文章编号:1674-2974(2025)06-0078-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025178

# 18CrNiMo7-6钢V型缺口成形外圆磨削三维表面粗糙度

张银霞[1,2,3†],宋作鹏[1,2,3],梁蓝夫[1,2,3],李梦琪[1,2,3],王栋[1,2,3]
(1. 郑州大学 机械与动力工程学院,河南 郑州 450001;
2. 抗疲劳制造产业技术研究院,河南 郑州 450016;
3. 河南省抗疲劳制造技术工程研究中心,河南 郑州 450001)

**摘 要**:为了探究成形外圆磨削加工工艺参数对18CrNiMo7-6钢表面质量的影响,并确定较优的工艺参数组合,利用万能工具磨床和CBN成形砂轮,采用成形磨削V型缺口技术,以工件转速、砂轮转速和砂轮径向进给速度为变量,以表面粗糙度、均方根粗糙度、表面偏斜度和表面峭度等三维表面粗糙度幅度参数为评价表面质量的指标开展单因素和正交试验研究.试验结果表明:随着工件转速的增大,表面粗糙度、均方根粗糙度和表面偏斜度均先减小后增大,而表面峭度逐渐减小;随着砂轮转速的增大,表面粗糙度和均方根粗糙度也先减小后增大,而表面偏斜度和表面峭度先增大后减小;随着砂轮径向进给速度的增大,表面粗糙度和均方根粗糙度均逐渐增大,表面偏斜度和表面峭度则先增大后减小.三变量对工件三维表面粗糙度的影响程度从大到小依次为砂轮转速、砂轮径向进给速度和工件转速.综合试验结果确定较优的工艺参数:工件转速、砂轮转速和砂轮径向进给速度分别为900 r/min、5 000 r/min和0.15 mm/min.

**关键词**:18CrNiMo7-6钢;磨削加工;三维表面粗糙度;成形磨削;灰色关联分析法
**中图分类号**:TG583 **文献标志码**:A

# 3D Surface Roughness of 18CrNiMo7-6 Steel V-shaped Notch Formed by Cylindrical Grinding

ZHANG Yinxia[1,2,3†],SONG Zuopeng[1,2,3],LIANG Lanfu[1,2,3],LI Mengqi[1,2,3],WANG Dong[1,2,3]
(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. Industrial Science &Technology Institute for Anti-fatigue Manufacturing, Zhengzhou 450016, China;
3. Henan Province Engineering Research Center of Anti-fatigue Manufacturing Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract**: To investigate the influence of forming outer circle grinding process parameters on the surface quality of 18CrNiMo7-6 gear steel, and determine the optimal combination of process parameters, this paper uses universal tool grinder and CBN forming grinding wheel to process a V-shaped notch by forming grinding. Taking the workpiece speed, the grinding wheel speed and the grinding wheel radial feed speed as the test variables; the three-

* **收稿日期**:2024-06-05
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(U1804254), National Natural Science Foundation of China(U1804254);河南省重大科技专项(201400211200), Major Science and Technology Project of Henan Province (201400211200).
**作者简介**:张银霞(1974—),河南长垣人,郑州大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: zhangyinxia@zzu.edu.cn

dimensional surface roughness amplitude parameters: surface roughness, root mean square roughness, surface skewness and surface kurtosis are used as the evaluation process indicators of surface quality. Single-factor experiments and orthogonal experiments are conducted separately. The experimental results indicate that as workpiece speed increases, surface roughness, root mean square roughness, and surface skewness all decrease first and then increase, while surface kurtosis gradually decreases; as grinding wheel speed increases, surface roughness and root mean square roughness also decrease first and then increase, while surface skewness and surface kurtosis increase first and then decrease; as grinding wheel radial feed speed increases, both surface roughness and root mean square roughness gradually increase, while surface skewness and surface kurtosis first increase and then decrease. The degree of influence of the three variables on the three-dimensional surface roughness of the workpiece, ranked from greatest to least, is: grinding wheel speed, grinding wheel radial feed speed, and workpiece speed. The optimal parameter combination identified from the comprehensive single-factor experiment and orthogonal experiment results is as follows: a workpiece speed of 900 r/min, a grinding wheel speed of 5 000 r/min, and a grinding wheel radial feed speed of 0.15 mm/min.

**Key words**: 18CrNiMo7-6 steel; grinding machining; 3D surface roughness; form grinding; grey relational analysis method

在机械生产制造领域,许多零部件都包含缺口特征,如孔洞、圆角、肩部以及凹槽等.这些缺口特征容易导致应力集中[1],进而降低零部件的疲劳强度.如何提高缺口零部件的可靠性和使用寿命,一直是机械生产和制造领域的切入点与关键点.缺口特征形状复杂,尺寸紧凑,具有不易加工的特点,成形磨削作为一种特殊的加工方式,因其高精度、高效率及对复杂零部件的高适用性被广泛应用于缺口零部件的加工中.作为精密加工的最后一道工序,如何提高缺口成形磨削后工件的表面质量一直深受学者的关注.

表面质量的优劣很大程度上取决于表面粗糙度,粗糙度高的零件表面存在较深的波谷,这些深谷相当于微观缺口,微观缺口的存在会加剧应力集中,而应力集中是疲劳失效的主要原因[2-3].因此,采用科学有效的方法来分析成型磨削对缺口特征表面粗糙度的影响是十分必要的.

