

· 应用与服役 ·



## 螺纹加工顺序对 A286 紧固件室温疲劳性能的影响

孔祥伟, 侯美伶, 白云, 张剑锋  
(江阴兴澄特种钢铁有限公司特钢研究院, 江阴 214400)

**摘要:**采用轴向疲劳试验机、金相显微镜、显微硬度计和扫描电镜等方法,通过对不同螺纹加工顺序的 A286 合金耐热紧固件进行高频拉-拉疲劳测试,并对疲劳断口和螺纹的金相进行分析。结果表明,在经过 720 °C-12 h 时效后加工螺纹,有利于提高紧固件疲劳性能的稳定性,对疲劳中值强度略有影响,对疲劳断裂方式无影响。时效前加工螺纹,会在紧固件表面形成大量的孪晶,时效过程中强化相会在孪晶界以大尺寸颗粒析出。时效前加工螺纹的紧固件其螺纹根部硬度值波动大,可能是造成疲劳性能波动大的原因。

**关键词:**耐热紧固件; 高温合金; 螺纹; 疲劳性能

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00002 **中图分类号:**TG132. 3+2

## Effect of Thread Processing Sequence on Room Temperature Fatigue Performance of A286 Fasteners

Kong Xiangwei, Hou Meiling, Bai Yun, Zhang Jianfeng  
(Special Steel Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel works Co., Ltd., Jiangyin 214400, China)

**Abstract:** The high frequency tensile fatigue test of heat-resistant fasteners of A286 alloy with different thread processing sequences was carried out by means of axial fatigue testing machine, metallographic microscope, microhardness tester and scanning electron microscope, and the metallographic of fatigue fracture and thread was analysed. The results show that machining thread after 720 °C-12 h aging is beneficial to improve the stability of fatigue performance of fasteners, and has a slight effect on the median fatigue strength, but has no effect on the fatigue fracture mode. A large number of twins are formed on the surface of machined threads before aging, and the reinforced phase precipitates out at the twin boundary with large size particles during aging. Because the hardness of fasteners threaded before aging fluctuates greatly, it may also be the cause of the fluctuation of fatigue performance.

**Key Words:** Heat-resistant fastener; High temperature alloy; Thread; Fatigue Performance

涡轮增压技术可使等排量的发动机获得高功率,增加发动机的燃烧转换效率,是目前主机厂普遍使用的节能减排技术。涡轮增压转速高,并连接排气歧管,服役温度高,该部位紧固件需要采用耐热材料制作。A286 合金属于沉淀强化型变形高温合金,具有较好的热稳定和耐腐蚀性,大量应用于涡轮增压紧固件。A286 耐热紧固件的制造通常将螺纹加工安排在时效热处理前,时效后紧固件的抗拉强度可达到 1 000 MPa 以上<sup>[1-2]</sup>。根据高强度合金紧固件的制造经验可知,高强度合金紧固件的螺纹加工一般安排在调质热处理之后,这样可保证螺纹表面产生压应力,有利于提高疲劳强度,降低疲劳性能的波动,同时由于螺纹加工是在调质热处理之后,在保证螺纹具有高的尺寸精度的同时,防止热处理过程中的螺纹发生磕碰<sup>[3]</sup>。《高温合金材料学》上册第七章提到 GH2135 合金经抛丸强化后,从室

温至 700 °C 的高速旋转弯曲疲劳极限( $10^7$ )均获得明显改善<sup>[4]</sup>。抛丸是在工件表面引入残余压应力提高疲劳强度。A286 耐热紧固件的螺纹加工是否可以安排在时效热处理之后,通过冷变形在螺纹部位引入残余压应力提升疲劳强度,还未有该方面的报道。

本文通过对时效热处理前、后加工螺纹的耐热紧固件进行室温疲劳性能测试及对其断口、金相组织等的分析,研究螺纹加工顺序对耐热紧固件室温疲劳性能的影响。

### 1 实验材料及方法

实验用耐热紧固件材料 A286 合金的化学成分见表 1,其制造工艺流程是通过 30 t 真空感应+电渣重熔冶炼<sup>[5]</sup>,电渣锭尺寸为  $\phi 600$  mm,电渣锭重为 10 t。电渣锭经过锻造开坯成  $\phi 170$  mm 后再经高速线材厂轧制成  $\phi 12$  mm 的盘条,经过拉丝→固溶

