

# 高锰钢精密超精密镜面加工技术及试验研究

关佳亮<sup>1</sup>, 徐真真<sup>1</sup>, 张孝辉<sup>2</sup>, 尚海洋<sup>1</sup>, 郭奎崇<sup>1</sup>, 王建杰<sup>1</sup>

(1.北京工业大学 先进制造技术北京市重点实验室, 北京 100124;

2.北京卫星制造厂有限公司, 北京 100080)

**摘要:** **目的** 利用 ELID 磨削技术对  $ZGMn_{13}Cr_2$  高锰钢进行精密超精密镜面磨削加工试验研究, 解决其加工性能差的问题, 以提升表面质量, 采用二次回归通用旋转设计试验, 探究不同试验因素对  $ZGMn_{13}Cr_2$  高锰钢加工表面质量的影响规律, 并对各因素工艺参数进行优化。**方法** 对 MSG-612 CNC 超精密成型平面磨床进行 ELID 磨削工艺模块化改造后, 采用 240#、W10 粒度的金属结合剂金刚石砂轮对直径  $\phi 50$  mm、厚度 10 mm 的样件进行 ELID 磨削加工, 对比两种粒度砂轮的加工效果。应用二次回归通用旋转设计进行工艺试验, 搭建表面粗糙度二次回归数学模型, 探究不同试验因素对工件表面质量的影响程度, 使用判定系数  $R^2$  检验二次回归模型对实际情况的拟合程度。最后, 由 lingo 软件对二次回归数学模型进行优化, 得出  $ZGMn_{13}Cr_2$  高锰钢 ELID 磨削各试验因素工艺参数的最佳组合。**结果** 经 W10 金属结合剂金刚石砂轮加工后, 样件获得较高精度的镜面效果, 两种粒度所加工的样件表面均无烧伤。判定系数  $R^2$  检验二次回归模型对实际情况的拟合度为 99.24%, 模型的预测结果对实际加工有指导意义。优化得出的最佳工艺参数组合为: 砂轮线速度 35 m/s, 电解电压 90 V, 砂轮进给量 2  $\mu$ m, 电解间隙 0.734 mm。**结论** ELID 精密超精密镜面磨削加工技术可大幅提高  $ZGMn_{13}Cr_2$  高锰钢的加工效率和加工精度, 减少工件表面烧伤, 在高锰钢磨削加工方面具有良好的应用价值。

**关键词:**  $ZGMn_{13}Cr_2$  高锰钢; ELID 磨削技术; 在线电解; 二次回归通用旋转设计; 优化组合

**中图分类号:** TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)10-0353-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.042

## Precision and Ultra Precision Mirror Processing Technology and Experiment of High Manganese Steel

GUAN Jia-liang<sup>1</sup>, XU Zhen-zhen<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-hui<sup>2</sup>, SHANG Hai-yang<sup>1</sup>,  
GUO Kui-chong<sup>1</sup>, WANG Jian-jie<sup>1</sup>

(1.Beijing Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Beijing University of Technology,  
Beijing 100124, China; 2.Beijing Spacecrafts, Beijing 100080, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the precision and ultra precision mirror grinding experiment of  $ZGMn_{13}Cr_2$  high manganese steel by ELID grinding technology to solve the problem of poor processing performance and to improve its surface quality and then use the quadratic regression universal rotation design test to explore the influence of different test factors on the

收稿日期: 2020-03-17; 修订日期: 2020-04-17

Received: 2020-03-17; Revised: 2020-04-17

作者简介: 关佳亮 (1964—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 难加工材料精密超精密加工技术及专用装备开发。邮箱: guanjl@bjut.edu.cn

**Biography:** GUAN Jia-liang (1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: development of precision ultra-precision machining technology and special equipment for difficult materials. E-mail: guanjl@bjut.edu.cn

**引文格式:** 关佳亮, 徐真真, 张孝辉, 等. 高锰钢精密超精密镜面加工技术及试验研究[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 353-361.

GUAN Jia-liang, XU Zhen-zhen, ZHANG Xiao-hui, et al. Precision and ultra precision mirror processing technology and experiment of high manganese steel[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 353-361.

surface quality of  $ZGMn_{13}Cr_2$  high manganese steel, and optimize the process parameters of each factor. The sample with diameter of  $\phi 50$  mm and thickness of 10 mm was processed by ELID with metal bonded diamond wheel with grain size of 240# and W10 after the modularization of ELID grinding process for MSG612-CNC ultra precision forming surface grinder to compare the processing effects of two kinds of grinding wheels. The process test was carried out by the universal rotary design of quadratic regression. Then, the mathematical model of quadratic regression of surface roughness was built to explore the influence degree of different test factors on the surface quality of workpiece. Decision coefficient  $R^2$  was used to test the fitting degree of quadratic regression model to the actual situation. At last, LINGO software was used to optimize the quadratic regression mathematical model to get the best combination of process parameters of various experimental factors in the ELID grinding of  $ZGMn_{13}Cr_2$  high manganese steel. After machining with W10 metal bonded diamond wheel, the sample had a high precision mirror effect, and there was no burn on the surface of the sample processed with two particle sizes. The fitting degree of the quadratic regression model to the actual situation was 99.24%, and the prediction results of the model were instructive to the actual machining. The optimum technological parameters of grinding wheel were obtained, with linear speed of 35 m/s, electrolytic voltage of 90 V, grinding wheel feed of 2  $\mu m$  and electrolytic clearance of 0.734. ELID Precision mirror grinding technology can greatly improve the processing efficiency and accuracy of  $ZGMn_{13}Cr_2$  high manganese steel, reduce the surface burn and crack of workpiece, and has good application value in the grinding of high manganese steel.

