

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180129

冶金工艺对 GCr15 高周旋转弯曲疲劳性能的影响

史智越, 徐海峰, 许 达, 俞 峰, 曹文全

(钢铁研究总院特殊钢研究所, 北京 100081)

摘 要: 对真空脱气与电渣重熔两种冶金工艺制备的 GCr15 轴承钢进行了高周机械疲劳试验研究, 发现在 10^7 次疲劳寿命条件下, 电渣重熔轴承钢具有 1 085 MPa 的旋弯疲劳强度, 高于真空脱气轴承钢的 1 000 MPa。利用扫描电镜对疲劳断口进行了表征和分析, 结果显示引起电渣重熔轴承钢起裂的夹杂物尺寸分布在 3.4~25.6 μm , 而导致真空脱气轴承钢裂纹起裂的夹杂物尺寸为 13.3~71.9 μm 。通过对旋弯疲劳断口的起裂核心夹杂物、裂纹扩展的鱼眼以及瞬间断裂区等疲劳全过程特征参数与旋弯疲劳强度以及旋弯疲劳寿命间关系研究, 发现了大颗粒夹杂物尺寸 (DS) 及分布是影响轴承钢旋弯疲劳强度与寿命的关键因素, 指出降低轴承钢中大颗粒夹杂物尺寸、控制其分布以及提高裂纹容忍度依然是未来高端轴承钢冶金控制的发展方向。

关键词: GCr15 轴承钢; 旋转弯曲疲劳; 夹杂物; 断口特征; 疲劳机理

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)11-0085-08

Effects of metallurgical craftwork on high bending fatigue performance of GCr15 steel during high cycle rotation

SHI Zhi-yue, XU Hai-feng, XU Da, YU Feng, CAO Wen-quan

(Institute of Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The research on the high cycle mechanical fatigue test of GCr15 bearing steel under vacuum degassing and electroslag remelting processes was studied. It was observed that under the condition of 10^7 times fatigue life, the bending fatigue strength of ESR bearing steel was 1 085 MPa, which was higher than that of vacuum degassing steel (1 000 MPa). The fatigue fracture surface was characterized and analyzed by scanning electron microscope. The size of the inclusions derived from the electroslag process was 3.4-25.6 μm , while that of the vacuum degassing process was 13.3-71.9 μm . It is demonstrated that the size of large particle inclusions (DS) and their distribution are the key factors affecting the fatigue strength and life of bearing steels by studying the relationship between the characteristics of entire fatigue process, such as crack initiation core inclusions, the crack expanding fish-eye, the instantaneous fracture zone and the fatigue strength and the life of spin bending fatigue fracture. It was pointed out that reducing the size of large particle inclusions in bearing steel, controlling its distribution and increasing crack tolerance were still the development direction of metallurgical control of high-end bearing steel in the future.

Key words: GCr15 bearing steel; rotary bending fatigue; inclusion; fracture characteristic; fatigue mechanism

目前常用的轴承钢主要包括以 GCr15 为主的高碳轴承钢、以 G20CrNi2Mo 为主的渗碳轴承钢和以 9Cr18Mo 为主的不锈轴承钢^[1]。其中 GCr15 轴承钢是轴承钢中量大面广的轴承钢产品, 其产量占轴承钢产量的 80% 以上, 作为轴承滚动体和内外圈材料广泛应用于航空航天、交通运输以及矿山机械等装备领域^[2]。针对应用领域对纯净度和夹杂物的不同要求, GCr15 的冶炼方式也不同, 主要分为真空脱气轴承钢 (LF+RH/VD)、电渣冶炼轴承钢 (ESR) 和

双真空轴承钢 (VIM+VAR)^[3]。轴承在服役期间受到交变载荷的作用, 导致轴承滚动体与内外圈滚动面的疲劳剥落并最终导致轴承失效^[4]。国内外对轴承钢的疲劳研究表明, 洁净度和夹杂物是导致轴承钢裂纹起裂和扩展的主要因素。随着轴承钢中洁净度从 20 世纪 70 年代的氧的质量分数为 0.003%~0.005% 到目前的 0.000 3%~0.000 5%, 轴承钢的接触疲劳寿命从 10^7 提高到了 10^8 次, 轴承钢的旋弯疲劳强度从 500 提高到了 1 000 MPa^[5]。可见轴承钢洁

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFB0300101)

作者简介: 史智越 (1993—), 男, 硕士生; **E-mail:** 602122219@qq.com; **收稿日期:** 2018-03-27

通讯作者: 曹文全 (1969—), 男, 博士, 教授级高级工程师; **E-mail:** caowenquan@nercast.com

净度与夹杂物控制水平是接触疲劳寿命和旋弯疲劳强度的重要保证。

轴承的失效主要表现为滚动体或内外圈滚道表面的疲劳剥落和磨损^[6]。疲劳剥落导致轴承的疲劳失效,而过量磨损则导致轴承的净度失效,从而引起磨损失效。随着轴承设计与润滑技术的发展,轴承磨损失效逐步得到克服。因而延长轴承寿命主要在于解决轴承材料的疲劳失效。轴承钢在服役过程中受到交变载荷的作用,使轴承材料在缺陷处(主要是夹杂物)产生应力或应变集中,导致裂纹在缺陷处萌生、扩展并最终剥落^[7]。前人通过接触疲劳和旋弯疲劳等试验的研究表明,轴承钢中夹杂物的类型、尺寸、分布对轴承钢的疲劳寿命具有决定性影响。但这些研究主要针对真空脱气轴承钢进行,且研究结果主要是定性研究,缺乏定量的夹杂物表征和深入的理论探讨^[8]。众所周知^[9-10],冶炼工艺的不同会导致轴承钢较大的洁净度和夹杂物差异,从而更有利于对影响轴承钢疲劳寿命控制因素的对比研究,明