→轻拉等工序制成  $\phi 9.78$  mm 钢丝。由国内某知名紧固件厂冷镦成耐热紧固件毛坯,然后,一部分先加工螺纹再进行时效热处理,另一部分先时效热处理再加工螺纹。螺纹加工均使用冷滚丝工艺。时效热处理是在同一真空热处理炉进行,避免紧固件表面产生氧化。加工成紧固件的成品型号是 M10×1.5×50 mm。

将制备的耐热紧固件在 zwick 型号 vibrophore 250 高频疲劳试验机按 ISO 3800—1993《螺纹紧固件轴向载荷疲劳试验 试验方法和结果评定》标准升降法进行室温疲劳性能测试,平均静载荷设置为 36 kN (静载荷=0.5×屈服强度×紧固件横截面面积),频率范围为 80 ~ 100 Hz,加载的步长  $\Delta F_{aH}$  为 0.3 kN,以振动 1 000 万次作为疲劳通过的判定标准。利用场发射扫描电镜(SEM)对其疲劳断口形貌进行观察。将耐热紧固件沿纵向切割经标准磨抛后在硫酸铜溶液中侵蚀,用金相显微镜(OM)、扫描电镜对其组织进行表征。用显微硬度计测试其螺纹牙底硬度。

## 2 实验结果

### 2.1 疲劳性能

从时效前后疲劳性能结果表 2、表 3 对比可知,时效前加工螺纹的紧固件疲劳实验的动载荷波动较大,共波动了 5 个应力级。而时效后加工螺纹的

紧固件疲劳实验的动载荷波动小,只波动 3 个应力级。通过 ISO3800 标准计算疲劳中值进行对比,见表 4。可知,时效后加工螺纹的紧固件与时效前加工螺纹的紧固件疲劳中值强度略高,两者相差不大。但从疲劳散差对比,明显的时效后加工螺纹散差小,疲劳性能更稳定。

### 2.2 疲劳断口

时效前和时效后加工螺纹的紧固件在疲劳断裂中均从螺纹根部发生断裂,如图 1 所示。疲劳的裂纹源均从螺纹根部的表面萌发。螺纹根部未见明显的表面缺陷和非金属夹杂物等。疲劳裂纹从螺纹根部的表面萌发后往内部扩展,如图 2(a)所示,以垂直于疲劳裂纹扩展的方向形成疲劳条纹(疲劳辉纹)。往内部扩展约 100  $\mu\text{m}$  后,裂纹扩展为解理断裂特征,疲劳裂纹扩展速率加快,并开始出现大量的二次裂纹<sup>[6]</sup>。而再往里扩展后裂纹失稳扩展,断裂特征为韧窝断裂<sup>[7]</sup>。

### 2.3 螺纹金相

紧固件螺纹根部金相照片如图 3 所示,从图 3 可知,时效前加工的螺纹根部经过腐蚀后与时效后加工螺纹相比,明显的“发黑”,时效后加工的螺纹根部经过腐蚀后与基体颜色无差别,只能观察到存在明显的冷加工变形流线。用扫描电镜进一步的观察可见,时效前加工的螺纹,螺纹根部处的变形

表 1 A286 合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of A286 alloy

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	V	B	Fe
0.03 ~ 0.08	0.4 ~ 1.0	1.0 ~ 2.0	≤0.025	≤0.015	13.5 ~ 16.0	24.0 ~ 27.0	1.0 ~ 1.5	1.9 ~ 2.3	≤0.35	0.1 ~ 0.5	0.003 ~ 0.010	其余

