

GH4169 磨削表面粗糙度影响参数的敏感性研究

Study of Sensitivity of Parameter Affecting Surface Roughness in Grinding Superalloy GH4169

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 黄新春 张定华 杨振朝 任敬心 姚倡锋

[摘要] 通过 GH4169 高温合金平面切入磨削实验,建立了表面粗糙度的经验公式,分析了表面粗糙度对磨削参数的灵敏度,获得了磨削参数稳定域和非稳定域。结合正交试验法中的极差分析方法获得了不同磨削参数对表面粗糙度的影响曲线,进行了磨削参数区间的优选。研究表明:表面粗糙度对磨削深度的变化最为敏感,对工件速度的变化敏感次之,对砂轮速度的变化最不敏感;磨削深度优选范围为 0.01 ~ 0.015mm,工件速度优选范围为 10 ~ 15m/min,砂轮速度优选范围为 20 ~ 30m/s,可控制表面粗糙度在 0.7 μ m 以内。为高温合金材料磨削表面粗糙度控制提供理论方法和试验依据。

关键词: GH4169 磨削 表面粗糙度 灵敏度 稳定域

[ABSTRACT] Through the plunge-cut grinding experiment of GH4169 superalloy, the experience formula of surface roughness is built, the sensitivities of surface roughness on process parameter are analyzed, the process parameter stability region and instability region are acquired. Using the extreme difference analysis method facing the orthogonal experiment, the influencing curves of process parameters on surface roughness are obtained, the optimum selection of the grinding process parameter interval is proceed. Results show that the surface roughness is most sensitive to the variety of the grinding depth, and secondly sensitive to the workpiece speed. And it is insensitive to the wheel speed. The optimum grinding depth ranges are from 0.01mm to 0.015mm, and the optimum workpiece speed ranges are from 10m/min to 15m/min and the optimum wheel speed ranges are from 20 m/s to 30m/s. The optimum grinding parameters that can control the value of roughness is about R_a 0.6. The theoretical method and the test datum can be used for the surface roughness control of GH4169 superalloy.

Keywords: GH4169 Grinding Surface roughness Sensitivity Stability region

高温合金以优良的高温强度、热稳定性及抗热疲劳性被广泛应用于航空、航天、船舶及化学工业中。但是高温合金的磨削加工性差,磨削过程中砂轮易粘附堵塞。磨削高温合金时,砂轮磨粒有较严重的磨耗磨损和粘附堵塞,磨削比很低(普通砂轮的磨削比 G :1~2)^[1],这些都不利获得好的表面粗糙度,影响高温合金构件的加工表面完整性,从而影响了服役使用性能。

表面粗糙度是表面完整性最重要的评价指标之一,其大小对构件的耐磨性能、疲劳性能、应力腐蚀性能等具有重要的决定作用。这种现象对高温合金等高强度合金材料更为突出,因此在高温合金材料的磨削加工中,必须注重对表面粗糙度的控制。

Colwell, Peter 等^[2,3]针对高温合金磨削过程中的磨削力和磨削温度对磨削表面的残余应力的影响进行了研究。Hahn 和 Lindsay 等^[4]对高温合金磨削加工过程中的磨削比的理论计算做了比较深入的研究,他们认为,磨削比与作用在砂轮上的磨削力有关。Guo 等^[5]通过试验研究了电镀 CBN 砂轮磨削镍基高温合金时砂轮磨损和加工参数对磨削性能的影响,其在普通 Al₂O₃ 砂轮磨削功率模型的基础上建立了电镀 CBN 砂轮磨削镍基合金的磨削功率模型。

任敬心等^[6,7]以 GH33A 为例,分析了磨削时传入工件表层热量的百分比;计算了不同深度处的磨削温度,并试验验证了磨削温度场的计算结果。在考虑磨削温度对材料性能影响的条件下,分析计算了磨削残余应力。此外,又以 GH4169 高温合金为主要研究对象,论述了高温合金的磨削特征。由于高温合金的难磨性以及磨削时砂轮表面存在严重的粘附物,因而使磨削力和磨削温度显著增高,磨削比非常低。