Ohmori 等[4]对 ELID 成形磨削技术进行研究,加工出一种表面粗糙度 $R_a$ 达到了 8 nm 的抛物面反射镜.Zhu 等[5]介绍了一种新型不规则(异形)滚子的成形磨削加工工艺,阐述了该成形磨削技术加工条件下表面粗糙度、轮廓精度和材料去除率的变化规律.Michalski[6]建立了三维仿真模型,研究滚齿后的圆柱齿轮齿面三维表面形貌特征,并开展试验,采用 $S_{Pa}$、$S_{Pq}$、$S_{Pt}$ 等三维评定参数对齿面表面形貌进行了分析.Beamud 等[7]通过使用 $S_a$、$S_z$ 和 $S_{pd}$ 三维评价参数评估电抛光表面,分析电解工艺控制参数对316L不锈钢电抛光的影响,并指出三维表面评估参数比二维参数具有更高的信息能力,能较好地改善表面纹理的评估情况.综上所述,目前,国内外学者针对成形磨削技术及零部件加工表面粗糙度的研究已有不少成果,但是关于成形磨削工艺参数对缺口加工表面三维粗糙度的研究还较少.

试样缺口处的几何精度对理论应力集中系数 $K_t$ 有直接影响.V型缺口疲劳试样的缺口处具有尺寸小、精度要求高的特点,因此,加工过程通常首先需要按照缺口要求的角度和底部圆弧半径进行粗加工,以保留磨削余量.随后,通过成形磨削进行精加工,直至达到最终尺寸要求.吴少洋[8]针对 $K_t$=2.06 的V型缺口疲劳试样缺口磨削过程展开仿真分析,加工底部半径为0.75 mm的V型缺口,采用单因素试验探究了工艺参数对磨削结果的影响.而对于加工难度更大的底部半径为0.14 mm的V型缺口鲜有研究.

齿轮作为汽车及航空航天等交通运输领域的核心零件一直深受关注.齿槽是一种典型的缺口特征,齿根弯曲疲劳是齿轮失效的一种重要方式,而

齿根底部的应力集中是造成其失效的首要原因，所以降低齿根表面粗糙度对减少齿根疲劳其失效有重要意义.然而齿槽形状复杂、尺寸紧凑，存在加工成本高且极难保证尺寸要求等问题，成形砂轮磨削可直接将毛坯加工为特定的形状，不仅可以提高生产效率，还可以保证工件几何形状的一致性，更好地满足加工复杂零部件的要求.

18CrNiMo7-6齿轮钢是一种含碳量较低的优质结构钢，因其良好的机械性能和加工性能，被广泛应用于对核心韧性要求较高的重型和高应变齿轮零件[9-11].Zhang等[12]探究了高速外圆磨削工艺对18CrNiMo7-6钢圆柱试样表面层硬度和显微组织的影响，并通过分析硬度和残余应力的形成机制，对磨削参数进行了优化.朱浩阳等[13]通过开展单因素试验，探究了外圆纵向磨削工艺参数对18CrNiMo7-6钢圆柱形疲劳试样表面完整性的影响.王栋等[14]研究了高速车铣加工工艺对18CrNiMo7-6钢圆柱试样表面粗糙度的影响，并确定了优化加工表面质量的最优参数组合.由此可见，关于加工工艺对18CrNiMo7-6钢圆柱型试样的研究比较完善，但是关于18CrNiMo7-6钢V型缺口的磨削成形研究还比较缺乏.

三维表面参数从最初伯明翰大学定义的“14+3”参数体系，到目前的ISO 25178标准体系，日渐发展完善.不同的评价参数适用不同场合，本文对不同评价参数的工程应用进行研究，发现表面性能的研究多集中在幅度参数与功能参数，而对表面性能影响程度最为显著的是幅度参数.

因此，本文主要针对18CrNiMo7-6齿轮钢开展底部半径为0.14 mm的V型缺口的成形磨削试验，通过设计单因素试验和正交试验，探究磨削工艺参数，包括工件转速$n_w$、砂轮转速$n_s$及砂轮径向进给速度$v_r$对缺口底部三维表面粗糙度幅度参数的影响规律，如表面粗糙度$S_a$、均方根粗糙度$S_q$、表面偏斜度$S_{sk}$和表面峭度$S_{ku}$，并采用灰色关联分析法得出以$S_a$、$S_q$、$S_{sk}$和$S_{ku}$为工艺指标的较为合理的加工工艺参数组合.

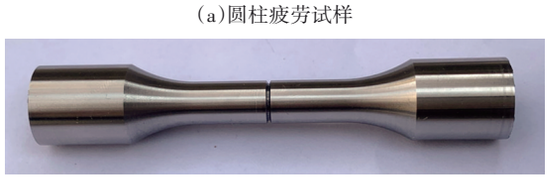
## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验材料为18CrNiMo7-6硬质合金钢，将方料切割至长度为80 mm、直径为14.5 mm的圆柱件，经粗车精车，成形磨削，最终加工至符合要求尺寸和精度的试样，实物图如图1所示，试样加工尺寸如图2所示.缺口成形加工所用设备为瑞士EWAG公司的WS11万能工具磨床，在加工过程中该机床通过吸尘功能收集磨屑，不使用磨削液.采用底部圆弧半径0.14 mm、双斜边60°的树脂CBN成形砂轮，分别选用100/120#和230/270#粒度的砂轮进行粗磨和精磨加工，砂轮的具体参数如表1所示.通过磨床自带显微观测系统观察砂轮磨损情况，当底部半径磨损到0.2 mm时对砂轮进行修整.



