

引文格式: 王亚霁, 孙玉利, 墨洪磊, 等. 单晶硅透镜铣磨工艺参数优化研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(7): 90-94.

WANG Yaji, SUN Yuli, MO Honglei, et al. Study on the optimization of grinding process parameters of monocrystalline silicon lens[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(7): 90-94.

单晶硅透镜铣磨工艺参数优化研究*

王亚霁¹, 孙玉利¹, 墨洪磊², 袁航², 朱力敏², 陆波², 郭凌曦²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海 221116)

[摘要] 针对红外光学领域应用广泛的非球面单晶硅透镜, 开展非球面法向磨削加工工艺研究。通过正交试验方法研究了砂轮转速、铣磨深度以及进给量等工艺参数对非球面铣磨加工表面粗糙度和材料去除率的影响规律, 并通过灰关联分析, 得到了一组针对法向磨削法加工表面粗糙度和材料去除率双指标优化的工艺参数。研究结果表明通过提高砂轮转速能够显著降低非球面加工表面粗糙度, 并改善非球面表面粗糙度分布的一致性; 通过灰色关联分析, 实现了非球面法向磨削加工表面粗糙度和材料去除率的双目标优化, 在提高非球面元件的表面加工质量的同时也具有一定的加工效率; 法向磨削法易在非球面表面形成螺旋线和放射状的磨削纹路, 磨削纹路会对表面粗糙度的分布均匀性造成影响, 因此应当注意抑制磨削纹路的生成。

关键词: 单晶硅透镜; 非球面; 工艺参数优化; 表面粗糙度; 材料去除率

Study on Optimization of Grinding Process Parameters of Monocrystalline Silicon Lens

WANG Yaji¹, SUN Yuli¹, MO Honglei², YUAN Hang², ZHU Limin², LU Bo², GUO Lingxi²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 221116, China)

[ABSTRACT] Aimed at the aspheric monocrystalline silicon lens widely used in the field of infrared optics, the processing technology of aspheric normal grinding was studied. Through orthogonal experiment, the influence of process parameters such as wheel speed, grinding depth and feed speed on the surface roughness and material removal rate of aspheric surface grinding was studied. Through grey correlation analysis, a group of process parameters optimized for the surface roughness and material removal rate of normal grinding was obtained. The results show that, by increasing the rotation speed of the grinding wheel, the surface roughness of the aspheric surface can be significantly reduced, and the uniformity of the surface roughness distribution of the aspheric surface can be improved. Through the grey correlation analysis, the double objective optimization of the surface roughness and the material removal rate of the aspheric normal grinding can be realized, which can not only improve the surface quality of the aspheric components, but also has a certain degree of machining efficiency. The normal grinding method tends to form helix and radial grinding marks on the aspheric surface. The grinding marks could affect the distribution uniformity of surface roughness, so it is supposed to pay attention to restraining the generation of grinding marks.

Keywords: Monocrystalline silicon lens; Aspheric surface; Process parameter optimization; Surface roughness; Material removal rate

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.07.090

红外光学透镜作为红外制导系统中的关键元件, 不仅需要起到保护内部制导系统的作用, 而且必须对特定红外波段辐射光透明^[1]。单晶硅因其硬度高、化学稳定

性强、折射率高、光色散小、且在红外波段具有良好的光线透过率等优点被广泛应用于红外光学制导系统。由单晶硅加工制造而成的非球面单晶硅透镜也因此成为红外光学领域所使用的关键光学元件之一^[2]。

单晶硅透镜的加工过程通常包括铣磨和抛光, 铣磨

* 基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U20A20293)

加工是非球面元件成形加工的关键工序。铣磨加工时的去除率是衡量铣磨加工效率的重要物理量,工艺参数对其有重要影响;材料去除率与铣磨加工表面质量存在影响关系。因此,研究单晶硅材料铣磨的材料去除率和表面粗糙度对提高铣磨效率和表面加工质量、降低铣磨成本,以及合理地安排铣磨工艺及选择加工参数均有重要的理论指导意义。国内外针对非球面元件的加工工艺做了大量研究,均取得了一定的研究成果^[3-6],但针对非球面法向磨削法加工表面粗糙度与材料去除率双指标的工艺优化仍缺乏相对深入的探究。

