

# 40CrMnSiMoVA 钢棒材和锻材裂纹扩展特性对比分析

Comparison Analysis for 40CrMnSiMoVA Bar and Forging Crack Growth Character

李淑兰, 徐人平  
(昆明理工大学, 昆明 650224)  
LI Shu-lan, XU Ren-ping  
( Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

摘要: 在分析 40CrMnSiMoVA 钢棒材和锻材力学性能的基础上, 对其裂纹扩展特性进行了统计分析, 并对其均值和方差进行了假设检验。结果表明: 两种材料的裂纹扩展速率和寿命均随着裂纹的增加而增加; 其裂纹扩展寿命的分散性均随裂纹长度的增加而减少; 而其裂纹扩展速率的分散性, 先随裂纹长度的增加而减小, 达到一定程度后则随裂纹长度的增加而增加。锻材的分散性大于棒材。该结论对于了解该材料的裂纹扩展性能, 合理使用材料均有积极的意义。

关键词: 材料试验; 对比分析; 40CrMnSiMoVA; 寿命; 裂纹扩展速率  
中图分类号: TB302.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)04-0019-04

**Abstract:** Based on study of mechanical performance of 40CrMnSiMoVA bar and forging, their crack growth character is statistically analyzed, mean value and variance are statistically tested. The result showed that crack growth rate and life of both material increase with crack increase, the divergence of crack growth life increases with crack length increases, the divergence of crack growth rate decreases at the beginning and increases in the end with crack length increase. The divergence of 40CrMnSiMoVA forging is larger than that of bar material. The results can be used for material selection and application.

**Key words:** material test; comparison analysis; 40CrMnSiMoVA; life; crack growth character

40CrMnSiMoVA 钢是中国自行研制的无镍低合金超高强度钢。该钢具有良好的工艺性能和综合力学性能, 经淬火加低温回火后有高的强度和良好的抗疲劳断裂性能, 适宜制造高强度结构件、轴类零件和螺栓等重要受力结构部件。有文献<sup>[1]</sup>报道, 用该钢制造的受力零件, 其受力方向应与材料的纤维方向一致, 对于形状复杂的零件, 应采用模锻件, 已有一些文献<sup>[1]</sup>报导了 40CrMnSiMoVA 钢的断裂韧性, 裂纹扩展速率, 应力强度因子门槛值等。但至今对其各向异性时的裂纹扩展特性及其相互间的关系研究甚少。本工作通过对 40CrMnSiMoVA 钢棒材和锻材在同一裂纹长度时寿命和裂纹扩展速率的统计分析, 比较了该钢在不同状

态下的裂纹扩展的统计特性, 从而在机械设计时能够正确地使用该钢材。

## 1 试验方法和基本数据

本试验的实施和数据分析按照《金属材料力学性能表达准则》和《金属材料疲劳试验统计分析方法》进行, 具体试验在以下条件下进行:

- (1) 原材料规格:  $\phi 180\text{mm}$  棒材和  $\phi 180\text{mm}$  棒材改锻成试样毛坯。
- (2) 化学成分: 试验用材料的化学成分列于表 1。
- (3) 取样与形状: 试样的形状及取样方法见表 2。

表 1 化学成分  
Table 1 Chemical composition of 40 CrMnSiMoVA steel

Composition	C	Si	Mn	S	Cr	P	V	Mo
Mass fraction/ %	0.38	1.25	0.95	0.014	1.46	0.013	0.10	0.52

表 2 试样的取样方法

Table 2 Orietation and size of specimen

Specification	Sampling method	Sample	B/mm	W/mm
Bar	L-C	CT	20	80
Forging	L-T	CT	20	80

(4) 热处理工艺: 920℃加热, 190℃等温 1h, 260℃回火 3h。

(5) 力学性能: 试样的力学性能见表 3。

表 3 试样的力学性能

Table 3 Mechanical properties of 40CrMnSiMoVA steel

Specification	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%	$\psi$ /%
Bar	1815	1503	11.6	47.6
Forging	1819	1496	12.1	50.1