确轴承钢疲劳性能的主要控制因素,为高端轴承钢的冶金质量控制提供试验与理论指导。

本文主要通过对电渣重熔和真空脱气两种不同冶炼工艺生产的轴承钢 GCr15 进行旋弯疲劳试验,探讨冶炼工艺对疲劳强度和疲劳寿命的影响。通过疲劳断口夹杂物的扫描电镜表征和基体夹杂物的 ASPEX 定量表征,探讨冶炼工艺对夹杂物特性的影响。最后应用 Paris 裂纹扩展公式研究了夹杂物尺寸、交变应力大小与疲劳寿命和疲劳强度间的关系,探讨未来高端轴承钢冶金质量的生产控制方向。

1 试验材料与方法

本试验材料选用两钢厂分别以不同冶炼工艺制得的 GCr15 全淬透轴承钢,其中 1 号样品冶炼工艺为真空脱气冶炼和连铸(BOF+LF+RH+CC)、2 号样品的冶炼工艺为电渣重熔冶炼和模铸(VIM+ESR+MC)。具体的化学成分见表 1。

表 1 两种样品化学成分(质量分数)

Table 1 Compositions of two kinds of specimens									%
样品	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
1 号	1.05	0.29	0.31	0.014	<0.005	1.42	0.014	0.058	<0.010
2 号	1.02	0.25	0.35	0.009	<0.005	1.50	0.027	0.042	0.020
样品	Ti	Al	N	O	As	Ca	Pb	Sb	Sn
1 号	0.001 2	0.025	0.001 9	0.000 4	<0.005 0	0.000 6	0.000 1	0.000 4	0.000 4
2 号	0.001 4	0.018	0.005 3	0.001 0	0.007 7	<0.005 0	0.000 1	0.001 2	0.001 7

高周旋转弯曲疲劳试样由钢厂锻造原坯,经线切割、车削制取旋转弯曲疲劳试验毛坯,并留出足够的加工余量,热处理后再精磨成标准高周疲劳试样,如图 1 所示。两种钢所采用的热处理工艺为旋弯毛坯的传统等温球化热处理:790 °C×4 h+720 °C×2 h+650 °C(AC)和旋弯疲劳试样精磨前的传统整体硬化热处理:840 °C×30 min(OQ)+170 °C×3 h(AC)。旋弯疲劳试验在 PO1-6 机械疲劳试验机上按照 GB/T 4337—2015 标准进行,试验频率为 80 Hz,载荷比 R 为 -1,试验环境为室温。试样断裂后在扫描电镜下测量分析包括裂纹源(夹杂物)、起裂区(“鱼眼”)和瞬断区等裂纹起裂与扩展的特征尺寸等参数,并用 ASPEX 夹杂物分析仪对基体中夹杂物类型、尺寸和分布等夹杂物参数进行定量表征。通过对断口夹杂物和基体夹杂物的定量表征,分析引起旋弯疲劳的夹杂物因素。通过室温

拉伸试验进行了两种轴承钢的力学性能测试,探讨静态拉伸强度与旋弯疲劳强度的关系。

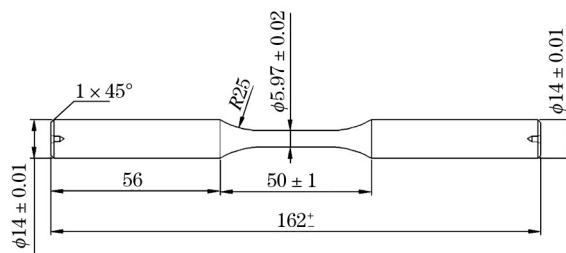


图 1 高周疲劳样品尺寸

Fig. 1 Dimension of sample used in high cycle fatigue testing

2 试验结果

2.1 基本力学性能与旋弯疲劳性能

两种试验材料的基本力学性能参数见表 2。可以看出,2 号电渣钢的抗拉强度(R_m)为 2 272.7 MPa,

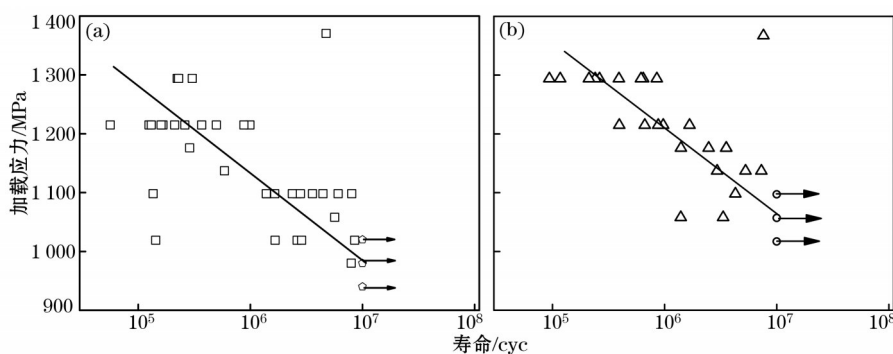
比 1 号真空脱气钢的抗拉强度 2 018.7 MPa 高出约 13%; 同时 2 号电渣轴承钢的 U-型室温冲击功 (KU) 达到了 10.0 J, 比 1 号真空脱气钢的 8.7 J 高出约 15%。图 2 所示为 1 号、2 号样品利用多试样法拟合的旋转弯曲 S-N 曲线。由图 2 可以看出, 随着加载应力降低, 其循环周次明显增加, 并出现传统疲劳极限水平段。同时也可以看出, 2 号试样疲劳强度高于 1 号试样。利用升降法计算得到 1 号、2 号试样的 10^7 次的旋转疲劳强度 (σ_{-1}) 分别为 1 000 和 1 085 MPa,

