

高温合金 K445 微磨削表面质量实验研究

周云光, 巩亚东, 温雪龙, 朱宗孝

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为探究镍基高温合金的微尺度磨削表面质量, 首先采用 0.9 mm 磨头直径、500[#] 磨粒的微磨棒对典型镍基高温合金材料 K445 进行微尺度磨削三因素五水平正交试验。通过极差分析找出影响微磨削表面质量的主次因素: 进给速度的影响最大、主轴转速次之、磨削深度的影响最小; 优化出了微磨削 K445 的理想工艺组合, 即进给速度 $f_m = 20 \mu\text{m/s}$ 、磨削深度 $a_p = 6 \mu\text{m}$ 、主轴转速 $v_g = 58 \text{ kr/min}$ 时, 加工表面粗糙度最小, R_a 为 462 nm。其次通过单因素实验总结出了进给速度、磨削深度、主轴转速及微磨棒悬伸量对 K445 磨削表面质量的影响规律, 并对其原因进行了深入分析, 使之成为镍基高温合金微小零件的加工提供重要的理论依据。

关 键 词: 微磨削; 镍基高温合金; 磨削参量; 表面粗糙度; K445

中图分类号: TH 161

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)02-0218-05

Experimental Study on Surface Quality in Micro-grinding of Superalloy K445

ZHOU Yun-guang, GONG Ya-dong, WEN Xue-long, ZHU Zong-xiao

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: ZHOU Yun-guang, E-mail: zhouyunguang123@126.com)

Abstract: To explore the micro-grinding surface quality of nickel-based superalloy, orthogonal experiments of three factors and five levels on nickel-based superalloy K445 were performed using a micro-grinding tool with [#]500 grains and 0.9 mm diameter. The influencing factors on the surface roughness were clarified according to the range analysis: the feed rate was a dominant factor, followed by spindle speed and grinding depth. The optimized parameters combination was as follows: feed rate $f_m = 20 \mu\text{m/s}$, the grinding depth $a_p = 6 \mu\text{m}$ and the feed speed $v_g = 58 \text{ kr/min}$, on which the surface roughness $R_a = 462 \text{ nm}$, being minimum. Then, how the factors such as spindle speed, feed speed, grinding depth and overhanging length affected grinding surface quality was analyzed through a single-factor experiment so as to provide important theoretical basis for fabricating micro nickel-based superalloy workpiece.

Key words: micro-grinding; nickel-based superalloy; grinding parameter; surface roughness; K445

微尺度磨削主要指使用直径小于 1 mm 的微型磨棒对材料直接进行机械去除加工获得所需形貌, 其主要用于微型零件及微特征的加工^[1-4]。

镍基高温合金不仅有良好的蠕变强度, 还有优良的高温强度和高温抗氧化能力, 被广泛应用于航空、宇航及船舶工业中, 如: 火箭发动机、航空发动机、小型航天器、工业燃气轮机的叶片及涡轮传动轴等热端部件, 是一种典型的难加工材料。高

温合金构件的最终服役表面为磨削表面, 而磨削表面的质量直接影响构件的使用性能。国内外对高温合金的磨削进行了一些研究工作, 如: Aspinwall 等^[5]采用电镀 CBN 砂轮磨削镍基高温合金, 获得了粗糙度为 750 nm 的加工表面; Balan 等^[6]研究了半干式磨削中油雾参数对磨削 Inconel 751 高温合金的影响, 获得了表面形貌光滑的磨削表面; Guo 等^[7]分析了加工参数和刀具

收稿日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375082)。

作者简介: 周云光(1986-), 男, 河北秦皇岛人, 东北大学博士研究生; 巩亚东(1958-), 男, 辽宁本溪人, 东北大学教授, 博士生导师。

磨损对磨削过程的影响;傅玉灿等^[8]研究了单颗磨粒高速磨削镍基高温合金的切屑形成过程,在获得最大未变形磨削深度的同时分析了转速与磨屑形状的关系.黄新春等^[9-10]研究了磨削参数对磨削过程的影响,建立了磨削 GH4169 的表面粗糙度的经验公式,并对各磨削参数进行了优选.但是,就目前检索的文献来看,对镍基高温合金的微尺度磨削还鲜有报道.镍基高温合金导热性差,因此磨削过程中磨削温度高、磨削力大,容易造成砂轮堵塞和磨损.另外,微米级的高温合金零件及微特征的磨削过程已不是常规尺度磨削工艺的成比例缩小,而受到尺度效应的强烈影响,表现出传统磨削理论无法解释的现象和特点.

