

表面失效及防护

## 三维表面粗糙度对 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的影响

王栋<sup>a,b</sup>, 律谱<sup>b</sup>, 陈真真<sup>a</sup>

(郑州大学 a.机械与动力工程学院 b.河南省资源与材料工业技术研究院, 郑州 450001)

**摘要:** **目的** 探究固定载荷下三维表面粗糙度  $S_a$  对 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的影响。**方法** 通过砂纸研磨制备不同表面粗糙度及纹理方向的 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳试样, 测量所有试样的表面粗糙度参数  $S_a$  及三维表面形貌参数  $S_q$ 、 $S_z$ 、 $S_{sk}$ 、 $S_{ku}$ 。对试样进行旋转弯曲疲劳试验, 分析疲劳寿命。**结果** 在相同或相近粗糙度的情况下, 轴向纹理疲劳试样疲劳寿命大于周向纹理疲劳试样疲劳寿命。相同纹理方向的情况下, 表面三维粗糙度  $S_a$  越低, 试样疲劳寿命越高。试样疲劳寿命次数与表面粗糙度参数  $S_a$  及三维表面形貌参数  $S_q$ 、 $S_z$ 、 $S_{sk}$ 、 $S_{ku}$  均有明显的相关性。**结论** 对于 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳试样, 拥有平行于疲劳应力的机械加工纹理比垂直于疲劳应力的机械加工纹理具有更小的危害性。降低 18CrNiMo7-6 试样表面粗糙度, 能够有效提高试样旋转弯曲疲劳寿命。纹理方向平行于疲劳应力方向的试样, 表面偏斜度  $S_{sk}$  对零件疲劳寿命影响不明显。

**关键词:** 三维粗糙度; 疲劳寿命; 旋转弯曲疲劳; 三维表面形貌特征; 18CrNiMo7-6 钢; 纹理方向

**中图分类号:** TB302 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)11-0283-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.11.031

## Effect of Three-dimensional Surface Roughness on Rotating Bending Fatigue Life of 18CrNiMo7-6 Steel

WANG Dong<sup>a,b</sup>, LYU Pu<sup>b</sup>, CHEN Zhen-zhen<sup>a</sup>

(a.School of Mechanical and Power Engineering, b.Henan Province Industry Technology Research Institute of  
Resources and Materials, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the effect of three-dimensional surface roughness  $S_a$  on the bending fatigue life of 18CrNiMo7-6 steel under the fixed load. 18CrNiMo7-6 steel rotating bending fatigue specimens with different surface roughness and texture path were prepared by sandpaper grinding. The surface roughness parameters  $S_a$  and three-dimensional surface topography parameters  $S_q$ ,  $S_z$ ,  $S_{sk}$ , and  $S_{ku}$  of all specimens were measured. Rotational bending fatigue test was carried out on the specimen to analyze the fatigue life of the specimen. The fatigue life of axial textured specimens with the same or similar roughness was greater than that of circumferential textured specimens. Under the same texture direction, the lower the three-dimensional surface roughness was, the higher the fatigue life was. The fatigue life times of specimens were significantly correlated with  $S_a$  and  $S_q$ ,  $S_z$ ,  $S_{sk}$ , and  $S_{ku}$ . For 18CrNiMo7-6 steel rotating bending fatigue specimens, machining grooves

收稿日期: 2019-01-16; 修订日期: 2019-04-15

Received: 2019-01-16; Revised: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1804254)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (U1804254)

作者简介: 王栋 (1970—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为关键件的抗疲劳制造技术、精密与超精密加工技术。邮箱: wangdong@zzu.edu.cn

Biography: WANG Dong (1970—), Male, Doctor, Professor, Research focus: anti-fatigue manufacturing technology for key parts, precision and ultra-precision manufacturing technology. E-mail: wangdong@zzu.edu.cn

perpendicular to fatigue stress are more harmful than machining grooves parallel to fatigue stress. Reducing the surface roughness of the 18CrNiMo7-6 steel specimen can effectively improve the rotational bending fatigue life of the specimen. The surface skewness  $S_{sk}$  of the specimen with texture direction parallel to the fatigue stress direction has no obvious influence on the fatigue life of the part.

