

Cr系汽车发动机连杆用钢 LG40Cr 的疲劳性能

梁娜 翟正龙 李小雄

(山东钢铁股份有限公司莱芜分公司特钢事业部, 莱芜 271105)

摘要 莱钢特钢事业部生产的连杆用钢 LG40Cr (成分: 0.40C, 0.24Si, 0.72Mn, 0.016P, 0.005S, 0.98Cr, 0.036Al) 的工艺流程为 50 t 电弧炉-60 t LF-VD-260 mm × 300 mm 连铸-连轧 Φ70 mm 棒材。用 30 支 LG40Cr 钢试样进行旋转弯曲疲劳试验, 试验前试样经 860 °C 油淬 + 570 °C 回火处理, 其屈服、抗拉强度、伸长率和断面收缩率分别为 835 ~ 840 MPa, 1 030 ~ 1 040 MPa, 14% ~ 15% 和 48% ~ 49%。钢中非金属夹杂为 0 ~ 1.0 级。圆柱形试样在 400 ~ 600 MPa 9 个应力下采用 4 点加力的方式进行试验, 测试其 S-N 曲线, 计算疲劳极限, 并分析 420 MPa, 500 MPa 两应力下的疲劳断口形貌。试验结果表明, 材料具有良好的强塑性匹配, 内部质量良好, 洁净度较高, 对应于 1.0×10^7 疲劳寿命, LG40Cr 钢试样的疲劳极限可达 427 MPa。

关键词 连杆用钢 LG40Cr 旋转弯曲疲劳性能 断口形貌 S-N 曲线

Fatigue Property of Cr Series Steel LG40Cr for Connecting Rod of Auto Engine

Liang Na, Zhai Zhenglong and Li Xiaoxiong

(Special Steel Division, Laiwu Branch Co, Shandong Iron & Steel Co Ltd, Laiwu 271105)

Abstract The steel LG40Cr for connecting rod (成分: 0.40C, 0.24Si, 0.72Mn, 0.016P, 0.005S, 0.98Cr, 0.036Al) is produced by 50 t EAF-60 t LF-VD-260 mm × 300 mm bloom concasting-continuous rolling Φ70 mm round bar process flow sheet at Laiwu Special Steel Division. 30 samples of steel LG40Cr are used to carry out rotating bending fatigue test, and before test the samples are heat-treated by oil quenched at 860 °C + tempered at 570 °C, and their yield and tensile strength, elongation and reduction of area are respectively 835 ~ 840 MPa and 1 030 ~ 1 040 MPa, and 14% ~ 15% and 48% ~ 49%. The ratings of nonmetallic inclusion in steel are 0 ~ 1.0. The test of cylindrical specimen is carried out at 9 stress (400 ~ 600 MPa) by 4 loading point, the S-N curve and the fatigue limit are measured and calculated and the morphology of fatigue fracture of samples at both stress 420 MPa and 500 MPa is analyzed. Test results show that the test material has nice combination of strength and plasticity, good interior metallurgy quality and higher cleanliness, and corresponding to 1.0×10^7 fatigue life the fatigue limit of the steel LG40Cr samples is up to 427 MPa.

Material Index Steel LG40Cr for Connecting Rod, Rotating Bending Fatigue Property, Morphology of Fracture, S-N Curve

连杆在发动机中做复杂的平面运动, 小头随活塞作上下往复运动, 大头随曲轴作高速回转运动, 杆身在大、小头运动的合成下作复杂的摆动。因此, 连杆在工作过程中承受着很高的周期性冲击力、惯性和弯曲力, 疲劳性能对于连杆至关重要, 直接影响到发动机的性能。目前, 国内连杆用钢主要为 45、40Cr、35CrMoA、42CrMoA 等调质钢以及 35MnVS、C70S6、SVdH20S1、S45CVMn 等非调质钢^[1-3]。

旋转弯曲疲劳试验又称 Nakamura test (中村试验), 主要用途是对材料的洁净度进行评估, 也可以用来绘制材料的 S-N 曲线, 测定材料的疲劳极限, 常用于测试连杆用钢的疲劳性能^[4-5]。