**KEY WORDS:**  $ZGMn_{13}Cr_2$  high manganese steel; ELID grinding technology; online electrolysis; quadratic regression general rotary design; optimization combination

锰钢是一种强度较高的合金钢材。锰含量达到 10%（质量分数）以上的锰钢被称作高锰钢，此时材料具有很高的强度、塑性、韧性和加工硬化等特性<sup>[1-2]</sup>。当极大的冲击载荷作用于高锰钢时，受载表面出现加工硬化，但材料内部仍然保持原有的韧性和强度，因而能承受冲击、挤压、磨损等恶劣工况条件，常用于制作钢磨机、滚珠轴承、铲斗、铁轨等抗冲击磨损的结构件<sup>[3]</sup>。因为高锰钢加工硬化的特性导致其机加工性能很差，所以该材料大都采用铸造成形工艺，少量采用锻造工艺，在不能避免需要机加工时，常选用陶瓷基砂轮进行磨削加工<sup>[4-7]</sup>。但精加工时，陶瓷基砂轮中的陶瓷结合剂具有较高的硬度和强度<sup>[8]</sup>且参加磨削，会对已加工表面造成划伤，同时陶瓷结合剂对磨粒的把持力大，磨粒磨钝后不易脱落，加工时摩擦力增大，产生大量磨削热，使样件表面产生烧伤，加剧纵向微裂纹的产生<sup>[9-13]</sup>。因此，需要频繁地采用金刚

石笔对砂轮的磨削表面进行修整，给砂轮造成很大的损耗，使加工成本增加。ELID 磨削技术可实现金属结合剂砂轮的在线修锐，使砂轮在磨削过程中始终保持良好的磨削状态，磨削力小，磨削温度低，避免了磨削表面烧伤的产生<sup>[14-21]</sup>。但对  $ZGMn_{13}Cr_2$  高锰钢的 ELID 磨削加工尚处于摸索阶段。本文应用二次回归通用旋转设计工艺试验，实验数据借助 DPS（数据处理）和 lingo（优化）软件处理，探究不同试验因素对样件加工表面质量的影响程度，优化出能够满足材料精密超精密镜面加工要求的 ELID 磨削加工工艺参数组合。

## 1 ELID 磨削工艺装置的组成及其镜面磨削的成形过程

ELID 磨削技术是基于电解原理衍生出的一种在线电解修锐的电化学加工技术<sup>[14]</sup>，其装置如图 1 所示。

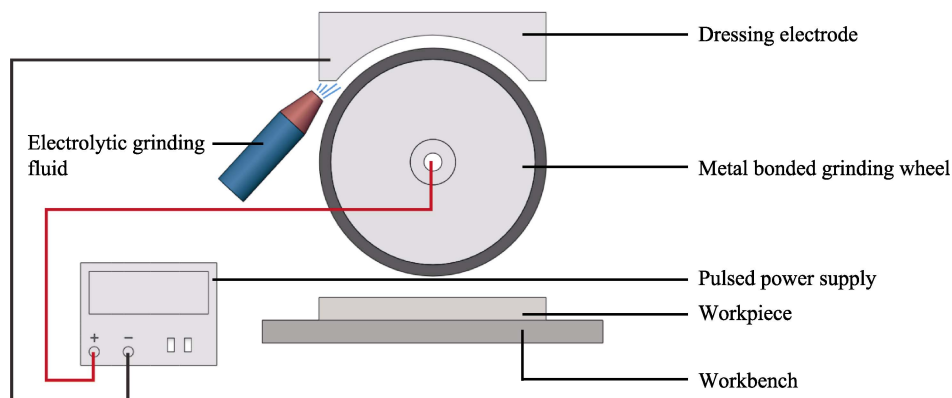


图 1 ELID 磨削装置示意图  
Fig.1 Diagram of ELID grinding device

专用脉冲电源的正负极分别连接导电性良好的金属结合剂砂轮及与砂轮形状相匹配的电解电极, 电解磨削液不断喷洒在电极和砂轮之间, 动态闭合了此电解磨削工艺装置。

ELID 镜面磨削的成形过程依次经历预电解修锐、磨削和精磨三个阶段<sup>[15-21]</sup>。在预电解修锐阶段, 电解修锐和氧化抑制作用同时进行, 开始时, 电解修锐作用大于氧化抑制作用, 磨粒出刃高度随着电解的进行逐渐增大, 但同时伴随着磨粒周围金属结合剂的溶解。这些稀松柔软的溶解物以氧化膜的形式覆盖在砂轮表面, 阻碍着电解作用的发生, 氧化抑制作用凸显, 直至电解作用消失, 有效抑制砂轮的过度电解, 此时磨粒获得最大的出刃高度, 如图 2a 和图 2b 所示; 磨削阶段, 由于磨削加工中的连续进给, 氧化膜被工

件刮除, 出刃磨粒对工件表面进行磨削加工。当砂轮表层的出刃磨粒被磨钝时, 其根部的金属结合剂由于电解作用逐渐变薄, 把持力逐渐减弱, 以致不足以将其把持在结合剂中, 此时在磨削力的作用下脱落并游离于砂轮表面的氧化膜中。与此同时, 随着磨削过程中电解过程的持续进行, 先前包裹在表层金属结合剂下的磨粒也会获得出刃并参与磨削, 此过程与磨削同步进行, 砂轮金属结合剂中的磨削磨粒发生推陈出新的作用, 如图 2c 和图 2d 所示; 精磨阶段, 由于砂轮进给量小于砂轮表面氧化膜厚度, 此时固着磨粒不参加磨削, 只有附着在砂轮表面且蕴含着游离态磨粒的氧化膜随着砂轮高速旋转, 并对已加工表面进行高速、无压力的研磨抛光加工, 从而获得超精密镜面表面, 如图 2e 所示。所以, ELID 镜