徐西鹏等^[8,9]针对磨削温度对高温合金工件表面完整性影响进行了分析;并在一台精密平面磨床上分别采用 SiC、Al₂O₃ 和 CBN 砂轮对 TC4 和镍基高温合金 K417 进行平面磨削试验,解释了砂轮磨损机理,结果表明:SiC 和 Al₂O₃ 砂轮磨削时砂轮与工件间产生了严重的黏附现象,原因在于高温下工件与砂轮接触界面的化学反应以及 TC4 和 K417 的塑性变形;而 CBN 砂轮由于其化学稳定性高,在高温下也能获得较好的加工表面,即使增大磨

削深度也仍能保持磨削温度低于 1000℃。陈明等^[10] 通过试验研究了高温合金的磨削烧伤机理。王殿龙等^[11] 提出了精磨新型镍基高温合金时磨削力随磨削参量变化的经验公式。田荣鑫等^[12] 面向高速铣削中表面粗糙度的工艺控制,研究了工艺参数区间敏感性分析方法,给出了工艺参数稳定域和非稳定域的划分原则和方法;并获得不同切削工艺参数对表面粗糙度的影响曲线,提出了工艺参数区间的优选方法。

上述文献主要针对高温合金的磨削加工中的磨削力、磨削温度、砂轮磨损和残余应力等方面进行了研究,对磨削参数的优化研究甚少。

本文以高温合金 GH4169 为研究对象,采用正交试验法,针对磨削参数对磨削表面粗糙度的影响灵敏度进行分析,并采用文献 [12] 中的工艺参数区间灵敏度分析和区间优选方法,获得了高温合金 GH4169 磨削参数稳定域和非稳定域。该方法与直观分析法结合,可更好地对磨削用量进行控制,为高温合金磨削表面完整性加工提供参数选择依据。

1 高温合金 GH4169 磨削试验

1.1 试验材料

试件材料为 GH4169 镍基高温合金,其属 Ni-Cr-Fe 基时效硬化型合金,其成份特点是含 Nb 量较多,含较多的 Cr 和 Fe,含少量的 Al、Ti,以形成 γ' 相和 γ'' 相,其主要化学成份组成如表 1 所示。GH4169 高温合金在室温 / 高温下的力学性能如表 2 所示,其抗拉强度 σ_b 在 200℃ 为 1392 MPa、400℃ 为 1324 MPa、600℃ 为 1295 MPa、750℃ 为 843 MPa、800℃ 为 618 MPa。

表1 GH4169高温合金的化学成分 %

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	<0.015	余量

表2 GH4169高温合金的力学性能

弹性模量 E/GPa	热导率 $\lambda / W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	延伸率 $\delta / \%$	硬度 HB (室温)	冲击值 $a_k / (J \cdot cm^{-2})$	收缩率 $\psi / \%$	熔点 $/ ^\circ C$
205 (20℃)	14.65 (100℃)	15	346~450	573 (20℃)	41	1260~1320

1.2 试验方案

试验所用机床为 MM7120 平面磨床;砂轮采用 SA80KV 单晶刚玉砂轮,直径 250mm,粒度 80 中软级,宽度为 25mm;磨削方式为顺磨,平面切入磨削,采用乳

液冷却,加工方案如图 1 所示。采用三因素四水平正交试验法,研究磨削参数(工件速度 v_w 、磨削深度 a_p 、砂轮速度 v_s)对表面粗糙度 R_a 的影响,试验方案如表 3 所示。

表面粗糙度用接触式 TR240 表面粗糙度仪进行测量。在磨削面沿垂直进给方向,等距选取 5 个点,测量每点表面粗糙度 R_a 值并求取平均值,测量取样长度 0.8mm,

