

镍基高温合金珩磨材料去除率研究

黄大顺¹ 杨长勇¹ 傅玉灿¹ 陈燕¹ 杨能阁² 闫文²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 西安航空动力股份有限公司, 西安, 710021)

摘要: 针对典型的镍基高温合金材料 GH4169 开展珩磨试验, 研究了主轴转速、往复速度、每往复进给量、油石粒径对材料去除率的影响规律。结果表明: 主轴转速对材料去除率影响较小, 其余三因素均对材料去除率有显著影响, 其中每往复进给量和油石粒径的影响最为显著, 且材料去除率与三者均呈现正相关关系。进行多元线性回归拟合出经验公式。同时还发现, 适当提高网纹交叉角可以提高珩磨材料去除率。对加工余量一定且粗糙度要较高的内孔珩磨进行了工艺优化, 实现了更高的加工效率。

关键词: GH4169; 珩磨; 材料去除率; 网纹交叉角; 工艺优化

中图分类号: TG58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)05-0726-06

Study on Material Removal Rate of Nickel-Based Superalloy During Honing

Huang Dashun¹, Yang Changyong¹, Fu Yucan¹, Chen Yan¹, Yang Nengge², Yan Wen²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. Xi'an Aero-Engine (Group) Ltd., Xi'an, 710021, China)

Abstract: Honing experiments are carried out for a typical superalloy GH4169 to analyze the material removal rate against four factors: spindle speed, stroke speed, wedge feed per stroke cycle and grain size. The results show that: the other three factors have a significant influence on material removal rate while the spindle speed affects little, in which grain size and feed per stroke cycle exert the greatest impact on material removal rate. There is a positive correlation between material removal rate and the three caught. And the experience formula is fit with multiple linear regression. The study also finds that raise the cross hatch angle appropriately can improve material removal rate. Honing process is optimized for hole with small allowance and a higher roughness request to achieve higher efficiency.

Key words: GH4169; honing; material removal rate; cross hatch angle; process optimization

镍基高温合金以其在高温状态下具有良好综合力学性能、热稳定性和抗氧化能力而广泛用于航空航天领域, 其特点是导热系数低、材料塑性大, 属于典型的难加工材料^[1-2]。在航空航天领域中存在很多诸如压气机盘上的孔、阀和衬套之类的孔类零件。时代的发展也对飞行器提出新的要求: 更大的推重比、更高的速度, 这势必对孔的精度要求更高。

内圆磨削、珩磨和研磨是 3 种常用的孔的精加工方式。内圆磨削是线接触, 加工效率低、磨削力大且不均匀、加工长孔比较困难而且装夹不易对中。研磨加工去除余量小、效率低下、污染严重、人为因素影响大且难以实现自动化。珩磨兼有磨和研的特点, 有它独特的优势。

珩磨包含 3 种运动, 珩磨时配备油石^[3-4]的珩

基金项目: 国家自然科学基金(51305200)资助项目; 江苏省自然科学基金(BK20130805)资助项目; 江苏省科技支撑计划(BE2013122)资助项目。

收稿日期: 2014-05-10; **修订日期:** 2014-07-10

通信作者: 陈燕, 女, 教授, E-mail: ninaych@nuaa.edu.cn。

磨头同时做旋转和往复运动,珩磨油石径向扩张进给,从圆柱形工件表面刮掉一层金属,同时留下交叉网纹图案,这些图案可以作为润滑油的通道^[5-6]。珩磨能提供较小的形位公差和较好的表面粗糙度,常作为最后一道工序用在传统的机械加工过程之后,如钻、铰、镗等^[7-8]。有很多因素会影响内圆珩磨的材料去除率。一方面涉及到珩磨机本身,如往复速度,切向速度,珩磨油石作用在工件表面的压力以及冷却液的类型等;另一方面则涉及到珩磨油石的磨料粒径大小、结合剂类型、磨料密度大小以及油石硬度等^[9]。近年来关于珩磨的研究也开展了许多,文献^[10]等采用金刚石和 SiC 油石分别对灰铸钢套进行粗珩和精珩以探究珩磨参数对表面完整性、生产率、网纹角以及摩擦系数的影响。结果表明:对于 D181 油石而言,切削速度对粗糙度影响最大;对于 D151 油石而言,油石压力对粗糙度影响最大。对两种油石加工效率影响最大的都是切削速度。文献^[11]采用金属结合剂 CBN 油石珩磨缸体,研究不同珩磨参数对表面粗糙度的影响,结果表明:缸体表面粗糙度受磨料粒度影响最大,其次是珩磨头压力,切向速度对粗糙度影响微弱。文献^[12]使用 3 个不同粒径的油石和几种不同压力下 45 钢的内圆珩磨试验。其结果表明,材料去除速率取决于粒度大小,压力和珩磨时间。文献^[13]研究了油石压力、速度和网纹交叉角,试图增加珩磨效率。他们在网纹交叉角 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时获得最高的材料去除率。