电渣轴承钢的旋弯疲劳强度比真空脱气轴承钢的旋弯疲劳强度高出约 8.5%。

表 2 两种样品力学性能及其旋弯疲劳强度

Table 2 Mechanical properties of two kinds of specimens

样品	HRC	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$Z/\%$	KU/J	$\sigma_{-1}(N=10^7)/$ MPa
1 号	57.4	2 018.7	1 731.7	4.0	8.7	1 000
2 号	59.5	2 272.7	1 774.7	4.7	10.0	1 085



(a) 1 号-LF+RH; (b) 2 号-ESR。

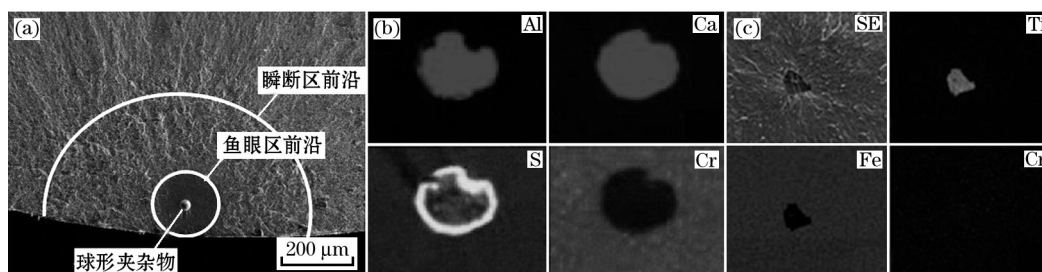
图 2 两种样品特征 S-N 曲线

Fig. 2 S-N curves of specimens No. 1 and No. 2

2.2 旋弯疲劳断口特征与断裂特征参数表征

用扫描电镜二次电子成像 (SEM) 对两组试样进行断口观察, 得到的典型的断口形貌如图 3(a) 所示, 绝大多数试样裂纹源均为基体内部非金属夹杂物。由图中旋弯疲劳断口形貌可以看出, 断口均具有疲劳裂纹源“夹杂物”、疲劳裂纹缓慢扩展区“鱼眼”、疲劳裂纹快速扩展区以及瞬间断裂区等 4 个断

口特征。鱼眼内部为平滑区域, 猜测其形成原因为试样在疲劳试验过程中, 受到交变应力, 夹杂物周围基体不断拉压, 导致裂纹扩展和弥合; 裂纹快速扩展区主要是在拉应力作用下裂纹的张开与扩展, 没有裂纹弥合过程, 所以快速裂纹扩展断面相对粗糙; 而当裂纹扩展到基体能承受的最大值时, 材料突然发生断裂, 形成断口的瞬间区^[1]。图 3(b)、(c) 所



(a) 旋弯疲劳断口的断口形貌特征; (b) 1 号-LF+RH 中间断裂后的 CaS 包裹的复合球形夹杂物的成分分析;

(c) 2 号-ESR TiN 型夹杂物成分分析。

图 3 旋弯疲劳断口形貌及夹杂物成分分析

Fig. 3 Rotary bending fatigue fracture morphologies and chemical composition analysis

示为试验过程中夹杂物的断裂面, 利用 EDS 能谱对“鱼眼”中心夹杂物成分进行分析, 1 号真空脱气钢样品内部起裂源大部分为钙、铝、硫等元素组成的复合球形氧化物。能谱分析表明, 夹杂物的核心是

以钙、铝和铬等氧化物的组成复合氧化物, 而以 CaS 为外面包裹的复合夹杂物^[12]。2 号样品起裂源多为 TiN 型夹杂, 夹杂物多为不规则多边形。

根据图 3 的裂纹源 (夹杂物类型、形状、大小与

位置)、裂纹慢速扩展区“鱼眼”、裂纹快速扩展区(鱼眼区前沿到瞬断区前沿)和裂纹瞬断区(超过瞬断区前沿后)等对4个主要断口特征进行了定量测定。图4所示为旋弯疲劳断口特征参数示意图,给出了特征尺寸的测量方法,包括夹杂物形状、尺寸(主要参数是夹杂物尺寸 d_{inc} 和夹杂物深度 h_{inc}),“鱼眼”的大小(切向长度 $2b_1$ 和 $2b_2$),以及瞬断区的尺寸(d_3 和 d_4);同时利用EDS测定夹杂物成分,分析夹杂物类型。

图5所示为1号、2号样品夹杂物大小 d_{inc} 、鱼眼切向长度 $2b_1$ 、瞬断区长度 d_3 与夹杂物深度间的关系。由图5(a)可知,1号真空脱气钢试样夹杂物尺寸 d_{inc} 和夹杂物深度 h_{inc} 分别在13.3~71.9和13.4~445.6 μm 范围内分布,平均值分别为27.1和146.4 μm ;2号电渣轴承钢试样夹杂物大小 d_{inc} 和夹杂物深度分别在3.4~26.6和10.8~193.1 μm 范围内分布,平

均值分别为13.3和83.2 μm 。同时,鱼眼大小与夹杂物深度存在很好的关系,即鱼眼大小随夹杂物深度的增加而增大。这表明夹杂物分布严重影响了旋弯疲劳过程中裂纹的扩展。

