

## 胀断连杆用 C70S6 钢的高周疲劳性能

刘智雄<sup>1,2</sup> 陈思联<sup>2</sup> 张英建<sup>2</sup> 惠卫军<sup>1,2</sup> 刘荣佩<sup>1</sup>

(1 昆明理工大学材料科学与工程学院, 昆明 650093;

2 钢铁研究总院先进钢铁材料技术国家工程研究中心, 北京 100081)

**摘要** 采用旋转弯曲疲劳实验研究了胀断连杆用两种成分(% : 0.69C-0.034V- <0.005Ti-0.015N 和 0.72C-0.036V-0.023Ti-0.014N) C70S6 钢的高周疲劳性能。结果表明, 疲劳断裂均起源于试样的表面基体, 其高周疲劳性能主要受微观组织特别是珠光体片层间距的影响; 含 0.023% Ti 的 C70S6 钢中珠光体片层间距较大, 析出粗大 (Ti, V) (C, N), 导致 0.023% Ti 钢疲劳性能低于不含 Ti 的 C70S6 钢。

**关键词** C70S6 钢 高周疲劳性能 微观组织 胀断连杆

## High-Cycle Fatigue Properties of C70S6 Steel for Connecting Rod of Fracture Splitting

Liu Zhixiong<sup>1,2</sup>, Chen Silian<sup>2</sup>, Zhang Yingjian<sup>2</sup>, Hui Weijun<sup>1,2</sup> and Liu Rongpei<sup>1</sup>

(1 Faculty of Material Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 National Engineering Research Center of Advanced Iron and Steel Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** High-cycle fatigue properties of two C70S6 steels without and with Ti in steel (% : 0.69C-0.034V- <0.005Ti-0.015N and 0.72C-0.036V-0.023Ti-0.014N) for connecting rod of fracture splitting have been studied by using rotating-bending fatigue test method. Results show that all fatigue cracks initiated at matrix of surface of specimen, and the high-cycle fatigue properties are affected by micro-structure especially by interlamellar spacing of pearlite; the interlamellar spacing of pearlite in the steel C70S6 containing 0.023% Ti is larger than that in the Ti-free steel C70S6 in which there is coarse (Ti, V) (C, N) precipitates, therefore the fatigue properties of 0.023% Ti steel are lower than that of Ti-free steel.

**Material Index** C70S6 Steel, High-Cycle Fatigue Property, Microstructure, Connecting Rod of Fracture Splitting

连杆的机械加工工艺复杂, 精度要求高, 特别是连杆的大头孔。由于机械加工精度误差而造成连杆大头孔的失圆是影响发动机性能可靠性的一个重要因素。近年来国外开发的胀断(裂解)连杆技术解决了此问题。胀断连杆技术的原理是: 将整体锻造的连杆初加工后, 在大头孔内侧加工两条对称的沟槽, 形成宏观缺口。在加工过程中, 利用材料对缺口的裂纹敏感性, 采用专用的胀断模具使沟槽根部产生高度应力集中, 当应力增大到一定程度时, 沟槽根部产生裂纹并快速扩展, 在几乎不发生塑性变形的情况下实现连杆本体与连杆盖的分离。被胀断后的连杆体和连杆盖的断面为不规则的三维曲面, 两曲面可以完全啮合, 在之后的装配过程中保证了连杆大头孔的圆度。胀断连杆技术具有传统连杆加工工艺无法比拟的优越性, 其加工工序少, 节省精加工设备, 节材节能, 生产成本明显降低<sup>[1-5]</sup>。

胀断连杆技术要求材料在胀断过程中不能发生

过大的塑性变形, 使断口呈脆性断裂状态。国外用于胀断加工的连杆材料主要是粉末冶金材料、锻钢、球磨铸铁和可锻铸铁<sup>[3]</sup>。欧美最早采用的胀断连杆用钢是在 0.70% 碳钢基础上开发的高碳钢 SAE1070 或 C70S6, 其成分特点是低硅、低锰、添加微合金元素 V 和易切削元素 S; 合金元素范围很窄, 洁净度要求严格<sup>[1]</sup>。本试验选用工业生产及不同产地的 C70S6 钢, 进行旋转弯曲疲劳实验。