本文开展非球面法向磨削法加工工艺研究,采用正交试验方法研究铣磨深度、进给量以及砂轮转速等工艺参数对非球面铣磨加工表面粗糙度和材料去除率的影响规律,并通过灰色关联分析,得到了一组针对法向磨削法加工表面粗糙度和材料去除率双指标优化的工艺参数,在提高加工表面质量的同时保证较高的加工效率。

1 试验设计方法

在 MCG 150 型光学加工中心设备上,利用法向磨削法铣磨非球面硅透镜,试验装置如图 1 所示。法向磨削法加工如图 2 所示。磨削过程中砂轮主轴与工件主轴夹角在数控程序的控制下发生变化以保证砂轮磨削点位置始终垂直于非球面元件磨削点处的法向。法向磨削法本质上属于单点磨削,能够更加精密地去除材



图1 法向磨削法试验装置

Fig.1 Normal grinding experimental equipment

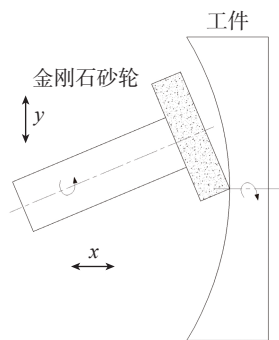


图2 法向磨削法示意图

Fig.2 Schematic diagram of normal grinding method

料,但砂轮与工件的点接触方式也加剧了砂轮的磨损程度,因此可选用耐磨性更好的金属基砂轮。

试验采用的砂轮型号为 $\phi 35\text{mm}$ 的 D46 金属基杯型砂轮,试验材料为口径 $\phi 103\text{mm}$ 的单晶硅毛坯件,所加工的单晶硅非球面透镜最大曲率半径为 159.767mm 。加工后的非球面表面粗糙度采用 Form Talysurf Series 2 系列接触式轮廓测量仪检测,材料去除率通过计算单位时间内的体积变化量来表征。

针对法向磨削方法,对砂轮转速、铣磨深度以及进给量这 3 个因素分别选取 3 个水平,如表 1 所示,对加工参数采用 $L_9(3^4)$ 正交表进行正交试验。

2 试验结果与分析

2.1 表面粗糙度

单晶硅透镜法向磨削法加工后的表面粗糙度和材料去除率的相关数据计算结果如表 2 所示。其中, MRR 为材料去除率; $T_1 \sim T_3$ 为各因素水平下的表面粗糙度或材料去除率之和; $K_1 \sim K_3$ 为各因素水平下的表面粗糙度和材料去除率均值及对应 $T_1 \sim T_3$ 的 $1/3$; T_R 和 T_{MMR} 分别表示 9 组加工参数下得到的表面粗糙度之和及材料去除率之和。

由表 2 可知,不同水平下的砂轮转速、铣磨深度以及进给量所对应的表面粗糙度极差分别为 0.4214、0.0585 及 0.0075,因此表面粗糙度对于砂轮转速的变化最为敏感。为获得最低的表面粗糙度,各加工参数的最优水平分别为砂轮转速 8000r/min 、铣磨深度 $40\mu\text{m}$ 及进给量 0.015mm/r ,各参数水平下的表面粗糙度均值如图 3 所示,法向磨削法下各加工参数对表面粗糙度的影响趋势如图 4 所示,其中, n_s 为砂轮转速; a_p 为铣磨深度; f 为进给量。由图 4 可以发现,砂轮转速的变化对于表面粗糙度具有显著影响,表面粗糙度随着砂轮转速的提高显著降低。

相对于砂轮转速,铣磨深度和进给量对于表面粗糙度的影响不明显,对表 2 中的数据进行方差分析,计算结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出,计算得出的砂轮转速统计量 F 大于检验因子 $F_{0.05(2,2)}$,而铣磨深度和进给量的统计量 F 则小于检验因子 $F_{0.05(2,2)}$,因此砂轮转速对于表面粗糙度具有显著影响,而铣磨深度和进给量对于表面粗糙度的影

表1 法向磨削法因素水平表

Table 1 Level of normal grinding parameters

因素水平	砂轮转速 $A/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	铣磨深度 $B/\mu\text{m}$	进给量 $C/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$
1	4000	20	0.015
2	6000	40	0.02
3	8000	60	0.025

