杯形陶瓷 CBN 砂轮修整工艺及参数优化

刘 佳 陈五一

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 针对金刚石滚轮修整杯形 CBN 砂轮时各修整工艺参数对砂轮修整后磨削 TC 4时的磨削温度、磨削力和表面粗糙度的影响进行实验研究,并对磨削温度和表面粗糙度进行了多因素回归分析.在回归分析得到的数学模型基础上,进一步对磨削温度和表面粗糙度进行双目标加权优化,得到了粗磨和精磨钛合金时砂轮的最佳修整参数,并通过磨削实验对优化结果进行了验证.

关 键 词: 金刚石滚轮; 陶瓷 CBN 砂轮; 修整参数; 回归分析; 双目标加权优化

中图分类号: TG 180

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)03-0374-06

Dressing process and parametric optimization of cup-shaped vitrified CBN wheels

Liu Jia Chen Wuyi

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Influences of dressing parameters on grinding temperatures, grinding forces and surface roughness in grinding TC 4 with cup-shaped CBN wheels dressed with a diamond roller under dry condition were investigated through experiments. Grinding temperatures and surface roughness were analyzed adopting regression method. Based on the mathematical models obtained by regression, weighted double-objective optimization was performed for lower grinding temperature and lower surface roughness. Finally, the optimal dressing parameters were calculated respectively for rough grinding and finish grinding and verified through grinding TC 4 experiments.

Key words: diamond roller; vitrified CBN wheel; dressing parameters; regression analysis; weighted double-objective optimization

超硬磨料砂轮的修整问题一直是难加工材料精密磨削研究的热点和难点.研究人员提出了各种新型的修整方法,如激光修整技术[1]、电解在线修整(ELID, Electrolytic In-process Dressing)[2]以及电火花修整法[3]等,但目前真正用于生产中的修整方法依然是旋转金刚石滚轮修整法和金刚石笔修整法.旋转金刚石滚轮修整法具有修整装置简单、修整性能稳定、效率高、成本低等特点[4-5],但若选择的修整工艺参数不合理,旋转金刚石滚轮修整法易于产生超硬磨料砂轮的后刀面磨损[6].已有的关于金刚石滚轮修整陶瓷 CBN 砂轮的修整工艺研究中,大都只对砂轮修整后磨削工件的表面粗糙度和磨削力进行研究[7-10],对磨削温度的关注较少,而磨削温度是磨削工艺优化中的重要参量,尤其在加工诸如钛合金这样的难加工材料时,磨削温度对磨削表面完整性有极其重要的影响.同样,在进行砂轮修整参数的优化时也仅以表面粗糙度为优化目标,且主要针对修整深度和修整间隔进行优化[11-12],在优化效果上存在局限性.

收稿日期: 2010-11-09; **网络出版时间**: 2012-02-21 11:46

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120221.1146.005.html

基金项目: 科技重大专项资助项目(2009ZX04001-141)

作者简介: 刘 佳(1985-),男,安徽淮北人,博士生,liujia07105@sina.com.

为了更深入地研究金刚石滚轮修整陶瓷 CBN 砂轮时修整工艺参数对修整后砂轮磨削性能的影响,尤其是对磨削温度的影响,以及综合考虑磨削温度和表面粗糙度时的修整参数优化问题,本文开展了金刚石滚轮修整陶瓷 CBN 砂轮和修整后砂轮磨削 TC 4 实验研究,综合考虑砂轮修整后磨削 TC 4 时的磨削力、磨削温度和表面粗糙度,并采用多元回归模型和双目标加权优化模型分别对修整参数对磨削温度和表面粗糙度的影响进行了回归分析和优化研究,以期对杯形陶瓷 CBN 砂轮的高效精密修整提供指导.

1　修整实验和磨削实验

1.1　修整实验设计

修整实验装置见图 1,主要由一个 2 800 r/min 的固定转速电机带动直径为 112 mm 的金刚石滚轮组成. 待修整的砂轮:直径 80 mm;粒度 70 ~ 80#;杯壁厚度为 3 mm. 金刚石滚轮的修整部位主要是 *R*0. 6 mm 的尖端圆弧. 根据已有的研究成果[6,10],影响修整效果的参数主要有 3 个:修整深度 a_d,修整进给速度 f_d,修整速比 q_d. 为了研究旋转金刚石滚轮修整工艺参数对砂轮磨削性能的影响规律,设置了单因素实验,如表 1 所示. 由于逆修时(即修整速比 $-1 < q_d < 0$),相对速度较大,修整后的砂轮表面较为平整且粗糙度较小[13],在磨削 TC 4 时易于发生粘接现象,所以本文在修整时采用顺修方式(即修整速比 $0 < q_d < 1$).