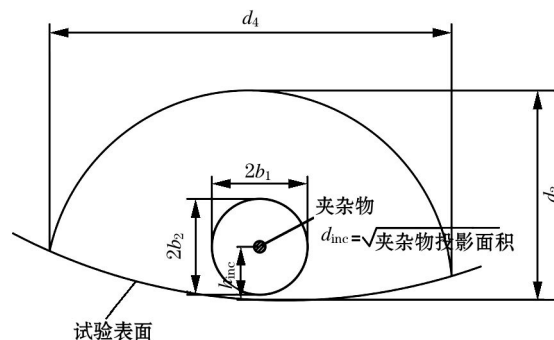
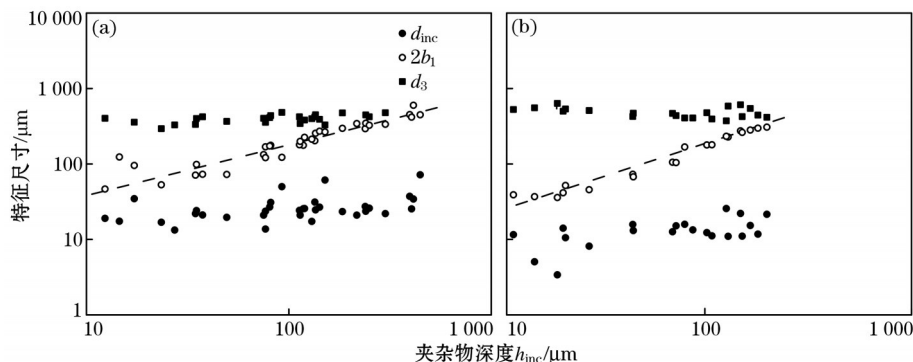


图4 疲劳断口特征参数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of characteristic parameters of fatigue fracture



(a) 1号-LF+RH; (b) 2号-ESR。

图5 断口特征参数间的关系

Fig. 5 Relationship between fracture characteristic parameters

2.3 基体夹杂物的定量表征

利用ASPEX夹杂物定量分析仪,对表面研磨抛光后的热处理试样进行夹杂物大小、数量和成分类型测定(检测面积约为125 mm²)。两种轴承钢的夹杂物表征结果如图6所示。可以看出2号试样中尺寸小于13 μm 的夹杂物数量大于1号真空脱气钢试样,而1号真空脱气钢尺寸大于20 μm 的夹杂物数量明显增多,这与旋转弯曲疲劳断口测量出的数据基本相符,即真空脱气钢的大颗粒夹杂物尺寸明显大于电渣轴承钢。对于真空脱气钢,通过ASPEX测量得到的夹杂物最大尺寸与通过旋弯疲劳断口测得的夹杂物存在较大差异。通过ASPEX测量得到的最大夹杂物尺寸为33.4 μm ,小于通过旋弯疲劳试验测得的最大夹杂物尺寸71.9 μm ;而对于电渣轴承钢,利用ASPEX测定的最大夹杂物尺寸为28.4 μm ,与通过旋弯疲劳断口测定的最大夹杂物尺寸基本

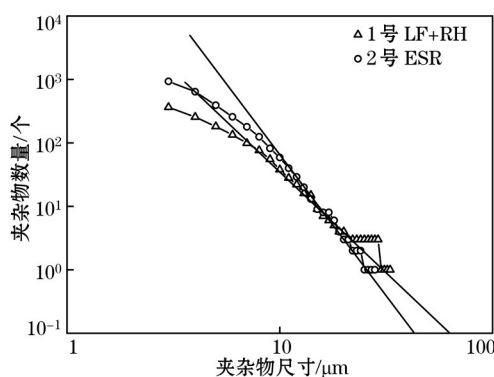


图6 夹杂物尺寸统计分布

Fig. 6 Statistical distribution of inclusion size

一致。比较以上两种夹杂物测定结果,可以看出,影响真空脱气轴承钢旋弯疲劳失效断裂的夹杂物,大多为尺寸大于13.3 μm 的由CaS包裹的铝、钙、铬复合氧化物;而影响电渣轴承钢旋弯疲劳失效断裂

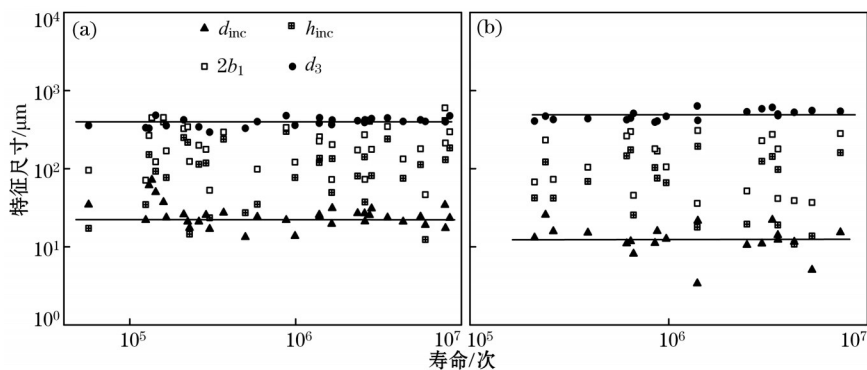
的夹杂物,大多为尺寸大于 $3.4\ \mu\text{m}$ 的 TiN 夹杂物。通过对比来看,2 号电渣钢中的 TiN 夹杂物在 $3.4\ \mu\text{m}$ 就引起轴承钢的旋弯疲劳,远远小于 1 号真空脱气轴承钢中的复合球形夹杂物 $13.3\ \mu\text{m}$ 的引起旋弯疲劳的临界尺寸,这与文献中报道的 TiN 对疲劳影响因子远远高于其他类型夹杂物相一致^[13-14]。因此未来不仅仅要控制轴承钢中的氧化物夹杂,而且要重点控制轴承钢中的钛质量分数。

