

引文格式: 王冬冬, 王波. GH4169 抗疲劳表面砂带磨削工艺参数优化[J]. 航空制造技术, 2023, 66(21): 125-131.

WANG Dongdong, WANG Bo. Optimization of process parameters for GH4169 anti-fatigue surface abrasive belt grinding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(21): 125-131.

GH4169 抗疲劳表面砂带磨削工艺参数优化

王冬冬¹, 王波²

(1. 海军装备部, 西安 710021;

2. 中国航发动力股份有限公司, 西安 710021)

[摘要] GH4169 高温合金广泛应用于航空发动机热端构件, 提高 GH4169 高温合金叶片抗疲劳性能对于航空发动机的长期稳定服役意义重大。砂带磨削作为航空发动机叶片的精加工工艺, 磨削参数与磨削后的表面状态及抗疲劳性能密切相关。为揭示砂带磨削工艺参数对磨削表面抗疲劳性能的影响, 本研究采用不同工艺参数对 GH4169 高温合金疲劳试样进行砂带磨削加工, 探究了工艺参数对表面完整性、疲劳寿命的影响规律。结果表明, 线速度、进给速度和下压力对磨削后 GH4169 高温合金试样表面的粗糙度、残余应力均有显著影响。当线速度 $v=11$ m/s, 进给速度 $f=1000$ mm/min, 下压力 $F=3$ N 时, 抗疲劳性能最优; 当线速度大于 15 m/s 且下压力大于 6 N 时, GH4169 高温合金表面表面质量降低、划痕深度增加、烧伤现象严重, 试样表面表现为残余拉应力状态, 会极大降低试样疲劳性能。

关键词: 砂带磨削; 粗糙度; 残余应力; 低周疲劳; 抗疲劳制造

Optimization of Process Parameters for GH4169 Anti-Fatigue Surface Abrasive Belt Grinding

WANG Dongdong¹, WANG Bo²

(1. Naval Armament Department, Xi'an 710021, China;

2. AECC Aviation Power Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

[ABSTRACT] GH4169 superalloy is widely used in aero-engine hot components, and improving the fatigue resistance of GH4169 superalloy aero-engine blades is of great significance for the long-term stable service of aero-engines. Abrasive belt grinding is a finishing process of aero-engine blades, and the grinding parameters are closely related to the surface state and fatigue resistance after grinding. To reveal the effect of abrasive belt grinding process parameters on the fatigue resistance of the ground surface, this study carried out abrasive belt grinding on GH4169 superalloy fatigue samples with different process parameters and explored the influence of process parameters on surface integrity and fatigue life law. The results show that the line speed, feed speed, and downforce have significant effects on the surface roughness and residual stress of the GH4169 superalloy workpiece after grinding. When $v=11$ m/s, $f=1000$ mm/min, $F=3$ N, the fatigue resistance is the best. When the linear velocity is greater than 15 m/s and the downward pressure is greater than 6 N, the surface quality of GH4169 superalloy decreases, the depth of scratches increases, and the burning phenomenon is serious.

Keywords: Abrasive belt grinding; Roughness; Residual stress; Low cycle fatigue; Anti-fatigue manufacturing

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.21.125

航空航天技术的不断发展进步对航空发动机的高可靠性服役提出了新挑战。叶片作为航空发动机的核心部件之一, 往往服役在高温、高压、复杂载荷情况下, 极易发生疲劳失效^[1]。据统计, 目前航空发动机零

件的失效形式多为疲劳失效^[2], 疲劳失效会严重影响发动机的总体性能, 甚至造成机毁人亡的严重后果^[3-5]。

GH4169 高温合金是一种广泛应用于航空发动机热端构件的材料, 具有较高的强度、抗蠕变性能和疲劳寿命,

尤其是在 650 °C 的环境下仍能保持理化性质稳定^[6]。因其出色的抗剪切能力和抗磨蚀能力, GH4169 高温合金也成为典型的难加工材料^[7]。在磨削过程中,磨粒钝化及过高的材料去除率会导致磨削热聚集而产生局部高温,使磨削过后工件表面发生烧伤^[8],严重影响加工质量,加工后表面抗疲劳性能难以保证。砂带磨削作为加工复杂曲面的精加工方式之一,有着高效磨削、精密磨削和冷态磨削等优点^[9],可以有效保证磨削过后复杂曲面构件的表面完整性^[10]。