(a)圆柱疲劳试样



(b)成形加工后缺口疲劳试样

图1 原材料缺口试样

Fig.1 Raw material notched specimen

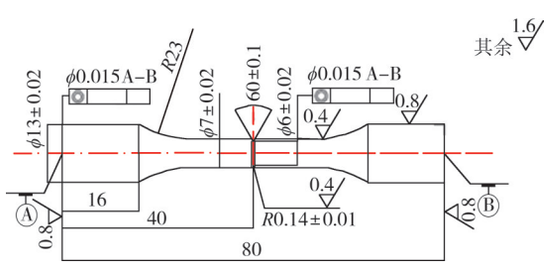



图2 试样加工尺寸(单位:mm)

Fig.2 Specimen process dimension(unit:mm)

表1 树脂CBN成形砂轮参数

Tab.1 Resin CBN forming grinding wheel parameters

| 粒度 | 磨料 | 结合剂 | 磨粒尺寸范围/μm | 浓度/% | 砂轮直径/mm | 砂轮宽度/mm | 砂轮斜边角度/(°) | 砂轮圆弧半径/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100/120# | CBN | 树脂结合剂 | 151~197 | 100 | 75 | 8 | 60 | 0.14 |
| 230/270# | CBN | 树脂结合剂 | 53~75 | 100 | 75 | 8 | 60 | 0.14 |

### 1.2 成形磨削工艺参数

成形磨削加工时，砂轮相对于工件沿砂轮与工件中心连线方向做径向进给运动，结合机床功能，选取工件转速$n_w$、砂轮转速$n_s$以及砂轮径向进给速

度$v_r$作为试验自变量.预试验结果表明,加工参数过小会放大机床的震动效应,导致较差的表面加工质量;而进给速度过大,工件表面会产生烧伤现象.所以最终选取$n_s$变化范围为4 000~8 000 r/min, $n_w$变化范围为500~900 r/min, $v_r$变化范围为0.1~0.2 mm/min.

正交试验试验量小、结果全面,但相对单一因素的多水平研究试验结果不够直观,因此本文采用单因素试验与正交试验相结合的方法来进行研究.V型缺口成形磨削设备为瑞士EWAG公司的WS11万能工具磨床,试验采用成形切入磨削的方式.以$n_w$、$n_s$及$v_r$为自变量,开展单因素试验,探究V型缺口成形磨削加工过程中,不同加工工艺参数对试样三维表面粗糙度$S_a$、$S_q$、$S_{sk}$和$S_{ku}$的影响规律,具体试验参数如表2所示.同时,为了进一步研究各工艺参数对三维表面粗糙度影响程度的强弱,开展三因素四水平正交试验,并采用灰色关联分析法得出较优的加工工艺参数,具体试验参数如表3所示.

**表2　单因素试验工艺参数**

**Tab.2　Process parameters for single-factor testing**

| 序号 | 砂轮转速$n_s$/(r·min$^{-1}$) | 工件转速$n_w$/(r·min$^{-1}$) | 砂轮径向进给速度$v_r$/(mm·min$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 1 | 4 000, 5 000, 6 000<br>7 000, 8 000 | 700 | 0.15 |
| 2 | 6 000 | 500, 600, 700<br>800, 900 | 0.15 |
| 3 | 6 000 | 700 | 0.1, 0.125, 0.15<br>0.175, 0.2 |

**表3　正交试验工艺参数**

**Tab.3　Process parameters of orthogonal test**

| 编码水平 | 砂轮转速$n_s$/(r·min$^{-1}$) | 工件转速$n_w$/(r·min$^{-1}$) | 砂轮径向进给速度$v_r$/(mm·min$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 1 | 4 000 | 600 | 0.1 |
| 2 | 5 000 | 700 | 0.125 |
| 3 | 6 000 | 800 | 0.15 |
| 4 | 7 000 | 900 | 0.175 |

### 1.3　三维表面粗糙度检测设备及数据处理

本文使用的三维表面粗糙度检测设备为Bruker公司的NPFLEX三维表面测量仪,该设备基于白光干涉原理,采用非接触式测量方法,具有较高的检测精度.因V形缺口测量区域是半径为0.14 mm的圆弧段,直接测量存在误差,为了最大限度地减少测量误差并确保数据的精确性与可靠性,对加工后的试样缺口底部进行了5次旋转测量,并取3个中值数据点进行处理.图3为三维表面粗糙度数据处理.在检测设备的检测区域内选择12个数据提取区域,如图3(a)所示,分别记录这些提取区域的三维参数评定值,本文取该点相对基准点的高度,再对三维参数评定值进行高斯拟合,得出该试样缺口底部的三维表面粗糙度值,并与数据点下的平均值作比较,如图3(b)所示.