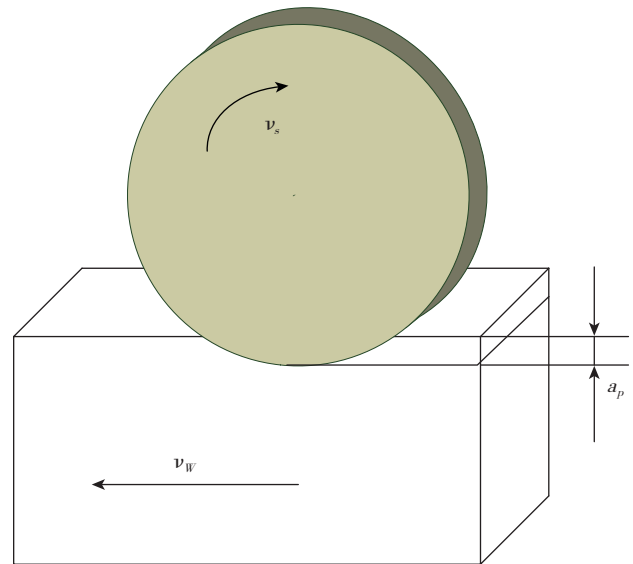


图1 磨削示意图

Fig.1 Grinding process

表3 磨削试验方案及表面粗糙度测试结果

编号	$v_w / (m \cdot min^{-1})$	a_p / mm	$v_s / (m \cdot s^{-1})$	$R_a / \mu m$
1	5	0.005	15	0.32
2	5	0.01	20	0.367
3	5	0.015	25	0.452
4	5	0.02	30	0.457
5	10	0.005	20	0.427
6	10	0.01	15	0.688
7	10	0.015	30	0.811
8	10	0.02	25	0.814
9	15	0.005	25	0.391
10	15	0.01	30	0.609
11	15	0.015	15	0.797
12	15	0.02	20	0.805
13	20	0.005	30	0.42
14	20	0.01	25	0.71
15	20	0.015	20	0.792
16	20	0.02	15	0.871

评定长度 4.0mm。经测试和统计计算后的表面粗糙度见表 3。

2 磨削表面粗糙度工艺参数区间敏感性分析

通过建立表面粗糙度经验公式,对磨削表面粗糙度工艺参数灵敏度的分析,得到磨削表面粗糙度与磨削参数的灵敏度关系,在此基础上,对敏感的工艺参数进行灵敏度计算,获得使表面粗糙度变化平缓的工艺参数区间敏感性范围^[12]。

2.1 表面粗糙度经验公式的建立及相对灵敏度分析

对表 3 中的磨削参数数据和表面粗糙度测试数据,采用多元线性回归分析方法进行拟合,建立了如式(1)所示的表面粗糙度的经验公式:

$$R_a = 3.09v_w^{0.3721} a_p^{0.4614} v_s^{-0.1608} \quad (1)$$

对上述回归方程进行相关系数检验,其 $R_{min}=0.683$, $R^2=0.859 > R_{min}$,说明其相关性是可信的,而且建立的回归模型是显著的。根据表面粗糙度对工艺参数相对灵敏度的定义;相对灵敏度即为指数型经验公式各变量的指数,可以计算出表面粗糙度对各磨削参数的相对灵敏度分别为: $S_{Ra}^{v_w} = 0.3721$, $S_{Ra}^{a_p} = 0.4614$, $S_{Ra}^{v_s} = -0.1608$ 。

2.2 表面粗糙度工艺参数绝对灵敏度分析

表面粗糙度对工件速度、磨削深度、砂轮速度的绝对灵敏度模型为:

$$\begin{cases} S_{Ra}^{v_w} = 0.3721 \times 10^{0.4986} \bar{a}_p^{0.4614} \bar{v}_s^{-0.1608} \bar{v}_w^{-0.6279} \\ S_{Ra}^{a_p} = 0.4614 \times 10^{0.4986} \bar{v}_w^{0.3721} \bar{v}_s^{-0.1608} \bar{a}_p^{-0.5386} \\ S_{Ra}^{v_s} = -0.1608 \times 10^{0.4986} \bar{v}_w^{0.3721} \bar{a}_p^{0.4614} \bar{v}_s^{-1.1608} \end{cases} \quad (2)$$

