

高强度钢压剪疲劳裂纹扩展的实验研究^①

陈 枫 孙宗颀

(中南工业大学力学开放实验室, 长沙 410083)

K. Zaremba

(瑞典皇家工学院固体力学系, 斯德哥尔摩 10044, 瑞典)

摘 要 滚珠轴承接触点附近的高压剪应力是引起轴承疲劳破坏的原因。为获得高强度钢在压剪疲劳加载下的断裂性态, 通过轴向裂纹薄壁圆筒的压剪疲劳加载试验, 研究了这类材料的疲劳破坏规律。结果表明, 复合疲劳加载时门槛值对压应力分量并不敏感, 但对扩散速率和临界扩展角却有明显影响。裂纹扩展速率随压应力增加而提高, 裂纹较快达到失稳; 裂纹扩散角则随压应力增加而减小, 疲劳裂纹将向有利于 I 型断裂的方向扩展。这表明轴承滚道内, 任何平行于压应力的缺陷、微裂纹都将是十分危险的。

关键词 疲劳断裂 门槛值 应力强度因子 裂纹扩展速率

中图法分类号 O346.1

滚动轴承是机械中常见的重要部件, 从普通机械、机车车辆到航空航天器都有它们的存在。这类构件既受到高的压剪应力作用又处于疲劳加载状态。航空、航天和军事上对高强度材料特殊性能的要求促进了对材料在 I 型和 II 型加载下的疲劳破坏的研究, 取得了令人瞩目的成就^[1-5], 但对高强度材料在压剪疲劳加载下的断裂性能的研究却很少见诸于文献。而压剪疲劳加载又是工程构件, 特别是轴承中常见的受载方式。

本文分析了压剪应力场的特点, 并通过具有轴向裂纹的高强度轴承钢制成的薄壁圆筒试样的压扭疲劳加载, 对材料的门槛值、疲劳裂纹扩展速率和临界开裂角等断裂性能作了一系列实验研究。实验结果与理论分析相当一致。

1 压剪裂纹尖端的应力场特点

如图 1 所示, 考虑一长 $2a$, 与压应力 p 成 β 角的具有有限曲率的非闭合裂纹。此压应力引起沿 x 轴方向的应力分量为 p_x ^[6]。

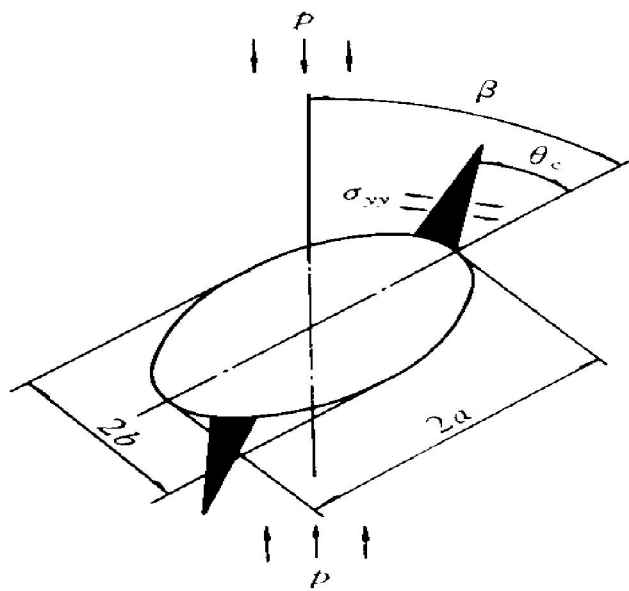


图 1 压剪裂纹尖端应力特点分析

Fig. 1 Analysis of stress characteristic at crack tips under compression-shear loading

$$p_x = p \cos^2 \beta \quad (p > 0) \quad (1)$$

式中 p 为远场压应力, 由 p 引起的裂纹尖端的应力强度因子(SIF)可由下式表示。

$$\begin{aligned} K_I &= - p a \sin^2 \beta \\ K_{II} &= - p a \sin \beta \cdot \cos \beta \end{aligned} \quad (2)$$

① 国家自然科学基金资助项目 49762164 及 1998 年环太平洋先进材料与工艺国际会议宣读论文

收稿日期: 1997- 08- 29; 修回日期: 1998- 10- 20 陈 枫, 男, 在职博士

式中 K_I, K_{II} 分别为 I 型和 II 型应力强度因子, a 为裂纹半长。

式(2) 中的 K_I 仅使裂纹面发生闭合趋势, 并非通常意义下的 I 型应力强度因子。Muskhelishvili^[7] 指出, 长、短轴分别为 $2a$ 和 $2b$ 的椭圆裂纹, 在曲率为 ρ 的非闭合裂纹尖端处, 因 x 方向的剪应力 p_x 而引起的裂尖最大局部拉应力在数值上等于 p_x , 见图 1, 即有

$$\sigma_{\max} = -p_x$$

(3)