**KEY WORDS:** 3-D roughness, fatigue life; rotating bending fatigue; three-dimensional surface topography; 18CrNiMo7-6 steel; texture direction

随着我国高铁、航空等领域的迅速发展,对于关键结构件疲劳寿命的研究成为了时下热点。其中较为突出的成果为北京航空材料院赵振业院士提出的抗疲劳制造。抗疲劳制造是控制表面完整性和表面变质层,以疲劳性能为主要判据和提高疲劳强度的制造技术<sup>[1]</sup>。表面粗糙度作为表面完整性指标的重要内容,对零件的疲劳寿命有重要影响。陈煜达等人<sup>[2-6]</sup>的研究表明,表面粗糙度值越大,应力集中就越明显,疲劳寿命越低。也有学者<sup>[7]</sup>提出,垂直于疲劳应力的机械加工沟槽比平行于疲劳应力的机械加工沟槽具有更大危害性。我国传统的机械设计数据库中缺乏高强度合金钢在  $Ra \leq 0.4 \mu\text{m}$  下的粗糙度对于疲劳寿命影响的试验数据支撑,笼统地认为  $Ra \leq 0.4 \mu\text{m}$  时,表面加工粗糙度引起的应力集中对加工零件的疲劳强度几乎没有影响,即表面加工系数为 1<sup>[8]</sup>。与三维粗糙度测量相比,二维粗糙度测量依赖于轮廓的选取位置,丢失了大量表面有效信息<sup>[9]</sup>,三维粗糙度携带有与功能特性有关的表面形貌信息。零件的技术性能评价常常依赖于零件表面特征状况<sup>[10]</sup>,对三维表面粗糙度参数进行研究,能够将三维表面参数及其影响因子

与表面实际功能建立清晰的网络,便于三维参数的选择和功能评价<sup>[11]</sup>。目前采用表面形貌参数预测疲劳寿命的仿真模型依然欠妥<sup>[12]</sup>。本文采用三维表面粗糙度  $S_a$  及英国伯明翰大学开发的 14+3 三维参数最小体系<sup>[13-16]</sup>中与疲劳强度和抗裂强度有关的三维参数<sup>[17]</sup>为研究对象,去除与装配有关的三维参数后,设计了旋转弯曲疲劳试验,研究了粗糙度  $S_a$  及三维表面粗糙度参数  $S_q$ 、 $S_z$ 、 $S_{sk}$ 、 $S_{ku}$ ,对 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的影响。

1 试验

1.1 条件

按照 GB/T 4337—2015 进行试验。旋转弯曲疲劳试验机为长春仟邦测试设备有限公司 QBWP-6000 型旋转弯曲疲劳试验机。试验最高转速为 6000 r/min,四点简支梁结构,单个砝码盘最大加载砝码重量为 600 N。试样材料为 18CrNiMo7-6 钢,试样尺寸如图 1 所示。试样所用材料力学性能见表 1。

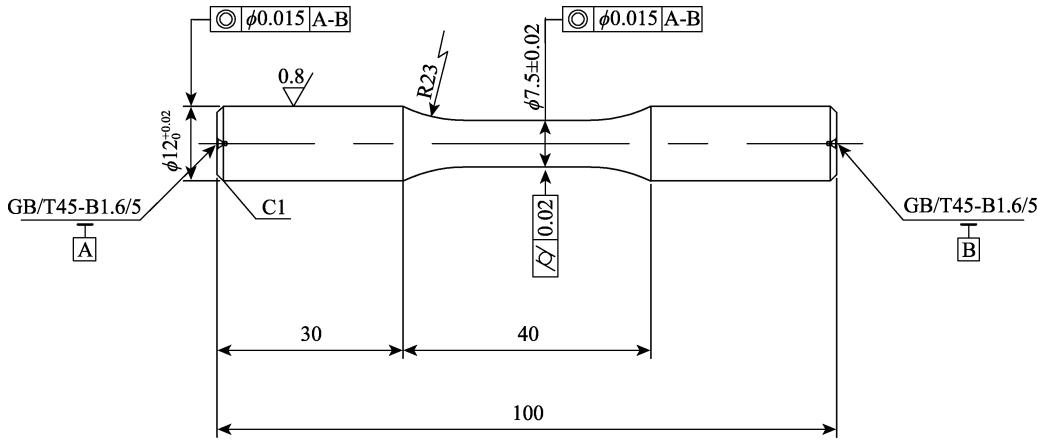


图 1 试件尺寸  
Fig.1 Specimen size

表 1 18CrNiMo7-6 钢的力学性能  
Tab.1 Mechanical properties of 18CrNiMo7-6 steel

Tensile strength/ (N·mm <sup>-2</sup> )	Yield strength/ (N·mm <sup>-2</sup> )	Ductility/ %	Reduction of area/%	Hardness (HRC)
944	670	13.7	52.6	31.8

1.2 方案

试验环境温度为  $20_{-5}^{+10} \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 为了防止室温条件下试样自热问题,根据 GB/T 4337—2015<sup>[18]</sup>,采用 2000 r/min 的频率进行疲劳试验,加力方式为四点加力,力臂长度为 200 mm,试样直径为 7.5 mm。预试