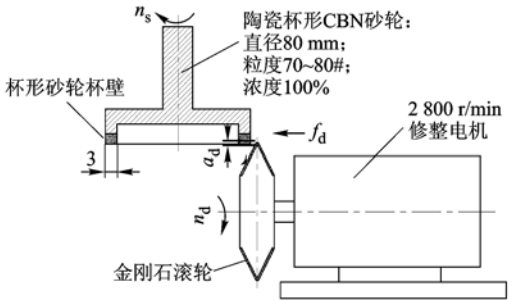


图 1　金刚石滚轮修整陶瓷 CBN 砂轮实验装置图

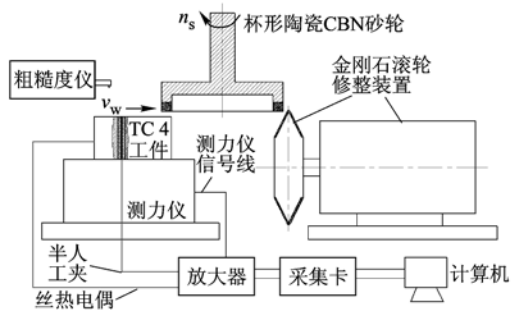
表 1　金刚石滚轮修整陶瓷 CBN 砂轮的实验参数

实验参数	数值
f_d/(m · min^{-1})	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,1.0,1.2
q_d	0.4,0.5,0.6,0.7
a_d/μm	5,8,12,15,20

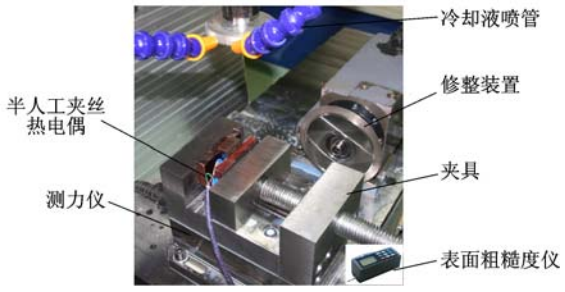
根据所修整的陶瓷 CBN 磨料砂轮的粒度和浓度,首先进行修整进给速度的单因素实验,修整速度分别选择为 0. 2,0. 3,0. 4,0. 5,0. 6,0. 7,0. 8,1. 0,1. 2 m/min,由于在前期实验过程中,当进给速度超过 1. 2 m/min 时,砂轮的修整效果呈现恶化的趋势,主要表现在修整后磨削温度开始升高,所以修整进给速度的上限选择为 1. 2 m/min. 按照金刚石滚轮对 CBN 砂轮挤压起主要作用时的修整比进行修整实验,修整速比设定为 0. 7[10];修整深度设定为 0. 005 mm. 在最佳的修整进给速度确定后再进行修整速比、修整深度的单因素实验,并最终找到各个修整参数对修整效果的影响规律. 为了消除修整次数对修整效果的影响,同时考虑到砂轮磨粒层的高度,将每一个参数下砂轮修整次数设置为 5 次.

1.2　磨削 TC 4 实验设计

为了考查金刚石滚轮修整参数对陶瓷 CBN 砂轮修整效果的影响规律并对其进行多元回归分析,通过采用修整以后砂轮的磨削加工性能来衡量,所以采用不同修整参数修整出的陶瓷 CBN 砂轮磨削 TC4 材料,并通过测量相同磨削参数条件下的磨削温度、磨削力和工件表面粗糙度来衡量陶瓷 CBN 砂轮的修整效果. 在已有的大量陶瓷 CBN 砂轮磨削 TC4 实验的基础上,综合考虑磨削效率和磨削质量而选择砂轮修整后磨削 TC4 工件的磨削参数为:砂轮转速 n_s = 12 000 r/min (50. 24 m/s);磨削深度 a_p = 0. 010 mm;磨削进给速度 v_w = 1 500 mm/min;磨削液采用 10% 的水基乳化液. 磨削力测量采用 KISTLER 压电式测力仪进行;磨削温度采用半人工夹丝热电偶测量,热电偶由直径 0. 015 mm 康铜丝和 TC 4 工件材料组成;表面粗糙度采用 TR 200 便携式粗糙度仪测量. 磨削实验系统和装置如图 2 所示.