在试验参数范围内,平均工件速度 $\bar{v}_w = 12.5$ m/min,平均磨削深度 $\bar{a}_p = 0.125$ mm,平均砂轮速度 $\bar{v}_s = 22.5$ m/s,其绝对灵敏度分别为:

$$\begin{cases} S_{Ra}^{v_w} = 0.2667v_w^{-0.6279} \\ S_{Ra}^{a_p} = 2.2096a_p^{-0.5386} \\ S_{Ra}^{v_s} = -0.4868v_s^{-1.1608} \end{cases} \quad (3)$$

图 2(a)~(c) 为依据式(3)获得的表面粗糙度对工件速度、磨削深度和砂轮速度的绝对灵敏度曲线。

由绝对灵敏度分析可知,高温合金平面切入磨削条件下,表面粗糙度对磨削深度的变化最为敏感,对工件速度的变化敏感次之,对砂轮速度的变化不敏感。因此,在优选磨削参数时,在试验参数范围内需要对磨削深度和工件速度进一步优化选择,而对砂轮速度的选取可以在参数区间内选在较大的范围。

由图 2(a) 可知,在工件速度区间 [5m/min, 10m/min] 的绝对灵敏度值大于 [10m/min, 15m/min] 和 [15m/min, 20m/min] 区间,即当工件速度从 10m/min 变化到 15m/min 时,其表面粗糙度的变化平缓,当工件速度从 15m/min 变化到 20m/min 时,其表面粗糙度的变化比较平缓。同理,

由图 2(b) 可知,当磨削深度从 0.01mm 变化到 0.02mm 时,表面粗糙度的变化比较平缓。当砂轮速度从 20m/s 变化到 30m/s 时,表面粗糙度的变化比较平缓。

2.3 磨削参数稳定域和非稳定域

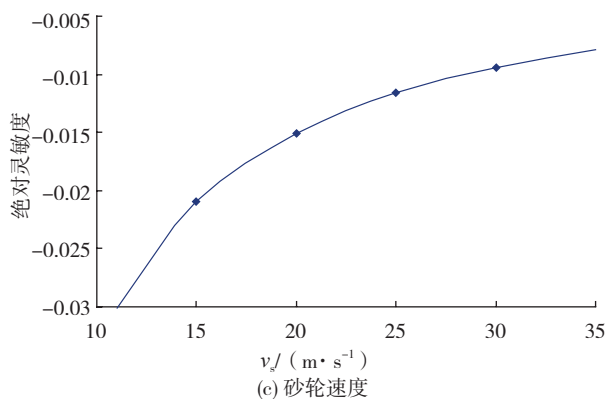
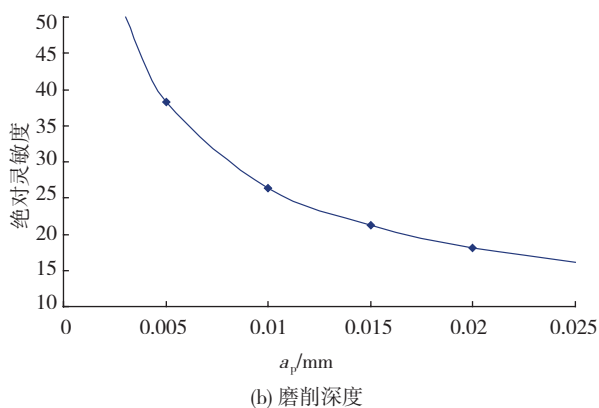
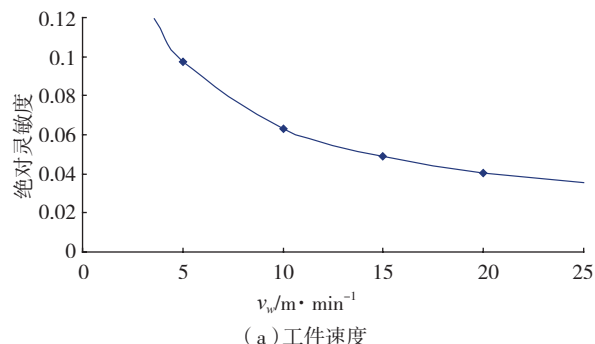