本文针对镍基高温合金微型零件越来越广泛的应用前景,对典型镍基高温合金 K445 的微尺度磨削进行了深入研究.首先通过正交分析方法优化出合理的微磨削工艺方案,然后深入分析了各磨削参数对磨削表面质量的影响.

1 K445 微尺度磨削实验

1.1 实验条件

实验材料:典型镍基高温合金 K445.实验机床:JX-1 型精密微磨削机床,机床主轴最高转速 60 000 r/min, x/y/z 轴工作行程 490 mm/490 mm/120 mm,最高进给速度 9 m/min.微磨具:刀柄直径 3 mm、磨头直径 0.9 mm、表层电镀 500[#]磨粒.磨削表面粗糙度在三维表面轮廓仪上测量.

1.2 实验方案

实验首先选取对微磨削过程有重要影响的主轴转速、磨削深度、进给速度三个因素五个水平进行正交试验,进给速度 f_m ($\mu\text{m/s}$) 取 20 (A_1), 40 (A_2), 100 (A_3), 200 (A_4) 和 300 (A_5);磨削深度 a_p (μm) 取 3 (B_1), 6 (B_2), 9 (B_3), 12 (B_4) 和 15 (B_5);主轴转速 n_g ($\times 10^3$ r/min) 取 18 (C_1), 28 (C_2), 38 (C_3), 48 (C_4) 和 58 (C_5).正交试验方案设计见表 1.

2 实验结果及分析

K445 镍基高温合金微磨削各正交试验方案对应的加工表面粗糙度值 R_a 如表 1 所示.

2.1 微尺度磨削工艺参数的优化

微尺度磨削加工表面粗糙度值极差分析如表 2 所示. $\sum M_i$ 表示某一因素在同一参数水平下的加工表面粗糙度值之和; N_i 表示某因素在同一

表 1 微尺度磨削正交试验表				
Table 1 Orthogonal test table of micro-grinding				
编号	主轴转速	磨削深度	进给速度	表面粗糙度 R_a/nm
1	C_1	B_1	A_4	881
2	C_1	B_2	A_3	895
3	C_1	B_3	A_2	945
4	C_1	B_4	A_1	654
5	C_1	B_5	A_5	751
6	C_2	B_1	A_3	797
7	C_2	B_2	A_2	656
8	C_2	B_3	A_1	661
9	C_2	B_4	A_5	672
10	C_2	B_5	A_4	696
11	C_3	B_1	A_2	702
12	C_3	B_2	A_1	496
13	C_3	B_3	A_5	732
14	C_3	B_4	A_4	918
15	C_3	B_5	A_3	788
16	C_4	B_1	A_1	538
17	C_4	B_2	A_5	725
18	C_4	B_3	A_4	567
19	C_4	B_4	A_3	792
20	C_4	B_5	A_2	613
21	C_5	B_1	A_5	614
22	C_5	B_2	A_4	679
23	C_5	B_3	A_3	742
24	C_5	B_4	A_2	476
25	C_5	B_5	A_1	671

水平下粗糙度值的平均值, $N_i = (\sum M_i)/n$, n 为正交试验表中某一因素同水平下的实验次数; R 表示各因素在同一水平下粗糙度值的极差:

$$R = \max |(N_i - N_j)|_{i \neq j}, i, j = 1, 2, 3, 4, 5.$$

R 反映了粗糙度值的变动幅度, R 越大, 该因素对加工表面粗糙度的影响越大. 由表 2 可知, 在此微尺度磨削实验中, 进给速度对微磨削 K445 高温合金的表面粗糙度影响最大, 主轴转速次之, 磨削深度的影响最小. 优化出的工艺组合为 $A_1C_5B_2$. 对此方案进行了 5 次重复实验, 测得表面粗糙度值为 462 nm, 通过对比得知, $A_1C_5B_2$ 方案最优.