a　磨削实验系统图



b　磨削实验装置图

图 2　修整后砂轮磨削 TC4 工件实验图

2 实验结果回归分析

杯形陶瓷 CBN 砂轮采用不同修整参数修整后,在相同的磨削参数下磨削 TC4 时的磨削力变化不大,法向力 F_n 和切向力 F_t 基本维持在 30 N 和 12 N,即采用金刚石滚轮进行杯形陶瓷 CBN 砂轮修整时,磨削力的变化对砂轮修整参数的变化并不十分敏感. 所以本文重点研究修整参数对磨削温度和表面粗糙度的影响规律.

2.1 磨削温度多元回归分析

TC4 的磨削温度对磨削烧伤和工件表面完整性有着重要的影响,而磨削温度则与砂轮的磨削性能、磨削参数和冷却润滑条件紧密相关,修整主要改变砂轮地貌进而影响砂轮的磨削性能. 为了得到修整工艺参数对磨削温度的综合影响规律,在前述修整实验和磨削实验的基础上,建立磨削温度多元回归分析模型.

首先对修整进给速度和修整速比对磨削温度的影响进行曲线拟合,由于是单因素回归分析,采用可决系数 $R^2 = U/L_{yy} = 1 - Q/L_{yy}$ 来评价拟合优度,其中 L_{yy} 为总离差平方和,U 和 Q 分别为回归平方和和残差平方和. 分别对实验值进行了线性、二次多项式、Logistic 以及指数分布拟合,结果以二次多项式拟合时得到的拟合优度最高,拟合优度 R^2 分别达到 0.866 和 0.892,实验值和拟合结果分别如图 3、图 4 所示,因此修整进给速度和修整速比对磨削温度的影响选择二次多项式拟合:

$$T = a_1 + b_1 f_d + c_1 f_d^2 \tag{1}$$

$$T = a_2 + b_2 q_d + c_2 q_d^2 \tag{2}$$

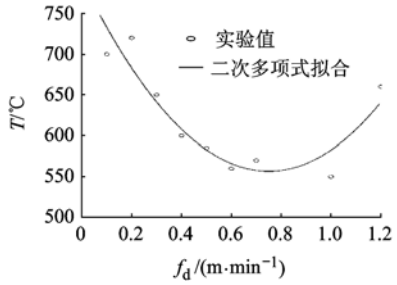


图 3 修整进给速度对磨削温度的影响曲线

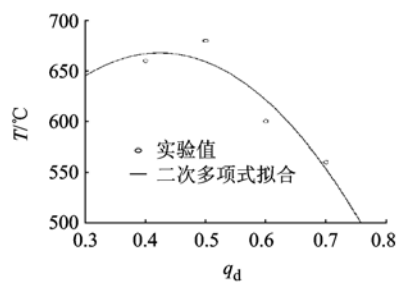


图 4 修整速比对磨削温度的影响曲线

而修整深度在所选参数范围内对磨削温度的影响采用线性拟合时的拟合优度 R^2 最高,其值为 0.923,实验值和线性拟合结果如图 5 所示. 因此可以用线性函数进行拟合:

$$T = a_3 + b_3 a_d \tag{3}$$

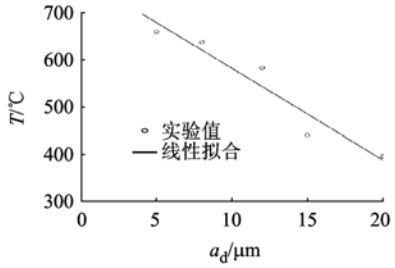


图 5 修整深度对磨削温度的影响曲线

通过单因素修整参数对磨削温度的影响曲线可以看到,磨削温度的多元回归方程的建立应该选择解释变量分别为 f_d, f_d^2, q_d, q_d^2 和 a_d,被解释变量为磨削温度 T,进行多元统计回归分析. 多元线性回归分析模型为

$$\left.\begin{aligned} &y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \\ &E(\varepsilon) = 0 \\ &\mathrm{var}(\varepsilon) = \sigma^2 \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

其中,$\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_k, \sigma^2$ 与 $x_0, x_1, \cdots, x_k$ 无关,且 ε 为不可观测的随机变量.