图2 表面粗糙度对磨削参数的绝对灵敏度

Fig.2 Absolute sensitivity of surface roughness to grinding parameters

表4 磨削参数稳定域和非稳定域

工艺类别	工艺参数非稳定域	工艺参数稳定域
工件速度 / (m · min ⁻¹)	[5,10]	[10,20]
磨削深度 /mm	[0.005,0.01]	[0.01,0.02]
砂轮速度 / (m · s ⁻¹)	[15,20]	[20,30]

表面粗糙度磨削参数稳定域是指表面粗糙度的变化对磨削参数的变化不敏感的参数范围。表面粗糙度磨削参数非稳定域是指表面粗糙度的变化对磨削参数的变化敏感的参数范围。

根据表面粗糙度对工件速度、磨削深度、砂轮速度的绝对灵敏度曲线,获得本文试验参数范围内工件速度、磨削深度、砂轮速度的稳定域和非稳定域,如表4所示。

3 磨削参数区间优选

针对本文的高温合金 GH4169 磨削加工试验,磨削参数区间优选步骤如下。

(1) 进行表面粗糙度工艺参数的相对灵敏度分析,结果表明表面粗糙度对磨削深度的变化最为敏感,对工件速度的变化敏感则次之,对砂轮速度的变化最不敏感;

(2) 确定工件速度和磨削深度的稳定域和非稳定域,结果见表4;

(3) 通过正交试验数据的极差分析法,得到如图3所示的敏感工艺因素(工件速度和磨削深度)在稳定域和非稳定域时表面粗糙度的变化范围;还可以得到非敏感工艺因素(砂轮速度)在所取参数内的变化范围。

由图3(a)可知,工件速度稳定域表面粗糙度在 $R_a 0.65 \sim 0.7$ 之间,非稳定域表面粗糙度从 $R_a 0.4$ 左右变化到 $R_a 0.65$ 左右;随着工件速度的增加,表面粗糙度增大。工件速度 v_w 的增大,会使单颗磨粒未变形磨削厚度增大,从而使 R_a 值增大。

由图3(b)可知,磨削深度稳定域表面粗糙度在 $R_a 0.59 \sim 0.7$ 之间,非稳定域表面粗糙度从 $R_a 0.38$ 左右变化到 $R_a 0.59$ 左右;随着磨削深度的增加,表面粗糙度增大。磨削深度 a_p 的增大,会使单颗磨粒未变形磨削厚度增大,从而使 R_a 值增大。

由图3(c)可知,在砂轮速度稳定域表面粗糙度在 $R_a 0.57 \sim 0.6$ 之间,非稳定域表面粗糙度从 $R_a 0.6$ 左右变化到 $R_a 0.67$ 左右;随着砂轮速度的增加,表面粗糙度减小。磨削深度 v_s 的增大,会使单颗磨粒未变形磨削厚度减小,所以,随着 v_s 的增高, R_a 值不但减小,而且减小得比较显著。

最后,为了得到稳定的磨削表面粗糙度,选择的高温合金 GH4169 磨削参数区间如表5所示,该区间范围可保障较稳定的表面粗糙度。工件速度和磨削深度的优选区间选在了稳定域中的前段,这是考虑到在磨削加工中在考虑稳定的表面粗糙度的同时要兼顾加工的效率,如果要进行参数值调整,需进一步计算稳定域和非