验后,采用 487 MPa 的应力进行试验,以保证所有数据的可靠性。为了得到不同粗糙度  $S_a$  水平和纹理方向的旋转弯曲疲劳试样,采用砂纸对试样进行研磨,得到不同粗糙度  $S_a$  水平和机械加工沟槽垂直(周向纹理试样)及平行(轴向纹理试样)于疲劳应力的试样。使用 NPFLEX 三维表面形貌测量系统对所有试样进行三维形貌检测,采样区域面积为  $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ,每个试样取 5 个测量点,去除最大值最小值后,取平均值为测定值。所有试样采用相同加工工艺进行制备。采用 ProtoLDR 高速 X 射线残余应力分析仪对抛磨后试样进行残余应力检测,随机抽取 3 个试样,对每个试样取 5 个测量点进行检测,去除最大值、最小

值后取均值,即为该试样表面残余应力测定值,可得残余应力值为 $-317$ 、 $-309$ 、 $-322\text{ MPa}$ 。由于试样加工工艺的一致性,认为本批次试样残余应力都在 $-316\text{ MPa}$ 。本次试验共计 32 个试样,按纹理方向分,轴向纹理 16 个、周向纹理 16 个,按粗糙度水平分,在每个纹理方向上分 4 个粗糙度水平。具体疲劳试样三维粗糙度  $S_a$  见表 2。

为了探究纹理方向及三维表面形貌参数表面均方根偏差  $S_q$ 、表面十点高度  $S_z$ 、表面偏斜度  $S_{sk}$ 、和表面峭度  $S_{ku}$  等对旋转弯曲疲劳寿命的影响情况,采集 32 个试样的三维表面形貌参数,具体数值见表 3。

表 2 疲劳试样  $S_a$  值  
Tab.2  $S_a$  value of fatigue specimen

Sample Number	Texture direction	Roughness level/ $\mu\text{m}$	Roughness of $S_a/\mu\text{m}$	Sample Number	Texture direction	Roughness level/ $\mu\text{m}$	Roughness of $S_a/\mu\text{m}$
1	Axial texture	0.090	0.090	17	Circumferential texture	0.090	0.099
2			0.082	18			0.091
3			0.083	19			0.091
4			0.091	20			0.080
5	Axial texture	0.200	0.200	21	Circumferential texture	0.200	0.236
6			0.202	22			0.242
7			0.158	23			0.256
8			0.235	24			0.227
9	Axial texture	0.600	0.490	25	Circumferential texture	0.600	0.517
10			0.586	26			0.532
11			0.564	27			0.515
12			0.725	28			0.621
13	Axial texture	1.100	1.15	29	Circumferential texture	1.100	1.060
14			1.29	30			1.160
15			1.10	31			0.877
16			1.08	32			0.945

表 3 疲劳试样三维表面形貌参数值  
Tab.3 Three-dimensional topography value of fatigue specimen

Sample Number	Texture direction	$S_q/\mu\text{m}$	$S_z/\mu\text{m}$	$S_{sk}$	$S_{ku}$	Sample Number	Texture direction	$S_q/\mu\text{m}$	$S_z/\mu\text{m}$	$S_{sk}$	$S_{ku}$
1	Axial texture	0.139	2.640	-0.364	11.589	17	Circumferential texture	0.141	2.691	-0.748	8.578
2		0.130	2.650	-0.169	13.483	18		0.133	3.791	-1.060	13.627
3		0.130	2.561	-0.208	12.996	19		0.136	3.492	-1.582	13.560
4		0.142	2.671	-0.178	11.178	20		0.117	3.044	-1.402	12.819
5		0.266	3.696	-0.314	4.802	21		0.321	5.397	-1.048	6.559
6		0.275	3.704	-0.425	5.358	22		0.323	5.332	-0.895	6.958
7		0.224	3.233	-0.191	6.046	23		0.334	4.393	-0.637	4.481
8		0.310	4.172	-0.298	4.614	24		0.300	4.041	-0.748	5.308
9		0.642	6.746	-0.629	4.282	25		0.679	9.905	-0.480	4.426
10		0.786	10.717	-1.198	6.884	26		0.698	9.050	-0.822	4.238
11		0.752	20.868	-0.353	10.772	27		0.677	9.079	-0.389	4.508
12		0.981	22.477	-0.875	7.913	28		0.824	11.361	-0.384	4.372
13		1.495	17.053	-0.263	3.848	29		1.380	25.509	-0.482	9.049
14		1.673	20.108	-0.322	4.364	30		1.527	22.092	-0.319	4.563
15		1.388	17.059	-0.319	3.909	31		1.126	15.779	-0.249	4.253
16		1.432	20.535	-0.229	5.564	32		1.229	22.554	-0.048	5.136