表 2 时效前加工螺纹紧固件疲劳结果

Table 2 Fatigue results of fasteners threaded machined before aging

$\pm F_A$ [kN]	X=断裂, 0=通过; N>10 <sup>7</sup> 次														
3.6	X		X		X										
3.3		0		0		X		X		X					
3.0							0		0		X				X
2.7												X			0
2.4													0		
样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

表 3 时效后加工螺纹紧固件疲劳结果

Table 3 Fatigue results of fasteners threaded machined after aging

$\pm F_A$ [kN]	X=断裂, 0=通过; N>10 <sup>7</sup> 次														
3.9	X													X	
3.6		X		X		X		X		X		0		-	-
3.3			0		0		0		0		0				
样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

表 4 疲劳性能结果

Table 4 Fatigue performance results

样品	$F_{a50}/kN$	$\sigma_{a50}/MPa$	$S(F_A)/kN$
时效前加工螺纹	3.099	498.1	0.568
时效后加工螺纹	3.549	503.8	0.122

孪晶界上析出大量的第二相颗粒,且第二相颗粒尺寸粗大<sup>[8]</sup>,如图4(a)所示。而时效后加工的螺纹根部,孪晶界少且孪晶界虽有少量第二相颗粒析出,但其尺寸与时效前相比要小,如图4(b)所示。

### 2.4 螺纹硬度

将时效前加工螺纹的紧固件和时效后加工螺纹的紧固件,加工成相同的纵截面金相样品。用显微硬度计检验距离螺纹根部近 100  $\mu m$  处硬度,共检验 7 个螺纹,硬度结果见表 5。时效前加工螺纹根部硬度平均值为 367HV0.2,时效后加工螺纹根部硬度平均值为 454HV0.2。时效后加工螺纹产生了明显的冷作硬化。时效后加工螺纹平均硬度值比时效前加工高了近 87HV0.2,且硬度的波动小。

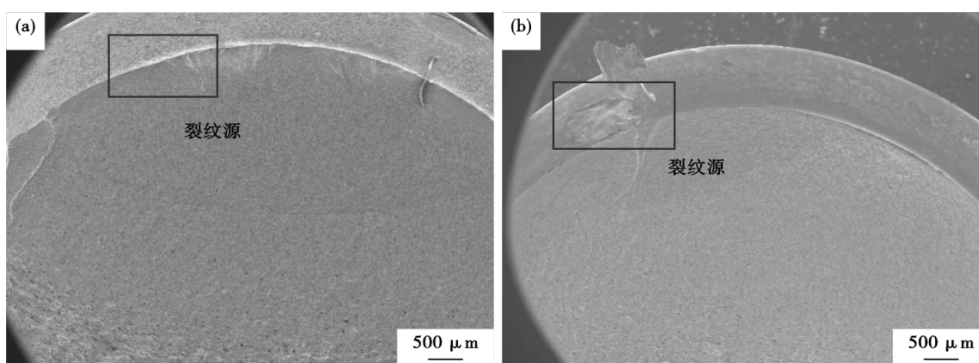


图 1 疲劳断口扫描照片:(a)时效前加工螺纹,(b)时效后加工螺纹

Fig. 1 SEM of fatigue fracture : (a) processing thread before aging , (b) processing thread after aging