叶片廓形精度、表面完整性等指标会影响叶片的服役性能和寿命^[11-12]。用于航空发动机的 GH4169 高温合金叶片长期在高温、高压、交变载荷等复杂的环境中服役,容易产生周期性应变集中的塑性变形,发生低周疲劳失效^[13]。很多学者通过试验探究了表面完整性指标对于各种工件、试验件低周疲劳性能的影响。Uhlmann 等^[14]研究了磨削工艺参数对于打磨后钢轨粗糙度和硬度的影响,发现进给速度对磨削过后的钢轨表面粗糙度有着显著影响。李坚等^[15]研究了抛磨工艺参数对抛磨后工件表面粗糙度的影响,利用极差分析法进行分析,得出了旋转速度、进给速度、接触力对表面粗糙度的影响依次减弱的结论。Wen 等^[16]研究了高强度合金钢超声振动磨削残余应力的形成机理,得出了加工参数与残余应力的相关规律,指出加工过程中,不同工艺参数下产生的磨削热不同是导致加工后工件表面残余应力不同的主要原因。罗学昆等^[17]研究了磨削、磨削+喷丸处理对疲劳寿命的影响,发现表面粗糙度和残余应力都会对工件的疲劳寿命产生影响,但是没有列出表面完整性因素影响程度的量化指标。Huang 等^[18]指出砂带磨削过程中较低的粗糙度能够降低裂纹产生的可能性,从而提高工件的疲劳寿命。Xiao 等^[19]认为叶片表面的残余压应力会抵消振动过程中的实际载荷,增强叶片表面强度,从而提高叶片的振动疲劳寿命,但文中采用的等效应力代替了残余应力的影响,没有揭示出残余应力对疲劳性能的影响机理。

众多学者针对具体的构件开展了表面完整性及疲劳性能的研究,但是目前砂带磨削过程关键工艺参数对于疲劳寿命的影响规律不清晰,难以有效指导抗疲劳磨削。考虑到针对某一构件的疲劳性能测试流程复杂且结果难以适用于不同种类构件,本文采用不同的工艺参数对 GH4169 高温合金加工的标准疲劳试样件进行砂带磨削加工,再对加工后的试样件表面进行形貌、粗糙度、残余应力检测,之后进行应力比 $R = -1$ 的拉压疲劳试验,最后根据疲劳循环数值及断口形貌,分析砂带磨削参数对疲劳试样件低周疲劳寿命的影响规律,从而为 GH4169 高温合金叶片的抗疲劳砂带磨削加工提供指导。

1 材料及设备

1.1 试验材料

试验所用 GH4169 高温合金材料为锻造板材,在线切割后热处理,热处理过程为 950 °C、1 h 和 720 °C、1 h,炉内冷却至 620 °C、8 h,最后风冷。表 1 和 2 给出了其化学组成及力学性能参数。

1.2 加工及检测设备

试样的磨削加工采用重庆大学高性能表面加工团队的激光砂带协同加工装备,该装备的三轴运动精度高、重复定位精度高且结构刚度大,有利于加工表面的一致性。所用砂带为 3M 公司生产的 A160 金字塔砂带,磨粒材料为氧化铝,干磨风冷。利用线切割技术将 GH4169 高温合金板材加工成标准疲劳试样,如图 1 所示。切割过程合理控制参数从而避免线切割过程中产生的热效应改变材料性质,试样侧面的氧化层采用砂纸进行抛光去除。

选用上海泰勒普森生产的 FTS Intra 表面粗糙度轮廓仪测量磨削后试样的表面粗糙度;选用 KEYEN 公司生产的 VHX-1000C/VW-6000 超景深三维显微系统及白光干涉仪检测加工后的表面形貌;采用 X 射线衍射仪测量加工后的表面残余应力;采用 MTS 拉扭组合电液伺

表 1 GH4169 高温合金的化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of GH4169 superalloy (mass fraction) %

Ni	Cr	Al	Mo	Ti	C	Nb
52.30	18.90	0.52	3.08	1.06	0.040	5.30
Mn	Si	Cu	Ta	Co	P	Fe
<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	余量

表 2 GH4169 高温合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of GH4169 superalloy

弹性模量 E/GPa	热导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	延伸率 $\delta/\%$	室温下硬度 (HB)	冲击值 $a_K/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	收缩率 $\psi/\%$	屈服强度/MPa
205	14.65	15	346~450	573	41	1030

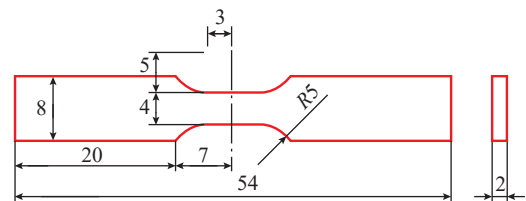


图 1 试样几何尺寸 (mm)

Fig.1 Sample geometry and dimensions (mm)

服材料试验系统进行低周疲劳测试,试验条件为室温,应力值为 80% 的屈服强度,应力比 $R=-1$,载荷形式为三角波,加载频率为 5 Hz,记录试样断裂的循环次数。试验设备及流程如图 2 所示。

1.3 试验参数设置

本研究探究的试验参数包括砂带线速度、进给速度和下压力。磨削加工试验采用单因素试验法,控制 3 个工艺参数中的 2 个改变另 1 个,从而获得单一工艺参数对加工表面粗糙度、残余应力等表面性能参数的影响。结合常规砂带磨削的工艺参数限制,选择的参数范围:线速度 v 为 6~18 m/s;进给速度 f 为 500~1000 mm/min;