2  $S_a$  及纹理方向对 18CrNiMo7-6 钢  
旋转弯曲疲劳寿命的影响

对 32 个疲劳试样在室温条件下采用四点加力方式进行旋转弯曲疲劳试验,加载应力为 487 MPa,加载转速为 2000 r/min,应力比  $R=1$ ,得到 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命,见表 4。

为了得到粗糙度  $S_a$  与纹理方向对 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的影响,结合表 2、表 4 可得粗糙度  $S_a$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命关系,见表 5。

由表 5 可得粗糙度  $S_a$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命分布图,对图中数据进行幂函数拟合,并计算相关性,如图 2 所示,图中  $R$  值代表相关系数。

由图 2 可知,随着 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲

表 4 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命  
Tab.4 Rotating bending fatigue life of 18CrNiMo7-6 steel

Sample number	Texture direction	Fatigue life (times)	Logarithm fatigue life	Sample number	Texture direction	Fatigue life (times)	Logarithm fatigue life
1	Axial texture	89 012	4.949	17	Circumferential texture	13 831	4.141
2		129 880	5.114	18		39 503	4.597
3		94 582	4.976	19		34 783	4.541
4		57 747	4.762	20		23 635	4.374
5		*	*	21		19 371	4.287
6		67 027	4.826	22		16 264	4.211
7		42 361	4.627	23		20 165	4.305
8		32 821	4.516	24		*	*
9		21 295	4.328	25		16 073	4.206
10		*	*	26		14 691	4.167
11		50 017	4.699	27		13 677	4.136
12		39 354	4.595	28		*	*
13		17 969	4.255	29		13 600	4.134
14		*	*	30		12 367	4.092
15		27 083	4.433	31		*	*
16		22 695	4.356	32		14 609	4.165

Note: \* means invalid sample, the life of invalid sample and the surface roughness are both not included in calculation

表 5 粗糙度  $S_a$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命关系  
Tab.5 Relationship between roughness  $S_a$  and 18CrNiMo7-6 steel rotating bending fatigue life

Texture direction	Roughness level/ $\mu\text{m}$		Test Data				Fatigue life	
							Mean	Standard deviation
Axial texture	0.09	Roughness $S_a/\mu\text{m}$	0.09	0.082	0.083	0.091	0.087	0.004
		Fatigue life (times)	89 012	129 880	94 582	57 747	92 805	25 598
	0.20	Roughness $S_a/\mu\text{m}$	0.2	0.202	0.158	0.235	0.198	0.031
		Fatigue life (times)	*	67 027	42 361	32 821	47 403	14 412
	0.59	Roughness $S_a/\mu\text{m}$	0.49	*	0.564	0.725	0.593	0.098
		Fatigue life (times)	21 295	*	50 017	39 354	36 889	11 855
	1.11	Roughness $S_a/\mu\text{m}$	1.15	1.29	1.1	1.08	1.110	0.029
		Fatigue life (times)	17 969	*	27 083	22 695	22 582	3 721
	0.09	Roughness $S_a/\mu\text{m}$	0.099	0.091	0.091	0.08	0.090	0.007
		Fatigue life (times)	13 831	39 503	34 783	23 635	27 938	9 976
Circumferential texture	0.24	Roughness $S_a/\mu\text{m}$	0.236	0.242	0.256	0.227	0.244	0.008
		Fatigue life (times)	19 371	16 264	20 165	*	18 600	1 683
	0.52	Roughness $S_a/\mu\text{m}$	0.517	0.532	0.515	*	0.521	0.008
		Fatigue life (times)	16 073	14 691	13 677	*	14 814	982
	1.06	Roughness $S_a/\mu\text{m}$	1.06	1.16	0.877	0.945	1.055	0.088
		Fatigue life (times)	13 600	12 367	*	14 609	13 525	916

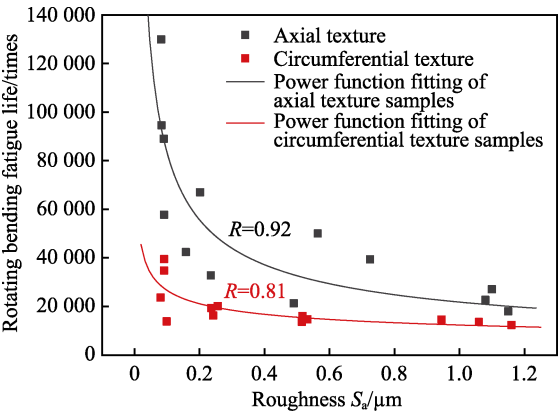


图 2 粗糙度  $S_a$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命分布  
Fig.2 Distribution of roughness  $S_a$  and 18CrNiMo7-6 steel rotating bending fatigue life