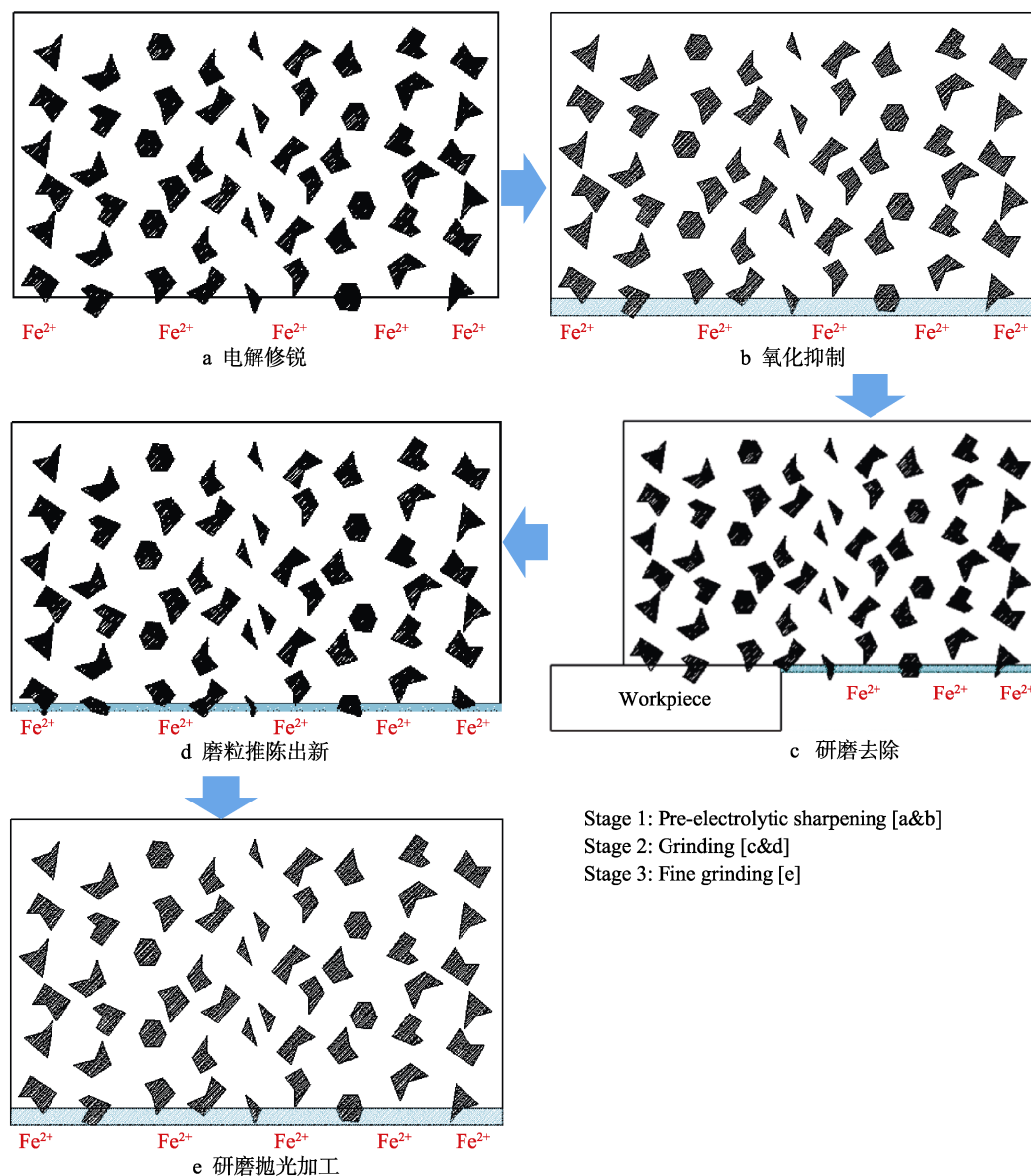


图 2 ELID 镜面磨削各阶段砂轮状态

Fig.2 State of ELID mirror grinding wheel in each stage: (a) electrolytic sharpening; (b) oxidative inhibition; (c) grinding removal; (d) bring forth the old and bring forth the new; (e) grinding and polishing action

面磨削加工是磨、抛、研集成化的精密超精密镜面加工技术。

2 试验

2.1 试验材料及设备

本试验使用改造后的 MSG-612 CNC 型高精度平面磨床(配有 ELID 磨削专用直流脉冲电源、专用电解磨削液、直径为  $\phi 180\text{ mm}$  的金属结合剂金刚石砂轮及其配套导电电极),对直径为  $\phi 50\text{ mm}$ 、厚度为  $10\text{ mm}$  的  $\text{ZGMn}_{13}\text{Cr}_2$  高锰钢进行 ELID 精密超精密镜面磨削试验,初始表面粗糙度  $Ra=3.2\text{ }\mu\text{m}$ 。使用 TR300 粗糙度形状检测仪和 S-3400N II 型扫描电子显微镜,分别对已加工样件表面进行二维和三维形貌测量。材料化学成分如表 1 所示。

表 1  $\text{ZGMn}_{13}\text{Cr}_2$  高锰钢的化学成分<sup>[22]</sup>  
Tab.1 Chemical composition of  $\text{ZGMn}_{13}\text{Cr}_2$  high manganese steel<sup>[22]</sup>

wt%					
C	Mn	Si	S	P	Cr
1.14	12.32	0.49	0.010	0.028	2.04

2.2  $\text{ZGMn}_{13}\text{Cr}_2$  高锰钢 ELID 磨削的可行性实验

实验工艺过程为:首先采用粒度为 240# 的金属结合剂金刚石砂轮对样件进行半精密加工,然后再采用微粉级粒度的金属结合剂金刚石砂轮(W10)对样件进行精密超精密加工。磨削工艺参数及结果如表 2 所示,磨削后的加工效果如图 3 所示,SEM 表面形貌如图 4 所示。