1 试验材料和方法

试验材料为莱钢特钢事业部生产的 LG40Cr, 生产工艺为: 50 t 电弧炉冶炼 → 60 t LF → 60 t VD 真空

脱气 → 连铸 → 轧制成材。在生产过程中, 为了满足钢材高洁净度、高均匀性的要求, 严格控制 P、S 及气体含量, 控制夹杂物形态。在电弧炉冶炼过程中, 严格脱氧脱磷操作, 控制终点的 [C]、[P] 成分及出钢温度; 精炼过程保持白渣, 按照成分标准要求加入合金, 喂入铝线和钙线, 加强脱氧和钙化处理; 精炼后进行真空处理、软吹氩, 软吹氩时严禁钢水裸露和大氩气量搅拌降温; 连铸全程长水口保护浇铸, 采用结晶器电磁搅拌和末端电磁搅拌, 控制中间包过热度, 连铸坯规格 260 mm × 300 mm; 轧制过程控制加热温度和加热时间, 保证钢坯加热均匀, 成材规格 Φ70 mm。钢材的化学成分如表 1 所示, 钢材的力学性能和非金属夹杂物检验结果如表 2 所示。

疲劳试验坯料尺寸为 Φ16 mm × 165 mm, 经调质处理 (淬火 860 °C / 油 + 回火 570 °C) 后送往中国科学院金属研究所进行精加工和疲劳试验, 精加工

后试样的尺寸如图 1 所示。对 30 支 LG40Cr 钢试样进行旋转弯曲疲劳试验,利用 PQ1-6 弯曲疲劳试验机依据 GB/T4337-2008 标准采用圆柱形试样 4 点加力的方式进行试验,试验频率 5 000 r/min,测试其应

表 1 LG40Cr 钢的化学成分/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
0.40	0.24	0.72	0.016	0.005	0.98	0.02	0.03	0.004	0.036

表 2 LG40Cr 钢的非金属夹杂物和力学性能

Table 2 Rating of nonmetallic inclusions and mechanical properties of steel LG40Cr

非金属夹杂物/级										屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	断面收缩 率/%			
A	Ae	B	Be	C	Ce	D	De									
1	1	0.5	0	0	0.5	0	0	0	0	0.5	0	0	835 ~ 840	1 030 ~ 1 040	14 ~ 15	48 ~ 49

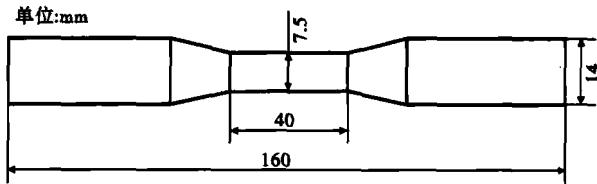


图 1 疲劳试验的试样尺寸

Fig. 1 Size of specimen for fatigue test

力-疲劳寿命(S-N)曲线(含疲劳极限)。应力比 -1,最长寿命 1.0×10^7 ,设计试验应力为 400、420、440、460、480、500、520、540、600 MPa。

2 试验结果及分析

2.1 疲劳极限及 S-N 曲线

试验结果如图 2 所示,从图 2 中可以看出,对应于 1.0×10^7 有 6 个试样没有断裂,按照 GB/T24176-2009《金属材料疲劳试验数据统计方案与分析方法》中的规定,用升降法计算对应于 1.0×10^7 的疲劳极限。用升降法求疲劳极限的数据,则 0 水平下的应力 $S_0=400$ MPa,相关事件数 f_i 如表 3 所示。

则得到对应于 1.0×10^7 的疲劳极限(中值)及其标准偏差,见公式(1)、(2)。

疲劳极限:

$$\hat{\mu}_y = S_0 + d \left(\frac{A}{C} - \frac{1}{2} \right) = 427 \text{ MPa} \quad (1)$$