2.2 工艺参数对微磨削表面质量的影响

当研究某一因素的影响时, 将其他因素水平固定, 通过变换某一参数总结出进给速度、主轴转速、微磨棒悬伸量和磨削深度对微磨削 K445 表面粗糙度的影响规律.

表 2 实验结果极差分析

Table 2 Range analysis of the test results			
因素	磨削表面粗糙度/nm		
	A	B	C
ΣM_1	3 020	3 532	4 126
ΣM_2	3 392	3 451	3 482
ΣM_3	4 014	3 647	3 636
ΣM_4	3 741	3 512	3 235
ΣM_5	3 494	3 519	3 182
N_1	604. 0	706. 4	825. 2
N_2	678. 4	690. 2	696. 4
N_3	802. 8	729. 4	727. 2
N_4	748. 2	702. 4	647. 0
N_5	698. 8	703. 8	636. 4
R	198. 8	39. 2	188. 8
因素主次	ACB		
最优方案	$A_1C_5B_2$		

2. 2. 1 进给速度对微磨削表面质量的影响

由图 1a 可知,进给速度越高,微磨削表面粗糙度越大. 进给速度大,磨削效率高,但当进给速度增大时,磨削力也显著增大,可能导致磨棒来不及排屑,磨屑黏附在磨粒的尖峰上;随着时间的推移,磨屑堆积、长大,将磨粒间隙堵塞,磨棒变钝,磨削力和磨削热剧增,甚至出现微磨棒表层电镀 CBN 磨粒脱落,造成磨棒破损,从而显著影响磨削表面粗糙度. 如图 1b 和图 1c 所示,进给速度越高,微磨棒堵塞就越严重,磨粒变钝得越厉害,造成磨削加工困难,影响磨削加工过程材料的去除,导致磨削表面粗糙度值变大.

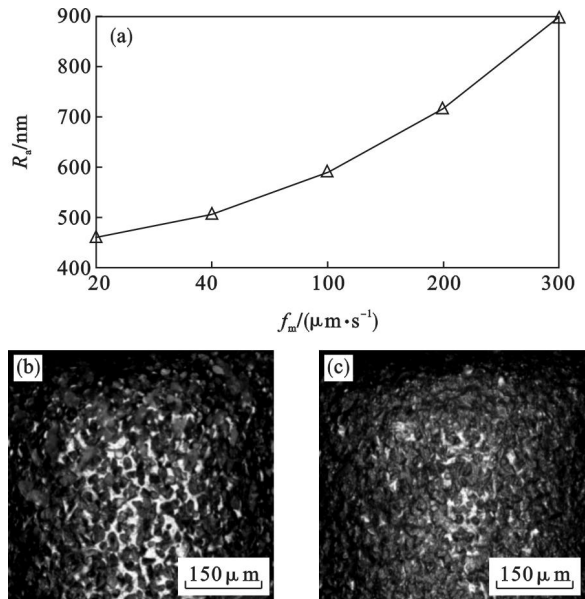


图 1 进给速度对表面粗糙度的影响

Fig. 1 Influence of feeding speed on surface roughness

(a)—粗糙度值变化曲线;
(b)— $f_m = 2 \mu\text{m}/\text{s}$; (c)— $f_m = 300 \mu\text{m}/\text{s}$.

2. 2. 2 主轴转速对微磨削表面质量的影响

由图 2a 可知,随着主轴转速的提高,加工表面粗糙度值逐渐减小. 分析其原因是:转速越高,微磨棒上的磨粒线速度越高,单位时间内参与磨削的磨粒数量增加,单个磨粒的切削厚度减小,塑性变形的传播速度小于磨削线速度,材料来不及变形就已经被磨粒切削,同时磨屑在瞬间被切离加工区域,大部分磨削热被磨屑带走,大大减小了磨削力和积屑瘤出现的可能性;而转速低时,加工表面粗糙,切屑不能及时排除,甚至在表面出现堆积,如图 2b、图 2c 所示,影响加工表面质量. 但在转速增大过程中,相邻两点间粗糙度值对转速的斜率越来越小,如图 2a 所示,表明当主轴转速增大到一定值时,主轴转速的变化对加工表面粗糙度的影响越来越不明显,同时过高的转速可能引起机床主轴的振动;因此,在对镍基高温合金进行微磨削的实际生产中,可适当提高机床主轴转速,以获得较好的表面质量.