3 讨论

3.1 断口特征参数与疲劳寿命和加载应力的关系

图 7 所示为真空脱气轴承钢和电渣轴承钢旋弯

疲劳断口的特征参数(夹杂物尺寸 d_{inc} 、夹杂物深度 h_{inc} 、鱼眼直径 $2b_1$ 和瞬断区前沿深度 d_3 随断裂前疲劳寿命 (N_f) 间的关系。从图 7(a)和(b)可以看出,夹杂物尺寸 d_{inc} 和瞬断区尺寸 d_3 随疲劳寿命的增加而变化不大,可以看作是裂纹的最小值和最大值。但是对于电渣钢而言,其最小值(夹杂物尺寸)在 $15\ \mu\text{m}$ 上下变化,最大值(瞬断区尺寸)在 $500\ \mu\text{m}$ 上下变化;而对于真空脱气轴承钢,其最小值平均值在 $20\ \mu\text{m}$ 上下变化,最大值平均值在 $400\ \mu\text{m}$ 上下变化。表明电渣轴承钢具有更高的裂纹扩展长度容忍度。同时图 7 也说明,“鱼眼”大小及夹杂物深度与疲劳寿命间不存在明显的对应关系。



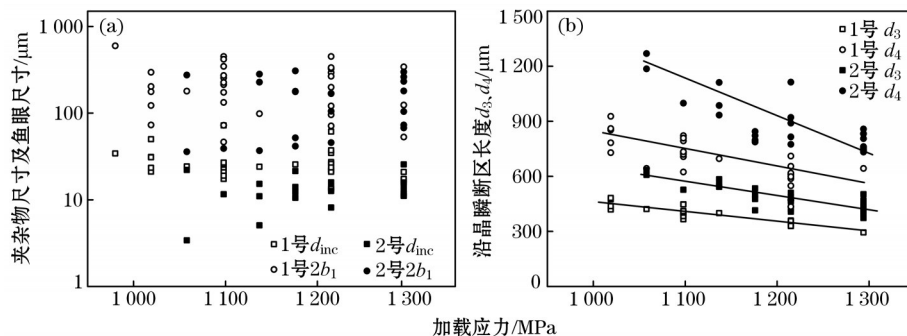
(a) 1号-LF+RH; (b) 2号-ESR。

图 7 断口特征参数与疲劳寿命的关系

Fig. 7 Experimental relationship between fracture characteristic parameters and failure cycle number

图 8 所示为夹杂物尺寸、“鱼眼”尺寸以及沿晶瞬断区长度 d_3 、 d_4 与加载应力之间的关系,可以看出,裂纹稳定扩展区长度主要受外加应力控制,同时与夹杂物所处位置即夹杂物深度有关,在试验过程中,靠近试样边部最大夹杂物周围不断受到拉-压作用,鱼眼

区逐步形成,并且逐渐扩大,猜想鱼眼四周形成一条真空条带,当其扩大到与试样表面相切时(如图 7 所示,深度 h_{inc} 与 $2b_1/2$ 的比值均在 1 上下浮动),真空状态被打破,试样瞬间断裂,在撕裂的瞬间外加载荷依旧作用于试样,并影响沿晶瞬断区大小^[15]。



(a) 夹杂物尺寸及鱼眼尺寸; (b) 沿晶瞬断区长度 d_3 、 d_4 。

图 8 断口特征参数与加载应力的关系

Fig. 8 Relationship between stress amplitude and fracture characteristic parameters

通过以上分析可以看出,夹杂物尺寸与瞬断区尺寸基本上不随循环疲劳次数发生变化,可以看作

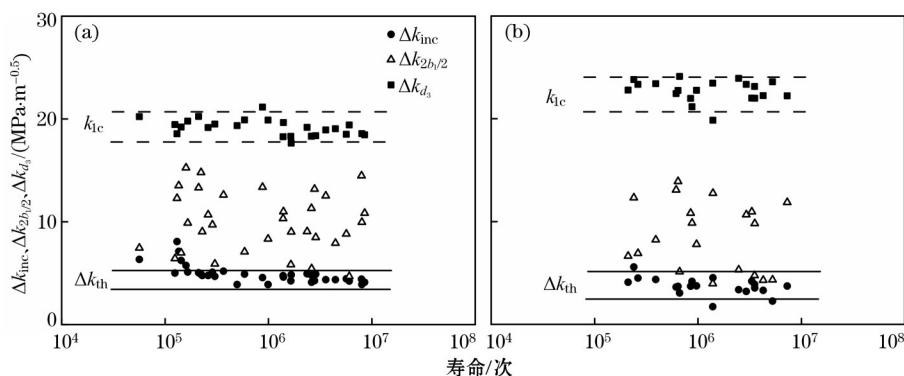
材料在循环疲劳断裂过程中的裂纹最大值和裂纹最小值。同时不仅单纯研究循环断口特征尺寸与