以往关于珩磨的研究多侧重于普通钢材,很少涉及到以高温合金为代表的难加工材料。由于实际生产中给珩磨预留的加工余量较少,一般在 $0.01\sim 0.02\text{ mm}$,且表面粗糙度要求较高,一般要求 $Ra0.2\ \mu\text{m}$,如何在较高加工精度要求和较小加工余量的前提下实现更高效珩磨加工是个难点。本文选取高温合金 GH4169 开展珩磨材料去除率研究,以主轴转速、往复速度、每往复进给量、油石粒径作为考虑因素,开展正交试验,以材料去除率作为指标,进行方差分析,并进行回归拟合得出经验公式。在加工余量为 0.02 mm 且粗糙度要求 $Ra0.2\ \mu\text{m}$ 的前提下对珩磨工艺进行优化实现高效加工。

1 试验材料及方法

1.1 试验设备

试验在 MB4250 立式珩磨机上开展(图 1)。主轴最高转速 $1\ 800\text{ r/min}$,选用配备双导向条的



(a) 珩磨试验设备

(b) 工件装夹图

图 1 试验装置图

Fig. 1 Experimental setup for honing and workpiece clamping

单油石珩磨杆和 4 种不同粒度相同金属结合剂 CBN 珩磨油石。

试验工件孔长 20 mm ,珩磨油石长度一般为工件长度的 $2/3\sim 3/2$ ^[14]。因此试验选用的油石长度为 30 mm 。珩磨机在每往复冲程的顶端进给一次,因此可以通过设置每往复进给量和总进给量来控制往复行程次数,所有试验统一选取 30 个往复行程。

1.2 试验工件

选取铸造镍基高温合金 GH4169(性能见表 1^[15])作为试验对象,孔径为 9.98 mm 。

表 1 铸造 GH4169 机械物理性能

Tab. 1 Physical and mechanical properties of casting GH4169

抗拉强度/GPa	0.2%屈服强度/GPa	热膨胀系数/ $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	硬度(HRC)
1.58	1.20	14.8	10.63	37~47

1.3 试验方法

选取主轴转速 n ,往复速度 v_a ,每往复进给量 Δx 和油石粒径 g_s 作为考虑因素,开展 4 因素 4 水平的正交试验(见表 2,3),以材料去除率作为指标进行方差分析,并进行多元线性回归拟合出经验公式。然后针对方差分析的结果开展试验探究材料去除率的影响规律,并基于此开展珩磨工艺优化以实现加工余为 0.02 mm ,粗糙度要求 $Ra0.2\ \mu\text{m}$ 的内孔更高效的珩磨加工。

根据珩磨加工的特性,珩磨材料去除率^[16]定义为单位时间单位面积油石与工件接触面积上的材料去除体积,材料去除率 Q_m ^[17]由式(1)给出。

表 2 试验因素及水平表

Tab. 2 Machining parameters and their levels

控制因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
主轴转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	600	800	1 000	1 200
往复速度 $v_a/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	1.80	3.24	4.38	5.10
每往复进给量 $\Delta x/\mu\text{m}$	0.09	0.22	0.35	0.44
油石粒径平均值 $g_s/\mu\text{m}$	100	49	34	8

