.7	255.8	249.6	263.2	262.4	261.28

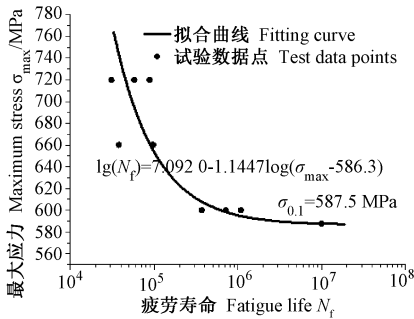


图 3 应力疲劳 S-N 曲线
Fig. 3 The S-N curve of stress fatigue

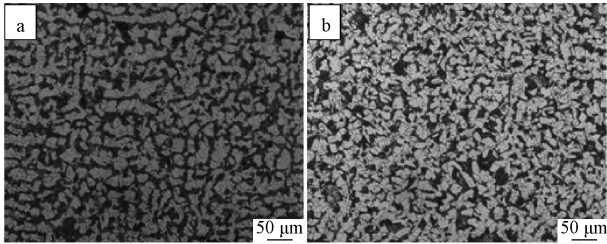


图 4 HRB500 钢筋金相组织(a 为 1 号,b 为 2 号)
Fig. 4 The microstructure of HRB500 steel bar
(a for number 1, b for number 2)

2. 2. 2 材料洁净度分析

在 1 000 倍视场下,随机选取 50 个视场,每个视场面积为 0. 009 6 mm²,研究发现 HRB500 钢筋中夹杂物数量较多,但夹杂物的尺寸较小。直径 $\Phi = 32$ mm 钢筋中夹杂物总数为 315 个,即平均 1 mm² 有 656 个夹杂物,当量直径 $ECD \leq 3 \mu\text{m}$ 的夹杂物占 96%;而直径 $\Phi = 20$ mm 钢筋中夹杂物总数为 347 个,即平均 1 mm² 有 723 个夹杂物;当量直径 $ECD \leq 3 \mu\text{m}$ 的夹杂物占 91%。故直径 $\Phi = 32$ mm 比 $\Phi = 20$ mm 钢筋的洁净度要高,由表 1 也可知直径 $\Phi = 32$ mm 比 $\Phi = 20$ mm 钢筋的[S]和 T(O)要低。

同时,研究表明 HRB500 钢筋中夹杂物的类型主要有 MnS、硅酸盐以及 MnS-硅酸盐复合夹杂,直径 $\Phi = 32$ mm 钢筋中 MnS 占 35%,硅酸盐占 28%,MnS-硅酸盐复合夹杂占 34%,其他氧化物夹杂(例如 Al_2O_3)占 3%;而直径 $\Phi = 20$ mm 钢筋中 MnS 占 47%,硅酸盐占 21%,MnS-硅酸盐复合夹杂占 26%,其他氧化物夹杂占 6%。图 5 是两种直径的钢筋中硅酸盐夹杂(包括 MnS-硅酸盐复合夹杂)的 $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ 三元相图,由图 5 可知钢筋中硅酸盐夹杂的主要

成分都是 MnO 和 SiO_2 ,并含有少量的 Al_2O_3 和 CaO 等;由于硅酸盐类夹杂物除了纯锰硅酸盐易变形外,其他复杂硅酸盐不变形或变形破碎^[9],所以这两种直径的 HRB500 钢筋中都含有大量脆性硅酸盐类夹杂物。

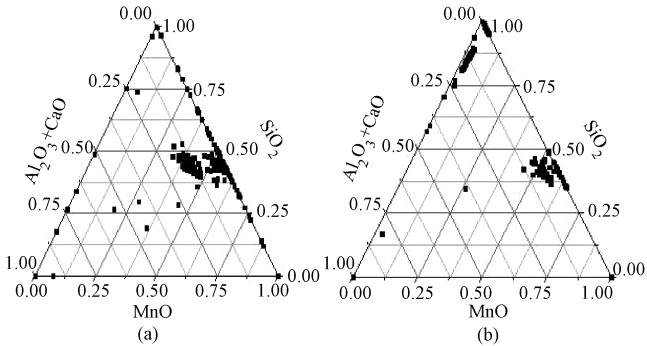


图 5 硅酸盐夹杂的 $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ 三元相图(a 为 1 号,b 为 2 号)
Fig. 5 $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ ternary phase diagram of silicate inclusions ((a) for number 1, (b) for number 2)