标准偏差:

$$\hat{\sigma}_y = 1.62d(D + 0.029) = 14.17 \text{ MPa} \quad (2)$$

其中:

$$A = \sum_{i=1}^i i f_i = 13; B = \sum_{i=1}^i i^2 f_i = 27; C = \sum_{i=1}^i f_i = 7;$$

$$D = \frac{DC - A^2}{C^2} = \frac{27 \times 7 - 13^2}{7^2} = 0.4082$$

式中: $\hat{\mu}_y$ - 疲劳极限/MPa; $\hat{\sigma}_y$ - 标准偏差/MPa; d- 试

表 3 升降法求疲劳极限的数据分析

Table 3 Analysis on data of fatigue limit by up and down method

应力 S_i /MPa	水平 i	f_i	$i f_i$	$i^2 f_i$
460	3	1	3	9
440	2	4	8	16
420	1	2	2	2
400	0	0	0	0
总和		7	13	27

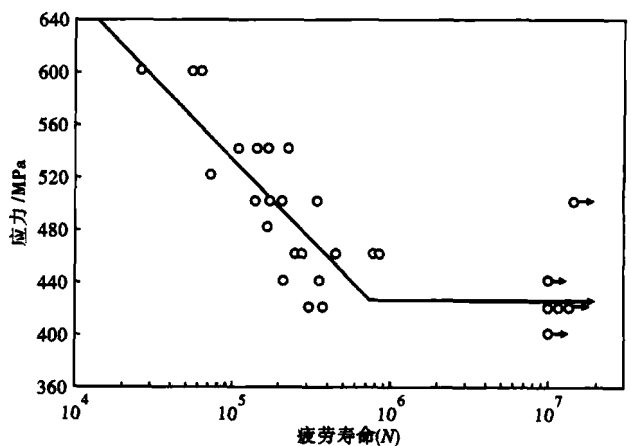


图 2 LG40Cr 钢的 S-N 曲线

Fig. 2 S-N curve of steel LG40Cr

样受力部位直径/mm。

2.2 疲劳断口分析

用扫描电镜分析 420、460、500、540 MPa 四个应力下的断裂试样的断口形貌。460、500、540 MPa 三个应力下的断口形貌及机理相似,图 3(a,b)所示为 500 MPa 应力作用的断口形貌。从图 3(a,b)中可以看出,在旋转弯曲应力作用下,试样表面所受应力最大,中心最小,疲劳源开始于表面,如图 3(a)所示,疲劳源两侧裂纹发展速度较中心快,贝纹线比较扁平,呈发散状。瞬断区在疲劳源对面,但相对于轴的旋转方向逆偏转一个角度,如图 3(a)b,从 a,b 疲劳源的相对角度来看旋转方向为逆时针。疲劳裂纹呈解理状扩展,且存在明显的片层状结构,从片层上

可以看到明显的、连续的疲劳辉纹。断口瞬断区有明显韧窝,材料的强塑性配合良好,韧性可以有有效的延长材料的疲劳性能。

在 420 MPa 应力作用下,多数试样没有断裂,但断裂试样的疲劳寿命仅为 10^5 ,分析断裂试样的疲劳断口形貌,如图 3 (c)(d)所示。从图 3(c)(d)中可以看出,与其他稍高应力下所不同的是,420 MPa 试样断口的疲劳源和瞬断区呈现出不同的状态,有两个疲劳源,如图 3 (c)a1、(c)a2,瞬断区在轴的內部连成一片,这主要是应力集中较大引起的。当应力集中较大时,沿轴向同时有几个疲劳源产生,瞬断区的位置在轴的內部,试样的疲劳辉纹呈交叉状。这很有可能是由于材料表面有加工缺陷造成的,因此出现了 420 MPa 下不同试样疲劳寿命相差较大的情况。

3 结论

(1) 连杆用钢 LG40Cr 圆柱形试样在 9 个应力下,4 点加力的方式进行旋转弯曲疲劳试验,对应于 1.0×10^7 的疲劳寿命,疲劳极限为 427 MPa,满足钢材不小于 350 MPa 的标准要求;材料具有良好的内部质量和较高的洁净度。

(2) 从材料 420、500 MPa 两应力下的断口分析来看,材料的强塑性匹配较好,420 MPa 应力作用下试样断裂的原因是由于出现了 2 个疲劳源所致,可能是由于机加工缺陷造成的。