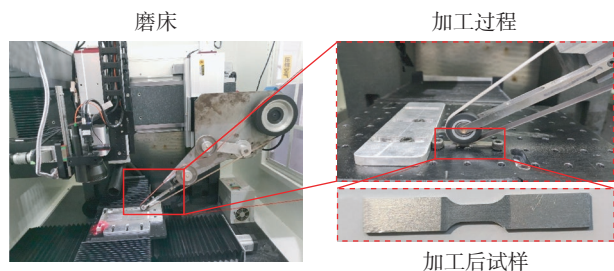


图 2 设备及流程

Fig.2 Equipment and processes

下压力 F 为 3~9 N。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌分析

不同磨削参数获得的表面形貌如图 3 所示。可以看出,每组试样表面均有较明显的脊状突起和深沟。从图 3 (a)和(b)可以看出,在较小的线速度水平下,随着下压力的提升,划痕明显加深,这是因为在较大的下压力条件下,部分较为坚硬的磨粒会在试样表面留下更深、更密的划痕;图 3 (a)和(d)对比可以看出,在砂带线速度较小的情况下,磨削后表面深沟及突起更多,在同样进给速度和下压力情况下,砂带磨削线速度越低,单颗磨粒和试样的作用时间越长,单颗磨粒造成的磨痕也越长,在多颗磨粒即整条砂带的作用下,造成了明显增多的深沟和突起;图 3 (b)、(e)和(h)中,图 3 (e)的深沟和突起最少,而图 3 (h)最多,这是因为图 3 (h)的高线速度条件下的切削引起了材料表面烧伤及材料黏附加刷,加工后图 3 (h)的试样表面的突起和深划痕更加密集;值得注意的是,图 3 (g)、(h)和(i)的加工过程中均出现了不同程度的火花飞溅,即磨削过程温度