疲劳循环次数间的关系得不到规律,单纯研究循环断口特征尺寸与加载应力的关系也存在较大分散性。为了进一步分析断口特征尺寸与旋弯疲劳次数和加载应力的关系,需要进一步考虑加载应力、循环次数与特征参数间的内在影响。另外研究结果还表明,不仅电渣轴承钢的最大夹杂物尺寸小于真空脱气轴承钢,同时电渣轴承钢可容忍的最大裂纹尺寸也大于真空脱气轴承钢,这说明最大颗粒夹杂物尺寸影响了钢的最大裂纹容忍度,即大颗粒尺寸越大,钢对裂纹尺寸容忍度越低,从而最终降低疲劳寿命与疲劳应力极限。

3.2 裂纹扩展断裂力学分析

轴承钢旋转弯曲疲劳破坏的过程表明,在反复轴向拉-压加载过程中,夹杂物与基体逐渐形成初始疲劳裂纹。图 7 和图 8 的结果说明,单纯研究断口特征参数与疲劳寿命或断口特征参数与加载应力间的关系是不科学的,需要将断口特征参数与加载应力相结合,研究影响钢疲劳寿命的控制因素。为此用断裂力学中应力强度因子幅的概念,进行断口特征参数和加载应力对疲劳行为影响的研究,见式(1)。

$$\Delta K = F\sigma(\pi d)^{1/2} \quad (1)$$



(a) 1号-LF+RH; (b) 2号-ESR。

图 9 夹杂物及鱼眼区应力强度因子与疲劳寿命关系

Fig. 9 Experimental relationship among stress intensity factor of inclusion, factor of fish-eye and failure cycle number

裂纹扩展公式通常满足 Paris 法则。这里假设由鱼眼到形成 GBF 区,直到形成鱼眼区也满足 Paris 法则^[17-18],将 Murakami 公式代入得到式(2)。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

式中: N 为疲劳次数; a 为裂纹长度; C 为常数; m 为 Paris 公式的指数,通常取 3^[19]。

对式(2)积分,得到包含断口特征尺寸 d , 疲劳循环寿命 N_f 和疲劳应力 σ 的积分结果,见式(3)。

$$N_f = \frac{1 - (d_{inc}/d)^{m/2-1}}{C(0.5\sigma)^m (m/2-1)d_{inc}^{m/2-1}} \quad (3)$$

式中: ΔK 为应力因子; F 为裂纹形状系数,对于表面缺陷 $F=0.65$,对于内部缺陷 $F=0.5$; d 为断口特征参数尺寸; σ 为特征尺寸前沿的应力水平,对于夹杂物 $\Delta K_{inc} = 0.5\sigma_a^{inc}(\pi d_{inc})^{1/2}$ 其中应力幅 $\sigma_a^{inc} = \sigma_a \left[1 - \left(\frac{h_{inc} - d_{inc}/2}{d_0/2} \right) \right]$ (d_0 为疲劳试样最小断面直径)。

图 9 所示为真空脱气轴承钢、电渣轴承钢试样的 ΔK_{inc} 、 $\Delta K_{2b/2}$ 和 ΔK_{d_3} 与疲劳寿命 N_f 的关系,可以看出,两组试样 ΔK_{inc} 均在 GCr15 钢裂纹扩展阈值范围 4~5^[16], 1 号真空脱气轴承钢部分低寿命区、大夹杂物的 ΔK 值均高于阈值,其更易满足裂纹扩展条件; 1 号真空脱气轴承钢与 2 号电渣轴承钢试样的 ΔK_{d_3} 分别在 17~20 和 20~24 之间,其值与 GCr15 钢断裂韧性 (k_{ic}) 基本吻合,表明裂纹从非金属夹杂物处萌生,应力强度因子幅高于阈值后开始稳定扩展,直至到达瞬断区前沿 d_3 后, ΔK 达到试样断裂极限,完全断裂,这也解释了 2 号电渣轴承钢试样疲劳强度高于真空脱气轴承钢的原因; 两组试样 $\Delta K_{2b/2}$ 值在 ΔK_{inc} 与 ΔK_{d_3} 之间,说明夹杂物 d_{inc} 与 d_3 大小为控制鱼眼 $2b_1$ 大小的边界,同时也验证了图 5 中的断口参数特征。

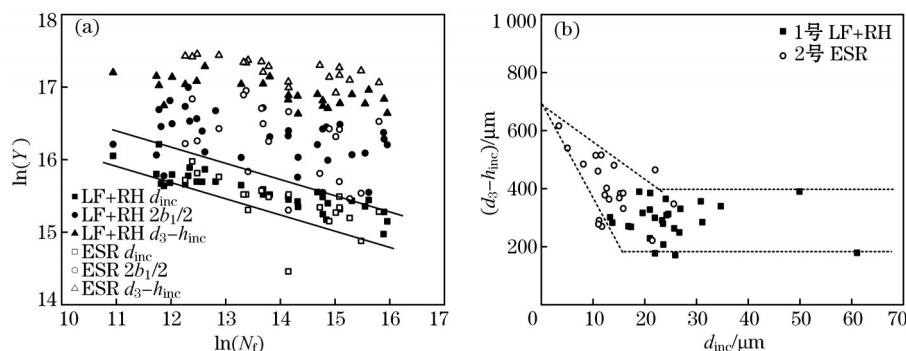
对式(3),取 $m=3$,并假设 d 远大于 d_{inc} ,得到式(4)。

$$N_f = \frac{1}{0.0625 C \sigma^3 d_{inc}^{0.5}} \quad (4)$$

令 $Y = F\sigma_a^3(\pi d)^{3/2}$,对本研究的断口特征尺寸及疲劳应力进行计算,得到 1 号真空脱气轴承钢、2 号电渣轴承钢试样夹杂物、鱼眼和裂纹扩展长度 $\ln(Y)$ 与 $\ln(N_f)$ 之间的关系图,如图 10(a)所示。可以看出,两组试样 $\ln(Y)$ 均随着 $\ln(N_f)$ 的升高而降低,表明寿命较长的试样裂纹扩展速率较慢。对比夹杂物尺寸 d_{inc}