表2 法向磨削法数据计算结果

Table 2 Calculation results of normal grinding data

组别名称	因素			结果	
	砂轮转速 $A/(r \cdot \min^{-1})$	铣磨深度 $B/\mu\text{m}$	进给量 $C/(mm \cdot r^{-1})$	$R_a/\mu\text{m}$	$MRR/(mm^3 \cdot s^{-1})$
1	4000	20	0.015	0.5702	0.0815
2	4000	40	0.02	0.5993	0.2154
3	4000	60	0.025	0.6380	0.3933
4	6000	20	0.02	0.5365	0.1077
5	6000	40	0.025	0.4642	0.2623
6	6000	60	0.015	0.5932	0.2445
7	8000	20	0.025	0.2043	0.1311
8	8000	40	0.015	0.1656	0.1630
9	8000	60	0.02	0.1735	0.3231
R_a	T_1	1.8075	1.311	1.329	$T_{R_a}=3.9448$
	T_2	1.5939	1.2291	1.3092	
	T_3	0.5433	1.4046	1.3065	
	K_1	0.6025	0.437	0.443	
	K_2	0.5313	0.4097	0.4364	
	K_3	0.1811	0.4682	0.4355	
	优水平	3	2	3	
	极差 R	0.4214	0.0585	0.0075	
主次序	$A > B > C$				
MRR	T_1	0.6903	0.3201	0.489	$T_{MRR}=1.9219$
	T_2	0.6144	0.6408	0.6462	
	T_3	0.6171	0.9609	0.7866	
	K_1	0.2301	0.1067	0.163	
	K_2	0.2048	0.2136	0.2154	
	K_3	0.2057	0.3203	0.2622	
	优水平	1	3	3	
	极差 R	0.0253	0.2136	0.0992	
主次序	$B > C > A$				

响不显著。砂轮属于多刃刀具,当砂轮转速提高,单位时间内参与工件表面切削的刀刃就越多,则单颗刀刃的切削深度就相对较低,得到的表面粗糙度也就越小,相对于砂轮转速,铣磨深度和进给量对于表面粗糙度的影响不明显,这是由于法向磨削法采用的砂轮为小尺寸杯型砂轮,砂轮边缘圆角较小,在磨削过程中砂轮与工件的接触弧长很小,接近于单点磨削。因此为了避免砂轮严重磨损,法向磨削法所能选择的铣磨深度和进给量范围较小,所以在小范围内变化的铣磨深度和进给量对于表面粗糙度的影响有限。

图5为不同加工参数下的单晶硅透镜法向磨削加工后的表面状态及表面粗糙度轮廓,给出的3组加工参数中砂轮转速与进给量均有所不同。

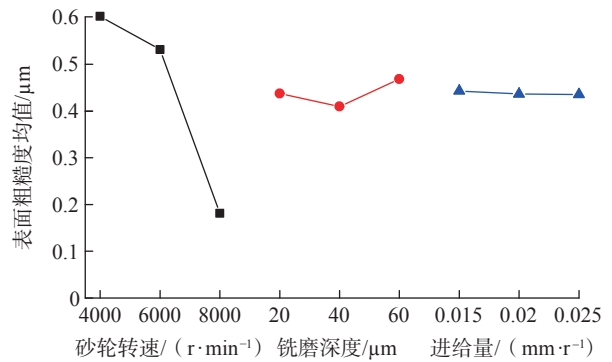
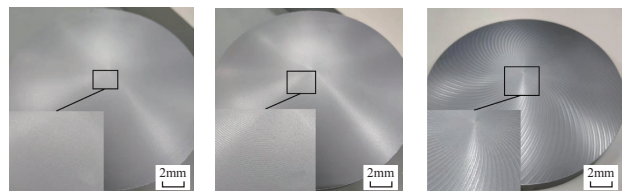


图3 各参数水平下的表面粗糙度均值
Fig.3 Mean value of surface roughness at each parameter level



(a) $n_s=4000r/min$, $a_p=60\mu\text{m}$, $f=0.025\text{mm/r}$, $R_a=0.6380\mu\text{m}$
 (b) $n_s=6000r/min$, $a_p=60\mu\text{m}$, $f=0.015\text{mm/r}$, $R_a=0.5932\mu\text{m}$
 (c) $n_s=8000r/min$, $a_p=60\mu\text{m}$, $f=0.02\text{mm/r}$, $R_a=0.1735\mu\text{m}$

图4 不同加工参数下的非球面表面形貌及粗糙度轮廓
Fig.4 Aspheric surface morphology and roughness profile under different machining parameters