表3 试验条件及结果

Tab. 3 Experimental conditions and results

试验号	代码值					材料去除率 $Q_m / (\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2})$
	n	v_a	Δx	g_s	误差	
1	1	1	1	1	1	0.035 0
2	1	2	2	2	2	0.097 0
3	1	3	3	3	3	0.150 0
4	1	4	4	4	4	0.056 0
5	2	1	2	3	4	0.053 0
6	2	2	1	4	3	0.009 7
7	2	3	4	1	2	0.260 0
8	2	4	3	2	1	0.220 0
9	3	1	3	4	2	0.018 0
10	3	2	4	3	1	0.130 0
11	3	3	1	2	4	0.043 0
12	3	4	2	1	3	0.170 0
13	4	1	4	2	3	0.071 0
14	4	2	3	1	4	0.190 0
15	4	3	2	4	1	0.022 0
16	4	4	1	3	2	0.056 0

$$Q_m = \frac{V}{ST} \quad (1)$$

式中: T 为珩磨时间, S 为单行程油石与工件的平均接触面积, V 为材料去除体积

$$V = \frac{\pi}{4} (D_f^2 - D_i^2) l_w \quad (2)$$

式中: D_f 为珩磨后工件内径, D_i 为珩磨前工件内径, l_w 为工件长度, 直径的测量采用量程为 8~10 mm 的三点内径千分尺。

珩磨过程中由于越程的存在^[14], 油石并非一直与工件全接触, 图 2 给出了油石长度 $l_s > l_w$ 时珩磨油石与工件接触示意图, 油石上、下越程量 l_u, l_d 一般为油石长度的 $1/3 \sim 1/5$ ^[18]。 S 由式(3.4)给出。

$$S = l \cdot \bar{l}_e \quad (3)$$

式中: l 为油石表面弧长(见图 3), \bar{l}_e 为单行程油石与工件平均接触长度

$$\bar{l}_e = \frac{\int_0^{T_s} l_e(t) dt}{T_s} \quad (4)$$

式中: $l_e(t)$ 为单行程珩磨油石与工件有效接触长度, T_s 为单行程周期。试验选取越程量为 $l_u = l_d = 10 \text{ mm}$, 经计算得出 $S = 48.46 \text{ mm}^2$ 。

2 结果与讨论

2.1 材料去除率影响因素分析

表 4 为材料去除率 Q_m 的方差分析表, 可以看

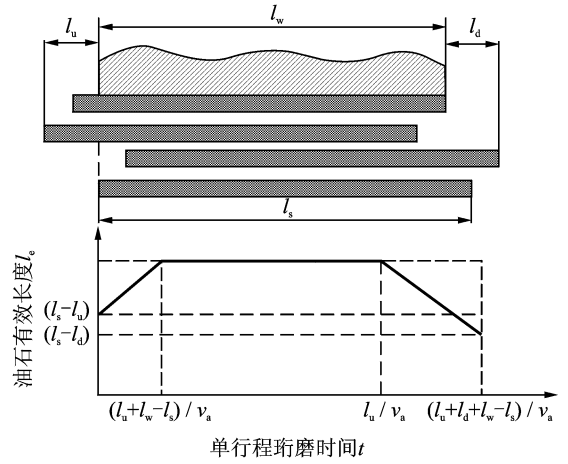
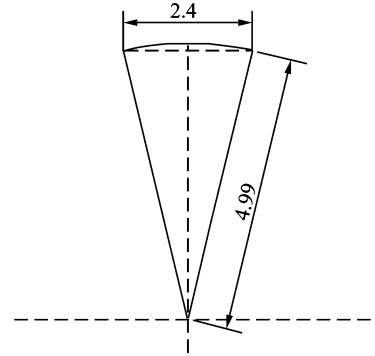
图 2 $l_w < l_s$ 时的油石有效长度示意图Fig. 2 Schematic diagram of effective length of honing stone when $l_w < l_s$ 

图 3 珩磨油石横截面轮廓示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cross-sectional of honing stone

出: $g_s, \Delta x, v_a$ 的影响显著, 其中前两者影响更为显著; 主轴转速 n 影响不显著。对材料去除率 Q_m 进行多元线性回归拟合得到如下经验公式(式 5), 由于主轴转速 n 影响不显著, 在此不予考虑。

$$Q_m = 10^{-2.224} \cdot v_a^{0.872} \cdot \Delta x^{0.837} \cdot g_s^{0.734} \quad (5)$$

$$R^2 = 0.96, \quad R = 0.98$$

网纹交叉角对珩磨加工效率影响很大, 珩磨过程中磨粒承受交变载荷, 磨粒受到的作用力随着所处位置、未变形切厚以及网纹交叉角 θ (图 4) 方向的变化而变化, θ 由式(6, 7)给出。增大网纹交叉角, 磨粒受力方向变化较大, 磨粒就更容易破碎或脱落, 从而露出新的切削刃, 实现油石自锐。可以增加材料去除率^[14], 但同时油石磨损会加剧。由式(6)可以看出, 增大 v_a 或者减小 v_t 均可以增加网纹交叉角 θ , 这里需要指出必须采取增加珩磨速度 v (v_a 和 v_t 的合成速度) 的方式增大 θ , 因为用较