与裂纹扩展长度,得到裂纹向心部扩展距离 d_3-h_{inc} 与 d_{inc} 关系图,如图 10(b)所示,可以看出,裂纹可扩展距离随着夹杂物尺寸的增大而下降,在 $d_{inc}=20\ \mu\text{m}$ 左右出现带状平台,说明基体中小尺寸夹杂物裂纹源相对于大尺寸夹杂物,需要更长的裂纹扩展距离。也

就是说,在疲劳加载过程中,小尺寸夹杂物裂纹源在试样疲劳断裂之前,其裂纹行进的距离更远,时间(寿命)更长。说明通过基体夹杂物尺寸 d_{inc} 可以预测疲劳寿命 N_f 。式(3)同样建立了裂纹尖端应力强度因子、夹杂物尺寸以及疲劳寿命之间的关系^[20]。



(a) $\ln(Y)$ 与 $\ln(N_f)$ 的关系; (b) d_3-h_{inc} 与 h_{inc} 的关系。

图 10 裂纹扩展速率以及扩展距离

Fig. 10 Crack propagation rate and distance

4 结论

(1) GCr15 轴承钢的旋弯疲劳断口可以被清晰地分为裂纹源(夹杂物核心)、鱼眼区、裂纹慢速扩展区和裂纹瞬断区 4 个区域。其中夹杂物深度与断口鱼眼大小存在较强的线性关系;对于高周疲劳试验(10^7),当疲劳试样表面打磨抛光处理后,破坏模式均有“鱼眼”破坏特征,鱼眼内部为非金属夹杂,夹杂物因成分类型不同可能保持原状或从中间断裂。

(2) 通过旋转弯曲疲劳试验和对断口特征参数标定,揭示了控制疲劳寿命最主要的两个因素为加载应力和夹杂物尺寸,疲劳寿命随着加载应力和夹杂物尺寸的增加而减小。电渣重熔工艺对于大颗粒夹杂物尺寸控制好于真空脱气冶炼,因此电渣轴承钢 GCr15 具有较好的旋弯疲劳强度。

(3) 基于 Paris 公式推定的夹杂物与疲劳寿命公式,解释了夹杂物大小、外加应力与疲劳寿命的关系,建立了夹杂物与疲劳寿命之间的联系,为通过夹杂物尺寸推定疲劳寿命提供了可能;利用断口特征参数,研究了裂纹扩展长度与夹杂物尺寸间的关系,发现了夹杂物大小对旋弯疲劳裂纹扩展长度的影响。

参考文献:

[1] 虞明全. 轴承钢钢种系列的发展状况[J]. 上海金属, 2008, 30(3): 49. (YU Ming-quan. The development status of bearing

steel and its grades series[J]. Shanghai Metals, 2008, 30(3): 49.)

- [2] 钟顺思, 王昌生. 轴承钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000. (ZHONG Shun-si, WANG Chang-sheng. Bearing Steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.)
- [3] 李昭昆, 雷建中, 徐海峰, 等. 国内外轴承钢的现状与发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(3): 1. (LI Zhao-kun, LEI Jian-zhong, XU Hai-feng, et al. Current status and development trend of bearing steel in China and abroad[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(3): 1.)
- [4] 干勇, 田志凌, 董瀚. 中国材料工程大典. 第 3 卷. 钢铁材料工程(下)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. (GAN Yong, TIAN Zhi-ling, DONG Han. China Material Engineering Canon, Third Volumes, Steel Material Engineering[M]. Beijing: China Industry Press, 2006.)
- [5] 曹文全, 李绍昆, 雷建中, 等. 国内外轴承钢现状与发展趋势[J]. 世界金属导报, 2015-08-11(B12). (CAO Wen-quan, LI Shao-kun, LEI Jian-zhong, et al. Current status and development trend of bearing steel in China and abroad[J]. World Metals, 2015-08-11(B12).)
- [6] 刘浏. 高品质特殊钢关键生产技术[J]. 钢铁, 2018, 53(4): 1. (LIU Liu. Key production-technology for high-quality special steel[J]. Iron and Steel, 2018, 53(4): 1.)
- [7] 车晓健, 杨卯生, 唐海燕, 等. 高性能 GCr15 轴承钢中夹杂物控制与疲劳性能[J]. 钢铁, 2018, 53(5): 76. (CHE Xiao-jian, YANG Mao-sheng, TANG Hai-yan, et al. Inclusion control and fatigue performance in high performance GCr15 bearing steel[J]. Iron and Steel, 2018, 53(5): 76.)
- [8] 尤绍军. 我国轴承钢及热加工技术的现状和研究方向[J]. 金属热处理, 2012, 37(1): 119. (YOU Shao-jun. Status and research directions of bearing steels and heat processes in China