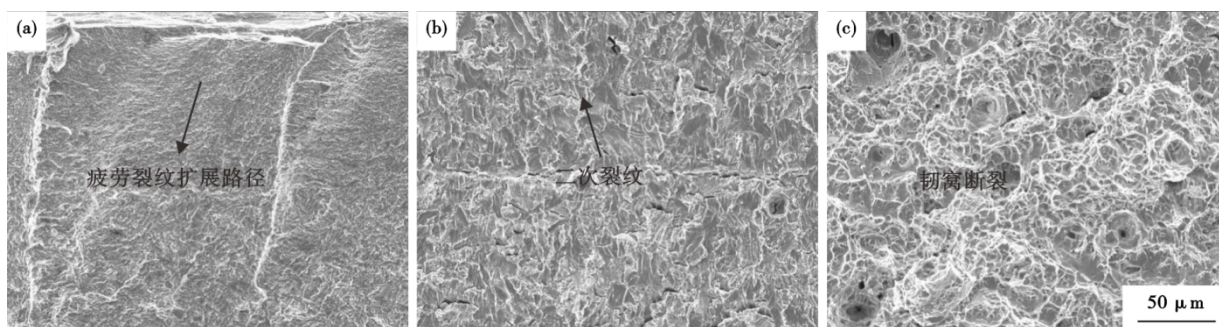


图 2 疲劳断口扫描照片:(a)疲劳源,(b)疲劳扩展区,(c)瞬断区

Fig. 2 SEM of fatigue fracture : (a) fatigue crack source , (b) fatigue expansion zone , (c) transient fault zone

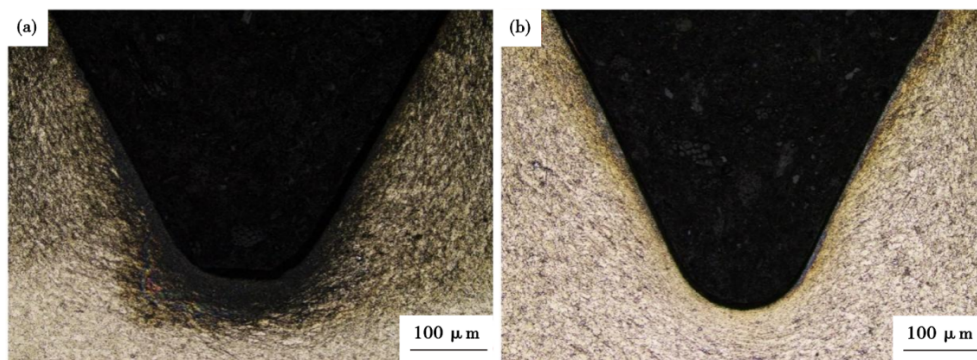


图 3 螺纹根部金相照片:(a)时效前加工螺纹,(b)时效后加工螺纹

Fig. 3 Metallographic photograph of thread root : (a)processing thread before aging , (b)processing thread after aging

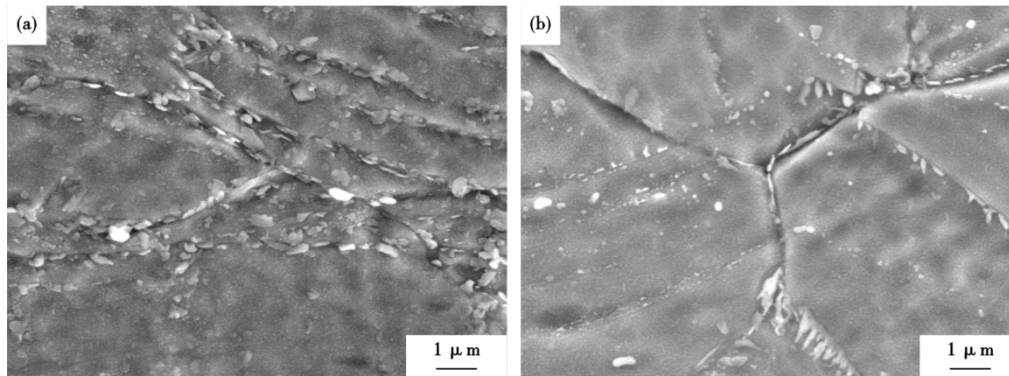


图4 螺纹根部扫描电镜照片:(a)时效前加工螺纹,(b)时效后加工螺纹

Fig. 4 SEM photograph of thread root : (a)processing thread before aging , (b)processing thread after aging

表5 不同顺序加工螺纹根部硬度 HV0.2

Table 5 Hardness HV0.2 at tooth root of thread processed in different ways

	点1	点2	点3	点4	点5	点6	点7	平均值	极差
时效前加工螺纹	380	367	346	384	360	362	371	367	38
时效后加工螺纹	468	450	449	451	454	451	455	454	19