表 4 40CrMnSiMoVA 棒材和锻材对数裂纹扩展寿命(lgN)

Table 4 Logarithmic life of crack growth (lgN) for 40CrMnSiMoVA bar and forging

No	Crack length/mm	Bar					Forging				
		Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
1	32	4.4623	4.4149	4.4406	4.5020	4.5283	4.5063	4.5385	4.4918	4.4944	4.4856
2	33	4.5290	4.4934	4.5144	4.5701	4.5965	4.5771	4.6116	4.5662	4.5755	4.5641
3	34	4.5831	4.5551	4.5712	4.6249	4.6506	4.6350	4.6701	4.6280	4.6434	4.6213
4	35	4.6270	4.6046	4.6177	4.6686	4.6938	4.6828	4.7203	4.6785	4.7012	4.6688
5	36	4.6639	4.6457	4.6562	4.7044	4.7293	4.7241	4.7628	4.7179	4.7441	4.7085
6	37	4.6961	4.6814	4.6905	4.7346	4.7600	4.7598	4.7967	4.7545	4.7747	4.7427
7	38	4.7248	4.7114	4.7207	4.7614	4.7871	4.7902	4.8252	4.7845	4.8057	4.7727
8	39	4.7498	4.7361	4.7467	4.7845	4.8115	4.8164	4.8498	4.8103	4.8330	4.7998
9	40	4.7703	4.7594	4.7685	4.8053	4.8333	4.8401	4.8710	4.8328	4.8571	4.8247
10	41	4.7886	4.7788	4.7872	4.8232	4.8524	4.8605	4.8909	4.8522	4.8777	4.8460
11	42	4.8045	4.7955	4.8029	4.8390	4.8679	4.8784	4.9088	4.8689	4.8955	4.8642
12	43	4.8184	4.8100	4.8167	4.8528	4.8814	4.8941	4.9250	4.8836	4.9115	4.8802
13	44	4.8317	4.8227	4.8290	4.8649	4.8935	4.9079	4.9393	4.8964	4.9263	4.8936

$x_{ji}$  数据相互交叉, 难以判断裂纹扩展寿命的大小。

取对数裂纹扩展循环数  $x_{ji} = \lg N_{ji}$  为随机变量, 并将对应的同一  $a_j$  的不同  $x_{ji}$  作为一个子样进行统计处理。当给定  $j$  时, 由  $i$  个试件  $x_{ji}$  可以得到子样平均值  $\bar{x}_j$  和子样标准差  $s_j$ 。

$$\bar{x}_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r x_{ji} \tag{1}$$

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^r x_{ji}^2 - \frac{1}{r} (\sum_{i=1}^r x_{ji})^2}{r-1}} \tag{2}$$

$$C_{ij} = \frac{S_j}{\bar{x}_j} \tag{3}$$

2 裂纹扩展寿命统计分析与对比

采用成组试验法求解  $P$ - $a$ - $N$  曲线, 将 40CrMnSiMoVA 钢棒材试件 5 个和锻材试件 5 个分别在以下条件进行试验:

加载条件: 轴向加载,  $R = 0.1$ ,  $P_{max} = 1.96 \times 10^4 N$

试验频率:  $f = 13.33 Hz$

试验温度: 室温, 15~ 25℃

相对湿度: 70% ~ 80%

测得  $r$  个试件在上述同一循环载荷作用下, 裂纹从初始长度  $a_0$  扩展到指定裂纹长度  $a_j$  的循环数  $N_{ji}$ , 其中  $i = 1, 2, 3, \dots, r$ , 表示试件序号, 共有  $r$  个试件,  $j = 1, 2, \dots, m$ , 表示指定裂纹长度  $a_j$  共有  $m$  个。其对数裂纹扩展循环数  $x_{ji} = \lg N_{ji}$  (见表 4), 10 个试件 (棒材试件 5 个, 锻材试件 5 个) 对数裂纹扩展循环数