劳试样粗糙度值  $S_a$  的降低, 旋转弯曲疲劳寿命增加, 且具有轴向纹理试样的疲劳寿命明显高于周向纹理疲劳试样。说明了拥有平行于疲劳应力的机械加工沟槽比垂直于疲劳应力的机械加工沟槽具有更小的危害性。对数据点进行幂函数曲线拟合, 可得不同纹理

方向下粗糙度  $S_a$  与旋转弯曲疲劳寿命的相关性分别达到 0.92 和 0.81, 说明轴向纹理试样粗糙度  $S_a$  与旋转弯曲疲劳寿命之间存在明显的幂相关关系。由幂函数特点可推知, 粗糙度无限接近于 0 时, 旋转弯曲疲劳寿命将增大。即在同一材料的条件下, 降低零件表面粗糙度  $S_a$  值能够有效增加零件疲劳寿命, 并提升零件疲劳极限应力水平。

为了更加直观地描述粗糙度  $S_a$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命之间的关系, 取同一粗糙度水平下的疲劳试样粗糙度值  $S_a$  与疲劳寿命均值代表该粗糙度  $S_a$  条件下的旋转弯曲疲劳寿命, 并对疲劳寿命进行置信度计算, 可得 95% 的置信度下粗糙度  $S_a$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的关系见表 6。

由表 6 可以得出, 在 95% 的置信度下, 粗糙度  $S_a$  为 0.09  $\mu\text{m}$  的轴向纹理试样比 1.11  $\mu\text{m}$  的疲劳寿命提高 3.11 倍; 粗糙度  $S_a$  为 0.09  $\mu\text{m}$  的周向纹理试样比 1.06  $\mu\text{m}$  的疲劳寿命提高 1.07 倍; 粗糙度  $S_a$  为 0.09  $\mu\text{m}$  的轴向纹理试样比周向纹理试样的疲劳寿命提高 2.32 倍。

表 6 95% 的置信度下粗糙度  $S_a$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的关系

Tab.6 Relationship between roughness  $S_a$  and 18CrNiMo7-6 steel rotating bending fatigue life under 95% confidence

Texture direction	Axial texture				Circumferential texture			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Roughness $S_a/\mu\text{m}$	0.09	0.20	0.59	1.11	0.09	0.24	0.52	1.06
Fatigue life (times)	92 805	47 403	36 889	22 582	27 938	18 600	14 814	13 525

由表 3 中各个试样的三维表面形貌参数值及表 4 中各个疲劳试样的疲劳寿命, 可得不同三维表面形貌参数与疲劳寿命的关系分布图, 对图中有关数据进行拟合并计算相关性, 其结果如图 3—图 6 所示。

表面均方根偏差  $S_q$  与二维参数  $R_q$  相对应, 代表了区域内采样点偏离基准平面的程度。表面十点高度  $S_z$  代表了评定区域内五个最大波峰和五个最大深谷

的平均值之和。由图 3—图 6 可知, 表面均方根偏差  $S_q$  和表面十点高度  $S_z$  与旋转弯曲疲劳寿命有明显的幂相关关系。其中表面十点高度  $S_z$  与旋转弯曲疲劳寿命的相关性最为显著, 且随着表面十点高度的增大, 疲劳寿命下降<sup>[19]</sup>。这是由于随着  $S_z$  的增大, 表面最大纹痕越来越深, 其抵抗疲劳破坏的能力越来越差, 零件的疲劳寿命越来越低。

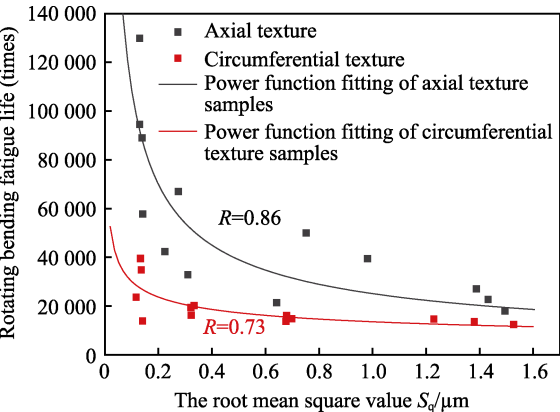


图 3 表面均方根偏差  $S_q$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的关系

Fig.3 Distribution of surface root mean square deviation  $S_q$  and 18CrNiMo7-6 steel rotational bending fatigue life