由材料组织与洁净度分析可知两种直径的 HRB500 钢筋的组织、硬度及夹杂物基本一致,这与试验测得两者疲劳强度靠近相吻合。

2. 3 断口分析结果

由扫描电镜分析断口形貌可知,HRB500 钢筋疲劳断裂试样的断口与典型疲劳断口一样,均包括 3 个形貌不同的区域:疲劳源区、裂纹扩展区、瞬断区,如图 6 所示。

2. 3. 1 疲劳源区

由图 6 可知,HRB500 钢筋疲劳断裂属于表面基体起裂。疲劳源是疲劳裂纹萌生的策源地,一般在试样表面,常和缺口、刀痕、夹杂物等缺陷相关,由于这里会造成表面应力集中。如图 7 所示,试验也发现疲劳

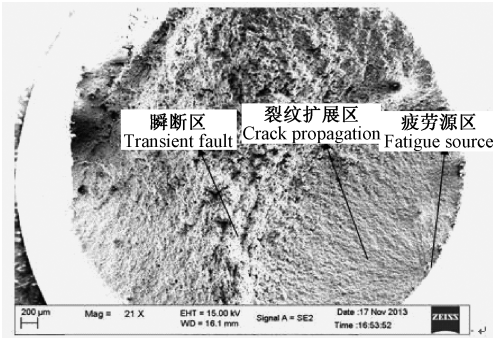


图 6 HRB500 钢筋疲劳断口形貌
Fig. 6 The fatigue fracture of HRB500 steel bar

源区含有大量脆性夹杂物,利用 EDS 能谱分析可知是硅酸盐夹杂,成分主要是 SiO_2 和 MnO ,还含有少量 Al_2O_3 、 MgO 和 CaO 等,与图 5 分析得到的硅酸盐夹杂成分相吻合。由于脆性夹杂物与周围基体强度不一致,容易产生应力集中,导致在相界面开裂^[10],从而在试样表面产生疲劳源。

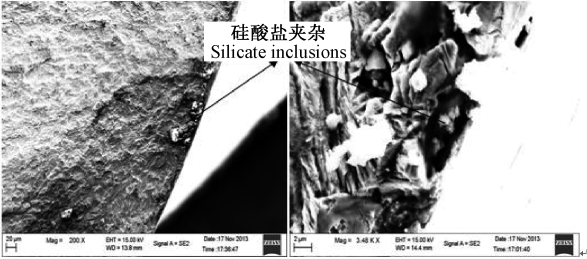


图 7 疲劳源区夹杂物形貌

Fig. 7 Inclusions morphology of fatigue source area

2.3.2 裂纹扩展区

由图 6 和图 8 可知,HRB500 钢筋的起裂源区呈放射状在基体中扩展,并且在裂纹扩展区的部分区域有河流花样,但河流花样短而弯曲,支流少,呈现比较明显的片层状结构,故疲劳裂纹的扩展主要以准解理断裂为主。因为准解理断裂在裂纹扩展时,难于严格地沿一定晶体学平面扩展,断裂路径不再与晶粒位向有关,而主要与细小碳化物质点有关;由图 4 可知钢筋局部有粗大的珠光体组织,其渗碳体含量较高,硬度和强度较大,容易产生应力集中,在疲劳裂纹扩展时在晶内不断产生裂纹。

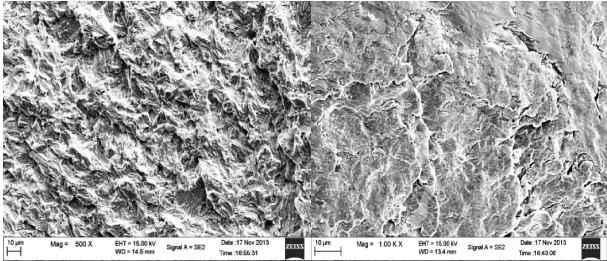


图 8 裂纹扩展区形貌

Fig. 8 The morphology of crack propagation

2.3.3 瞬断区

由图 6 和图 9 可知,HRB500 钢筋瞬断区呈韧性断裂机制,在中间平面应变区为放射状或人字纹断口,在边缘平面应力区为剪切唇,同时伴有大量的韧窝形成。并且发现大量韧窝中含有夹杂物颗粒,主要是硫化锰和硅酸盐,这与材料洁净度分析结果一致,钢筋中夹杂物数量较多,并且大部分是硫化锰和硅酸盐类夹杂,从而推断瞬断区主要以微孔聚集断裂,因为夹杂物与基体塑性变形不协调会产生分离,最终导致界面脱粘,形成韧窝状组织。