表 4 材料去除率的方差(ANOVA)分析表
Tab. 4 Results of ANOVA for material removal rate

误差来源	自由度	方差	均方差	F	F_{α}		显著性
					95%	99%	
n	3	7.28×10^{-3}	2.43×10^{-3}	8.25			
v_a	3	1.65×10^{-2}	5.49×10^{-3}	19.26			*
Δx	3	2.90×10^{-2}	9.68×10^{-3}	33.96	9.28	29.46	**
g_s	3	3.83×10^{-2}	1.28×10^{-2}	44.81			**
误差	3	8.55×10^{-4}	2.85×10^{-4}				

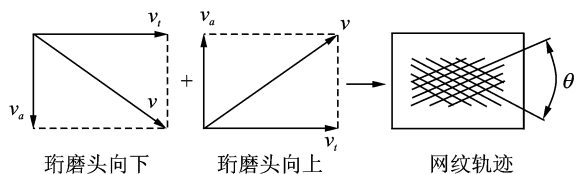


图 4 珩磨网纹交叉角形成过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram for formation process of cross hatch angle during honing

小的珩磨速度,磨粒所受力大体处在一个较低的水平,这反过来又降低了磨粒所受的交变载荷差异性的作用效果,从而减弱油石的自锐效果。

$$\theta = 2\arctan \frac{v_a}{v_t} \quad (6)$$

$$v_t = \frac{\pi D n}{1\ 000} \quad (7)$$

式中: D 为被珩孔直径, v_t 为油石切向速度。

图 5 所示为 GH4169 珩磨时材料去除率 Q_m 随主轴转速 n 的变化趋势图。可以看出,随着 n 增大,材料去除率 Q_m 整体变化幅度较小,在 7% 以内,这也验证了方差分析的结果,即主轴转速 n 对材料去除率 Q_m 的影响不显著。一方面,随着转速的增加网纹交叉角 θ 减少。从前文的分析可知, θ 减小弱化了油石的自锐能力,磨粒钝化后不能及时破碎或脱落,降低了磨粒的切削能力,在相同珩磨时间内材料去除量少,材料去除率低。相关研究表明^[14],磨粒所受到的力会随着转速的增加而增大,油石的自锐效果增强,同时单位时间内磨粒划过的路径变长,磨屑长度增加,使得材料去除率有增大趋势。在本文试验条件下,由网纹交叉角 θ 减少导致材料去除率减少趋势与由主轴转速 n 增加导致材料去除率增加趋势相当,使得材料去除率 Q_m 整体变化幅度较小。

图 6 所示为 GH4169 珩磨时材料去除率 Q_m 随往复速度 v_a 的变化趋势图。可以看出,随着 v_a 的增大,材料去除率 Q_m 呈增大趋势,一方面由式(1)可以看出同等材料去除量的情况下,由于珩磨

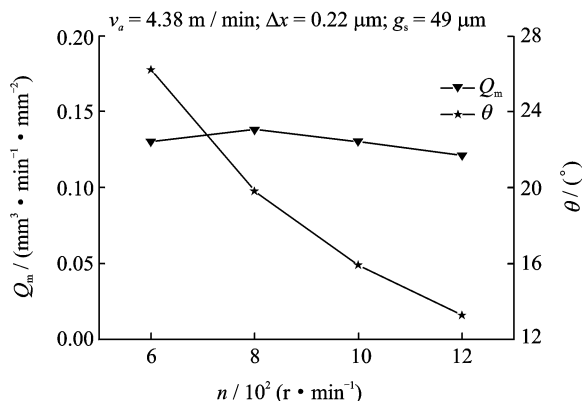


图 5 不同主轴转速下材料去除率和网纹交叉角趋势

Fig. 5 Material removal rate and cross hatch angle VS speed of spindle

行程和往复次数 N_0 一定,增大 v_a 会导致珩磨时间减少,因此珩磨效率有所增加;另一方面从图 6 中可以看出,增大 v_a 会导致网纹交叉角 θ 增大,根据前面分析可知 θ 增大使得油石自锐能力增强,油石一直保持锋利,从而增大材料去除率。