表 2  $\text{ZGMn}_{13}\text{Cr}_2$  高锰钢 ELID 磨削工艺参数及结果  
Tab.2 ELID grinding parameters and results of  $\text{ZGMn}_{13}\text{Cr}_2$  high manganese steel

Grinding wheel type	Grinding wheel feed $F/\mu\text{m}$	Electrolytic voltage $U/\text{V}$	Electrolytic gap $\delta/\text{mm}$	Linear speed of grinding wheel $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Duty cycle $D/\%$	Electrolyte concentration $C/\%$	Surface roughness $Ra/\text{nm}$
240#	10	80	0.5	20	50	5	97
W10	2	80	0.5	20	50	5	48

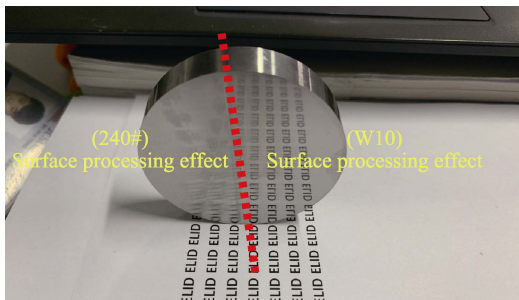
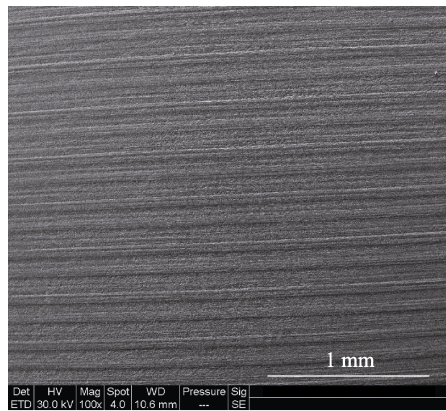
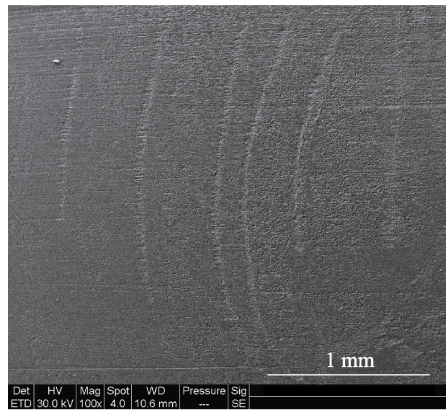


图 3 磨削后加工效果对比  
Fig.3 Comparison of machining effects after grinding

由表 2 和图 3 能够看出,ELID 磨削后样件获得了较低的表面粗糙度及较高的镜面效果。从图 4a 中可以看出,采用粒度为 240# 的金属结合剂砂轮磨削得到样件的表面无烧伤,磨削纹路规整明显,这说明 ELID 磨削中砂轮磨削状态良好,从而保证了磨削痕迹的均匀性和一致性。对比观察在同等放大倍率下的图 4b,其样件表面无烧伤且磨削痕迹均匀细密。微粉级粒度的 W10 金属结合剂金刚石砂轮对样件表面可实现微细加工,致密均匀的加工痕迹能够覆盖半精加工留下的较粗痕迹。另外,图 4b 中残留着较深的纵向划痕是材料缺陷造成的。综合以上分析可见,对于  $\text{ZGMn}_{13}\text{Cr}_2$  高锰钢材料,ELID 磨削技术可避免工件表面烧伤,获得高质量和高精度的加工表面,同时还可以减少加工工序,降低加工成本,提高加工效率。



a 磨削纹理(240#)



b 磨削纹理(W10)

图 4 磨削表面 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphology of grinding surface: (a) grinding texture (240#), (b) grinding texture (W10)



2.3 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢 ELID 磨削的二次回归通用旋转试验设计

二次回归通用旋转设计能在实验次数较少的情况下，依靠牺牲正交性来保证预测精度的一致性，可以进行试验参数与试验结果之间关系的探究。ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢 ELID 磨削受众多因素的影响，例如砂轮进给量、电解电压、电解间隙、砂轮线速度、占空比、电解质浓度等。依据 ELID 磨削硬脆材料的实验经验，占空比和电解质浓度两因素对 ELID 磨削结果的影响较小，将这两个因素作为常量处理，试验中分别采用 50%和 5%（质量分数）<sup>[23]</sup>，砂轮进给量、电解电压、电解间隙及砂轮线速度四个因素作为变量处理，按照上述顺序分别记作  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ 、 $Z_4$ ，进行四因素的非线性二次回归通用旋转设计。在前期模拟试验结果的基础上，根据表 3 所示的机床对各试验因素控制的最小分辨率，确定上述四因素的上、下两水平，如表 4 所示。在二次回归通用旋转试验设计的数值分析与建模过程中，不同的量纲会发生各异的自身变异，从而对数学模型引入不必要的误差，故所有的数值分析都将建立在编码水平  $X_j$  上，各试验因素水平编码如表 5 所示。表 5 中  $j=1,2,3,4$ ； $Z_{1j}$  为第  $j$  个因素的上水平， $Z_{2j}$  为  $j$  个因素的下水平， $Z_{0j}$  为第  $j$  个因素的零水平（上、下水平的中间值）， $\Delta_j$  为第  $j$  个因素的取值变化区间。依据二次回归通用旋转试验设计理论进行 31 组试验<sup>[24-26]</sup>，每组试验用 W10 粒度的金属结合剂金刚石砂轮对样件进行磨削加工，在已加工样件表面随机选取 3 个点，进行目标点表面粗糙度测量，并对测量结果做平均值处理。试验设计方案及