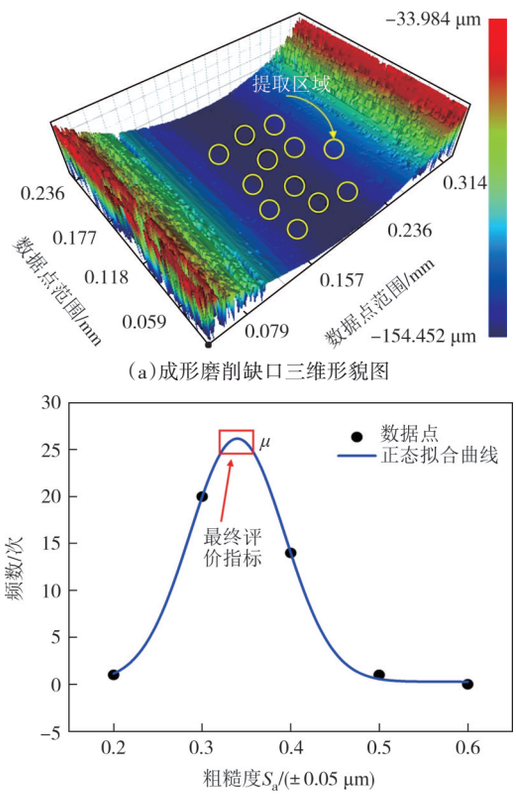



图3　三维表面粗糙度数据处理

Fig.3　Three-dimensional surface roughness data processing

## 2　试验结果分析

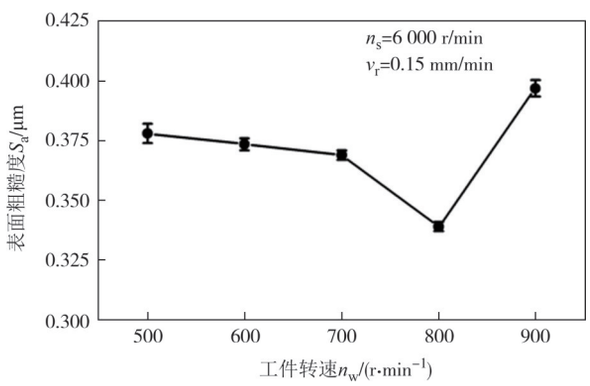
### 2.1　单因素试验结果分析

本节基于单因素试验数据,系统分析了各工艺参数对三维表面粗糙度的作用机理和影响规律,并确定了一组较优参数组合.图4~6为实验结果的影响曲线.

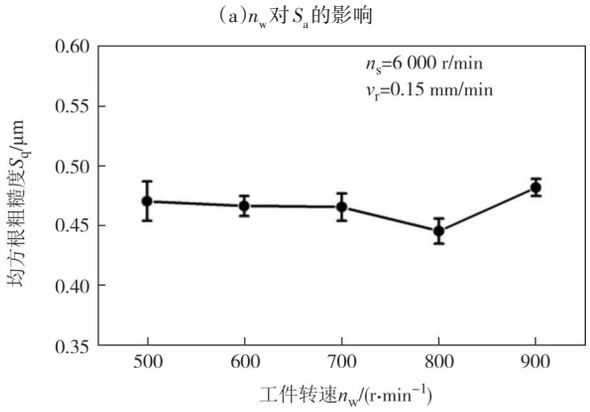
#### 2.1.1　工件转速

由图4可以看出,随着工件转速$n_w$的增大,V型缺口底部表面粗糙度$S_a$与均方根粗糙度$S_q$均呈现先减小后增大的趋势,在$n_w$为800 r/min时,两者均达

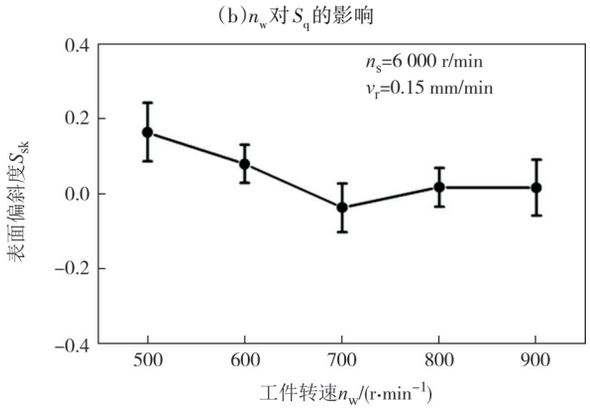
到最小值;表面偏斜度$S_{sk}$也呈现先减小后增大趋势,在$n_w$为700 r/min时,$S_{sk}$达到最小值;表面峭度$S_{ku}$整体逐渐减小,在$n_w$为900 r/min时,$S_{ku}$达到最小值.究其原因,当砂轮转速$n_s$和砂轮径向进给速度$v_r$保持恒定时,若工件转速$n_w$过低,单位时间内的有效磨粒作用次数较少,单颗磨粒磨削时间增长,磨粒轨迹间距扩大使理论残留高度上升,磨粒之间的相互干涉导致工件表面可能出现烧伤现象.但当$n_w$增大到某一值时,单颗磨粒的最大未变形磨屑厚度相应增大,磨削深度也随之增加,单颗磨粒磨削力增大,工件表面磨痕增大,加工表面质量变差,因此存在拐点,加工表面的波峰波谷数量及尖锐程度较低,表面粗糙度也较小.



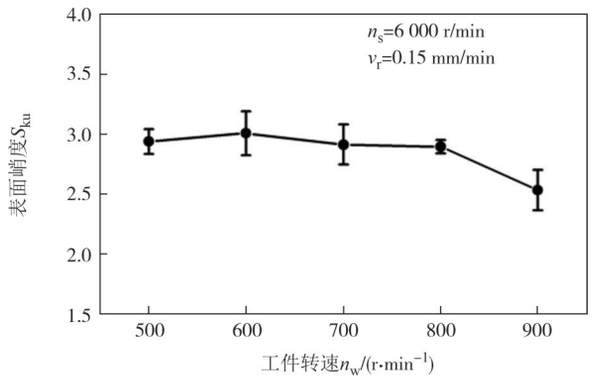

(a)$n_w$对$S_a$的影响




(b)$n_w$对$S_q$的影响




(c)$n_w$对$S_{sk}$的影响




(d)$n_w$对$S_{ku}$的影响

图4 工件转速对缺口底部三维表面粗糙度的影响

Fig.4 Effect of workpiece speed on three-dimensional surface roughness at the bottom of the notch