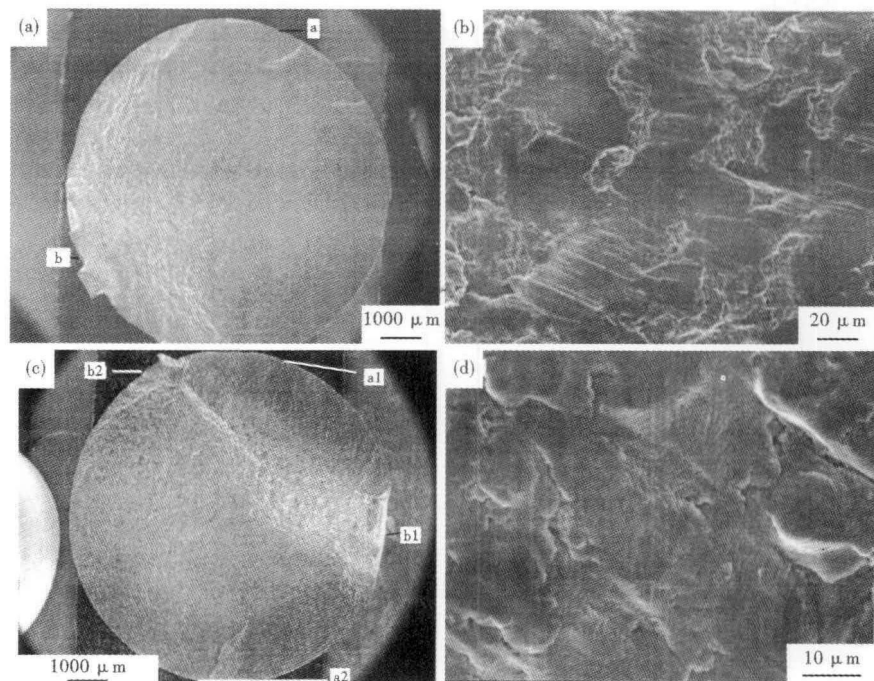


图 3 应力 500 MPa(a)(b)和 420 MPa(c)(d) LG40Cr 钢疲劳试样断口形貌
Fig. 3 Morphology of fatigue sample fracture of steel LG40Cr with stress 500 MPa (a) (b) and 420 MPa (c) (d)

参考文献

- [1] 曹 正. 汽车发动机连杆材料的现状及发展趋势[J]. 汽车工艺与材料,2007(1):7-10.
- [2] 王秋冰,马 鸣,卢震鸣,等. 发动机连杆用材料与工艺的发展趋势[J]. 柴油机设计与制造,2007,15(1):40-44.
- [3] 李 鹏. 国外汽车发动机连杆材料最新应用[J]. 汽车工艺与材料,2010(1):42-45.
- [4] 刘智雄,陈思联,张英建,等. 胀断连杆用 C70S6 钢的高周疲劳性能[J]. 特殊钢,2010,31(3):68-70.
- [5] 刘智雄,惠卫军,陈思联,等. 胀断连杆用中碳非调质钢的高周疲劳性能[J]. 钢铁研究学报,2011,23(6):49-53.

梁 娜(1982-),女,硕士,工程师,2007 年昆明理工大学毕业,特殊钢的工艺技术及产品开发工作。
E-mail:wdhlp77@126.com

收稿日期:2012-12-30

下 期 要 目

菱镁矿基脱硫剂铁水预脱硫过程的热力学分析	刘 坤等
推/张力轧制不锈钢/碳钢复合钢筋的有限元模拟与实验研究	高亚男等
基于改善 30CrMo 钢大棒材心部致密度轧制工艺有限元模拟	王东兴等
高镁铝酸钙型预熔精炼渣配加合成渣以及 Al 对低碳钢深脱硫的研究	朱子江等
MgO-C-S(FeS)反应的热力学过程	刘 坤等
淮钢特殊钢大型圆坯连铸工艺装备特点及实践	王忠英等
防止 Q195L 热轧窄带钢边裂的工艺实践	路文刚等
国内 1215 系低碳高硫易切削钢的工艺流程和内部质量控制	林腾昌等