### 3 结果分析与讨论

从疲劳结果可知,时效前、后加工的螺纹对紧固件疲劳强度略有影响,但是对疲劳强度的散差影响比较大,时效后加工螺纹的紧固件疲劳性能更加稳定。通过对两种紧固件螺纹加工顺序的螺纹根部进行硬度检测发现,时效后加工螺纹的螺纹根部硬度比时效前加工螺纹的硬度高,且硬度波动小。时效后加工螺纹可在表面形成冷变形区,形成残余压应力,有助于提升紧固件的疲劳性能<sup>[9]</sup>。从金相组织分析可知,时效前加工螺纹,有螺纹根部存在冷变形,引入大量的变形孪晶<sup>[10]</sup>,该变形孪晶为第二相的析出不仅提供了形核位置而且加快元素扩散,导致大量的时效强化相在孪晶界和晶界析出,且析出的尺寸较大<sup>[11]</sup>。因而,在同样的腐蚀条件

下,时效前加工螺纹的金相表面“发黑”。大颗粒尺寸的第二相在孪晶界和晶界析出也会破坏晶界的结合力,加快疲劳裂纹的萌生<sup>[12]</sup>。结合显微硬度可知,时效前加工螺纹,可能还存在形成孪晶程度不同,造成时效后螺纹根部的硬度偏差较大,从而也会影响紧固件的疲劳强度波动。

### 4 结论

(1)A286耐热紧固件时效前加工螺纹的疲劳中值强度 $\sigma_{a50}$ 为498.1 MPa,时效后加工螺纹的疲劳中值强度 $\sigma_{a50}$ 为503.8 MPa,时效前和时效后加工螺纹的紧固件疲劳强度相差不大。但疲劳稳定性存在明显的差别,时效前加工螺纹疲劳 $S(F_A)$ 为0.568 kN,时效后加工螺纹疲劳 $S(F_A)$ 为0.112 kN,时效后加工螺纹的紧固件疲劳性能更稳定;

(2)时效前加工螺纹在螺纹表面形成大量的变形孪晶,时效强化相在720℃-12h时效过程中会在孪晶界大量析出,且析出的颗粒尺寸较大;

(3)时效后加工螺纹的螺纹根部硬度高,且波动小。时效前加工螺纹的螺纹根部硬度低,且波动较大。

### 参考文献

- [1] 钱鹏,陆恒昌,袁峰. 汽车用耐热紧固件团标的制定及A286合金螺栓的研制[J]. 上海金属, 2020, 42(6): 15-19+26.
- [2] 胡隆伟,叶文君. 紧固件材料手册[M]. 北京:中国宇航出版社, 2014.
- [3] 陆刚. 高强度螺栓选材及其产品加工工艺[J]. 特钢技术, 2014, 20(4): 1-7.
- [4] 郭建亭. 高温合金材料学-中册制备工艺[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [5] 崔利民,王忠鑫,罗保帅,等. GH2132合金2t电渣锭重熔工艺改进[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 43-46.
- [6] 谷宇,张晶晶,张保亮. 超纯铁素体不锈钢热疲劳性能的研究[J]. 特殊钢, 2014, 35(1): 65-67.
- [7] 周红伟,白凤梅,杨磊,等. 1100 MPa级高强钢的低周疲劳行为[J]. 金属学报, 2020, 56(7): 937-948.
- [8] 柳思成,许彦伟,殷小健,等. 形变量及时效制度对A286高温合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(5): 167-171.
- [9] 程明龙,贾延奎,张德远. 高强螺纹滚压工艺的有限元模拟及试验研究[J]. 工具技术, 2017, 51(5): 18-22.
- [10] 李烁,闫森,金奎文,等. 碳含量及热加工变形量对镍基合金GH3625组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 75-78.
- [11] 费阳,刘宏玉,汪圣锋,等. 新型挤压轮钢4Cr3.75MoSiV的析出相对热疲劳性能的影响[J]. 特殊钢, 2013, 34(6): 49-51.
- [12] 王晓南,杜林秀,邸洪双. 新型热轧纳米析出强化超高强汽车板的疲劳性能研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(22): 27-33.