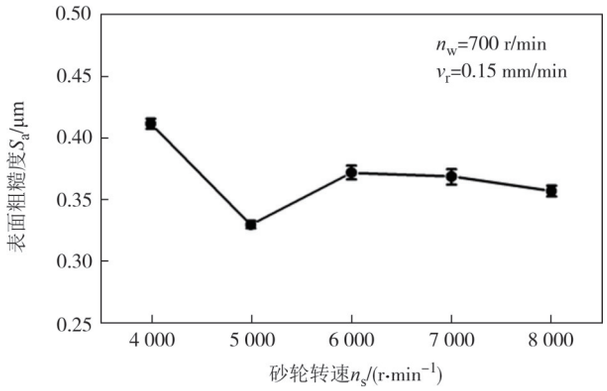
### 2.1.2 砂轮转速

由图5可以发现,随着砂轮转速$n_s$的增大,表面粗糙度$S_a$与均方根粗糙度$S_q$的值整体变化一致,均呈现先减小后增大的趋势,在$n_s$为5 000 r/min时,$S_a$与$S_q$均取得最小值;随着砂轮转速$n_s$的增大,表面偏斜度$S_{sk}$有一定程度的升高,但呈现出起伏的状态,$S_{ku}$呈现先增大后减小的趋势,在$n_s$为5 000 r/min时,$S_{ku}$取得最大值.这是因为在材料去除率不变的条件下,随着砂轮转速$n_s$的增大,单位时间内的有效磨粒数增加,单颗磨粒未变形磨屑厚度减小,磨削深度也随之减小,粗糙度降低,波谷分布密度增加但平均深度减小,同时伴随波谷锐度增大.随着$n_s$的持续增大,大量磨粒参与磨削,砂轮线速度过高,切削厚度减小,比磨削能增加,耕梨和滑擦作用加剧,磨削区温度上升,导致工件表面产生烧伤等缺陷[15],粗糙度升高,波谷增多,锐度减小.

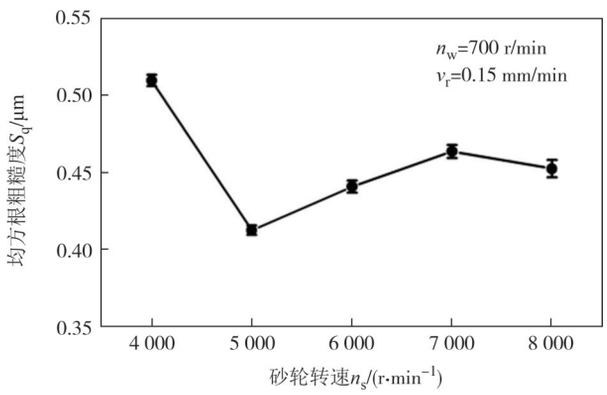
### 2.1.3 砂轮径向进给速度

由图6可以看出,随着砂轮径向进给速度$v_r$的增大,V型缺口底部表面粗糙度$S_a$与均方根粗糙度$S_q$的值变化一致,均呈现逐渐增大的趋势;表面偏斜度$S_{sk}$和表面峭度$S_{ku}$整体变化一致,均呈现先增大后减小的趋势,在$v_r$为0.15 mm/min时,两者达到最大值.究其原因,由于砂轮与工件的直径都相对较小,单位时间内参与磨削的磨粒数量一定,导致单颗磨粒的磨削力增大,磨粒的磨削深度增加,因此工件表面质量变差,粗糙度值增大,波峰数量和尖锐程度也增大,在$v_r$为0.15 mm/min时,波峰数量和尖锐程度达到最大.

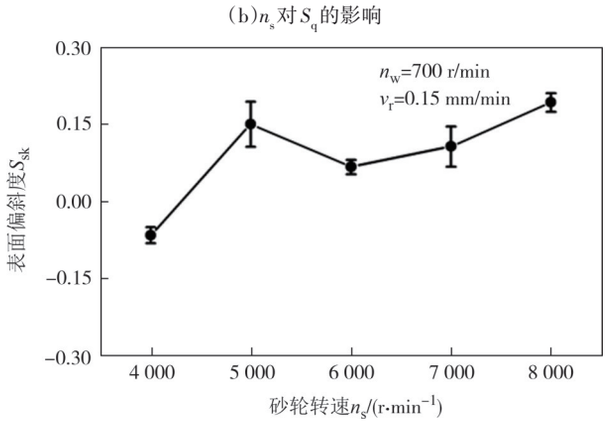
综合试验结果发现,较优参数分别为:工件转速800 r/min,砂轮转速5 000 r/min,砂轮径向进给