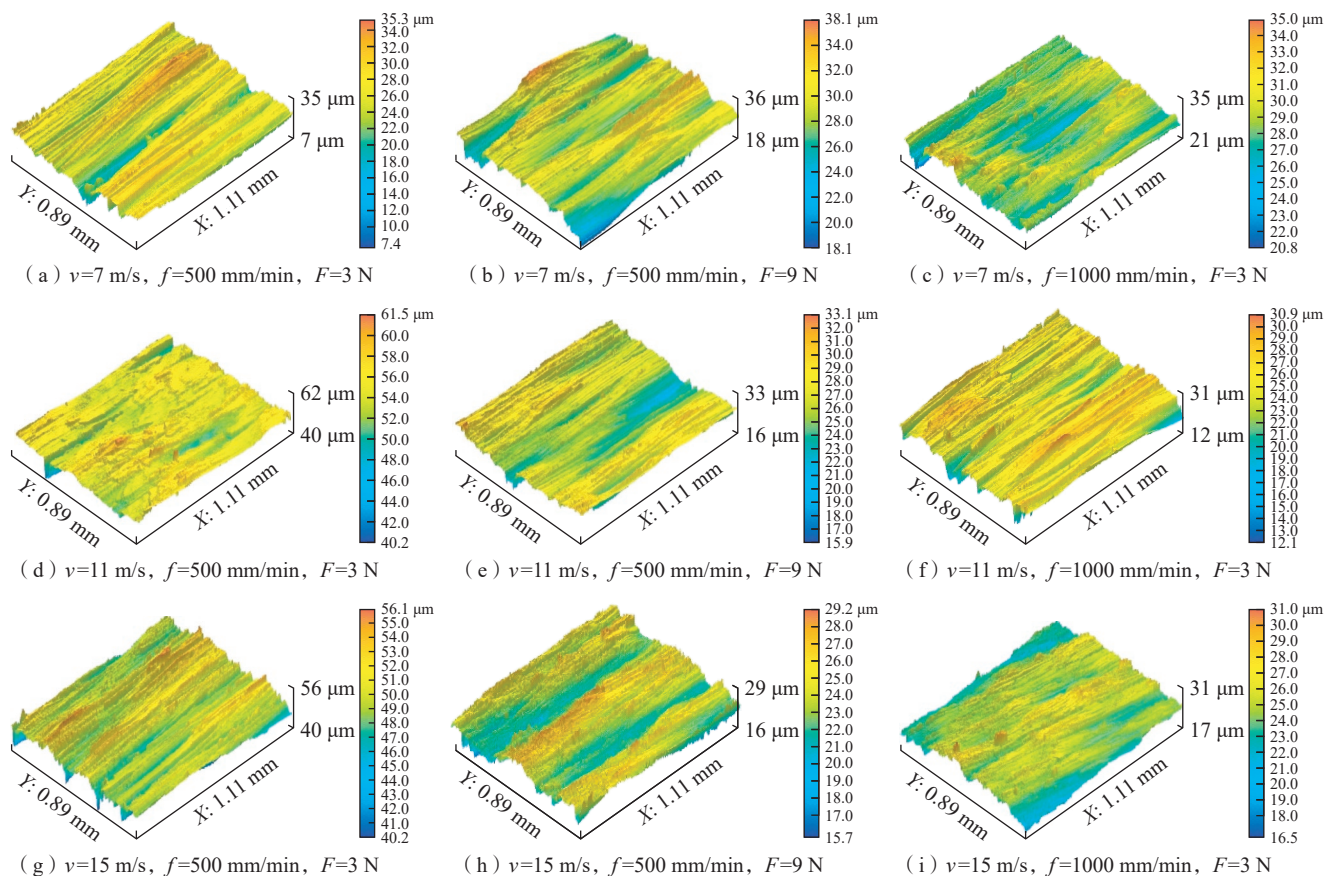


图 3 不同工艺参数下试样表面三维形貌

Fig.3 Three-dimensional morphology of sample surface under different process parameters

更高,这是加工后试样表面黏附物增加的主要原因。

利用超景深检测设备获得的表面形貌如图4所示,其中典型的划痕特征用红色虚线标出。从图4(a)和(c)的对比中可以看出,在线速度较低的情况下,试样表面会留下更深、更宽的划痕,磨削过程出现了剥离损伤现象;在中等的线速度下,划痕更密且更浅,没有发现明显的剥离损伤。图4(a)和(b)工艺参数区别为下压力,可以看出图4(b)中出现了更深、更宽且延续更长的划痕,这是因为较大下压力下低速磨削导致了单颗磨粒与试样表面更长时间的接触和挤压。图4(e)和(f)为线速度为15 m/s条件下磨削试样表面形貌,可以看出,虽然试样表面质量显著提升,但是表面均出现了不同程度的烧伤现象,尤其在图4(f)中出现了密集

连续烧伤痕迹,这与图3(h)中的密集突起和凹陷表面是对应的。

2.2 粗糙度分析

图5为单因素试验粗糙度探究结果。图5(a)为进给速度700 mm/min和下压力6 N情况下控制线速度在6~18 m/s范围变化测得;图5(b)为线速度11 m/s和下压力6 N情况下控制进给速度在500~1000 mm/min范围变化测得;图5(c)为线速度11 m/s和进给速度在700 mm/min情况下控制下压力在3~9 N范围变化测得。

从图5(a)中可以看出,粗糙度数值随着线速度的增大先减小后增大,且在线速度达到15 m/s后剧烈增大,结合前文的形貌分析,这是由于试样表面出现了烧伤,导致材料的去除机制发生了变化;从图5(b)中可