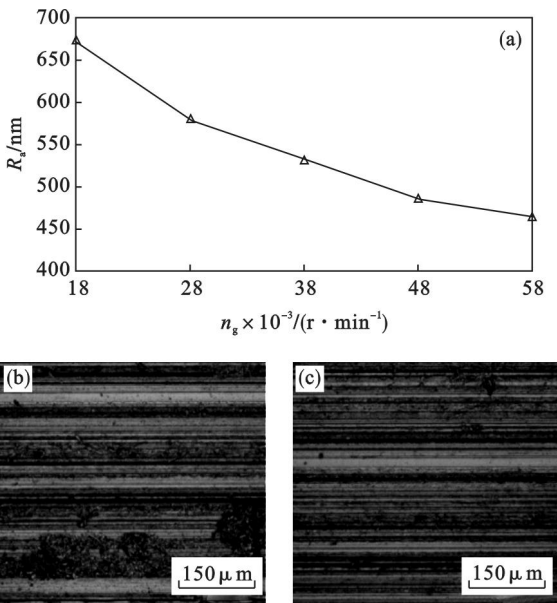


图 2 主轴转速对表面粗糙度的影响

Fig. 2 Influence of spindle speed on surface roughness

(a)—粗糙度值变化曲线;
(b)— $n_g = 18 \times 10^3 \text{ r}/\text{min}$; (c)— $n_g = 58 \times 10^3 \text{ r}/\text{min}$.

2. 2. 3 微磨棒悬伸量对表面质量的影响

传统大尺度加工时,若增大刀具的悬伸量,势必会使刀具的刚度降低,可能会引起微米级的刀具跳动量. 微米级的刀具跳动量对大尺度加工影响不大,甚至可以忽略;但在微尺度磨削过程中,磨棒的整体尺寸与传统砂轮相比非常小,同样的刀具跳动量与微磨棒直径的比值较大,尤其对于 K445 镍基高温合金这种难加工材料,刀具悬伸量的差异对磨削质量的影响不可忽略,如图 3 所示.

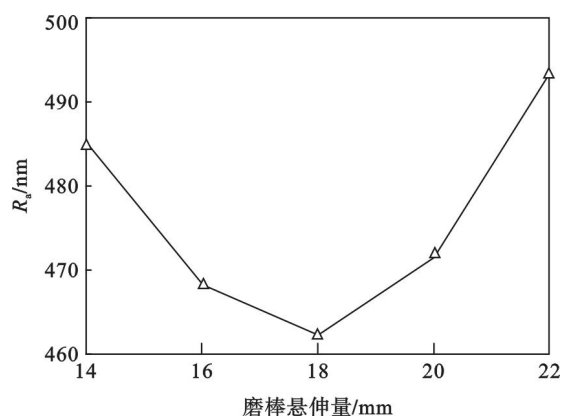


图3 微磨棒悬伸量对表面粗糙度的影响

Fig. 3 Influence of overhanging length of micro-grinding tool on surface roughness

由图3可知,随着刀具悬伸量的变化,K445表面粗糙度先减小后增大.原因是,当微磨棒悬伸量过小时,主轴转动和外界干扰引起的振动很容易传到微磨棒上,从而影响加工表面质量,此时主轴转动和外界干扰对加工的影响大于微磨棒刚度变化的影响.当刀具悬伸量过大时,在刀柄径向跳动量一定的情况下,传递到微磨棒尖端的径向跳动变大,造成加工表面质量变差.