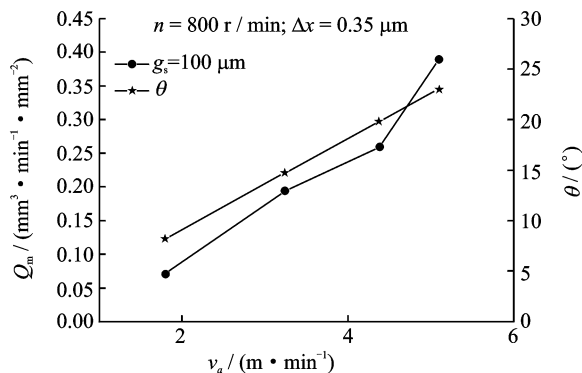


图 6 不同往复速度下材料去除率和网纹交叉角趋势

Fig. 6 Material removal rate and cross hatch angle with increasing stroke speed

图 7 所示为 GH4169 珩磨材料去除率 Q_m 随每往复进给量 Δx 的变化趋势图。

可以看出,随着每往复进给量 Δx 增大,材料去除率 Q_m 逐渐增大。增大 Δx 会增大油石径向扩

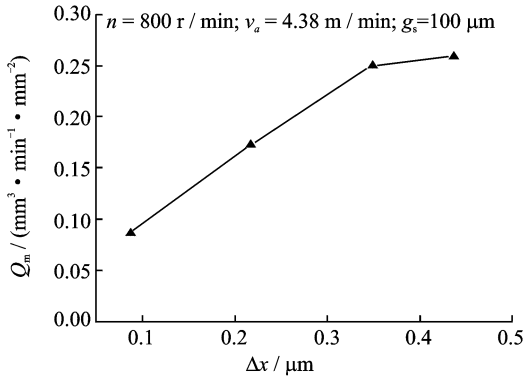


图7 不同进给量下材料去除率趋势

Fig. 7 Material removal rate VS feed per stroke cycle

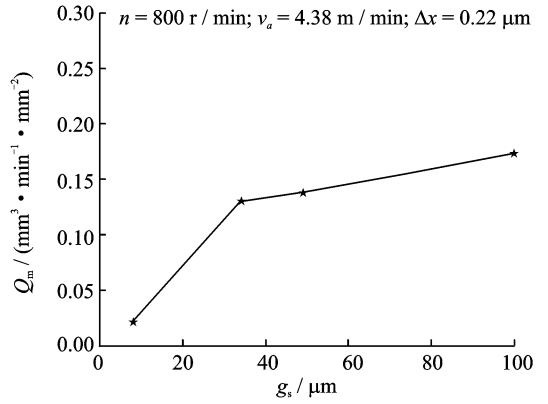


图8 油石粒径平均值对材料去除率影响趋势

Fig. 8 Material removal rate with increasing grain size

张压力,从而使磨粒切削刃更深的压入工件表面,增加油石动态切削刃的数目。动态磨削刃数目的增多导致了磨屑数目的增多。此外由于磨粒切削刃部位呈倒棱锥型^[19],切削刃压入工件表面深度增大会导致磨屑横截面积的增大,从而增加了材料去除率。

图8为材料去除率 Q_m 随油石磨料粒径的变化趋势图,可以看出随着油石粒径增大 Q_m 整体呈增大趋势,但当 $g_s > 34 \mu\text{m}$ 时材料去除率 Q_m 增幅变缓。主要原因在于,相同油石圆弧表面积条件下,粗磨粒油石单位面积上的磨粒个数相对少。当油石受到相同径向扩张压力的情况下,单个磨粒上的作用力就会越大。且由于磨粒本身尺寸较大,同等切深的条件下,粒径较大的油石磨屑的横截面积较大,磨屑也较厚,去除材料更多。尽管相同条件下粗磨粒油石单颗磨粒去除材料的体积更多,但是由于粗磨粒油石单位面积上的磨粒个数相对少,单位面积上有效磨削刃数目少,材料去除率的增幅放缓。