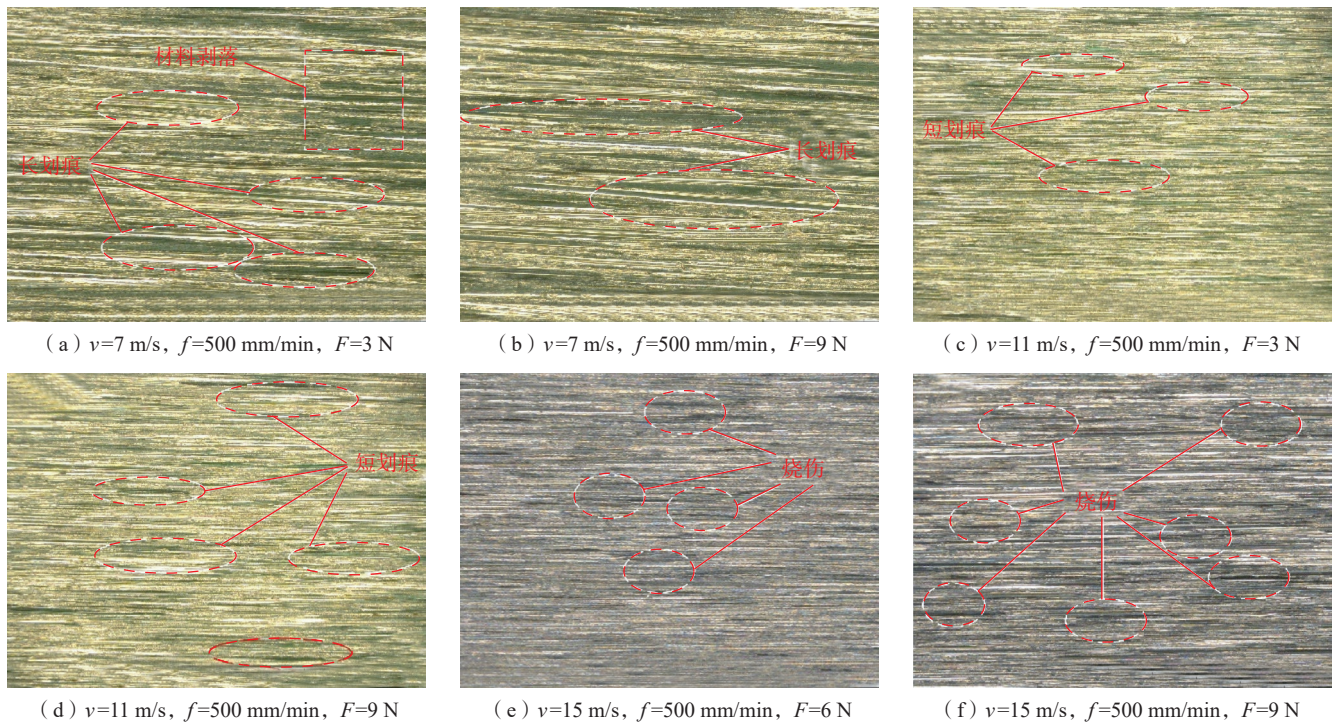


图4 不同工艺参数下试样表面二维形貌

Fig.4 Two-dimensional morphology of sample surface under different process parameters

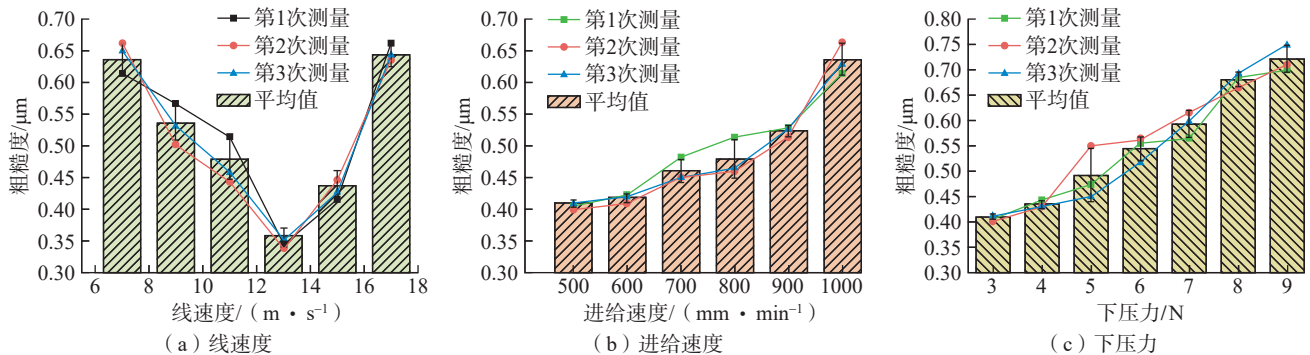


图5 不同单因素试验的粗糙度

Fig.5 Roughness of different single-factor experiments

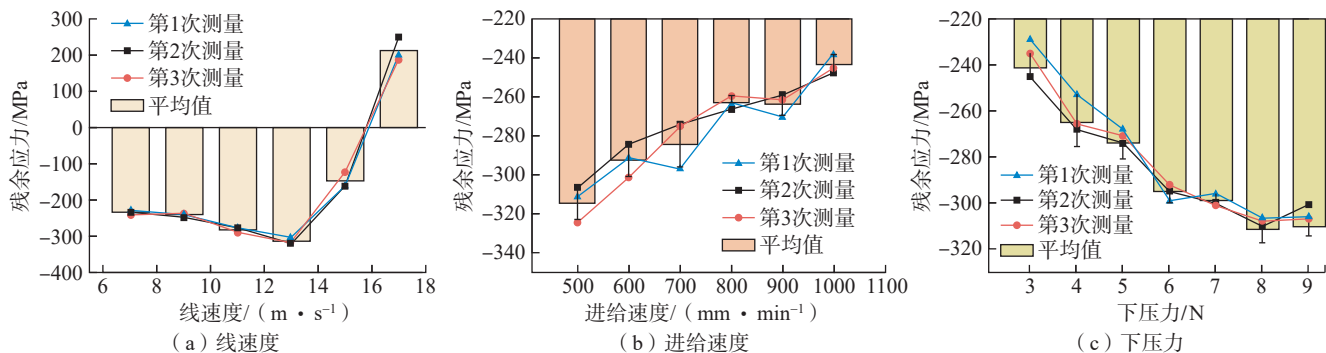


图6 不同单因素试验的残余应力
Fig.6 Residual stress of different single-factor experiments

可以看出,粗糙度会随着进给速度的增大而增大,但是前期增大幅度并不大,在进给速度由 900 mm/min 上升到 1000 mm/min 时,粗糙度明显提高;从图 5 (c) 中看出,粗糙度随着下压力的增大而增大。从各工艺参数对磨削后粗糙度影响程度来看,各工艺参数均能显著影响粗糙度数值,但是粗糙度会随线速度的增加先减小后增大,结合超景深结果分析,发现高速磨削导致工件表面烧伤是造成磨削后粗糙度增大的主要原因。