2.2.4 磨削深度对微磨削表面质量的影响

由图4a可知,磨深从 $3\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的过程中,表面粗糙度先减小后增大,磨深为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的粗糙度值高于磨深为 $6\text{ }\mu\text{m}$ 时的粗糙度值;磨深从 $6\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的过程中,加工表面粗糙度值逐渐变大;当磨深为 $6\text{ }\mu\text{m}$ 时,表面粗糙度值达到最小.产生这种现象的原因是:在微尺度磨削过程中,当磨削深度减小到一定程度时,微磨粒切削刃就有可能只是对工件材料进行摩擦和挤压,而只有少量甚至没有材料被去除,加工表面在磨削过后出现较大的弹性恢复,而导致微磨削表面质量变差.另外,由于镍基高温合金属于典型的难加工材料,材料黏性较大,在较低磨深情况下,容易造成磨粒切削处形成积屑瘤和磨粒之间堵塞,影响了材料的去除.随着磨削深度增大,微磨削过程中磨削力和磨削温度升高,磨削表面塑性变形大,导致微磨棒排屑困难,从而导致在较大磨深时加工表面出现一定的烧伤,引起粗糙度值增大.图4b~图4e分别显示了切深为 $3, 6, 12$ 和 $15\text{ }\mu\text{m}$ 时微磨削的表面形貌:图4b中表面纹理已经发生变化,可以判断出加工表面出现了较大的塑性变形及弹性恢复;图4c加工表面磨削纹理清晰,塑性变形小,产生的划痕较浅,表面质量良好;图4d和图4e表面凹凸不平,凹坑及划痕较深,也出现了

较大的弹性恢复,表面质量较差.

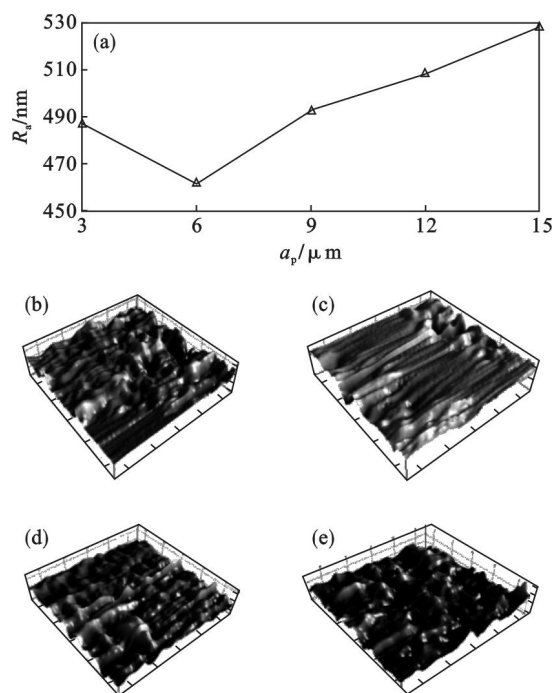


图4 磨削深度对表面粗糙度的影响

Fig. 4 Influence of grinding depth on surface roughness

(a)—粗糙度值变化曲线; (b)— $a_p = 3\text{ }\mu\text{m}$;
(c)— $a_p = 6\text{ }\mu\text{m}$; (d)— $a_p = 12\text{ }\mu\text{m}$; (e)— $a_p = 15\text{ }\mu\text{m}$.

3 结 论

1) 利用正交试验方案,使用磨头直径为 0.9 mm 、表面镀层磨粒为 $500^\#$ CBN的微磨棒对K445镍基高温合金进行微磨削加工,根据极差分析结果得出,进给速度对加工表面质量影响最大,主轴转速的影响次之,磨深的影响最小.微磨削优化工艺参数组合:进给速度 $20\text{ }\mu\text{m/s}$ 、切削深度 $6\text{ }\mu\text{m}$ 、主轴转速 $58 \times 10^3\text{ r/min}$,此时的加工表面粗糙度值为 462 nm .

2) 通过单因素实验分析得出:①K445镍基高温合金的微磨削表面粗糙度随主轴转速的升高而降低,转速低时会出现积屑瘤,实际加工中可适当提高主轴转速;②磨深从 $3\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的过程中,粗糙度值先减小后增大,磨深为 $6\text{ }\mu\text{m}$ 时的加工表面形貌最光滑,粗糙度值最小;③进给速度从 $20\text{ }\mu\text{m/s}$ 增大到 $300\text{ }\mu\text{m/s}$ 过程中,粗糙度值逐渐增大,当进给速度较大时,砂轮出现了严重的堵塞情况;④微磨棒悬伸量对磨削表面有一定的影响,加工过程中悬伸量不能太长也不能太短,悬伸量为 18 mm 时,获得的粗糙度值最小.

(下转第242页)