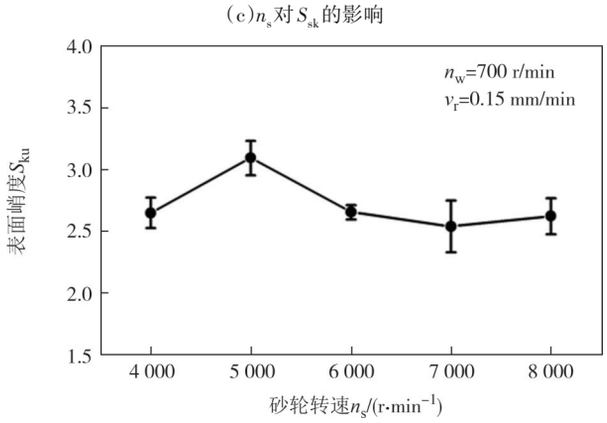

(a)$n_s$对$S_a$的影响




(b)$n_s$对$S_q$的影响



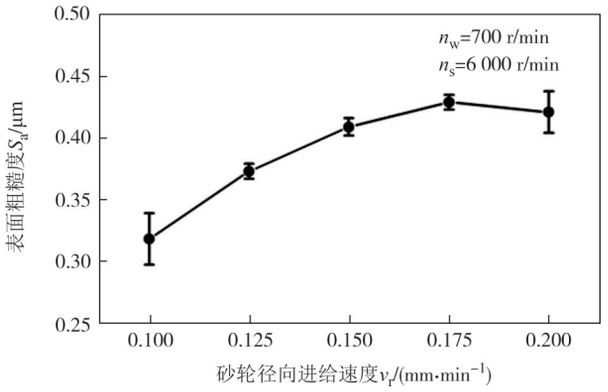

(c)$n_s$对$S_{sk}$的影响



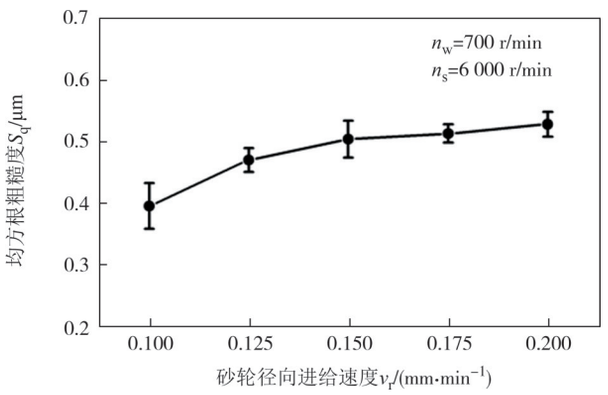

(d)$n_s$对$S_{ku}$的影响

图5　砂轮转速对缺口底部三维表面粗糙度的影响

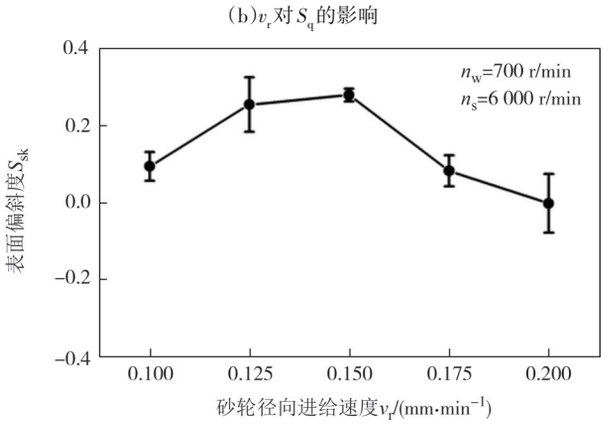
Fig.5　Effect of grinding wheel speed on three-dimensional surface roughness at the bottom of the notch



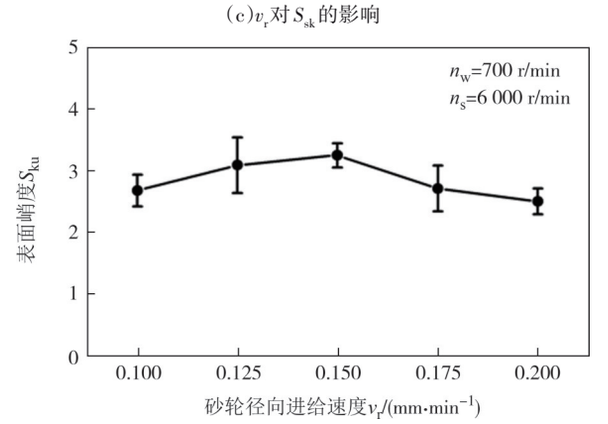

(a)$v_r$对$S_a$的影响




(b)$v_r$对$S_q$的影响




(c)$v_r$对$S_{sk}$的影响

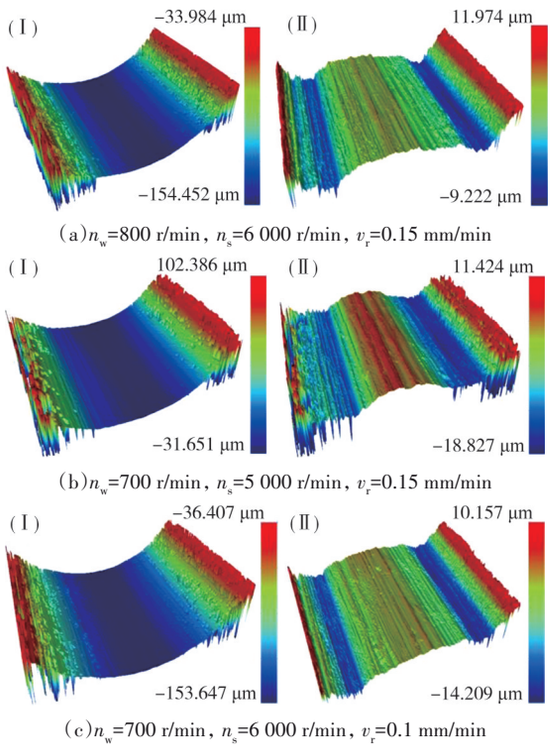



(d)$v_r$对$S_{ku}$的影响

图6　砂轮径向进给速度对缺口底部三维表面粗糙度的影响

Fig.6　Effect of radial feed rate of grinding wheel on three-dimensional surface roughness at the bottom of the notch

速度0.1 mm/min. 图7为18CrNiMo7-6钢原材料在各因素较优参数组合下缺口底部的三维表面形貌图，图中(Ⅰ)为三维形貌原始图，(Ⅱ)为展开图. 可以发现缺口底部纹路较为均匀，但在两侧存在较深的波谷，这可能是由于砂轮底部圆弧与斜边过渡衔接处磨粒分布不够均匀.