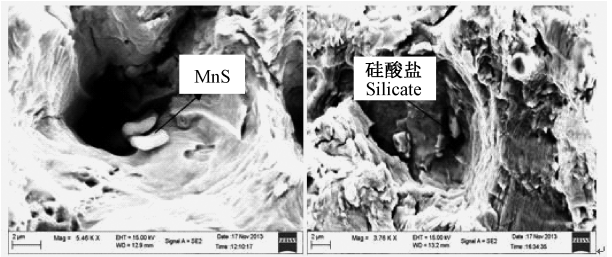


图 9 瞬断区形貌

Fig. 9 The morphology of transient fault

3 结论

通过轴向拉压疲劳试验方法研究 HRB500 钢筋的疲劳性能,并利用扫描电镜与能谱仪研究试样断口,同时结合不同直径钢筋的组织与洁净度分析,讨论 HRB500 钢筋的疲劳断裂机理,主要得到以下结论:

1)HRB500 钢筋在应力比 $R = 0.1$ 时 10^7 周次的拉压疲劳强度 $\sigma_{0.1} = 587.5 \text{ MPa}$,远高于一般碳素结构钢的疲劳强度;再利用三参数幂函数法非线性回归得到 $S-N$ 曲线方程为 $\lg(N_f) = 7.092 - 1.144 \lg(\sigma_{\max} - 586.3)$ 。

2)直径大小对 HRB500 钢筋的疲劳强度基本没影响,疲劳强度主要与材料成分、组织结构及夹杂物有关。

3)HRB500 钢筋的疲劳破坏均属于表面基体起裂,与钢中脆性夹杂物有关,疲劳裂纹呈放射状在基体中扩展,呈现比较明显的片层状结构,以准解理裂纹扩展为主,瞬断区呈韧性断裂,出现大量韧窝状组织,主要由于夹杂物引起微孔聚集断裂。

参考文献 (References)

[1] 孟宪珩,白宗奇. HRB500 钢筋的研制[J]. 河北冶金,2005,150 (6):17-19.
MENG XianHeng, BAI ZongQi. Development of HRB500 reinforcing steel bar[J]. Hebei Metallurgy, 2005,150(6):17-19(In Chinese).
[2] 吴绍杰,周福功. $\Phi 36\text{mm}$ 热轧 HRB500 螺纹钢的开发[J]. 江西冶金,2008,28(4):6-8.
WU ShaoJie, ZHOU FuGong. Development of $\Phi 36\text{mm}$ hot rolling HRB500 Rebar[J]. Jiangxi Metallurgy, 2008, 28(4):6-8(In Chinese).
[3] 陈 英. V-Nb 微合金化 HRB500 钢筋的试制[J]. 轧钢,2007,24 (3):64-66.
CHENG Ying. Trial production of V-Nb micro-alloyed HRB500 reinforced bar [J]. Steel Rolling, 2007, 24(3):64-66(In Chinese).
[4] 陈 伟,施 哲,等. 铌微合金化和控冷工艺开发 HRB500 抗震钢筋[J]. 材料热处理学报,2010,31(7):77-82.
CHEN Wei, SHI Zhe, et al. Development of Nb micro alloyed HRB500 anti-seismic ribbled bars produced by controlled cooling

process[J]. Transaction of Materials and Heat Treament, 2010,31(7):77-82(In Chinese).

[5] 吕 品. HRB500 高强钢筋低周疲劳性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2011:2.

LV Ping. Research on low cycle fatigue behavior of high strength steel HRB500[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2011:2(In Chinese).

[6] 李 骋,张国栋,等. 确定高周应力疲劳 S-N 曲线的方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2008,21(2):39-43.

LI Cheng, ZHANG GuoDong, et al. Method for reducing stress-life curve of high cycle fatigue [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008,21(2):39-43(In Chinese).

[7] 束德林. 工程力学性能[M]. 北京:机械工业出版社,2007:115.

SHU DeLin. Engineering mechanics performance [M]. Beijing: China Machine Press,2007:115(In Chinese).

[8] 尤大利. 中硫易切削非调质钢中硫化物的控制研究[D]. 北京:北京科技大学,2013:64-65.

YOU DaLi. Study on Control of Sulfides in Free-cutting Non-quenched and Tempered Steel with Medium Sulphur Content[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2013:64-65(In Chinese).

[9] 姜锡山. 钢中非金属夹杂物[M]. 北京. 冶金工业出版社,2011:65.

JIANG XiShan. Non-metallic inclusions in steel [M]. Beijing. Metallurgical Industry Press,2011:65(In Chinese).

[10] 周承恩,洪友士. GCr15 钢超高周疲劳行为的实验研究[J]. 机械强度, 2004, 26(S):157-160.

ZHOU ChengEn, HONG YouShi. Experimental investigation on very-high-cycle fatigue of GCr15 steel[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(S):157-160(In Chinese).