- [J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(1): 119.)
- [9] 刘雅政, 周乐育, 张朝磊, 等. 重大装备用高品质轴承用钢的发展及其质量控制[J]. 钢铁, 2013, 48(8): 1. (LIU Ya-zheng, ZHOU Le-yu, ZHANG Chao-lei, et al. Development and quality control of bearing steel for heavy equipment[J]. Iron and Steel, 2013, 48(8): 1.)
- [10] 黄永生, 孙光涛, 顾超, 等. 铝脱氧轴承钢 GCr15 精炼渣最优成分的分析与实践[J]. 中国冶金, 2017, 27(12): 44. (HUANG Yong-sheng, SUN Guang-tao, GU Chao, et al. Technical practice and research on optimal composition of refining slag of aluminium deoxidation bearing steel GCr15[J]. China Metallurgy, 2017, 27(12): 44.)
- [11] Shiozawa K, Morii Y, Nishino S, et al. Subsurface crack initiation and propagation mechanism in high-strength steel in a very high cycle fatigue regime[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(11): 1521.
- [12] 马惠霞, 李文竹, 黄磊, 等. 轴承钢中硫化物夹杂诱发疲劳裂纹的微观分析[J]. 金属热处理, 2012, 37(3): 119. (MA Hui-xia, LI Wen-zhu, HUANG Lei, et al. Analysis of sulphide inclusion induced fatigue crack in bearing steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(3): 119.)
- [13] 杨俊, 王新华, 龚志翔, 等. 超低氧车轮钢中 TiN 夹杂析出的热力学分析及控制[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(9): 1138. (YANG Jun, WANG Xin-hua, GONG Zhi-xiang, et al. Precipitation thermodynamics analysis and control of titanium nitride inclusions in extra-low oxygen wheel steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(9): 1138.)
- [14] 元海全. 20CrMnTi 钢成分优化对组织及接触疲劳寿命的影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010. (QI Hai-quan. Effect of Composition Optimization on Microstructure and Contact Fatigue Life of 20CrMnTi Steel[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.)
- [15] Spriestersbach D, Brodyanski A, L Sch J, et al. Very high cycle fatigue of bearing steels with artificial defects in vacuum[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(11): 1111.
- [16] 李伟. GCr15 钢超高周疲劳行为的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007. (LI Wei. Fatigue Behavior of GCr15 Steel in Gigacycle Regime[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.)
- [17] 鲁连涛, 李伟, 张继旺, 等. GCr15 钢旋转弯曲超长寿命疲劳性能分析[J]. 金属学报, 2009, 45(1): 73. (LU Lian-tao, LI Wei, ZHANG Ji-wang, et al. Analysis of rotary bending gigacycle fatigue properties of bearing steel GCr15[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(1): 73.)
- [18] 刘立名, 段梦兰, 柳春图, 等. 对裂纹扩展规律 Paris 公式物理本质的探讨[J]. 力学学报, 2003, 35(2): 171. (LIU Li-ming, DUAN Meng-lan, LIU Chun-tu, et al. Discussion on the physical essence of Paris formula for crack propagation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2003, 35(2): 171.)
- [19] Claude Bathias. Fatigue of Materials and Structures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [20] 张继明, 张建锋, 杨振国, 等. 高强钢中最大夹杂物的尺寸估计与疲劳强度预测[J]. 金属学报, 2004, 40(8): 846. (ZHANG Ji-ming, ZHANG Jian-feng, YANG Zheng-guo, et al. Estimation of maximum inclusion size and fatigue strength in high strength steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(8): 846.)

《钢铁》杂志征稿启事

《钢铁》杂志创刊于 1954 年, 由中国科学技术协会主管, 中国金属学会、钢铁研究总院和北京钢研柏苑出版有限责任公司主办, 是中国冶金界历史较长的综合性科技期刊, 也是反映钢铁工业科技成就的主要刊物之一。《钢铁》设有由 53 名国内知名学者、企业家等组成的编委会, 编委会顾问徐匡迪、殷瑞钰、张寿荣、翁宇庆和编委会主任委员干勇、编委会委员毛新平、谢建新等 7 位均为中国工程院院士。《钢铁》办刊宗旨是面向生产、结合实际; 坚持为中国钢铁工业生产建设服务, 报道钢铁工业的科技成就、生产工艺的技术进步、品种质量的改善提高、新技术新产品的开发应用、企业经营管理经验和专业理论应用研究等, 以提高钢铁行业科技工作者和管理人员的科技水平, 促进钢铁工业的发展。

2001 年 10 月《钢铁》入选由国家新闻出版总署创建的中国《期刊方阵》; 名列双百第 74 名。2009 年以前为 EI 收录期刊, 自 1992 年开始, 《钢铁》连续 8 次入编北大图书馆核心期刊(中文核心期刊); 为中信所“中国科技核心期刊”; 被国际著名检索机构 Scopus 收录。

《钢铁》主要栏目有: 综合论述、原料与炼铁、炼钢、压力加工、钢铁材料、环保与能源、装备技术、技术交流等。《钢铁》现为月刊; 大 16 开; 页码为 88 页; 期刊为自办发行。

1 征稿对象

从事钢铁冶金生产、管理、设计、科研、教学和钢材使用部门的科技人员、专家学者和管理人员等。

2 征稿范围

钢铁冶金领域具有创新性、高水平、有重要意义的原始性研究学术论文以及反映学科最新发展状况的文献综述和技术类文章。《钢铁》在继续报道和推广钢铁工业关键共性技术的基础上, 特向作者征集涉及钢铁工业关键技术的原创文章和综合论述文章。

特别欢迎作者针对钢铁企业资源优化配置和节能减排、资源综合利用等方面撰写技术文章。

3 投稿和联系方式

请登录“钢铁期刊网”网站(<http://www.chinamet.cn>)。点击“钢铁”的图标或刊名导航条, 进入期刊的首页了解详情。

联系人: 尚海霞, 党玉华, 何 祺;

邮 箱: IS@chinamet.cn;

电 话: 010-62182345;

传 真: 010-62185134;

通讯地址: 北京市海淀区学院南路 76 号;

邮 编: 100081。