结果如表 6 所示。

表 3 机床对各试验因素控制的最小分辨率  
Tab.3 Minimum resolution of the grinder to control each test factor

Experimental factor	Grinding wheel feed $F/\mu\text{m}$	Electrolytic voltage $U/\text{V}$	Electrolytic gap $\delta/\text{mm}$	Linear speed of grinding wheel $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
Minimum variation	1	0.01	0.1	1

表 4 各试验因素上、下水平  
Tab.4 Upper and lower levels of each test factor

Factor level	Grinding wheel feed $F/\mu\text{m}$	Electrolytic voltage $U/\text{V}$	Electrolytic gap $\delta/\text{mm}$	Linear speed of grinding wheel $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
Up level	2	30	0.2	15
Lower level	14	90	1	35

表 5 各试验因素水平编码  
Tab.5 Coding for each factor level

Level	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	Coding( $X_j$ )
$Z_{2j}$	14	90	1	35	+2
$Z_{0j}+\Delta_j$	11	75	0.8	30	+1
$Z_{0j}$	8	60	0.6	25	0
$Z_{0j}-\Delta_j$	5	45	0.4	20	-1
$Z_{1j}$	2	30	0.2	15	-2
$\Delta_j = \frac{(Z_{2j} - Z_{0j})}{2}$	3	15	0.2	5	

表 6 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢 ELID 磨削试验设计及结果  
Tab.6 Design and results of ELID grinding test for ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> high manganese steel

Test serial number	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	Surface roughness $Ra/\text{nm}$
1	1	1	1	1	11	75	0.8	30	60
2	1	1	1	-1	11	75	0.8	20	89
3	1	1	-1	1	11	75	0.4	30	66
4	1	1	-1	-1	11	75	0.4	20	92
5	1	-1	1	1	11	45	0.8	30	83
6	1	-1	1	-1	11	45	0.8	20	105
7	1	-1	-1	1	11	45	0.4	30	89
8	1	-1	-1	-1	11	45	0.4	20	110
9	-1	1	1	1	5	75	0.8	30	48
10	-1	1	1	-1	5	75	0.8	20	66
11	-1	1	-1	1	5	75	0.4	30	54
12	-1	1	-1	-1	5	75	0.4	20	68
13	-1	-1	1	1	5	45	0.8	30	66
14	-1	-1	1	-1	5	45	0.8	20	86
15	-1	-1	-1	1	5	45	0.4	30	80
16	-1	-1	-1	-1	5	45	0.4	20	93
17	2	0	0	0	14	60	0.6	25	84
18	-2	0	0	0	2	60	0.6	25	57

续表 6

Test serial number	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	Surface roughness $Ra/nm$
19	0	2	0	0	8	90	0.6	25	54
20	0	-2	0	0	8	30	0.6	25	96
21	0	0	2	0	8	60	1	25	85
22	0	0	-2	0	8	60	0.2	25	96
23	0	0	0	2	8	60	0.6	35	57
24	0	0	0	-2	8	60	0.6	15	104
25	0	0	0	0	8	60	0.6	25	78
26	0	0	0	0	8	60	0.6	25	76
27	0	0	0	0	8	60	0.6	25	79
28	0	0	0	0	8	60	0.6	25	78
29	0	0	0	0	8	60	0.6	25	77
30	0	0	0	0	8	60	0.6	25	79
31	0	0	0	0	8	60	0.6	25	78

2.4 二次回归通用旋转设计下数学模型的建立与  $R^2$  检验

根据非线性二次回归分析原理,四因素二次回归通用旋转设计的数学模型为<sup>[24]</sup>:

$$Y = b_0 + \sum_i b_i X_i + \sum_{i < j} b_{ij} X_i X_j + \sum_i b_{ii} X_i^2 \quad (1)$$

式中:  $i, j$  为试验数据的编码水平,  $i, j=1,2,3,4$ ;  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  为各变量及变量组合的回归系数。根据表 6 的 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢 ELID 磨削二次回归通用旋转试验设计及表面粗糙度数值结果,借助 DPS 数据处理

系统软件统计分析各项回归系数 ( $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$ ) 的估计数值,得到形如公式 (1) 的表面粗糙度数学模型<sup>[27]</sup>。

$$\begin{aligned} Y = & 77.85714 + 7.79167X_1 - 10.54167X_2 - 2.95833X_3 - \\ & 10.70833X_4 - 1.95387X_1^2 - 0.82887X_2^2 + 3.04613X_3^2 + \\ & 0.54613X_4^2 + 0.56250X_1X_2 + 0.56250X_1X_3 - 2.06250X_1X_4 + \\ & 0.93750X_2X_3 - 0.68750X_2X_4 - 0.93750X_3X_4 \end{aligned} \quad (2)$$

上述得到的 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢 ELID 磨削表面粗糙度数学模型,需对其进行统计检验以判断其对实际情况的拟合程度。下面将对试验结果进行方差分析,进而实施判定系数  $R^2$  检验验证模型对实际情况的拟合程度。表 7 为试验结果的方差分析。

表 7 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢 ELID 磨削试验设计结果方差分析  
Tab.7 Analysis of variance of ELID grinding test results of ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> high manganese steel