### 1 试验材料和方法

试验料为进口和国产的 C70S6 钢热轧态圆棒, 化学成分见表 1。将  $\Phi 65$  mm 棒材改锻为  $\Phi 18$  mm 的棒

表 1 C70S6 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test C70S6 steels /%

试样号	C	Si	Mn	P	S	V	Ti	O	N
7-1	0.69	0.21	0.55	0.013	0.071	0.034	<0.005	0.0009	0.015
7-2	0.72	0.23	0.58	0.010	0.067	0.036	0.023	0.0012	0.014

材。从  $\Phi 18$  mm 棒材上截取两组旋转弯曲疲劳试样坯料,每组附带 2 个拉伸样( $l_0 = 5 d_0, d_0 = 5$  mm),其中一组直接精加工成疲劳试样成品(标距段直径 5.97 mm,长度 30 mm),另一组经正火处理(950  $^{\circ}$ C 保温 30 min 后空冷)后再精加工成成品。两种试验料分别编号 7-1 和 7-2,后缀用“F”表示热锻态,用“N”表示正火态。

按照 GB/T4337-2008 在国产 PQ1-6 型旋转弯曲疲劳试验机上进行旋转弯曲疲劳试验,试验机为四点加力,试验速度 5 000 r/min,循环特征  $R = -1$ 。试验进行到试样发生断裂或旋转次数达到  $1 \times 10^7$  周次时为止。

从旋转弯曲疲劳试样的断口附近截取横向金相试样,分别在光学显微镜和日立 S-4300 型冷场发射扫描电镜(SEM)下观察微观组织。



图 1 C70S6 钢的典型微观组织形貌,7-2-F:  $< 0.005\% \text{ Ti}$ , 锻造

Fig. 1 Typical morphology of micro structure of steel C70S6, 7-2-F:  $< 0.005\% \text{ Ti}$ , forged

表 2 C70S6 钢微观组织参数的测试结果

Table 2 Measured results of microstructure parameters of C70S6 steels

编号	Ti 含量/ %	状态	铁素体含量 $V_f/\%$	原奥氏体晶粒 尺寸 $D/\mu\text{m}$	珠光体片层 间距 $S_0/\mu\text{m}$
7-1-F	$< 0.005$	锻态	4.71	63.9	0.281
7-1-N		正火态	5.81	58.0	0.298
7-2-F	0.023	锻态	1.79	67.1	0.378
7-2-N		正火态	2.22	60.1	0.344

表 3 C70S6 钢的力学性能

Table 3 Mechanical properties of C70S6 steels

编号	Ti 含量/ %	状态	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	断面收缩 率 $Z/\%$	屈强比 $R_{p0.2}/R_m$	疲劳极限 $\sigma_{-1}/\text{MPa}$	疲劳极限 比 $\sigma_{-1}/R_m$
7-1-F	$< 0.005$	锻态	908	563	33.5	0.620	404	0.445
7-2-N		正火态	890	550	35.0	0.618	394	0.443
7-2-F	0.023	锻态	933	548	33.8	0.587	379	0.406
7-2-N		正火态	938	528	31.3	0.563	386	0.412

## 2 试验结果与分析

### 2.1 微观组织和拉伸性能

试验料在热锻态和正火态下的金相组织均以片层状珠光体为主,少量的铁素体主要沿晶界呈断续网状分布(图 1)。由表 2 可见,相同状态、不同产地的试验钢,其铁素体含量和珠光体片层间距的差别较大,原奥氏体晶粒尺寸的差别较小。7-1 料铁素体含量略高,主要与其碳含量较低有关。试验钢的拉伸性能测定结果见表 3。这种高碳珠光体钢的锻态和正火态的拉伸性能的差异很少,碳含量较低的 7-1 料的抗拉强度略低于 7-2 料,但屈服强度和屈服比略高于 7-2 料。