根据以上多元回归数学模型,并首先对回归后残差较大的点进行剔除,最终采用 16 组实验数据并结合统计学软件 SPSS 进行磨削温度多元回归模型的计算,得到的回归模型为

$$\begin{aligned} T = {} & 943.112 - 19\,790.687 \times a_d + \\ & 491.784 \times q_d - 807.231 \times q_d^2 - \\ & 0.635 \times f_d + 0.0004 \times f_d^2 \end{aligned} \tag{5}$$

首先对得到的多元回归模型进行拟合优度检验和显著性检验. 拟合优度采用可决系数来评定,而在多元回归分析中,为了消除解释变量个数对拟合优度的影响程度而采用调整可决系数 $\bar{R}^2 = 1 - \dfrac{Q/(n-k-1)}{L_{yy}/(n-1)}$,磨削温度拟合优度可决系数和调整可决系数分别为 0.918 和 0.877,即认为回归方程的误差中,回归误差所占的比重较大,解释变量能够较好的解释被解释变量. 而回归方程的显著性则采用 F 统计量进行检验,其检验结果如表 2 所示,所选择的显著性水平为 0.05.

表 2 多元回归模型显著性检验表

模型	平方和	自由度	均方	F	概率 P
回归	105 266.74	5	21 053.35	22.389	3.9×10^{-5}
残差	9 403.25	10	940.33		
总计	114 670.0	15			

由表 2 可知,F 值为 22.389,即 $P = p\{F \geqslant 22.389\} = 3.9 \times 10^{-5}$,其值远小于 0.05 的显著性水平,所以认为该磨削温度多元回归模型非常显著. 图 6 为该多元回归模型的标准化残差的 P-P 图,各数据点对应点分布在图中所示对角线附近,则基本可以判定残差服从正态随机分布,这也是对多元回归模型最重要的一个前提假设,从而保证多元回归模型的正确性. 此外,还对该回归模型采用 Durbin-Watson 检验统计量进行序列相关检验、异方差检验以及采用容忍度和方差膨胀因子进行了多重共线性检验,检验结果均满足要求,说明所选回归模型合理.

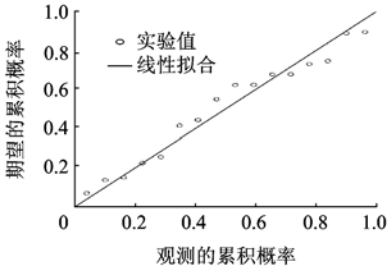


图 6　磨削温度回归标准化残差 P-P 图

2.2　表面粗糙度多元回归分析

工件的表面粗糙度主要影响工件的疲劳强度,尤其对像发动机叶片这样在高温条件下承受高频交变载荷的工件更为重要,而工件表面粗糙度除了与磨削工艺参数有关外,更重要的是与砂轮的地貌有关系,砂轮的地貌则是精密修整的结果. 为了研究修整工艺参数对 TC4 磨削表面粗糙度的综合影响规律,根据修整实验和磨削实验得到的粗糙度数据,建立表面粗糙度多元回归分析模型.

与温度多元回归类似,首先对单因素实验结果进行曲线拟合,并且根据拟合优度 R^2 来评价拟合结果的好坏. 修整进给速度、修整速比和修整深度对表面粗糙度的影响的实验值和拟合结果分别如图 7 ~ 图 9 所示. 结果表明影响曲线均以线性拟合最优,拟合优度 R^2 分别达到 0.853,0.876 和 0.953. 所以对表面粗糙度进行多元回归时均采用式(6)所示的线性函数:

$$R_a = c_1 + d_1 f_d = c_2 + d_2 q_d = c_3 + d_3 a_d \quad (6)$$

同样根据多元线性回归模型式(4),在显著性水平为 0.05 时计算多元统计回归模型,首先对回归后残差较大的点进行剔除,最终采用实验得到的 15 组数据并结合 SPSS 软件计算得到的回归模型为

$$R_a = 0.150 + 7.117 \times a_d + 0.388 \times q_d + 0.000\,13 \times f_d \quad (7)$$