2.3 残余应力分析

图 6 为单因素下残余应力试验探究结果。图 6 (a) 为进给速度 700 mm/min 和下压力 6 N 情况下控制线速度在 6~18 m/s 范围变化测得;图 6 (b) 为线速度 11 m/s 和下压力 6 N 情况下控制进给速度在 500~1000 mm/min 范围变化测得;图 6 (c) 为线速度 11 m/s 和进给速度在 700 mm/min 情况下控制下压力在 3~9 N 范围变化测得。

从图 6 (a) 中可以看出,残余压应力数值随着线速度的增大先增大后减小。在线速度位于 6~13 m/s 区间时,残余压应力随线速度增大而缓慢增大。在线速度为 15 m/s 时,加工后表面残余应力由压应力向拉应力转变,在线速度为 17 m/s 时完全表现为拉应力,数值为 213 MPa。上述工艺参数的影响规律和粗糙度类似,结合表面形貌和粗糙度的分析认为出现了烧伤现象。从图 6 (b) 中看出,残余压应力的数值随着进给速度的增大而减小,减小程度较为均匀。从图 6 (c) 中看出,残余压应力数值随下压力的增大先增大后趋于平稳,在下压力为 8 N 之后出现了略微的减小,这是因为较大的下压力情况下磨削过程产生的磨削热增加,热影响作用加重。

2.4 疲劳性能研究

表面完整性检测后选取典型工艺参数进行低周疲劳试验,试验加工参数见表 3。

将各组的 3 个试样重复试验,记录平均循环次数,计算标准差并绘制为柱状图,获得试样的疲劳寿命如图 7 所示。从总体结果看出,前 3 组试样的疲劳循环次

表 3 疲劳试样磨削加工工艺参数

Table 3 Grinding process parameters of the fatigue specimens

编号	线速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	进给速度 $f/(mm \cdot min^{-1})$	下压力 F/N
1	7.8	500	3
2	7.8	750	9
3	7.8	1000	6
4	11.7	500	9
5	11.7	750	6
6	11.7	1000	3
7	15.6	500	6
8	15.6	750	3
9	15.6	1000	9

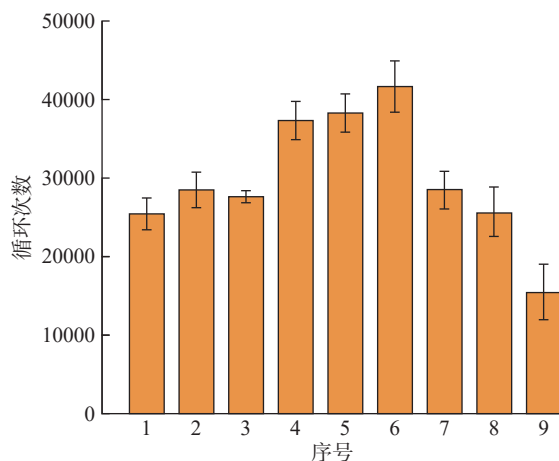


图7 疲劳循环次数统计
Fig.7 Statistics of fatigue cycles

数相对稳定,且偏差相对较小;第 4~6 组试样的疲劳寿命较高且离散性更大,其中第 6 组的循环次数最多,为 41579 次,表明线速度从 7 m/s 提升到 11 m/s 提高了试样疲劳性能;第 9 组疲劳循环次数最少,为 15478 次,且离散性最大,这证明高速快进给大切深并不利于试样件

疲劳寿命提高。

6号试样,其粗糙度平均值为 $0.41\ \mu\text{m}$,残余应力平均值为 $-225\ \text{MPa}$;9号试样,其粗糙度平均值为 $0.82\ \mu\text{m}$,残余应力平均值为 $319\ \text{MPa}$,二者残余应力有着本质区别。9号试样的残余应力转变原因为:9号试样的3个工艺参数选择最为激进,为9组探究范围中3个工艺参数的最大值。在磨削过程中,机械塑性变形引起的残余应力一般为压应力,而由热塑性变形引起的残余应力表现为拉应力^[20],9号试样在快速大进给大切深的条件下,生成了大量的磨削热,热塑性变形作用大于机械塑性变形,故加工后表现为残余拉应力。同时,6号试样表面未检测到烧伤,而9号试样表面烧伤较为严重,也佐证了上述推论。高粗糙度水平带来了更大的裂纹萌生可能,残余拉应力的作用降低了疲劳过程中的载荷抗性,多重作用下导致了6号和9号试样的疲劳循环次数不同。

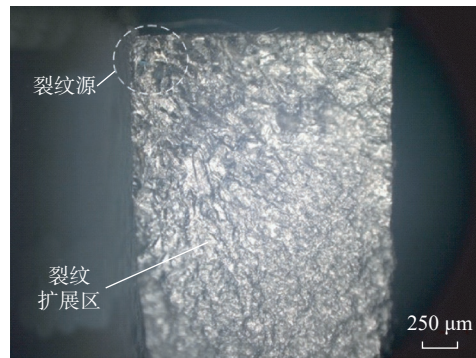
获取了6号和9号试样断裂截面,如图8所示。两组试样最显著差异的指标为粗糙度和残余应力。试样均从磨削表面靠近侧边的平滑过渡处萌生,如图8(a)和(b)所示,裂纹的萌生位置没有显著改变。图8(c)和(d)中显示出了明显的裂纹扩展分界线,即海滩纹。对比试样最终断裂区,发现图8(d)的瞬断区域更大,表示其抵抗载荷的能力更差。图8(c)具有更密集的裂纹扩展痕迹,且瞬断区更小,这归因于图8(c)试样件中的残余压应力可以抵消疲劳测试过程中部分载荷^[19]。