### 2.2 高周疲劳性能

图 2 是试验钢的旋转弯曲疲劳试验的 S-N 曲线,试验结果汇总见表 3。4 批试验钢的疲劳性能差异较小。相同产地的 C70S6 钢,其热锻态和正火态的疲劳极限和疲劳极限比非常接近;在同一状态下,7-1 料的疲劳性能略高于 7-2 料。对试验料所有疲劳断口的 SEM 观察表明,疲劳断裂均起源于试样的表面基体,疲劳裂纹呈解理状扩展,且存在明显的片

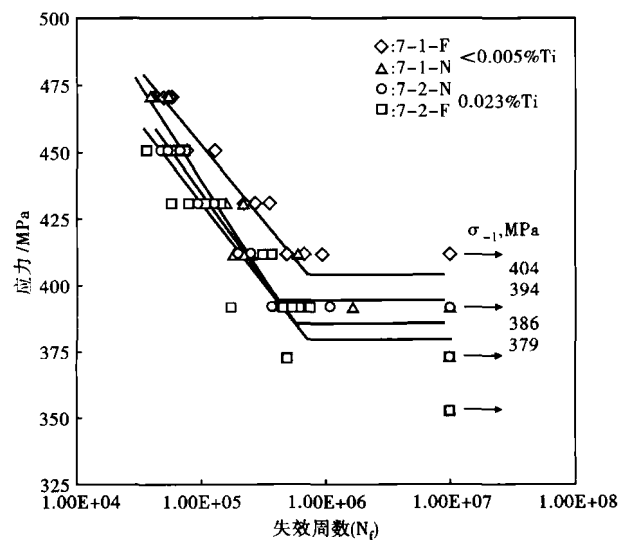


图 2 C70S6 钢的旋转弯曲疲劳 S-N 曲线

Fig. 2 S-N curves of rotating bending fatigue for steel C70S6

层状结构,这是疲劳裂纹在珠光体内扩展的结果,典型疲劳断口形貌见图 3。

## 3 讨论

铁素体 + 珠光体组织中,铁素体的硬度低于珠光体。在

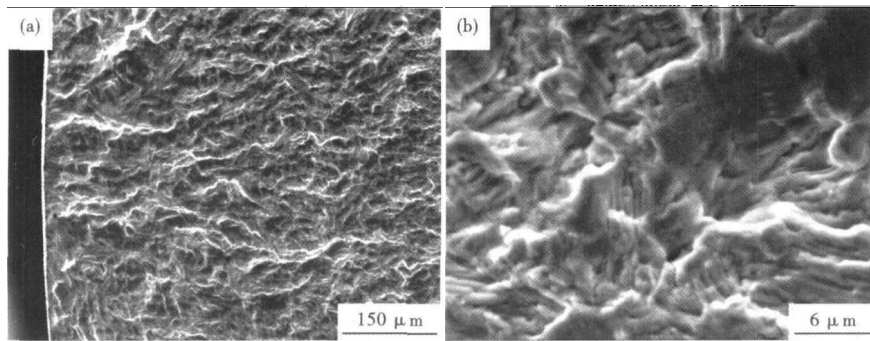


图3 C70S6 钢的基体表面疲劳断口的源区(a)和扩展区(b)的形貌,7-1-F, <0.005% Ti, 锻态,  $\sigma_a = 451$  MPa,  $N_f = 6.66 \times 10^4$

Fig.3 Morphology of initiated zone of fatigue fracture (a) at surface matrix of specimen and crack growth zone (b), C70S6 steel, 7-1-F,  $\leq 0.005\%$  Ti, forged,  $\sigma_a = 451$  MPa,  $N_f = 6.66 \times 10^4$