2.2 珩磨工艺优化

珩磨加工和其他机械加工方式一样,都面临着加工余量和加工效率之间不可调和的矛盾,人们既希望在粗珩阶段去除更多的加工余量,从而提高加工效率,又不得不为了满足工件的尺寸精度和表面质量要求较高而给精珩留一定的加工余量。鉴于珩磨的材料去除能力较低,一般孔类零件在精镗后会留给珩磨工序 $0.01 \sim 0.02 \text{ mm}$ 的加工余量,因此在加工余量较小且精度要求较高的情况下如何进行余量分配是珩磨加工必须解决的问题。

表5所示为试验用零件在加工余量为 0.02 mm 前提下,对粗珩、半精珩、精珩给予不同余量分配的试验条件和结果。其中主轴转速和往复速度均为 $n=800 \text{ r/min}$, $v_a=5.1 \text{ m/min}$ 。油石选用金属结合剂CBN油石。粗珩、半精珩油石粒径分别为 $100, 34, 8 \mu\text{m}$,工件材质和尺寸与前文正交试验用的试件相同。

表5 加工余量分配试验条件及结果

Tab. 5 Experimental conditions and results of allowance distribution

试验号	粗珩 $g_s=100 \mu\text{m}$		半精珩 $g_s=34 \mu\text{m}$				精珩 $g_s=8 \mu\text{m}$				总进给/ μm	$Ra/\mu\text{m}$
	$\Delta x/\mu\text{m}$	总进给/ μm	$\Delta x_1/\mu\text{m}$	总进给/ μm	$\Delta x_2/\mu\text{m}$	总进给/ μm	$\Delta x_1/\mu\text{m}$	总进给/ μm	$\Delta x_2/\mu\text{m}$	总进给/ μm		
1	0.44	13.2	0.44	8.8	0.22	4.4	0.44	4.4	0.22	2.2	25	0.184
2	0.44	13.2	0.44	13.2			0.22	6.6			27	0.221
3	0.44	13.2	0.22	13.2			0.22	6.6			33	0.157
4	0.44	13.2	0.44	8.8	0.22	4.4	0.22	6.6			29	0.163

从表5可以看出:4种方案按照加工效率由大到小排序为1,2,4,3,按珩后表面粗糙度 Ra 由小到大排序为3,2,1,4,方案3的表面粗糙度值最小,为 $Ra0.157 \mu\text{m}$,此时半精珩和精珩的每往复进给量较小,均为 $0.22 \mu\text{m}$,总的珩磨时间为 33 s 。由于半精珩的每往复进给量设置较小从而半精珩后的孔表面网

纹沟槽较浅,精珩产生的新的网纹更容易覆盖半精珩的网纹,从而获得较好的表面粗糙度。方案2虽然总的珩磨时间仅为 27 s ,但是工件的表面粗糙度是4种方案中最差的,为 $Ra0.221 \mu\text{m}$,主要由于半精珩的每往复进给量较大,为 $0.44 \mu\text{m}$;半精珩后的网纹沟槽较深,后面的精珩选用的油石粒径较小($8 \mu\text{m}$),且每往

复进给较小($0.22\ \mu\text{m}$),材料去除能力有限。且由于精珩时去除余量的限制不能完全去除半精珩的网纹。导致双重网纹交织在一起,从而影响表面粗糙度。方案1最能兼顾加工效率和表面质量要求($Ra0.2\ \mu\text{m}$),即在半精珩设置两种每往复进给量: $\Delta x_1 = 0.44\ \mu\text{m}$, $\Delta x_2 = 0.22\ \mu\text{m}$,前者减少了往复次数,后者保证了半精珩后孔表面的网纹深度较浅。同理精珩过程也设置同样的两种每往复进给量,这样既节约了时间(总珩磨时间为25 s)也能够覆盖掉半精珩产生的网纹从而获得较好的表面粗糙度。

3 结 论

(1)采用金属结合剂 CBN 油石珩磨 GH4169,每往复进给量、油石粒径、往复速度均对材料去除率影响显著,且材料去除率与三者之间均呈现正相关关系;主轴转速对材料去除率影响不显著。网纹交叉角对材料去除率有很大影响,适当提高往复速度增大网纹交叉角能大幅提高珩磨效率。