(a)$n_w$=800 r/min, $n_s$=6 000 r/min, $v_r$=0.15 mm/min

(b)$n_w$=700 r/min, $n_s$=5 000 r/min, $v_r$=0.15 mm/min

(c)$n_w$=700 r/min, $n_s$=6 000 r/min, $v_r$=0.1 mm/min

图7 V型缺口底部三维形貌图

Fig.7 3D morphology of V-shaped notch bottom

## 2.2 正交试验结果分析

### 2.2.1 正交试验结果

以三维表面粗糙度参数：表面粗糙度$S_a$、均方根粗糙度$S_q$、表面偏斜度$S_{sk}$和表面峭度$S_{ku}$为评价工艺指标，根据表3的正交试验工艺参数，开展L16($4^3$)的正交试验，得出正交试验结果如表4所示.

### 2.2.2 灰色关联分析法优化

运用灰色关联法进行分析时，为了避免数据值域和单位的影响，需要将原始数据进行无量纲化处理，计算公式如式(1)所示[16]：

$$y_i(j)=\frac{\max\limits_j x_i(j)-x_i(j)}{\max\limits_j x_i(j)-\min\limits_j x_i(j)} \tag{1}$$

式中：$i$为工艺指标；$j$为试验次数；$x_i(j)$为第$i$个指标下的第$j$次试验结果. 数据无量纲化处理后如表5所示.

对经过无量纲化处理后的数据进行灰色关联系数和灰色关联度的求解. 灰色关联系数为衡量无量纲化处理后的数据与理想状态下的数据的关系，通过对其比较排序，分析指标与研究对象关联程度. 灰色关联系数计算如式(2)所示[17].

$$\xi_i(j)=\frac{\min\limits_i\min\limits_j\left|y_i^0(j)-y_i(j)\right|+\rho\max\limits_i\max\limits_j\left|y_i^0(j)-y_i(j)\right|}{\left|y_i^0(j)-y_i(j)\right|+\rho\max\limits_i\max\limits_j\left|y_i^0(j)-y_i(j)\right|} \tag{2}$$

式中：$y_i(j)$为无量纲化后的数据结果；$y_i^0(j)$为第$i$个

表4 正交试验结果

Tab.4 Orthogonal test results

| 序号 | 砂轮转速$n_s$/(r·min$^{-1}$) | 工件转速$n_w$/(r·min$^{-1}$) | 砂轮径向进给速度$v_r$/(mm·min$^{-1}$) | 表面粗糙度$S_a$/μm | 均方根粗糙度$S_q$/μm | 表面偏斜度$S_{sk}$ | 表面峭度$S_{ku}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4 000 | 600 | 0.100 | 0.449 | 0.585 | −0.030 | 2.906 |
| 2 | 4 000 | 700 | 0.125 | 0.391 | 0.507 | 0.139 | 3.589 |
| 3 | 4 000 | 800 | 0.150 | 0.365 | 0.490 | −0.093 | 3.159 |
| 4 | 4 000 | 900 | 0.175 | 0.399 | 0.503 | 0.190 | 2.888 |
| 5 | 5 000 | 600 | 0.125 | 0.427 | 0.529 | −0.130 | 3.15 |
| 6 | 5 000 | 700 | 0.100 | 0.388 | 0.488 | −0.105 | 3.183 |
| 7 | 5 000 | 800 | 0.175 | 0.391 | 0.518 | −0.106 | 3.191 |
| 8 | 5 000 | 900 | 0.150 | 0.364 | 0.446 | −0.184 | 3.503 |
| 9 | 6 000 | 600 | 0.150 | 0.443 | 0.545 | 0.031 | 2.934 |
| 10 | 6 000 | 700 | 0.175 | 0.534 | 0.653 | 0.109 | 2.922 |
| 11 | 6 000 | 800 | 0.100 | 0.467 | 0.594 | −0.172 | 2.976 |
| 12 | 6 000 | 900 | 0.125 | 0.535 | 0.648 | −0.063 | 2.913 |
| 13 | 7 000 | 600 | 0.175 | 0.578 | 0.708 | −0.261 | 2.763 |
| 14 | 7 000 | 700 | 0.150 | 0.629 | 0.774 | 0.050 | 2.714 |
| 15 | 7 000 | 800 | 0.125 | 0.408 | 0.532 | 0.286 | 3.130 |
| 16 | 7 000 | 900 | 0.100 | 0.402 | 0.499 | 0.232 | 3.096 |

表5　原始数据无量纲化处理

Tab.5　Dimensionless processing of raw data

| 序号 | $S_a$无量纲化序列 | $S_q$无量纲化序列 | $S_{sk}$无量纲化序列 | $S_{ku}$无量纲化序列 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.679 | 0.576 | 0.578 | 0.781 |
| 2 | 0.898 | 0.814 | 0.269 | 0.000 |
| 3 | 0.996 | 0.866 | 0.692 | 0.491 |
| 4 | 0.868 | 0.826 | 0.176 | 0.801 |
| 5 | 0.762 | 0.747 | 0.761 | 0.502 |
| 6 | 0.909 | 0.872 | 0.715 | 0.464 |
| 7 | 0.898 | 0.780 | 0.717 | 0.455 |
| 8 | 1.000 | 1.000 | 0.859 | 0.098 |
| 9 | 0.702 | 0.698 | 0.466 | 0.749 |
| 10 | 0.358 | 0.369 | 0.324 | 0.762 |
| 11 | 0.611 | 0.549 | 0.837 | 0.701 |
| 12 | 0.355 | 0.384 | 0.638 | 0.773 |
| 13 | 0.192 | 0.201 | 1.000 | 0.944 |
| 14 | 0.000 | 0.000 | 0.431 | 1.000 |
| 15 | 0.834 | 0.738 | 0.000 | 0.525 |
| 16 | 0.857 | 0.838 | 0.099 | 0.563 |

工艺指标下的理想值. 由表5可知4个工艺指标的无量纲化序列最大值对应原始数据的最优值，均为1，故将[1,1,1,1]作为工艺指标下的理想值. $\rho$为分辨系数，$\rho \in [0,1]$，本文$\rho$取0.5. 灰色关联度计算公式如式(3)所示[18].

$$\gamma_j = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\xi_i(j) \tag{3}$$

式中：$m$为工艺指标个数，$m=4$；$j$为试验次数，$j=16$. 数据处理结果如表6所示.