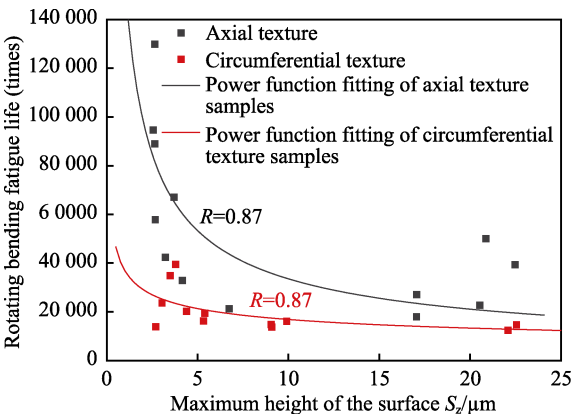


图 4 表面十点高度  $S_z$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的关系

Fig.4 Distribution of surface ten-point height  $S_z$  and 18CrNiMo7-6 steel rotational bending fatigue life

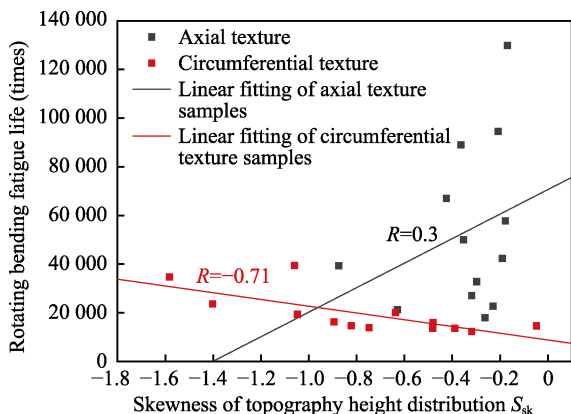


图5 表面偏斜度  $S_{sk}$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的关系

Fig.5 Distribution of surface skewness  $S_{sk}$  and 18CrNiMo7-6 steel rotational bending fatigue life

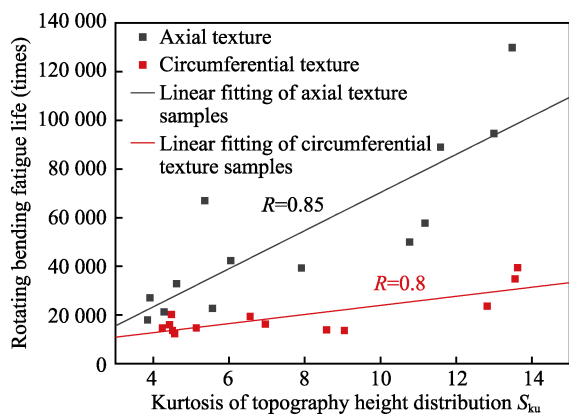


图6 表面峭度  $S_{ku}$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的关系

Fig.6 Distribution of surface kurtosis  $S_{ku}$  and 18CrNiMo7-6 steel rotational bending fatigue life

表面高度分布偏斜度  $S_{sk}$  是表征表面偏差不对称度的量。当  $S_{sk}=0$  时, 被测表面为高斯表面; 当  $S_{sk}>0$  时, 代表被测表面波峰所占高度较多; 当  $S_{sk}<0$  时, 代表被测表面波谷所占高度较多, 如图 7a 所示。由图 5 可知, 周向纹理试样疲劳寿命与  $S_{sk}$  无明显的线性关系。对轴向纹理试样进行线性拟合时, 遇到两个奇异点改变了拟合线方向, 使拟合线偏离了整体分布区域。为了能够更加有效地说明表面偏斜度  $S_{sk}$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的关系, 去除轴向纹理的两个奇异点后, 可得如图 8 所示的修正表面偏斜度  $S_{sk}$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的关系。由图 8 可知, 轴向纹理试样  $S_{sk}$  与旋转弯曲疲劳寿命相关程度不大,  $S_{sk}$  对旋转弯曲疲劳寿命没有影响。其原因是由于轴向纹理试样纹理分布方向为平行于疲劳应力, 在零件表面无法形成应力集中, 表面沟痕对疲劳寿命影响不大。在  $S_{sk}$  都小于 0 的情况下, 周向纹理试样  $S_{sk}$  与旋转弯曲疲劳寿命呈负相关。随着  $S_{sk}$  的减小, 疲劳寿命增加。这是由于  $S_{sk}$  越小, 工