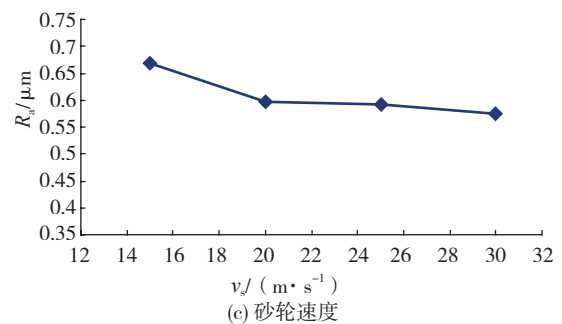
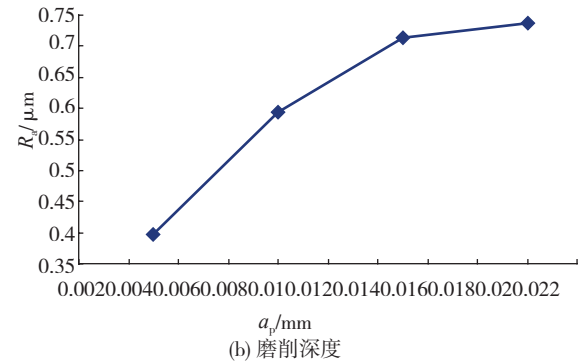
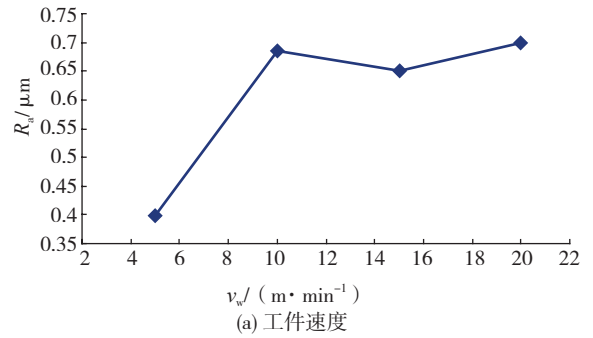


图3 磨削参数对表面粗糙度的影响曲线
Fig.3 Effect of grinding parameters on surface roughness

表5 磨削参数优选区间

工艺类别	工艺参数优选区间	稳定域或非稳定域	表面粗糙度 R_a 变化趋势
工件速度 / ($m \cdot min^{-1}$)	[10,15]	稳定域	0.65 ~ 0.68
磨削深度 / mm	[0.1,0.15]	稳定域	0.59 ~ 0.7
砂轮速度 / ($m \cdot s^{-1}$)	[20,30]	稳定域	0.57 ~ 0.6

稳定域。

4 结论

通过对高温合金 GH4169 平面切入磨削表面粗糙度对磨削参数敏感性研究,可以得出如下结论:

(1) 建立了表面粗糙度对磨削参数的经验公式,分析了磨削参数对表面粗糙度的相对灵敏度,表面粗糙度

(下转第91页)

在大飞机项目发展过程中,出现技术或人才断层,进而需要修改图纸,延长了大飞机的研发周期同时浪费了大量的人力与物力。人才链是技术链载体,技术链指导人才链进行技术研发的方向。

3.4 三链互动带动大飞机产业链的发展

综上所述,无论技术链还是人才链都需要资金链的支持,资金链是大飞机产业链的原动力,资金链若发生断裂,无论技术链还是人才链都必将断裂,最终导致整个大飞机产业链断裂。另一方面人才链与技术链又从不同角度为资金链输送新的技术与人才,为其持续性与稳定性提供支持。

在对人才链与技术链的研究中发现,人才链与技术链的关系,就如同人的大脑与身体,技术链就如同大脑指导人才链技术研发的方向,人才链就如身体一般,按照技术链的要求进行技术研发。因此大飞机产业链的发展过程中,资金链、技术链、人才链必须齐头并进,只发展其中某一部分,而忽视了其他两部分必将会阻碍大飞机产业链的发展,更可能导致整个产业链的断裂。因此在大飞机产业链发展应遵循齐头并进、相互促进的发展模式。

4 总结

本文从产业链的角度出发,将对大飞机产业发展有较大影响的3类因素——资金、技术、人才,与产业链内涵理论相契合,提出了Capital-Technology-Talent大飞机产业链模式。