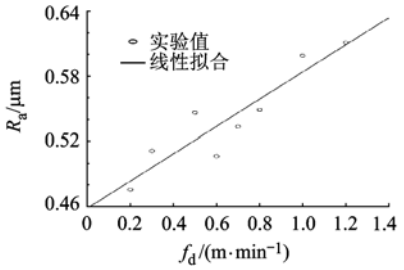


图 7　修整进给速度对表面粗糙度的影响曲线

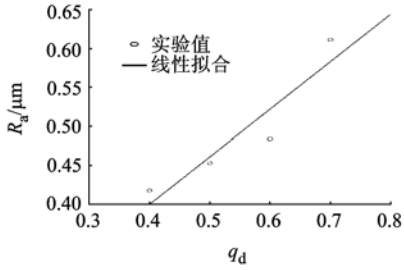


图 8　修整速比对表面粗糙度的影响曲线

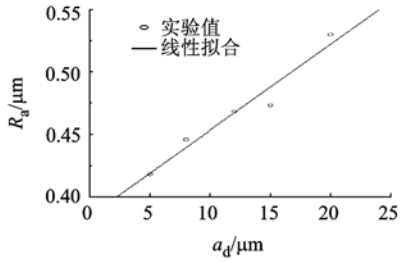


图 9　修整深度对工件磨削表面粗糙度的影响曲线

首先对得到的多元回归模型进行拟合优度检验和显著性检验. 拟合优度采用可决系数 R^2 来评价,而在多元回归分析中,为了消除解释变量个数对拟合优度的影响程度而采用调整可决系数 $\bar{R}^2$,磨削温度拟合优度可决系数和调整可决系数分别为 0.969 和 0.922,回归方程误差中回归误差所占的比重较大,解释变量能够非常好的解释被解释变量. 而回归方程的显著性则采用 F 统计量进行检验,其检验结果如表 3 所示,所选择的显著性水平为 0.05.

表 3　多元回归模型显著性检验表

模型	平方和	自由度	均方	F	概率 P
回归	0.040	3	0.013	55.97	5.98×10^{-7}
残差	0.003	11	2.38×10^{-4}		
总计	0.043	15			

由表 3 可知,F 值为 55.97,即 $P = p\{F \geqslant 55.97\} = 5.98 \times 10^{-7}$,其值远小于 0.05 的显著性水平,所以认为该磨削温度多元回归模型非常显著. 图 10 为该多元回归模型的标准化残差 P-P 图,各数据对应点分布在图中所示对角线附近,则基本可以判定残差服从正态随机分布,这也是对多元回归模型最重要的一个前提假设,从而保证

多元回归模型的正确性. 此外,还对该回归模型采用 Durbin-Watson 检验统计量进行序列相关检验、异方差检验以及采用容忍度和方差膨胀因子进行了多重共线性检验,检验结果均满足要求,说明所选回归模型合理.

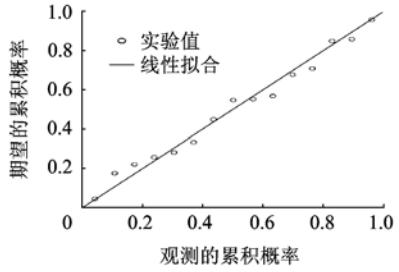


图 10 表面粗糙度回归标准化残差 *P-P* 图

3 温度和粗糙度双目标加权优化

在已经得到的磨削温度和表面粗糙度随修整参数变化的多元回归模型的基础上,为了进一步实现在不同的磨削加工需求时对砂轮地貌及其磨削性能的要求不同,而采用相应的修整参数,以提高砂轮修整的效率、精度并延长砂轮的使用寿命,基于此以磨削温度和粗糙度为目标对其进行双目标加权优化研究.