表3 法向磨削加工表面粗糙度方差分析表

Table 3 Analysis of variance of normal grinding surface roughness

变异来源	偏差平方和	自由度 / (\circ)	均方值	统计量 F	检验因子 $F_{0.05(2,2)}$
砂轮转速 A	0.304	2	0.152	39.48	19
铣磨深度 B	0.005	2	0.0025	0.649	—
进给量 C	6.263×10^{-5}	2	3.1315×10^{-5}	0.00813	—
误差	0.0077	2	0.00385	—	—

由图5(a)可知,在较低的砂轮转速下,非球面表面粗糙度较高,可以看出加工后的非球面表面所反射的光泽较暗。由表面粗糙度轮廓线可以看出,非球面中心区域表面粗糙度较小,而工件外缘区域表面粗糙度值较大,表面粗糙度整体沿半径方向逐渐增大,这主要由于沿非球面半径方向材料去除量不均匀所导致。对比3组加工参数下的非球面表面形貌可知,随着砂轮转速的提高,非球面表面的反射光泽度提高,表明了非球面表面质量有所提高;对比3组加工参数下的表面粗糙度轮廓可知,在较低的砂轮转速下,非球面元件中心区域与外缘区域的表面粗糙度差异较大,随着砂轮转速的提高,表面粗糙度随半径增大的幅度有所减小,非球面元件中心区域与外缘区域的表面粗糙度差值减小,非球面

元件整体表面粗糙度分布趋于一致。此外,从图5中非球面表面的局部放大图可以看出,各组加工参数下的非球面表面均出现了不同程度的磨削纹路。

这种磨削纹路普遍存在于工具与工件均做旋转运动的加工过程,如硅片磨削、球面磨削过程中均会出现类似的磨削纹路^[7]。在非球面的法向磨削过程中,杯型砂轮上的金刚石磨粒与工件材料相互接触并产生相对运动,在砂轮旋转运动、工件旋转运动以及进给运动的共同作用下,金刚石磨粒在工件表面留下螺旋线磨削轨迹。图6显示了不同砂轮转速下单颗磨粒与多颗磨粒共同作用的磨削轨迹,当砂轮转速较低时,单颗金刚石磨粒与工件接触时间较长,因此磨粒在工件表面划擦的时间较长,所留下的螺旋线磨削轨迹较长。由图6可以看出,较低砂轮转速下的单颗磨粒螺旋线磨削轨迹环绕