通过研究资金链、技术链、人才链的构成与三者间的内在联系,得出大飞机产业链的发展模式——资金链、技术链、人才链互相扶持、齐头并进。在今后的研究中,应以优化资金链、技术链、人才链作为研究的切入点,通过对资金链、技术链、人才链的优化,带动整个大飞机产业链的发展。

参考文献

- [1] 徐康宁. 中国大飞机产业化的市场约束与进入条件. 中国工业经济, 2007,6(6):113-120.
- [2] 张吉昌, 姜春海. 中国大飞机产业组织策略分析. 中国工业经济, 2008,1(1):59-67.
- [3] 郑晓博, 雷家骥. 我国发展大飞机的产业组织问题研究. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2009, 1(12):33-42.
- [4] 赵海山. 航空产业发展的模式选择及其治理逻辑. 科学与科学技术管理, 2009, 6:125-129.
- [5] 李一鸣, 刘军. 产业发展中相关理论与实践问题研究[D]. 成都: 西南财经大学出版社, 2006:47-48.
- [6] 李心片, 李仕明, 兰水. 产业链结构类型研究, 电子科技大学学报(社科版), 2004,(4):60-63.
- [7] 刘君. 大飞机产业发展战略研究. 经济管理者, 2010,12:131.

- [8] 李瑾. 工人日报, 2008年5月22日, 第007版.
- [9] Ibsen.A Z. The politics of airplane production: The emergence of two technological frames in the competition between Boeing and Airbus. Technology in Society, 2009, 10(6): 342-349.
- [10] 周华. 大飞机项目的复杂技术追赶路径研究框架. 国防科技, 2007,7:36-38.

(责编 亦非)

(上接第86页)

对磨削深度的变化最为敏感,对工件速度的变化敏感次之,对砂轮速度的变化不敏感。

(2) 表面粗糙度随着工件速度和磨削深度的增加,表面粗糙度增大;随着砂轮速度的增加,表面粗糙度减小。

(3) 获得的磨削参数优选区间为:磨削深度从0.1mm~0.15mm,工件速度从10m/min~15m/min,砂轮速度从20m/s~30m/s,可以使表面粗糙度控制在 $R_a0.7$ 以内。

参考文献

- [1] 任敬心, 康仁科, 史兴宽. 难加工材料的磨削. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [2] Colwell L V, Sinnott M J. The determination of residual stress in hardened ground steel. Trans. ASME.VOL.39.1957.
- [3] Peter J,Snoey R. Residual stress in plunge and cylindrical grinding. Int. Conf. on Manufacturing Engineering,1980.
- [4] Hahn R S, Lindsay R P. Principles of grinding, grinding theory techniques and troubleshooting. SME, 1982.
- [5] Guo C, Shi Z, Attia H, et al. Power and wheel wear for grinding nickel alloy with plated CBNwheels. CIRP Annals -Manufacturing Technology, 2007, 56 (1):343-346.
- [6] 任敬心, 孟庆国, 陈景蕙. 高温合金的磨削温度与残余应力. 航空工艺技术, 1995, (1): 3-7.
- [7] 任敬心, 杨茂奎, 李雅清, 等. 镍基高温合金的磨削特征. 航空学报, 1999, 18(6):755-758.
- [8] Xu X P, Yu Y Q, Xu H J. Effect of grinding temperatures on the surface integrity of a nickel-based superalloy. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1/3): 359-363.
- [9] Xu X P, Yu Y Q, Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys. Wear, 2003, 255 (7/12):1421-1426.
- [10] Chen M, Li X T, Sun F H, et al. Studies on the grinding characteristics of directionally solidified nickel based super alloy. Journal of Material Processing Technology, 2001, 116 (2/3): 165-169.
- [11] 王殿龙, 陈劲桦, 庞继有, 等. 新型镍基高温合金磨削性能实验研究. 工具技术, 2004, 38(2):10-13.
- [12] 田荣鑫, 姚倡锋, 黄新春, 等. 面向加工表面粗糙度的钛合金高速铣削工艺参数区间敏感性分析及优选. 航空学报, 2010, 31 (12): 2464-2470.

(责编 小城)