双目标加权优化的数学模型可以表示为

$$\left.\begin{aligned}\min\quad & [f_1(\boldsymbol{X}),f_2(\boldsymbol{X})]^{\mathrm{T}}\quad \boldsymbol{X}\in\mathbf{R}^n\\ \text{s.t.}\quad & g(\boldsymbol{X})\geqslant 0\\ & h(\boldsymbol{X})=0\end{aligned}\right\}\tag{8}$$

本文采用线性加权和法对磨削温度和表面粗糙度进行双目标优化,并且根据 2 个目标在不同的磨削加工阶段的重要程度确定其权值大小,进而构建评价函数将双目标转化为单目标进行优化求解,优化的单目标数学模型为

$$\left.\begin{aligned}\min\quad & [w_1\times(943.112-19\,790.687\times a_{\mathrm{d}}+\\ & 491.784\times q_{\mathrm{d}}-807.231\times q_{\mathrm{d}}^2-\\ & 0.635\times f_{\mathrm{d}}+0.0004\times f_{\mathrm{d}}^2+\\ & w_2\times(0.150+7.117\times a_{\mathrm{d}}+\\ & 0.388\times q_{\mathrm{d}}+0.000\,13\times f_{\mathrm{d}})]\\ \text{s.t.}\quad & 943.112-19\,790.687\times a_{\mathrm{d}}+\\ & 491.784\times q_{\mathrm{d}}-807.231\times q_{\mathrm{d}}^2-\\ & 0.635\times f_{\mathrm{d}}+0.0004\times f_{\mathrm{d}}^2\geqslant 0\\ & 0.150+7.117\times a_{\mathrm{d}}+0.388\times q_{\mathrm{d}}+\\ & 0.000\,13\times f_{\mathrm{d}}\geqslant 0\\ & 0.005\leqslant a_{\mathrm{d}}\leqslant 0.02\\ & 100\leqslant f_{\mathrm{d}}\leqslant 1\,200\\ & 0.4\leqslant q_{\mathrm{d}}\leqslant 0.7\end{aligned}\right\}\tag{9}$$

其中,w_1 和 w_2 分别为磨削温度和表面粗糙度 2 个优化目标的线性加权系数,且满足 $w_1+w_2=1$. 该单目标优化模型中,权值的确定根据粗磨和精磨工艺确定,由于粗磨加工中更加注重效率则降低磨削温度所占的权重就大一些,这样可以尽量避免磨削烧伤的发生而保持砂轮的持续磨削能力;而在精密磨削加工时,表面粗糙度所占的权重就相对大一些,最主要的目标是保证磨削表面质量,当然磨削温度的降低也很重要. 基于以上分析确定 2 种磨削加工时的磨削温度和表面粗糙度的权重值如表 4 所示.

表 4 双目标优化权值

磨削过程	w_1	w_2
粗磨	0.75	0.25
精磨	0.40	0.60

在进行加权优化之前要进行归一化处理,然后采用 MATLAB 遗传算法工具箱分别对粗磨和精磨加工阶段的陶瓷 CBN 砂轮修整参数进行优化,结果如表 5 所示.

表 5 双目标加权优化结果

磨削过程	a_{d}/μm	f_{d}/(mm·min^{-1})	q_{d}	T/℃	R_{a}/μm
粗磨	19.4	708.578	0.697	260	0.65
精磨	13.3	623.379	0.400	507	0.48

针对以上优化得到的结果进行了修整和磨削实验验证,结果如表 6 所示. 优化得到的修整参数修整后砂轮磨削 TC4 的磨削温度和表面粗糙度与实验结果吻合的非常好,误差在 10% 以内,证明了回归模型和优化模型的正确性,可以用来指导金刚石滚轮对陶瓷 CBN 砂轮的精密修整.

表 6 优化结果与实验结果对比及误差

结果	磨削温度 T/℃		表面粗糙度 R_{a}/μm	
	粗磨	精磨	粗磨	精磨
优化值	260	507	0.650	0.480
实验值	284	520	0.625	0.452
误差/%	9.23	2.56	3.85	5.83

4 结 论

针对金刚石滚轮修整杯形陶瓷 CBN 砂轮的修整工艺参数进行实验研究,并且通过磨削 TC4 工件对 CBN 砂轮的修整效果进行评估,得到的结论如下:①旋转金刚石滚轮修整法可以实现杯形陶瓷 CBN 砂轮的高效、稳定、快速修整,且修整后砂轮的磨削性能稳定;②采用多元线性回归方法得到了修整深度、修整速比和修整进给速度对磨削温度和表面粗糙度影响的经验公式;③根据双目标加权优化的数学模型,在对磨削温度和表面

粗糙度进行归一化的基础上采用遗传算法分别对粗磨和精磨中的修整参数进行优化,且磨削实验验证优化结果误差在 10% 以内.