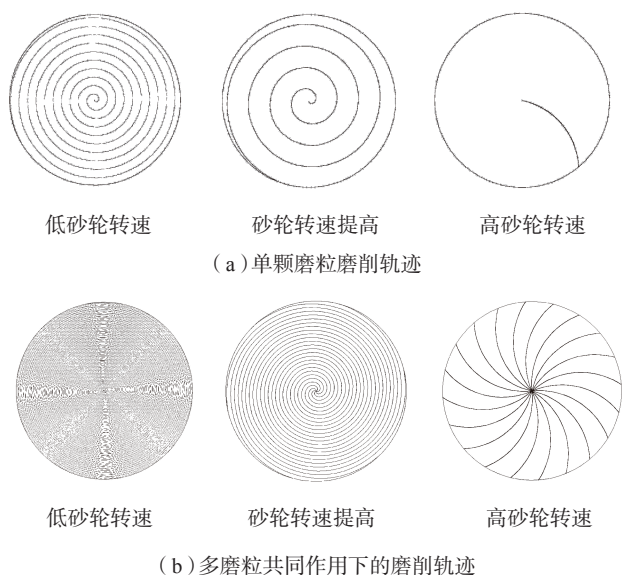


图5 砂轮转速对磨削纹路的影响规律

Fig.5 Effect of wheel speed on grinding grain marks

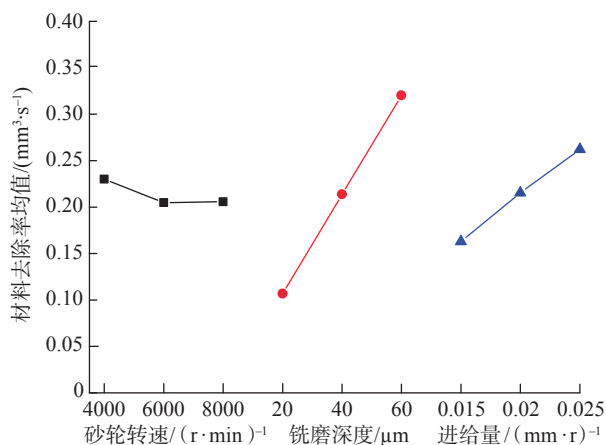


图6 各参数水平下的材料去除率均值

Fig.6 Mean value of material removal rate at each parameter level

圈数较多,在低砂轮转速下,多磨粒共同作用下的螺旋磨削轨迹较为集中,各磨粒产生的螺旋线间距较小,因此从整体非球面来看,表面的螺旋纹路就显得不易发现。随着砂轮转速的提高,金刚石磨粒在工件表面划擦的时间减少,因此单颗磨粒产生螺旋线磨削轨迹长度减小,可以看出螺旋线环绕圈数减少,因此多磨粒作用下的螺旋线磨削轨迹间距有所增大。当砂轮转速提高到一定阶段时,金刚石磨粒在工件表面划擦时间变得更少,以至于仅在工件表面留下一小段圆弧轨迹,则在多磨粒共同作用下,非球面表面便出现了如图5所示的由中心向外散射的磨削纹路。另一方面,由于表面粗糙度随砂轮转速的提高而降低,因此非球面表面被磨粒加工到的区域表面粗糙度随砂轮转速的提高而降低,因而磨削轨迹处的加工区域所反射的光泽更明亮,这也增强了非球面表面磨削纹路的明暗相间性,使得磨削纹路变得更明显。

综上所述,对于非球面法向磨削加工而言,加工过程中会在工件表面留下螺旋线磨削纹路,磨削纹路随砂轮转速的提高而变得稀疏,并且明暗对比性更加明显。在较低砂轮转速下,非球面表面磨削纹路不明显,但表面粗糙度较高;而在较高的砂轮转速下,非球面表面磨削纹路清晰可见,但非球面表面粗糙度值较低。由此可见,磨削纹路明显并不因为非球面整体加工表面粗糙度变差,但相关研究表明,磨削纹路会影响非球面表面质量的均匀性^[7]。因此从提高非球面表面质量均匀性的角度来看,也应当控制磨削纹路的生成,使得磨削纹路的分布变得更加均匀。

2.2 材料去除率

由表2可知,对于法向磨削法而言,为获得最高的材料去除率,各加工参数的最优水平分别为砂轮转速4000r/min、铣磨深度60μm及进给量0.025mm/r。

非球面法向磨削法中砂轮转速对于材料去除率的影响不明显,而通过增加铣磨深度和进给量则能显著提高材料去除率。由前述分析法向磨削法加工参数对于非球面表面粗糙度的影响规律可知,加工参数对于铣磨加工表面粗糙度具有一定影响,其中提高砂轮转速可显著降低表面粗糙度,而在一定范围内改变铣磨深度和进给量则对于表面粗糙度的影响不大。因此,在利用法向磨削法加工非球面零件时,可以采用较高的砂轮转速以获得较高的表面质量,并在机床和砂轮可靠工作的前提下合理选择铣磨深度和进给量,以保证一定的材料去除率。从这个角度看,法向磨削法更适合非球面粗加工后的精磨加工,采用较高的砂轮转速以及较低的铣磨深度和进给量,可以获得更高质量的加工表面。

2.3 表面粗糙度与材料去除率灰色关联分析

为了得到针对法向磨削法下表面粗糙度和材料去除率双指标优化的最优参数组合,需进行灰色关联分析,经无量纲化处理后的数据如表4所示,进而可计算出表面粗糙度与材料去除率的灰色关联度,如表5所

示。从表5可以看出,在第9组加工参数下,表面粗糙度与材料去除率的灰色关联度值最大,对应的加工参数组合为砂轮转速 8000r/min、铣磨深度 60 μm 、进给量 0.02mm/r。因此,该组合为本试验中针对法向磨削法表面粗糙度和材料去除率双指标优化的最优工艺参数,可以看出在该组加工参数下,表面粗糙度为 0.1735 μm ,仅次于针对表面粗糙度单指标优化的 0.1656 μm ;材料去除率为 0.3231 mm^3/s ,仅次于针对材料去除率单指标优化的 0.3933 mm^3/s 。通过对表面粗糙度和材料去除率的双目标优化,实现了对表面粗糙度和材料去除率的兼顾,一方面提高了非球面元件的加工表面质量;另一方面也保持了较高的加工效率。