件表面波谷越宽, 越不容易发生应力集中<sup>[20]</sup>, 沟槽对疲劳寿命的危害越小, 进而零件越不容易发生疲劳断裂。由以上分析可知, 纹理方向垂直于疲劳应力方向的试样的表面偏斜度  $S_{sk}$  对零件疲劳寿命具有负面影响, 纹理方向平行于疲劳应力方向的试样表面偏斜度  $S_{sk}$  对零件疲劳寿命影响不明显。

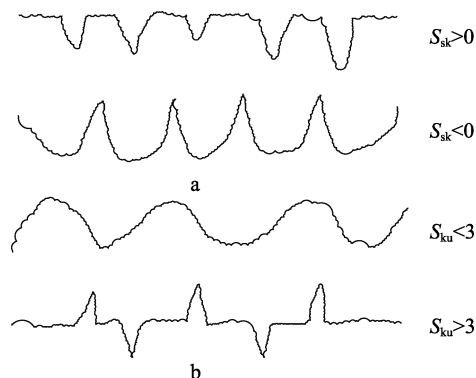


图7 不同偏态与峰态时表面形貌的区别  
Fig.7 Differences in surface topography between different skewness and kurtosis

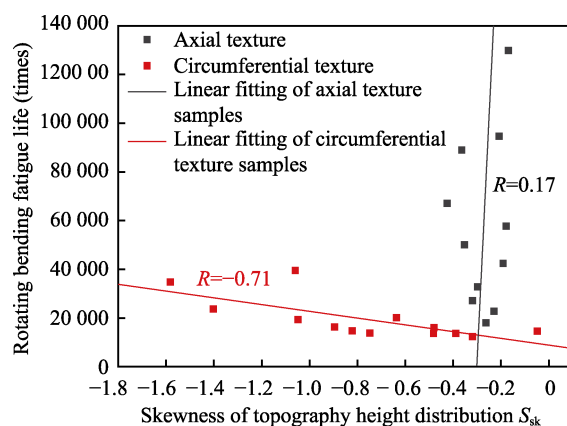


图8 修正表面偏斜度  $S_{sk}$  与 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的关系

Fig.8 Distribution of corrected surface skewness  $S_{sk}$  and 18CrNiMo7-6 steel rotating bending fatigue life

表面峭度  $S_{ku}$  是用来衡量表面高度尖锐程度的参数量。当  $S_{ku}=3$  时, 被测表面为高斯表面; 当  $S_{ku}>3$  时, 代表被测表面波峰波谷尖锐; 当  $S_{ku}<3$  时, 代表被测表面波峰波谷平缓, 如图 7b 所示。由图 6 可知, 表面峭度  $S_{ku}$  与零件疲劳寿命有较明显正相关关系, 即在  $S_{ku}>3$  的情况下, 随着峭度值的增加, 疲劳寿命增加, 也就是表面波峰波谷越尖锐, 疲劳寿命越高。通过分析发现, 本次试验中所有试样  $S_{sk}$  都小于 0, 且所有试样  $S_{ku}$  都大于 3。结合图 7a 中  $S_{sk}<0$  和图 7b 中  $S_{ku}>3$  的形貌特征可以发现, 本次试样中所有  $S_{ku}>3$  的试样都具有  $S_{sk}<0$  的特征, 即试样表面峭度的增加主要是由于波峰尖锐程度的增加引起的, 因而出现表面峭度与疲劳寿命正相关的这种现象符合一般认知。

### 3 结论

1) 拥有平行于疲劳应力方向的机械加工沟槽比垂直于疲劳应力方向的机械加工沟槽具有更小的危害性。

2) 降低 18CrNiMo7-6 钢试样表面粗糙度能够有效提高试样旋转弯曲疲劳寿命。

3) 纹理方向垂直于疲劳应力方向的试样, 表面偏斜度  $S_{sk}$  对零件疲劳寿命具有负面影响; 纹理方向平行于疲劳应力方向的试样, 表面偏斜度  $S_{sk}$  对零件疲劳寿命影响不明显。