它引起的应力强度因子 K_I 为

$$K_I = \lim_{\rho \rightarrow 0} \left(\frac{\sigma_{\max}}{2} \sqrt{\rho} \right)$$

(4)

将式(1), (3) 代入式(4) 得:

$$K_I = \frac{p \sqrt{\rho/a}}{2} \sqrt{a} \cos^2 \beta$$

(5)

于是, 由压应力 p 引起的裂尖 SIF 为式(2) 和式(5) 的叠加:

$$K_I = p \sqrt{a} \left(\frac{\sqrt{\rho/a}}{2} \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \right)$$

$$K_{II} = -p \sqrt{a} \sin \beta \cdot \cos \beta$$

(6)

于是, 压扭加载下的裂纹尖端处的 SIF 为由薄壁圆筒扭转引起的 K_{II} ^[8] 与式(6) 的叠加。显然, 当有限曲率非闭合裂纹受压剪时, 仍存在局部拉应力, 裂纹尖端同时存在 I、II 型应力强度因子, 所以压剪疲劳裂纹扩展准则可用 $\Delta K_I, \Delta K_{II}, R_I, R_{II}$ 和 φ 的函数式表示如下:

$$G(\Delta K_I, \Delta K_{II}, R_I, R_{II}, \varphi) = 0$$

(7)

式中 $\Delta K_I, \Delta K_{II}$ 分别是 I 型和 II 型应力强度因子幅值; $R_I = K_{I \min}/K_{I \max}, R_{II} = K_{II \min}/K_{II \max}$; φ 为 K_I 和 K_{II} 的相位角, 与加载历史有关。当 $\beta = 0$ 时, 裂纹平行于压应力, 此时裂纹不产生闭合趋势, 压剪疲劳加载时可忽略裂纹面的摩擦影响。

2 实验设计、步骤和结果

试样采用高强度轴承钢冷拔管, 在 680 ℃ 下保持 4 h 后水淬, 并经回火处理, 其化学成分和力学性能列于表 1 中。

图 2(a) 是专门设计的试样预裂纹冲击装置, 试样几何形状和尺寸如图 2(b) 所示。先在试样上钻一个直径为 4 mm 的小孔, 再沿轴向对称铣一宽度为 1.5 mm 的切口, 然后用图 2(a) 所示的冲击装置预制尖锐裂纹。裂纹总长度控制在 22~ 30 mm 之间。图 3 为压应力 $\sigma = -225 \text{ MPa}$ 时试样的疲劳裂纹、预裂纹及临界扩展角。加载路径: 先对试样加静压, 压力由

表 1 材料的化学成分与力学性能

Table 1 Chemical components and mechanical properties of materials(%)

C	Si	Mn	Mo	Cr	Ni	σ_s/MPa	σ_b/MPa	E/GPa
1.1	0.20	0.31	0.25	1.2	0.8	1010	1180	120

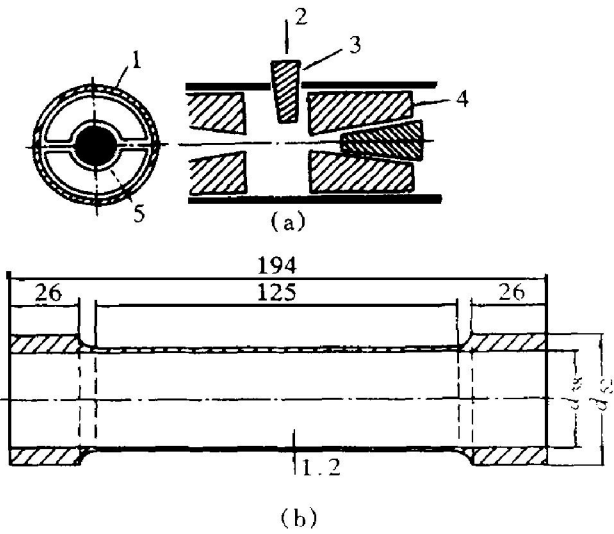


图 2 试样预裂纹冲击装置(a) 及试样几何形状(b)

Fig. 2 Pre-cracking device (a) and geometry of specimen (b) (unit: mm)

1—Specimen; 2—Impact load; 3—Conical wedge; 4—Supporting; 5—Conical wedge

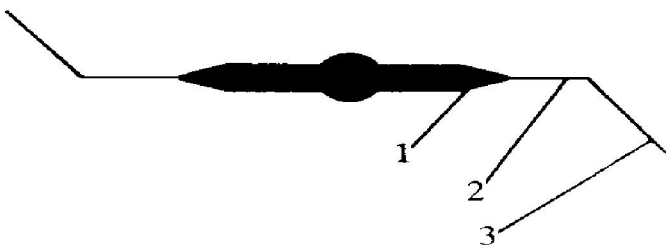


图 3 冲击预裂纹和疲劳裂纹及扩展方向
Fig. 3 Illustration of pre-cracking, fatigue crack and crack extension direction