参考文献(References)

[1] Hosokawa A, Ueda T, Yunoki T. Laser dressing of metal bonded diamond wheel [J]. CIRP Annals, 2006, 55(1): 329 – 332

[2] Kim H Y, Ahn J H, Seo Y H. Study on the estimation of wheel state in electrolytic in-process dressing (ELID) grinding [J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2001, 3: 1615 – 1618

[3] Sanchez J A, Ortega N, Lopez de Lacalle L N, et al. Analysis of the electro discharge dressing (EDD) process of large-grit size CBN grinding wheels [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(7/8): 688 – 694

[4] Meyer H R, Wiemann H J. Diamond roller dresser: their design and application considerations in Europe [J]. Ind Dia Rev, 1975: 89 – 95

[5] 邓鹏辉,吴耀宇,崔仲鸣,等. 旋转金刚石修整工具修整超硬磨料砂轮的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, 172(4): 68 – 70
Deng Penghui, Wu Yaoyu, Cui Zhongming, et al. Dressing of diamond grinding wheels using rotary diamond dresser [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009, 172(4): 68 – 70 (in Chinese)

[6] 庄司克雄. 磨削加工技术[M]. 郭隐彪,王振忠译. 北京:机械工业出版社, 2007: 123 – 128
Katsuo S. Grinding technology [M]. Translated by Guo Yinbiao, Wang Zhenzhong. Beijing: China Machine Press, 2007: 123 – 128 (in Chinese)

[7] Sunho K, Jung H A. Decision of dressing interval and depth by the direct measurement of the grinding wheel surface [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 88: 190 – 194

[8] Albert J S. An experimental investigation of rotary diamond truing and dressing of vitreous bond wheels for ceramic grinding [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1755 – 1774

[9] Torrance A A, Badger J A. The relation between the traverse dressing of vitrified grinding wheels and their performance [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1787 – 1811

[10] 张红霞,陈志同,陈五一. 金刚石滚轮修整效果与修整机理[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(7): 816 – 820
Zhang Hongxia, Chen Zhitong, Chen Wuyi. Dressing performance and dressing mechanism of diamond roller [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 816 – 820 (in Chinese)

[11] 李伟华,赵金伟. 凸轮加工中陶瓷 CBN 砂轮修整参数优化研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(3): 73 – 75
Li Weihua, Zhao Jinwei. Research on optimum dressing parameters of vitrified cBN wheel in cam shaft grinding [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2010, 30(3): 73 – 75 (in Chinese)

[12] 方伟,鲁涛. 修整参数对陶瓷 CBN 砂轮磨削效果的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(2): 25 – 28
Fang Wei, Lu Tao. Research on grinding performances of vitrified cBN wheel under different dressing parameter [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2010, 30(2): 25 – 28 (in Chinese)

[13] 任敬心,康仁科,史兴宽. 难加工材料的磨削[M]. 北京:国防工业出版社, 1999: 87 – 88
Ren Jingxin, Kang Renke, Shi Xingkuan. Grinding of difficult-to-cut materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 87 – 88 (in Chinese)

(编　辑:文丽芳)

(上接第 367 页)

[15] Moutarlier V, Gigandet M P, Pagetti J. Charactetisation of pitting corrosion in sealed anodic films formed in sulphuric, sulphuric/molybdate and chromic media [J]. Applied Surface Science, 2003, 206(6): 237 – 249

[16] Fanny S, Christine B, Georges M, et al. Characterisation of sealed anodic films on 7050 T74 and 2214 T6 aluminium alloys [J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 154(2): 94

[17] Ali M, Graeme E. Determination of fatigue related discontinuity state of 7000 series of aeroapace aluminum alloys [J]. Engineering Fatigue Analysis, 2007, 14(8): 673 – 685

[18] Suay J J, Gimenez E, Rodriguez T, et al. Characterization of anodized and sealed aluminium by EIS [J]. Corrosion Science, 2003, 45(21): 611 – 624

[19] 赵军,朱建龙,薛花娟,等. 阳极氧化对 7075 铝合金疲劳性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(3): 412
Zhao Jun, Zhu Jianlong, Xue Huajuan, et al. Effects of anodizing methods on behavior of 7075 aluminum alloy [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(3): 412 (in Chinese)

[20] Al-Rubaie K S, Del Grande M A, Travessa D N, et al. Effects of pre-strain on the fatigue life of 7050-T7451 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 464(3): 141 – 150

(编　辑:文丽芳)