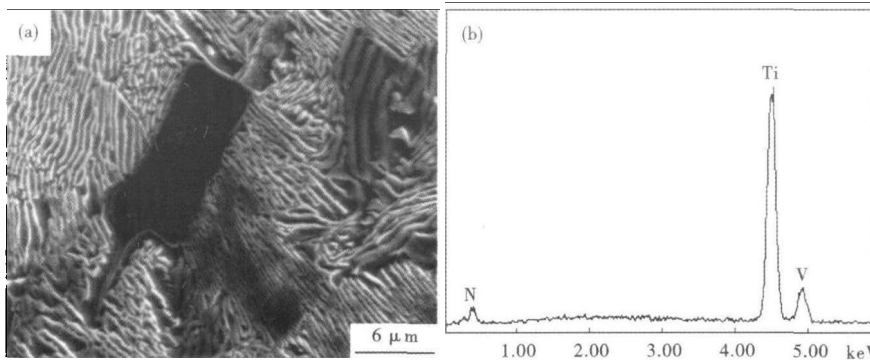


图4 C70S6 钢中粗大析出相的形貌(a)及其能谱(b),7-2,0.023% Ti

Fig.4 Morphology of coarse precipitated phase (a) and energy spectrum, C70S6 steel, 7-2, 0.023% Ti

此外,除微合金化元素 V 外,7-2 料中还添加了微合金化元素 Ti。在高温下,钢中的 C、N 优先与 Ti 结合,析出 Ti(C,N),消耗一部分 C 和 N;一部分 V 以已析出的 Ti(C,N)为形核,沉淀析出粗大稳定的 (Ti,V)(C,N)<sup>[9]</sup>,见图4。这亦可能是7-2 料疲劳性能低于7-1 料的另一个原因。

#### 4 结论

(1) C70S6 钢的旋转弯曲疲劳断裂均起源于试样的表面基体,其疲劳性能主要受微观组织特别是珠光体片层间距的影响。较粗大的珠光体片层间距和钢中加 Ti 形成的粗大 (Ti,V)(C,N) 析出相是7-2 料疲劳性能较差的主要原因。

(2) 相同产地的试验料在热锻态与正火态下的强度和疲劳性能相当。

国家科技支撑计划基金项目资助(2007BAE51B03)

循环应力的作用下,塑性滑移变形主要集中于铁素体中;而珠光体几乎不发生塑性滑移变形,因而在铁素体与珠光体的界面容易萌生疲劳早期裂纹并扩展。因此,强化铁素体、改善铁素体的分布状态和组织细化、均匀化是改善铁素体-珠光体型非调质钢疲劳性能的关键<sup>[6,7]</sup>。

与铁素体 + 珠光体型非调质钢不同,C70S6 钢为珠光体钢,其组织中铁素体含量极少,主要是片层状珠光体,因而其疲劳性能主要受珠光体组织特征的影响<sup>[8]</sup>。细化珠光体的片层间距,减少了平均自由滑移路程,降低位错塞积应力,使局部塑性应变降低,即降低引起渗碳体相断裂的应力。因此,珠光体片层间距较小的7-1 料的疲劳性能要优于片层间距较大的7-2 料。两种试验料锻态与正火态的强度和疲劳性能相当,这表明试验料中添加的微合金化元素 V、Ti 主要起晶粒细化的作用,而对析出强化的作用不明显。

#### 参考文献

- 曹正,史万富,王敢利,等.高碳微合金非调质钢连杆研究.汽车工艺与材料,2000(12):24
- 包雪鹏,刘善德,吴勇,等.C70S6 裂解连杆性能分析.轻型汽车技术,2008(3):25
- 张志强,杨慎华,金文明,等.C70S6 可裂解锻钢的微观组织和力学性能.新技术新工艺,2007(11):73
- Gu Z, Yang S, Ku S, et al. Fracture Splitting Technology of Automobile Engine Connecting Rod. Int J Adv Manuf Technol, 2005, 25: 883
- 姚贵升.汽车裂解连杆用钢的开发.汽车工艺与材料,2004(11):6
- 查小琴,惠卫军,雍岐龙,等.微观组织对中碳微合金非调质钢疲劳性能的影响.金属热处理,2007,32(6):94
- 查小琴,惠卫军,雍岐龙,等.钒对中碳非调质钢疲劳性能的影响.金属学报,2007,43(7):721
- 俞德刚.钢的强韧化理论与设计.上海:上海科学技术出版社,1990
- 董成瑞,任海翔,金同哲,等.微合金非调质钢.北京:冶金工业出版社,2000

刘智雄(1982-),男,在读硕士研究生。

收稿日期:2009-12-09