3 结论

本文采用了法向磨削法进行非球面铣磨加工工艺试验,通过正交试验方法研究了砂轮转速、铣磨深度以及进给量等工艺参数对非球面铣磨加工表面粗糙度和材料

去除率的影响规律,并通过灰色关联分析,得到了一组针对法向磨削法加工表面粗糙度和材料去除率双指标优化的工艺参数,通过试验研究得出了以下结论。

(1)对于非球面法向磨削加工,通过提高砂轮转速能够显著降低非球面加工表面粗糙度,并提高非球面表面粗糙度分布的一致性。砂轮转速对于材料去除率的影响不明显,而通过增加铣磨深度和进给量则能显著提高材料去除率。

(2)通过灰色关联分析,实现了非球面法向磨削加工表面粗糙度和材料去除率的双目标优化,在提高非球面元件加工表面质量的同时也具有一定的加工效率。

(3)法向磨削法易在非球面表面形成螺旋线和放射状的磨削纹路,磨削纹路会对表面粗糙度的分布均匀性造成影响,因此应当注意抑制磨削纹路的生成。

参考文献

[1] 罗海波,史泽林.红外成像制导技术发展现状与展望[J].红外与激光工程,2009,38(4):45-47.
 LUO Haibo, SHI Zelin. Status and prospect of infra-red imaging guidance technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4): 45-47.

[2] 程凯.单晶硅非球面抛光工艺实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
 CHEN Kai. Experimental study on polishing process of single crystal silicon aspheric surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[3] LEE E, BAEK S Y. A study on optimum grinding factors for aspheric convex surface microlens using design of experiments[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(3): 509-520.

[4] SAZEDUR R M, SALEH T, LIM H S, et al. Development of an on-machine profile measurement system in ELID grinding for machining aspheric surface with software compensation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(7-8): 887-895.

[5] 朱振涛,于正林.非球面加工工艺实验研究[J].机械工程师,2019(3):17-19.
 ZHU Zhentao, YU Zhenglin. Experimental research on the processing technology of aspheric surface[J]. Mechanical Engineer, 2019(3): 17-19.

[6] 许金凯,张学军,于化东.非球面元件精密铣磨加工技术研究[J].光学技术,2009,35(5):761-765.
 XU Jinkai, ZHANG Xuejun, YU Huadong. Study of precision milling and grinding process technology for aspheric components[J]. Optical Technique, 2009, 35(5): 761-765.

[7] 陈冰,李时春,邓朝晖,等.单晶硅非球面超精密磨削砂轮的性能参数优选[J].兵器材料科学与工程,2017,40(4):5-10.
 CHEN Bing, LI Shichun, DENG Zhaohui, et al. Optimization of wheel performance parameters for ultra-precision grinding aspherical surface of silicon[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(4): 5-10.

表4 无量纲化处理后的表面粗糙度和材料去除率数据

Table 4 Data of surface roughness and material removal rate after dimensionless treatment

组别名称	原始数据列		无量纲化处理后的数据列	
	$R_a/\mu\text{m}$	MMR/($\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	R_a	MMR
1	0.5702	0.0815	0.8565	0
2	0.5993	0.2154	0.9181	0.4294
3	0.6380	0.3933	1	1
4	0.5365	0.1077	0.7851	0.0629
5	0.4642	0.2623	0.6321	0.5799
6	0.5932	0.2445	0.9052	0.5228
7	0.2043	0.1311	0.082	0.1591
8	0.1656	0.1630	0	0.2614
9	0.1735	0.3231	0.0167	0.7749

表5 偏差值和灰色关联系数计算结果

Table 5 Calculation results of deviation value and grey correlation coefficient

组别名称	偏差		灰色关联系数		灰色关联度
	R_a	MMR	R_a	MMR	
1	0.8565	1	0.3686	0.3333	0.3509
2	0.9181	0.5706	0.3525	0.4670	0.4097
3	1	0	0.3333	1	0.6667
4	0.7851	0.9371	0.3891	0.3479	0.3685
5	0.6321	0.4201	0.4417	0.5434	0.4926
6	0.9052	0.4772	0.3558	0.5117	0.4337
7	0.082	0.8409	0.8591	0.3729	0.6160
8	0	0.7386	1	0.4037	0.7019
9	0.0167	0.2251	0.9677	0.6897	0.8287

通讯作者:孙玉利,教授、博士生导师、博士,研究方向为精密超精密加工技术、现代表面工程技术等,E-mail:sunyuli@nuaa.edu.cn。

(责编 古京)