	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	Partial correlation	Partial Eta squared
$X_1$	1457.042	1	1457.042	0.9804	0.1890
$X_2$	2667.042	1	2667.042	-0.9892	0.3460
$X_3$	210.0417	1	210.0417	-0.8839	0.0273
$X_4$	2752.042	1	2752.042	-0.9895	0.3570
Recurrence	7648.968	14	546.3549		
Surplus	58.7738	16	3.6734		
Misfit	51.9167	10	5.1917		
Error	6.8571	6	1.1429		
Synthesize	7707.742	30			

判定系数  $R^2$  用来检验回归模型对实际情况的拟合程度,是由回归平方和除以总平方和得来的。 $R^2$  越临近于 1,说明回归模型的预测数值与真实数值越临近,拟合程度越高。基于上述二次回归通用旋转设计下搭建的数学模型,计算分析得出该模型的判定系数  $R^2=0.9924 > 0.9$  ( $R^2 \geq 0.9$  时拟合效果较好),说明该数学模型与实际情况的拟合度较高,可用来预测和优化不同工艺参数下 ELID 磨削 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢的表面粗糙度。

3 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢 ELID 磨削工艺参数优化试验

3.1 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢 ELID 磨削试验因素对表面粗糙度的影响规律分析

判定系数  $R^2$  检验回归模型对实际情况的拟合程度较高,是检验模型中各试验因素联合起来的预测结

果对实际结果的影响程度,但总体试验因素的影响程度并不代表某一试验因素对试验结果的影响程度。 $\eta^2$ 作为多因素方差分析中的效应量 (Effect size), 可描述某一试验因素对试验结果的影响程度,实现各试验因素对 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢表面粗糙度影响的显著性排序<sup>[28]</sup>。它等于某一试验因素的平方和除以总平方和所得的商,其值越大,说明该试验因素对试验结果的影响越大,对优化试验结果越重要。根据表 7 可知,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  四因素所对应的效应量  $\eta^2$  大小顺序为  $X_4 > X_2 > X_1 > X_3$ , 得出各试验因素对 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢表面粗糙度影响程度的顺序为: 砂轮线速度 > 电解电压 > 砂轮进给量 > 电解间隙。

### 3.2 基于表面粗糙度数学模型下的工艺参数优化

本次试验所搭建的表面粗糙度数学模型,经以上分析检验得知可用来预测和优化表面粗糙度值。将上

述数学模型即式 (2) 作为目标函数,将编码变量  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  的范围介于编码范围  $(-2, 2)$  内,借助非线性规划优化大师 lingo 软件对此数学模型进行最小值寻优<sup>[29]</sup>,得到编码值  $X_j = (-2, 2, 0.67, 2)$ ,即砂轮线速度为 35 m/s、电解电压为 90 V、砂轮进给量为 2  $\mu\text{m}$ 、电解间隙为 0.734 mm 时,可获得表面粗糙度最优解。目标函数计算结果为  $Ra=12.7089 \text{ nm}$ 。参照表 3 中机床对各试验因素控制的最小分辨率调整各试验因素最佳工艺参数,开展对 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢的 ELID 磨削试验,对已加工表面随机取 3 点测量表面粗糙度,其平均值作为加工结果,试验加工结果为  $Ra=13 \text{ nm}$ ,则预测结果的误差为 2.23%。误差产生的原因: 机床控制精度误差及调整各试验因素最佳工艺参数所产生的误差;模型本身存在的误差及数值计算过程中存在的误差;试验结果读数取平均数时的舍入误差。ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢 ELID 磨削加工试验 3 次表面粗糙度测量图如图 5 所示,实物图及 SEM 表面形貌如图 6 所示。

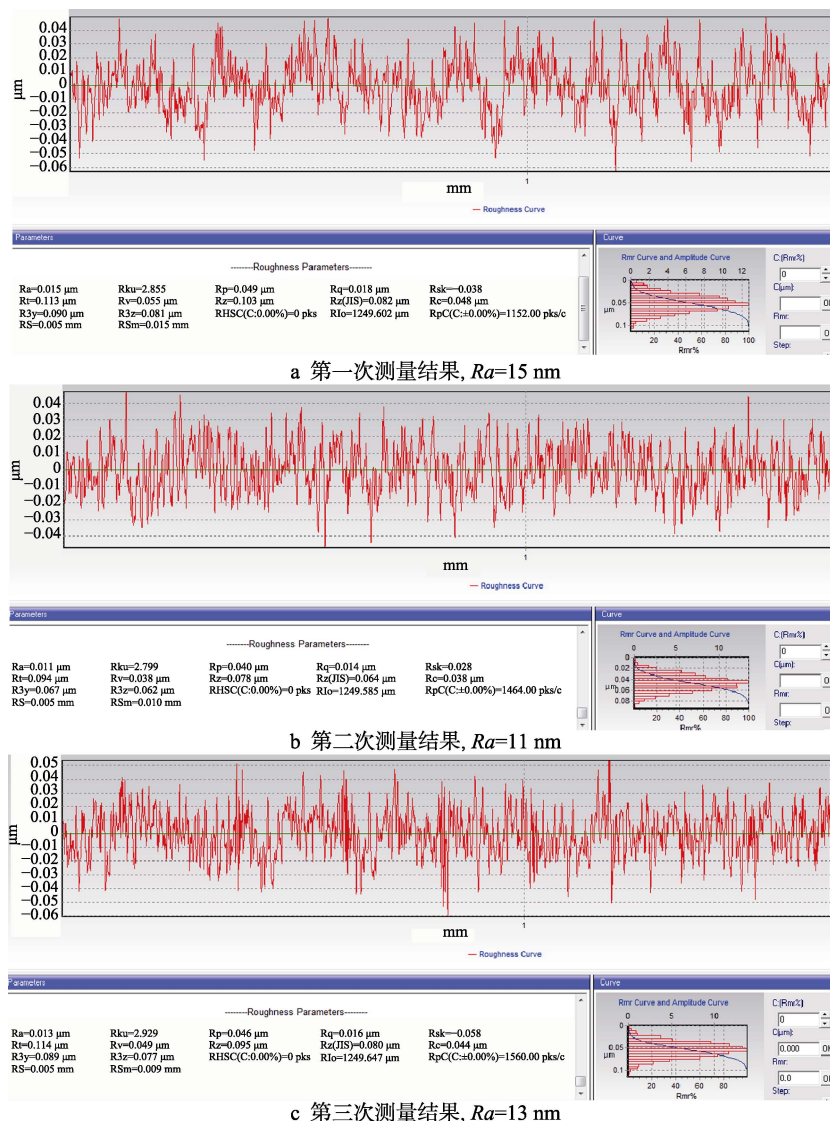
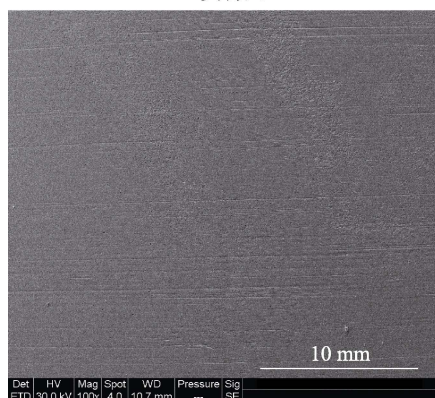