1—Machine notch; 2—Impact crack; 3—Fatigue crack
 零增加到某一终值并保持不变; 然后加循环扭矩 ($M_{\max} = 230 \text{ Nm}$), $R_{\parallel}$ 取 0 和 0.1 并分别对试样加 4 种不同压应力: 150, 225, 300 和 400 MPa, 最大压应力远小于材料的弹性极限, $\sigma_{\max}/\sigma_y$ 约为 0.4。实验时用移动式显微镜测量瞬时疲劳裂纹长度, 计算机采样。所有测试在 MTS 伺服机上完成。图 4 是不同压应力下疲劳裂纹扩展的门槛值、扩展速率及其比较。从图中可以看到压应力分量对压剪疲劳裂纹扩展特性的影响, 稳定扩展阶段可用 Paris 公式表示^[8], 即 $da/dN = C \Delta K_{\parallel}^m$, 在图 4 的对数座标里呈直线状。不同压应力对稳定扩展速率的影响可用图 4 中各曲线直线段的斜率表示, 如图 5 所示。可以看到, 随压应力增加, 扩展速率也明显增加且较快达到失稳。图 6 则为压应力对临界扩展角的影响曲线。可以看出, 随压应力增加, 临界开裂角减小, 裂纹有利于向自相似方向扩展。