3 结论

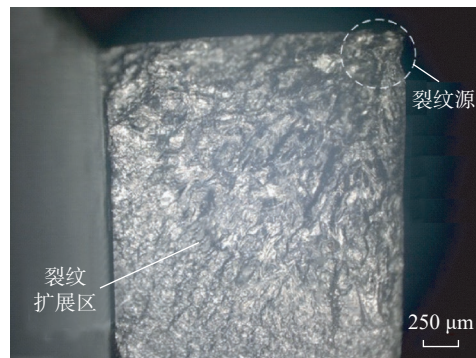
为探究磨削工艺参数对砂带磨削GH4169高温合金表面抗疲劳性能的影响规律,进而为航空发动机叶片抗疲劳磨削加工提供工艺指导,本研究在重庆大学自研激光砂带复合加工装备上采用不同工艺参数对GH4169高温合金疲劳试样进行砂带磨削加工,并开展了低周疲劳试验。结合磨削后试样表面完整性分析,探究了磨削工艺参数对疲劳寿命的影响机制,通过本研究得出以下结论。

(1)砂带磨削工艺参数可以显著改变GH4169高温合金砂带磨削过后的表面形貌。砂带线速度越小,则单颗磨粒与试样表面作用时间越长,留下的划痕越长;下压力越大,单颗磨粒切入试样深度越大,留下的划痕深度变大。在低转速、大下压力的工艺参数协同作用下,试样表面会留下较多连续且较深的划痕,降低表面完整性。

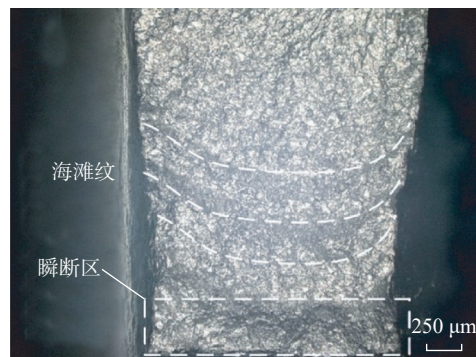
(2)通过粗糙度测试讨论了工艺参数对磨削后的GH4169高温合金表面粗糙度的影响。线速度的改变会显著影响粗糙度,随着线速度的增加,粗糙度先减小后增大,线速度在达到 $13\ \text{m/s}$ 后粗糙度趋势发生转变,发生转变的原因是线速度过大引起了试样表面烧伤。粗



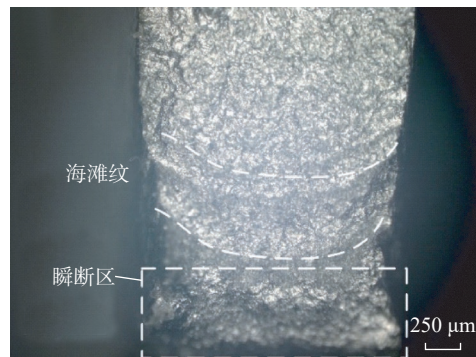
(a) 6号试样裂纹源



(b) 9号试样裂纹源



(c) 6号试样裂纹扩展及瞬断区



(d) 9号试样裂纹扩展及瞬断区

图8 断面结果

Fig.8 Cross-section results

糙度随进给速度和下压力的增大而增大,在进给速度大于 $900\ \text{mm/min}$ 后增速加快。

(3)通过残余应力测试探讨了工艺参数对磨削后的

GH4169 高温合金表面残余应力的影响。残余压应力数值随线速度增大先增大后减小,直到转变为拉应力,转变发生在线速度超过 15 m/s 之后,转变的原因为高速切削带来的热应力。残余压应力随进给速度增大而减小,随下压力增大而增大,但是增幅逐渐减缓,超过 8 N 之后基本保持不变。

(4)通过疲劳测试得到疲劳循环次数最多的工艺参数组合为:线速度 $v=11$ m/s,进给速度 $f=1000$ mm/min,下压力 $F=3$ N。结合断面形貌观察,工艺参数会影响加工后表面完整性,进一步会影响低周疲劳性能,但不会影响裂纹萌生位置。