具有存活率 99.9% 的对数裂纹扩展循环数  $x_{j, 99.9}$  用下式计算:

$$\bar{N}_j = 10^{\bar{x}_j} \tag{4}$$

平均裂纹扩展循环数为:

$$\bar{N}_j = 10^{\bar{x}_j} \tag{5}$$

具有存活率 99.9% 的安全裂纹扩展循环数为:

$$N_{j, 99.9} = 10^{x_{j, 99.9}} \tag{6}$$

将  $\bar{x}_j, s_j, x_{j, 99.9}$  列于表 5。从表 5 可以看到:

(1) 棒材和锻材的对数裂纹扩展寿命的均值随着裂纹长度的增加而增加, 其中锻材的均值比棒材的均值增长得快, 锻材的对数裂纹扩展寿命均值均大于棒

材的均值;

(2) 棒材和锻材的对数裂纹扩展寿命的方差均随着裂纹长度的增加而减小, 而锻材的方差比棒材的方差减小得慢, 但从总体分析, 锻材的方差均大于棒材的

方差。

(3) 由于上述原因, 故棒材和锻材 99.9%存活率的安全寿命  $x_{j, 99.9}$  随裂纹长度增长的速度均比中值寿命快, 其中, 锻材更比棒材增长得快。

表 5 40CrMnSiMoVA 棒材和锻材裂纹扩展寿命(lgN) 数字特征  
Table 5 Number character of crack growth life(lgN) for 40CrMnSiMoVA bar and forging

No	Crack length / mm	Bar			forging		
		$\bar{x}$	$s$	$x_{j, 99.9}$	$\bar{x}$	$s$	$x_{j, 99.9}$
1	32	4.4696	0.0168	4.4177	4.5033	0.0188	4.4452
2	33	4.5407	0.0141	4.4971	4.5784	0.0176	4.5240
3	34	4.5970	0.0125	4.5584	4.6396	0.0169	4.5874
4	35	4.6423	0.0112	4.6077	4.6903	0.0183	4.6338
5	36	4.6799	0.0101	4.6490	4.7318	0.0193	4.6722
6	37	4.7125	0.0089	4.6850	4.7657	0.0186	4.7082
7	38	4.7411	0.0082	4.7158	4.7957	0.0182	4.7395
8	39	4.7659	0.0078	4.7418	4.8291	0.0176	4.7675
9	40	4.7874	0.0077	4.7636	4.8451	0.0168	4.7932
10	41	4.8060	0.0076	4.7825	4.8655	0.0166	4.8142
11	42	4.8220	0.0075	4.7988	4.8832	0.0166	4.8319
12	43	4.8359	0.0074	4.8130	4.8989	0.0170	4.8464
13	44	4.8484	0.0072	4.8262	4.9127	0.0176	4.8583

3 裂纹扩展速率的统计分析 with 对比

点, 用切线法确定各点处的曲线斜率, 结果列于表 6。由表可见, 10 个试件的裂纹扩展速率数据也相互交叉, 难以比较并做出结论。

采用成组法, 在每个试件的  $\alpha-N$  曲线上取  $m$  个

表 6 40CrMnSiMoVA 棒材和锻材裂纹扩展速率( da/ dN)  
Table 6 Crack growth rate ( da/ dN) for 40CrMnSiMoVA bar and forging