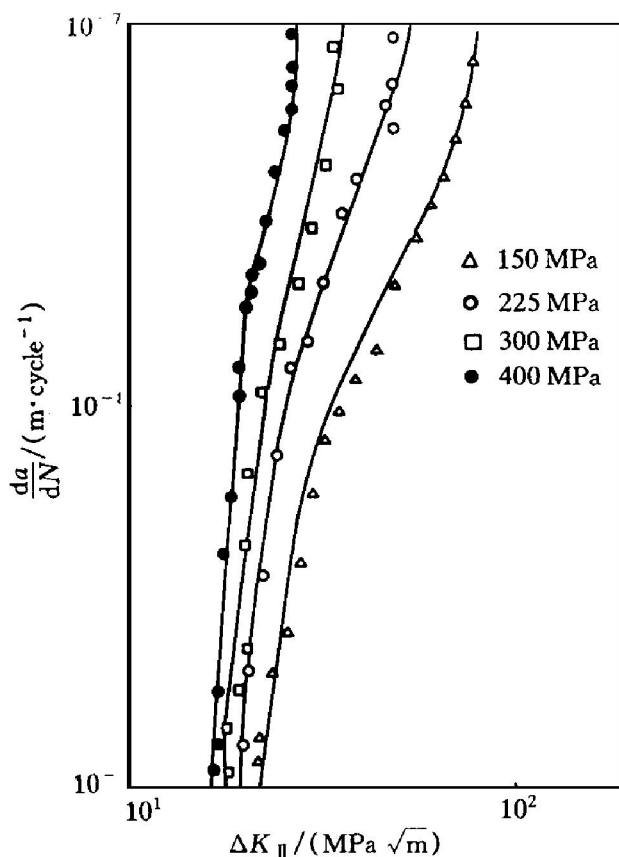


图 4 压剪疲劳裂纹扩展速率及比较

Fig. 4 Fatigue crack extension rates caused by compression-shear loading

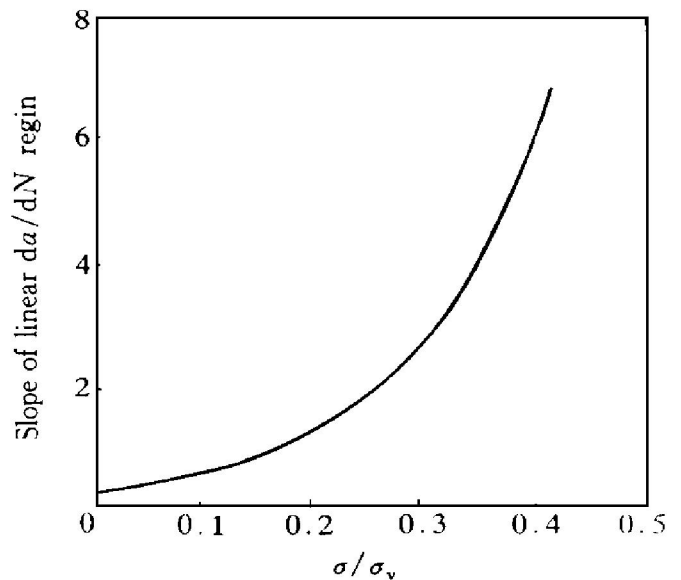


图 5 压应力对稳定扩展速率的影响

Fig. 5 Influence of compressive stress σ/σ_y on fatigue crack extension rate

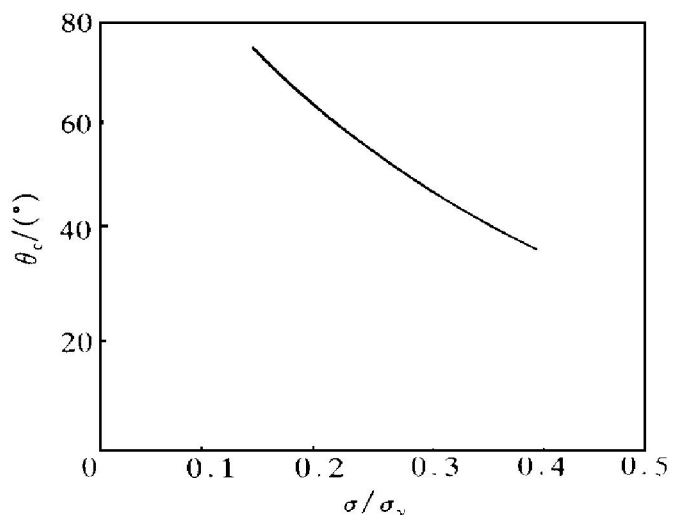


图 6 压应力对临界扩展角的影响

Fig. 6 Influence of compressive stress σ/σ_y on critical crack extension angle

3 结论

所设计的薄壁圆筒预裂纹冲击装置能成功引发尖锐的轴向裂纹, 当机械长槽沿周向时, 也能引发周向尖锐裂纹。实验结果表明, 压应力对高强度轴承钢的疲劳裂纹扩展规律有重大影响。扩展速率 da/dN 随压应力增加而迅速提高并较快达到失稳, 临界扩展角则随压应力增加而减小, 即裂纹将向有利于 I 型断裂的方

向扩展。这与理论分析结果是一致的。压应力增加时,由于泊松效应,引起纵向劈裂的 K_I 增加,从而使裂纹有利于向自相似扩展。材料疲劳裂纹扩展的门槛值对压应力并不十分敏感。研究结果也表明了压剪疲劳加载中,裂纹方向对试样失稳破坏至关重要,滚动接触部件内与压应力平行的微裂纹或缺陷是十分危险的。

REFERENCES

- 1 Forman R G. Engng Fracture Mech, 1972, 4: 333.
- 2 Head A K. Phil Mag, 1953, 44: 925– 958.
- 3 Glinka G. Int J Fatigue, 1982, 4: 59– 67.
- 4 Anatolovich S D *et al.* Engng Fracture Mech, 1975, 7: 649– 652.
- 5 Jehuda Tirosh and Elicatz. Eng Fract Mech, 1981, 14: 27– 38.
- 6 Muskhelishvili N T. Some Basic Problems in the Mathematical Theory of Elasticity. Noordhoff Groningen, Netherlands, 1953.
- 7 Lakehminaryana and Murthy. Int J Fract, 1976, 12: 547– 566.
- 8 Paris C and Erdogan F. J Bas Engng, 1963, D85: 528– 534.
- 9 Chen Feng(陈 枫). J of Central South University of Technology(中南工业大学学报), 1996, 28(5): 494– 498.

EXPERIMENTAL STUDY ON FATIGUE CRACK GROWTH OF HIGH STRENGTH STEEL SUBJECTED TO COMPRESSIVE SHEAR LOADING

Chen Feng and Sun Zongqi

*Opening Laboratory of Mechanics, Central South University of Technology,
Changsha 410083, P. R. China*

K. Zaremba

Department of Solid Mechanics, The Royal Institute of Technology, Stockholm 10044, Sweden

ABSTRACT High compressive shear stress beneath the contact point of ball bearing is the main reason for its fatigue failure. In order to obtain the knowledge of compressive shear fatigue crack growth, thir wall tube specimens with axial crack are used in the experiments. The specimens are loaded by a cyclic torque combined with different axial compressive stresses. The results show that fatigue crack growth rate and cracking angle are greatly affected by compressive stresses, the crack growth rate increases while cracking angle decreases with the increasing of compressive stresses. The threshold value seems insensative to compressive stresses. The results also show that fatigue crack growth tends to mode I fracture and become unstable at higher compressive stresses, which reveals that any microcracks or faults parallel to compressive stress are the most dangerous under fatigue loading.

Key words fatigue fracture threshold value stress intensity factor crack growth rate

(编辑 何学锋)