参考文献

- [1] 李飘,姚卫星. 镍基单晶合金低周机械疲劳寿命模型评述[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 9124-9131, 9151.
- LI Piao, YAO Weixing. A review of low cycle mechanical fatigue life models for nickel-based single crystal superalloy[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 9124-9131, 9151.
- [2] 谢孝昌,李旭东,汤春峰,等. 直接时效对 GH4169 合金应力集中敏感性的影响[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 88-93.
- XIE Xiaochang, LI Xudong, TANG Chunfeng, et al. Effect of direct aging on stress concentration sensitivity of GH4169 superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(2): 88-93.
- [3] 侯理臻,廖明夫,王四季,等. 航空发动机转子不平衡下转静摩擦试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(22): 14-20, 43.
- HOU Lizhen, LIAO Mingfu, WANG Siji, et al. Experimental study on the aero-engine rotor-stator rubbing in imbalance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(22): 14-20, 43.
- [4] SHLYANNIKOV V N, ISHTYRYAKOV I S. Crack growth rate and lifetime prediction for aviation gas turbine engine compressor disk based on nonlinear fracture mechanics parameters[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 103: 102313.
- [5] HOU J F, WESCOTT R, ATTIA M. Prediction of fatigue crack propagation lives of turbine discs with forging-induced initial cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 131: 406-418.
- [6] 刘雪丽,李和智,卿颖,等. 激光修复 GH4169 合金零部件关键技术研究[J]. 稀有金属, 2021, 45(6): 758-762.
- LIU Xueli, LI Hezhi, QING Ying, et al. Key technology of laser repairing GH4169 alloy parts[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45(6): 758-762.
- [7] 黄保腾,张彦彬,王晓铭,等. SG 砂轮磨削镍基合金 GH4169 砂轮磨损机理与磨削性能的实验评价[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 62-70.
- HUANG Baoteng, ZHANG Yanbin, WANG Xiaoming, et al. Experimental evaluation of wear mechanism and grinding performance of SG wheel in machining nickel-based alloy GH4169[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 62-70.
- [8] NAIK D N, MATHEW N T, VIJAYARAGHAVAN L. Wear of electroplated super abrasive CBN wheel during grinding of Inconel 718 super alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 43: 1-8.
- [9] 黄云. 砂带磨削技术的研究现状和发展方向简介[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(3): 1-4.
- HUANG Yun. Brief introduction of research status and development direction of belt grinding technology[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(3): 1-4.
- [10] 丁文锋,李敏,李本凯,等. 难加工金属材料磨削加工表面完整性研究进展[J]. 航空材料学报, 2021, 41(4): 36-56.
- DING Wenfeng, LI Min, LI Benkai, et al. Recent progress on surface integrity of grinding difficult-to-cut metal materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(4): 36-56.
- [11] 黄云,李少川,肖贵坚,等. 航空发动机叶片材料及抗疲劳磨削技术现状[J]. 航空材料学报, 2021, 41(4): 17-35.
- HUANG Yun, LI Shaochuan, XIAO Guijian, et al. Research progress of aero-engine blade materials and anti-fatigue grinding technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(4): 17-35.
- [12] HUA Y, LIU Z Q, WANG B, et al. Surface modification through combination of finish turning with low plasticity burnishing and its effect on fatigue performance for Inconel 718[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 375: 508-517.
- [13] 闫鹏,冯寅楠,乔双,等. 镍基变形高温合金低周疲劳研究进展[J]. 稀有金属, 2021, 45(6): 740-748.
- YAN Peng, FENG Yinnan, QIAO Shuang, et al. Research progress on low cycle fatigue of nickel-based wrought superalloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45(6): 740-748.
- [14] UHLMANN E, LYPOVKA P, HOCHSCHILD L, et al. Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness[J]. Wear, 2016, 366-367: 287-293.
- [15] 李坚,王兵,陈浩文. 抛磨工艺参数对表面粗糙度的影响研究[J]. 机械工程与自动化, 2022(1): 30-32.
- LI Jian, WANG Bing, CHEN Haowen. Research on effect of polishing process parameters for surface roughness[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022(1): 30-32.
- [16] WEN J, TANG J Y, ZHOU W H. Study on formation mechanism and regularity of residual stress in ultrasonic vibration grinding of high strength alloy steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 608-622.
- [17] 罗学昆,吴小燕,王科昌,等. 表面完整性对 FGH95 合金高温疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2020, 40(2): 53-60.
- LUO Xuekun, WU Xiaoyan, WANG Kechang, et al. Effect of surface integrity evolution on high-temperature fatigue property of FGH95 alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(2): 53-60.
- [18] HUANG Y, LI S C, XIAO G J, et al. Research on the fatigue failure behavior of 1Cr17Ni2 blades ground by abrasive belt with passivation treatment[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129: 105670.
- [19] XIAO G J, CHEN B Q, LI S C, et al. Fatigue life analysis of aero-engine blades for abrasive belt grinding considering residual stress[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 131: 105846.
- [20] DING W F, ZHANG L C, LI Z, et al. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9-12): 2939-2968.

通讯作者:王冬冬,工程师,研究方向为航空、舰船装备制造。

(责编 七七)