No	Crack length / m m	Bar( $\times 10^{-4}$ )					Forging( $\times 10^{-4}$ )				
		Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
1	35	2.5535	2.4149	2.4668	2.3979	2.2622	2.0503	1.8825	2.0487	1.8997	2.1526
2	36	2.7313	2.6209	2.6387	2.6190	2.4422	2.1888	2.0617	2.2163	2.0840	2.3055
3	37	2.9399	2.8499	2.8354	2.8381	2.6145	2.3417	2.2663	2.4066	2.2315	2.4395
4	38	3.1947	3.1038	3.0800	3.0741	2.7888	2.5123	2.4700	2.6199	2.4146	2.5745
5	39	3.5072	3.3938	3.4008	3.3282	3.0107	2.7086	2.6601	2.8662	2.5921	2.7382

采用类似公式(1)– (3)的方式, 对其进行统计处理, 得到不同裂纹长度时的裂纹扩展速率均值( $\bar{x}$ ), 标准差( $S$ )和变异系数( $c_v$ ), 见表 7。

分析表 7 数据可以明显地看出:

(1) 无论是棒材还是锻材, 其裂纹扩展速率均值均随着裂纹长度的增加而增加, 棒材的均值普遍大于锻材的均值。

(2) 无论是棒材还是锻材, 其裂纹扩展速率的方差, 先随着裂纹长度的增加而减小, 达到一定程度后随

着裂纹长度的增加而增加(个别数据除外), 对于棒材和锻材作比较, 棒材的方差远小于锻材的方差。

(3) 对于变异系数也有类似方差的现象。

4 裂纹扩展寿命和裂纹扩展速率的假设检验

4.1 裂纹扩展寿命的假设检验

从上述讨论中可以看出, 棒材和锻材的对数裂纹扩展寿命均值很接近, 锻材稍大些, 棒材和锻材的对数

表 7 40CrMnSiMoVA 棒材和锻材裂纹扩展速率( da/ dN) 数字特征

Table 7 Number character of crack growth rate ( da/ dN) for 40CrMnSiMoVA bar and forging

No	Crack length / mm	Bar			forging		
		$\bar{x}(\times 10^{-4})$	$S(\times 10^{-6})$	$c_v$	$\bar{x}(\times 10^{-4})$	$S(\times 10^{-6})$	$c_v$
1	35	2.4191	0.9531	0.0394	2.0068	10.1809	0.0507
2	36	2.6104	0.9369	0.0359	2.1711	8.9455	0.0412
3	37	2.8156	1.0767	0.0382	2.3371	7.9374	0.0340
4	38	3.0483	1.3677	0.0449	2.5183	7.2943	0.0290
5	39	3.3281	1.6877	0.0507	2.7130	9.1148	0.0336
6	40	3.6655	1.9413	0.0530	2.9334	12.4720	0.0425
7	41	4.0462	2.0364	0.0503	3.1927	16.9092	0.0530

裂纹扩展寿命标准差也很接近,棒材稍大于锻材,那么从统计分布的角度上分析,二者是否有显著差别呢,需要对其进行假设检验。

首先进行两个总体的方差比较,由于对数裂纹扩展寿命服从正态分布,因此可以考虑如下检验问题:

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2, H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$

当  $H_0$  成立时, 则有:

$$\frac{(n_2-1)n_1S_1^2}{(n_1-1)n_2S_2^2} \sim F_{(n_1-1, n_2-2)}$$

计算不同裂纹长度的  $\frac{(n_2-1)n_1S_1^2}{(n_1-1)n_2S_2^2}$  的值并列于表 8。

然后, 确定临界值, 给定置信度水平  $\alpha=0.05$ , 查表得  $F_{4.4}(0.05)=6.39$ 。表 8 中不同裂纹长度的  $\frac{(n_2-1)n_1S_1^2}{(n_1-1)n_2S_2^2}$  的值均小于 6.39, 均接受  $H_0$ 。可以认为棒材和锻材的裂纹扩展寿命方差无显著性差异。然后, 进行两个总体的均值比较, 由于试样数相等, 可采用配对试验的  $t$  检验法考虑如下检验问题。