图 5 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> 高锰钢表面粗糙度测量图

Fig.5 Measurement of ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> high manganese steel surface roughness: a) first measurement result  $Ra=15 \text{ nm}$ , b) second measurement result  $Ra=11 \text{ nm}$ , c) third measurement result  $Ra=13 \text{ nm}$



a 实物图



b 表面形貌

图6 ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub>高锰钢实物图及SEM表面形貌Fig.6 Physical drawing and SEM surface morphology of ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub> high manganese steel

## 4 结论

1) ELID磨削技术可实现高锰钢材料的低成本、高效精密超精密镜面加工,有效解决高锰钢加工过程中存在的表面烧伤问题。

2) 通过应用二次回归通用旋转设计进行工艺试验,搭建了表面粗糙度二次回归模型。据此分析得到ELID磨削各试验因素对ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub>高锰钢表面粗糙度影响程度的顺序为:砂轮线速度>电解电压>砂轮进给量>电解间隙。

3) 根据lingo软件优化得出各试验因素工艺参数的最佳组合为:砂轮线速度35 m/s,电解电压90 V,砂轮进给量2 μm,电解间隙0.734 mm。预测ZGMn<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub>高锰钢表面粗糙度最小值为Ra=12.7089 nm。以此为参考依据进行实际磨削实验,获得平均表面粗糙度为Ra=13 nm的已加工表面,预测结果的误差为2.23%。试验表明:表面粗糙度二次回归数学模型有效,可对加工结果进行合理预测,从而大大降低实验成本,大大缩短实验周期。

## 参考文献:

[1] 韩丽辉, 林林, 李牧明, 等. 高锰钢中氧含量测定方法

研究[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(11): 42-47.

HAN Li-hui, LIN Lin, LI Mu-ming, et al. Research on determination of oxygen content in high manganese steel[J]. Experimental technology and management, 2018, 35(11): 42-47.

[2] 王雪, 于秀涛. Mn含量对车梁用高锰奥氏体TWIP钢拉伸变形行为的影响[J]. 锻压技术, 2019, 44(9): 151-155.

WANG Xue, YU Xiu-tao. Influence of Mn content on tensile deformation behavior of high manganese austenite TWIP steel for vehicle beams[J]. Forging & stamping technology, 2019, 44(9): 151-155.

[3] 郭硕. 锰的用途及我国锰资源现状[N]. 中国矿业报, 2018-11-30(008).

GUO Shuo. Use of manganese and status quo of manganese resources in China[N]. China mining news, 2018-11-30(008).

[4] 李卫. 钢铁耐磨材料技术进展[J]. 铸造, 2006(11): 1105-1109.

LI Wei. Progress of wear-resistant steel and iron technology[J]. Foundry, 2006(11): 1105-1109.

[5] 孙广军. 高锰钢切削加工工艺性能的分析[J]. 工业设计, 2018(4): 137-138.

SUN Guang-jun. Analysis on the cutting process performance of high manganese steel[J]. Industrial design, 2018(4): 137-138.

[6] 张福全, 邵飞杰, 周怿武. Mn13Cr2高锰钢冲击磨损机制的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(12): 6-10.

ZHANG Fu-quan, SHAO Fei-jie, ZHOU Dian-wu. Research on impact wear mechanism of high manganese steel Mn13Cr2[J]. Journal of Hunan University(natural sciences), 2014, 41(12): 6-10.

[7] 杨晓勇. 研制可切削加工高锰钢辊套[J]. 内燃机与配件, 2019(18): 129-130.

YANG Xiao-yong. A high manganese steel roller sleeve for cutting was developed[J]. Internal combustion engine & parts, 2019(18): 129-130.

[8] 刘泽宇, 魏昕, 谢小柱, 等. 激光加工表面微织构对陶瓷刀具摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(10): 33-39.

LIU Ze-yu, WEI Xin, XIE Xiao-zhu, et al. Influence of surface micro texture with laser processing on the friction and wear performance of ceramic cutter[J]. Surface technology, 2015, 44(10): 33-39.

[9] 李时春, 周振红, 伍俏平, 等. 激光钎焊制备金属结合剂金刚石砂轮研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(2): 105-114.