#### 参考文献:

- [1] 高玉魁, 赵振业. 齿轮的表面完整性与抗疲劳制造技术的发展趋势[J]. 金属热处理, 2014, 39(4): 1-6.  
GAO Yu-kui, ZHAO Zhen-ye. Development trend of surface integrity and anti-fatigue manufacture of gears[J]. Heat treatment of metals, 2014, 39(4): 1-6.
- [2] 章刚, 刘军, 刘永寿, 等. 表面粗糙度对表面应力集中系数和疲劳寿命影响分析[J]. 机械强度, 2010, 32(1): 110-115.  
ZHANG Gang, LIU Jun, LIU Yong-shou, et al. Effect of roughness in surface stress concentration factor and fatigue life[J]. Journal of mechanical strength, 2010, 32(1): 110-115.
- [3] 陈煜达, 赵秀娟, 潘金芝, 等. 表面粗糙度对动车组车轴钢弯曲疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(22): 60-62.  
CHEN Yu-da, ZHAO Xiu-juan, PAN Jin-zhi, et al. Effects of surface roughness on bending fatigue properties of motor train unit axle steel[J]. Hot working technology, 2016, 45(22): 60-62.
- [4] 鱼滨涛, 佟振峰, 钟巍华, 等. 表面粗糙度对国产 316LN 钢低周疲劳性能的影响[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(9): 1660-1665.  
YU Bin-tao, TONG Zhen-feng, ZHONG Wei-hua, et al. Effect of surface roughness on low-cycle fatigue of domestic 316LN austenitic stainless steel[J]. Atomic energy science and technology, 2015, 49(9): 1660-1665.
- [5] 廖智奇, 吴运新, 袁海洋. 表面粗糙度对三维应力集中系数及疲劳寿命的影响[J]. 中国机械工程, 2015, 26(2): 147-151.  
LIAO Zhi-qi, WU Yun-xin, YUAN Hai-yang. Influences of surface roughness on three dimensional stress concentration factor and fatigue life[J]. China mechanical engineering, 2015, 26(2): 147-151.
- [6] ZAHAVI E, TORBILO V, PRESS S. Fatigue design. life expectancy of machine parts[M]. London: CRC Press, 1996.
- [7] JAAP Schijve. Fatigue of structures and materials[M]. New Delhi: CBS Publishers, 2009: 345.
- [8] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 第六卷. 北京: 机械工业出版社, 2010: 40-49.  
WEN Bang-chun. Machine design handbook[M]. Volume 6. Beijing: China Machine Press, 2010: 40-49.
- [9] 沙雪莹. 高速高质量磨削 18CrNiMo7-6 三维表面粗糙度研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.  
SHA Xue-ying. Research on 3D surface roughness of 18CrNiMo7-6 with high-speed and high-quality grinding[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [10] 李伯奎, 刘远伟. 表面粗糙度理论发展研究[J]. 工具技术, 2004(1): 63-67.  
LI Bo-kui, LIU Yuan-wei. Study of developing tendency of surface roughness[J]. Tool engineering, 2004(1): 63-67.
- [11] 何宝凤, 魏翠娥, 刘柄显, 等. 三维表面粗糙度的表征和应用[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1994-2011.  
HE Bao-feng, WEI Cui-e, LIU Bing-xian, et al. Three-dimensional surface roughness characterization and application[J]. Optics and precision engineering, 2018, 26(8): 1994-2011.
- [12] HINDERLITER Medina. The stress concentration factor for slightly roughened tandom surfaces: Analytical solution[J]. International journal of solids and structures, 2014, 51(51): 2012-2018.
- [13] 卢圣凤. 表面形貌复合评定理论与方法的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.  
LU Sheng-feng. Research on theory and method of surface topography composite evaluation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003.
- [14] DONG W P, SULLIVAN P J, STOUT K J. Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography: III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties[J]. Wear, 1994, 178(1): 45-60.
- [15] WHITEHOUSE D J. Characterization of surface systems[J]. Nanotechnology and precision engineering, 2003, 1(1): 45-48.
- [16] DONG W P, SULLIVAN P J, STOUT K J. Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography: IV: Parameters for characterising spatial and hybrid properties[J]. Wear, 1994, 178(1): 45-60.
- [17] 唐文彦, 张军, 李慧鹏. 触针法测量表面粗糙度的发展及现状[J]. 机械工艺师, 2000(11): 40-42.  
TANG Wen-yan, ZHANG Jun, LI Hui-peng. State-of-the-arts of contact needle type surface roughness measuring[J]. Modern manufacturing engineering, 2000(11): 40-42.
- [18] GB/T 4337—2015, 金属材料疲劳试验旋转弯曲方法[S]. GB/T 4337—2015, Metallic materials fatigue testing rotating bar bending method[S].
- [19] 肖秀和, 陈钜衍, 李钉. 接触疲劳推力片试样表面显微裂纹的研究[J]. 物理测试, 1991(5): 29.  
XIAO Xiu-he, CHENG Ju-xian, LI Ding. Study on micro-crack on the surface of contact fatigue thrust piece[J]. Physics examination and testing, 1991(5): 29.
- [20] 王永伟. 结构疲劳裂纹扩展的数值模拟[D]. 大连理工大学, 2006.  
WANG Yong-wei. The numerical simulation of fatigue crack growth of structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.