$z_i = x_{\text{棒}i} - x_{\text{锻}i}$

$z_i$  为总体  $z$  服从正态  $N(d, \sigma)$  的子样, 此时  $\bar{x}_{\text{棒}}$  与  $\bar{x}_{\text{锻}}$  是否相等的检验就等价于下述假设检验:

$H_0: d = 0, H_1: d \neq 0$

当  $H_0$  成立时, 则有:

$$\sqrt{n-1} \frac{\bar{z}}{s} \sim t_{(n-1)}$$

计算不同裂纹长度时  $\sqrt{n-1} \frac{\bar{z}}{s}$  的值并列于表 8。

确定临界值, 给定置信度水平  $\alpha=0.05$ , 查表得  $t_4(0.05)=2.776$ , 给定置信度水平  $\alpha=0.02$ , 查表得  $t_4(0.02)=3.747$ , 表 8 中不同裂纹长度的  $\sqrt{n-1} \frac{\bar{z}}{s}$  的值均小于 3.747 大于 2.776。因此, 在置信水平在 0.2 时, 可以认为二者无显著性差异, 但在置信水平在

0.05 时, 二者有显著性差异。

表 8 40CrMnSiMoVA 棒材和锻材对数裂纹扩展寿命 lgN 分布检验

Table 8 Distribution examination crack growth logarithmic life (lgN) for 40CrMnSiMoVA bar and forging

No	Crack length / mm	$t$ distribution	$F$ distribution
		examination value	examination value
1	32	1.1908	4.7281
2	33	1.4706	4.5441
3	34	1.7929	4.3656
4	35	2.1067	3.3429
5	36	2.3359	2.7020
6	37	2.4752	2.5791
7	38	2.6362	2.4726
8	39	2.7908	2.5044
9	40	2.9787	2.7436
10	41	3.1062	2.7940
11	42	3.2407	2.7015
12	43	3.3625	2.5584
13	44	3.4351	2.3427

4.2 裂纹扩展速率假设检验

用同样的方法计算裂纹扩展速率  $\frac{(n_2-1)n_1S_1^2}{(n_1-1)n_2S_2^2}$  和  $\sqrt{n-1} \frac{\bar{z}}{s}$  的值并列于表 9, 同样给定置信度水平  $\alpha=0.05$ , 查表得  $F_{4.4}(0.05)=6.39$ ,  $t_4(0.05)=2.776$ 。由于表 9 中的  $\frac{(n_2-1)n_1S_1^2}{(n_1-1)n_2S_2^2}$  的值均小于 6.39,  $\sqrt{n-1} \frac{\bar{z}}{s}$  的值均大于 2.776, 也大于 3.747, 可以认为棒材和锻材的裂纹扩展速率的方差无显著差异, 但其均值有显著性差异。

(下转第 46 页)

由图 3 明显可见不加超声波时施镀 1min 无铜层新增,其诱导期为 1~ 2min。而加入超声波,在施镀 1 分钟时不论超声波功率如何均有铜层增厚,且随超声波功率增加,铜层增厚量加大。这进一步说明了图 2 中,在当聚氨酯泡沫仅在钽活化情况下直接加超声波镀,比预镀 5min 后加超声波镀速要慢,原因是钽核被超声波震掉。由图 3 还可看出在施镀时间相同的情况下,随超声波功率的增大,镀层增重加大,在超声波功率 40% 以前镀速明显增大,但在 40% ~ 100% 功率之间随功率增加,镀层增重率增加缓慢。

3 结论

- (1) 镀铜层连续相一旦形成,超声波对镀液的“激活”作用能明显提高镀速,随超声波功率增加镀速提高,但超声波功率超过 40% ,镀层厚度增加缓慢。
- (2) 当在聚氨酯泡沫上经钽核活化后进行化学镀铜时,初始阶段便直接施加超声波,由于钽核被震掉而减慢初期铜层的形成。
- (3) 初始阶段不加超声波直接进行化学镀铜,即预