LI Shi-chun, ZHOU Zhen-hong, WU Qiao-ping, et al. Research progress in preparation of metal-bonded diamond grinding wheel by laser brazing[J]. Ordnance material science and engineering, 2019, 42(2): 105-114.

[10] ZHANG Yu-zhou, FANG Cong-fu, HUANG Guo-qin, et al. Numerical and experimental studies on the grinding of cemented carbide with textured monolayer diamond whe-



- els[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2019, 84: 478.
- [11] 毕果, 王惠雪, 周炼, 等. 金刚石砂轮磨削性能退化评估[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1508-1515.  
BI Guo, WANG Hui-xue, ZHOU Lian, et al. Grinding performance degradation of diamond wheel[J]. Optics and precision engineering, 2019, 27(7): 1508-1515.
- [12] 张珂, 赵国欢, 孙健, 等.  $ZrO_2$  陶瓷平面磨削温度仿真分析与实验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 251-258.  
ZHANG Ke, ZHAO Guo-huan, SUN Jian, et al. Simulated analysis and experimental research on grinding temperature of zirconia ceramic plane[J]. Surface technology, 2017, 46(12): 251-258.
- [13] 张浩, 刘玉德, 石文天, 等. 微细切削加工表面质量的研究综述[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 219-232.  
ZHANG Hao, LIU Yu-de, SHI Wen-tian, et al. Quality of micro machined surface[J]. Surface technology, 2017, 46(7): 219-232.
- [14] 杨黎健. 基于氧化膜状态主动控制的 ELID 磨削及其应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.  
YANG Li-jian. Study of ELID grinding based on the active control of oxide layer and its application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [15] 张开飞. 球轴承套圈沟道 ELID 成形磨削试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.  
ZHANG Kai-fei. Experimental research on ELID form grinding for the ring raceway of ball bearing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [16] 尹韶辉, 曾宪良, 范玉峰, 等. ELID 镜面磨削加工技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2010, 21(6): 750-755.  
YIN Shao-hui, ZENG Xian-liang, FAN Yu-feng, et al. Progresses of ELID mirror grinding technology[J]. China mechanical engineering, 2010, 21(6): 750-755.
- [17] 范植坚, 杨森, 唐霖. 电解加工技术的应用和发展[J]. 西安工业大学学报, 2012, 32(10): 775-784.  
FAN Zhi-jian, YANG Sen, TANG Lin. The application and development of electrochemical machining technology[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2012, 32(10): 775-784.
- [18] LIM H S, FATHIMA K, SENTHIL K A. A fundamental study on the mechanism of electrolytic in-process dressing grinding[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2002, 42(8): 935-943.
- [19] 周曙光, 关佳亮, 郭东明, 等. ELID 镜面磨削技术——综述[J]. 制造技术与机床, 2001(2): 42-44.  
ZHOU Shu-guang, GUAN Jia-liang, GUO Dong-ming, et al. ELID mirror grinding technology[J]. Manufacturing technology & machine tool, 2001(2): 42-44.
- [20] 郑友益. 超声 ELID 复合内圆磨削 ZTA 纳米复相陶瓷的磨削机理[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.  
ZHENG You-yi. On the mechanism of ultrasonic ELID composite internal grinding ZTA nano composite ceramics[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2015.
- [21] YIN Shao-hui, OHMORI H, DAI Yu-tang, et al. ELID grinding characteristics of glass-ceramic materials[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2008, 49(34): 333-338.
- [22] 阎治铭, 阎生贡, 王艺, 等. 铁路清筛机高锰钢易损件的制备[J]. 金属热处理, 2017, 42(3): 206-208.  
YAN Zhi-ming, YAN Sheng-gong, WANG Yi, et al. Preparation of high manganese steel parts for railway sieve machine [J]. Heat treatment of metals, 2017, 42(3): 206-208.
- [23] 关佳亮, 戚泽海, 路文文, 等. 基于 ELID 磨削机理的 GCr15 轴承钢内圆工艺试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(9): 110-113.  
GUAN Jia-liang, QI Ze-hai, LU Wen-wen, et al. Experimental study of GCr15 steel internal rings based on ELID grinding mechanism[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2017(9): 110-113.
- [24] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-7.  
REN Lu-quan. Regression design and optimization[M]. Beijing: Science Press, 2009: 1-7.
- [25] 胥雪炎, 李补喜. 不同被解释变量选择对决定系数  $R^2$  的影响研究[J]. 太原科技大学学报, 2007(5): 363-365.  
XU Xue-yan, LI Bu-xi. Research on the effect of selection of dependent variables on  $R^2$  statistic[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2007(5): 363-365.
- [26] 夏道宗, 于新芬, 马志杰. 二次回归通用旋转设计优化土茯苓总黄酮的提取工艺[J]. 中华中医药学刊, 2009, 27(7): 1460-1463.  
XIA Dao-zong, YU Xin-fen, MA Zhi-jie. Optimization of the extraction technique of total flavonoids from smilax glabra roxb. by quadratic regression general rotary unitized design[J]. Chinese archives of traditional Chinese medicine, 2009, 27(7): 1460-1463.
- [27] 唐启义. DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 846-847.  
TANG Qi-yi. Data-processing system DPS[M]. Beijing: Science Press, 2007: 846-847.
- [28] 权朝鲁. 效果量的意义及测定方法[J]. 心理学探新, 2003(2): 39-44.  
QUAN Chao-lu. Significance of study of the size of effect and its testing methods[J]. Exploration of psychology, 2003(2): 39-44.
- [29] 谢金星, 薛毅. 优化建模与 LINDO/LINGO 软件[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
XIE Jin-xing, XUE Yi. Optimization modeling and LINDO/LINGO software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.