(2)采用多元线性回归拟合出如下材料去除率的经验公式。

$$Q_m = 10^{-2.224} \cdot v_a^{0.872} \cdot \Delta x^{0.837} \cdot g_s^{0.734}$$

$$R^2 = 0.96, \quad R = 0.98$$

(3)在孔零件珩前加工余量较小($0.02\ \text{mm}$)且珩后表面粗糙度要求较高($Ra0.2\ \mu\text{m}$)前提下,选用三种不同粒径的油石($100, 34, 8\ \mu\text{m}$)进行粗珩、半精珩、精珩。当采用如下工艺参数:粗珩每往复进给 $\Delta x = 0.44\ \mu\text{m}$;半精珩 $\Delta x_{\text{半精}1} = 0.44\ \mu\text{m}$, $\Delta x_{\text{半精}2} = 0.22\ \mu\text{m}$;精珩 $\Delta x_{\text{精}1} = 0.44\ \mu\text{m}$, $\Delta x_{\text{精}2} = 0.22\ \mu\text{m}$,总的加工时间(25 s)最少,且表面粗糙度 $Ra0.184\ \mu\text{m}$ 能够满足要求($Ra0.2\ \mu\text{m}$)。

参考文献:

- [1] Choudhury I A, El-Baradie M A. The machinability of nickel-based alloys: A general review[J]. Materials Processing Technology, 1998, 77(1):278-284.
- [2] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京:科学出版社,2007.
China's aviation materials manual editing committee. China's aviation material handbook[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [3] Buj-Corral I, Vivancos-Calvet J. Improvement of the manufacturing process of abrasive stones for honing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68 (9/10/11/12): 2517-2523.
- [4] Sabri L, Mezghani S, El Mansori M. A study on the influence of bond material on honing engine cylinder bores with coated diamond stones[J]. Surface and Coatings Technology, 2010,205(5):1515-1519.
- [5] Tolinski M. High-performance honing[J]. Manufacturing Engineering, 2008,140(6):57-66.
- [6] Bšhre D, Schmitt C, Moos U. Analysis of the differences between force control and feed control strategies during the honing of bores[J]. Germany Procedia CIRP, 2012(1):377-381.
- [7] Schnitzler G. What's happening with honing[J]. Manufacturing Engineering, 2001,127(5):70-77.
- [8] Schnitzler G. Honing: it's no lapping matter[J]. Manufacturing Engineering, 2000,125(3):56-62.
- [9] El-Hoff H. Fundamentals of machining processes: conventional and non-conventional processes [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [10] Vrac D S, Sidjanin L P, Kovac P P, et al. The influence of honing process parameters on surface quality, productivity, cutting angle and coefficients of friction [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2012, 64 (2):77-83.
- [11] Buj-Corral I, Vivancos-Calvet J. Roughness variability in the honing process of steel cylinders with CBN metal bonded tools[J]. Precision Engineering, 2011, 35(2):289-293.
- [12] Bell S B, Maden H, Needham G. The influence of grit size and stone pressure on honing[J]. Precision Engineering, 1981,3(1):48-51.
- [13] Bai Y J, Zhang L H, Ren C Z. Experimental investigation on honing of small holes[J]. Key Engineering Materials, 2007,329(1):303-308.
- [14] Klocke F. Manufacturing processes 2: Grinding, honing, lapping[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [15] 冶军. 美国镍基高温合金[M]. 北京:科学出版社, 1978.
Ye Jun. The nickel-based superalloy of America[M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [16] 赵勇. 面接触磨削材料去除机理研究[D]. 天津:天津大学,2010.
Zhao Yong. Research on material removal mechanism of surface contact grinding[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [17] Buj-Corral I, Vivancos-Calvet J, Coba-Salcedo M. Modelling of surface finish and material removal rate in rough honing[J]. Precision Engineering, 2014,38 (1):100-108.
- [18] 中国航空制造工程手册编辑委员会. 航空制造工程手册——机载设备精密加工[M]. 北京:航空工业出版社,1996.
China's aviation manufacturing engineering manual editing committee. Aviation manufacturing engineering handbook-airborne equipment precision processing[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996.
- [19] Su Chong, Zhu Lida, Hou Junming, et al. Research and development of simulation system for virtual grinding[C]//2008 International Symposium on Computer Science and Computational Technology. Shanghai: [s. n.], 2008:409-412.