镀 5min 后施加 100% 的超声波的“复合工艺”可大大提高镀层的质量及镀速。  
(4) 加载超声波能提高镀层的连续性,减小漏镀现象及表面的裂纹产生。

参考文献

[ 1 ] ASHBY M F, EVANS A G, FLECK N A, et al. Metal foams: a design guide [ M ]. Oxford : Butterworth- Heinermann, 2000.  
[ 2 ] 罗远辉. 泡沫铜制备工艺研究[ J]. 有色金属, 2002, 11(4) : 17- 20.  
[ 3 ] 荆慧, 吕广庶. 聚氨酯泡沫化学镀的前处理工艺的改进[ J]. 电镀与涂饰, 2005, 11: 12- 14.  
[ 4 ] BANHART J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams [ J]. Progress in Materials Science, 2001, 46( 2) : 559- 632.

收稿日期: 2007-08-02; 修订日期: 2007-12-21  
作者简介: 赵鹏( 1981—), 男, 在读硕士研究生, 助理工程师, 主要从事泡沫金属的研制及应用开发工作, 联系地址: 北京市学院南路 76 号中国钢研科技集团公司 4# 信箱( 100081)。E-mail: ciliuti@sina.com

(上接第 22 页)

表 9 40CrMnSiMoVA 棒材和锻材裂纹扩展速率( da/ dN) 分布检验  
Table 9 Distribution examination of crack growth rate ( da/ dN ) for 40CrMnSiMoVA bar and forging

No	1	2	3	4	5	6	7
Crack length / mm	35	36	37	38	39	40	41
t distribution examination value	5. 2849	5. 6781	5. 7941	6. 0144	6. 3743	6. 8701	7. 1841
F distribution examination value	0. 8765	1. 0944	1. 8401	3. 5155	3. 4285	2. 4229	1. 4504

5 结论

- (1) 无论是棒材还是锻材, 其裂纹扩展速率和寿命均随着裂纹的增加而增加, 在裂纹扩展初期, 棒材的寿命稍小于锻材, 但由于棒材的裂纹扩展速率稍大于锻材, 导致了在裂纹扩展末期棒材的寿命远小于锻材。
- (2) 无论是棒材还是锻材, 其裂纹扩展寿命的分散性均随着裂纹长度的增加而减小, 锻材的分散性比棒材的分散性减小得慢, 但从总体分析, 棒材的分散性小于锻材的分散性。
- (3) 无论是棒材还是锻材, 其裂纹扩展速率的均值均随裂纹长度的增加而增加, 棒材的均值普遍大于锻材的均值, 其分散性先随着裂纹长度的增加而减小, 达到一定程度后, 随裂纹长度的增加而增加, 锻材的分散性大于棒材。
- (4) 但从统计意义上进行分布假设检验, 可以得到以下结论: 对于裂纹扩展寿命, 棒材和锻材的方差在

置信水平为 0. 05 时, 有显著性差异; 在置信水平为 0. 02 时, 无显著性差异; 对于裂纹扩展速率, 棒材和锻材的方差无显著性差异, 但其均值有显著性差异。

参考文献

[ 1 ] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[ M ]. 北京: 中国标准出版社, 1998, 305—384.  
[ 2 ] GB/ T 6398—1996, 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法[ S ].  
[ 3 ] 高镇同. 疲劳应用统计学[ M ]. 北京: 国防工业出版社, 1986.

基金项目: 云南省教育厅基金资助项目( 9612062)  
收稿日期: 2007-05-30; 修订日期: 2007-09-10  
作者简介: 李淑兰( 1957—), 女, 副教授, 主要研究方向为材料的力学性能及其可靠性研究, 参与国家自然科学基金、云南省科技厅基金项目的研究, 主持云南省教育厅基金项目 2 项。联系地址: 昆明市白龙寺 296 号昆明理工大学化学工程学院过程装备与控制工程系( 650224)。E-mail: lishulany@ 126.com