基于正交试验和灰色关联分析法可知，同一工艺参数下不同水平的灰色关联度主要取决于各项工艺参数的不同水平，该值的大小反映了各工艺参数不同水平对工艺指标的影响强弱，平均灰色关联度越大，对应的工艺指标越接近最优值. 不同工艺参数下各水平的灰色关联度如表7所示. 由正交试验的特点可知：对于18CrNiMo7-6钢V型缺口成形磨削正交试验，砂轮转速对工艺指标的影响程度最大，其次依次为砂轮径向进给速度、工件转速.

由表7可得到不同工艺参数各水平与灰色关联度平均值的关系如图8所示. 其中(Ⅰ)为$n_s$与灰色关联度平均值的关系，(Ⅱ)为$n_w$与灰色关联度平均值的关系，(Ⅲ)为$v_r$与灰色关联度平均值的关系. 由图8可得，最为合理的工艺参数组合为：工件转速900 r/min，砂轮转速5 000 r/min，砂轮径向进给速度0.15 mm/min.

表6　灰色关联系数及灰色关联度

Tab.6　Grey correlation coefficient and grey correlation degree

| 序号 | 灰色关联系数 | | | | 灰色关联度 |
|---|---|---|---|---|---|
| | $\gamma(S_a)$ | $\gamma(S_q)$ | $\gamma(S_{sk})$ | $\gamma(S_{ku})$ | |
| 1 | 0.609 | 0.541 | 0.542 | 0.695 | 0.597 |
| 2 | 0.831 | 0.729 | 0.406 | 0.333 | 0.575 |
| 3 | 0.993 | 0.788 | 0.619 | 0.496 | 0.724 |
| 4 | 0.791 | 0.742 | 0.377 | 0.715 | 0.657 |
| 5 | 0.678 | 0.664 | 0.676 | 0.501 | 0.630 |
| 6 | 0.847 | 0.796 | 0.637 | 0.483 | 0.691 |
| 7 | 0.831 | 0.695 | 0.638 | 0.478 | 0.661 |
| 8 | 1.000 | 1.000 | 0.780 | 0.357 | 0.784 |
| 9 | 0.626 | 0.624 | 0.484 | 0.665 | 0.600 |
| 10 | 0.438 | 0.442 | 0.425 | 0.678 | 0.496 |
| 11 | 0.563 | 0.526 | 0.754 | 0.625 | 0.617 |
| 12 | 0.437 | 0.448 | 0.580 | 0.687 | 0.538 |
| 13 | 0.382 | 0.385 | 1.000 | 0.899 | 0.667 |
| 14 | 0.333 | 0.333 | 0.468 | 1.000 | 0.534 |
| 15 | 0.751 | 0.656 | 0.333 | 0.513 | 0.563 |
| 16 | 0.777 | 0.756 | 0.357 | 0.534 | 0.606 |

表7　不同工艺参数下各水平的平均灰色关联度

Tab.7　Average grey correlation degree of each level under different process parameters

| 工艺参数下的水平 | 灰色关联度平均值 | | |
|---|---|---|---|
| | 砂轮转速 | 工件转速 | 砂轮径向进给速度 |
| 水平一 | 0.638 | 0.624 | 0.628 |
| 水平二 | 0.692 | 0.574 | 0.577 |
| 水平三 | 0.563 | 0.641 | 0.661 |
| 水平四 | 0.593 | 0.646 | 0.620 |
| 极差 | 0.129 | 0.072 | 0.084 |

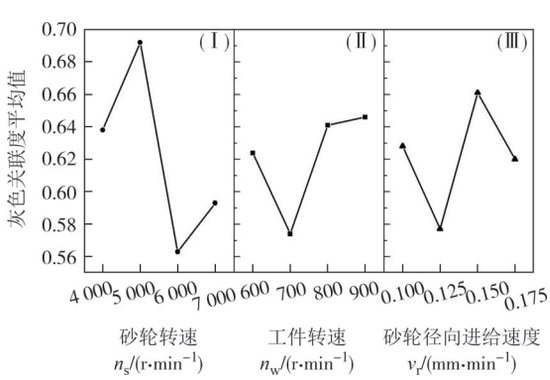



图8　不同工艺参数与灰色关联度平均值的关系

Fig.8　Relationship between different process parameters and the average value of grey correlation degree

可以发现，单因素试验与正交试验得到的最优工艺参数组合并不相同，对两组工艺参数组合再次进行灰色关联度分析. 分析结果发现两者的灰色关

联度值相等,均为0.667,但是由于在加工过程中砂轮径向进给速度过小时存在一定的不稳定性,所以选取工件转速900 r/min、砂轮转速5 000 r/min、砂轮径向进给速度0.15 mm/min为18CrNiMo7-6钢原材料最为合理的工艺参数组合.图9为$n_w$=900 r/min,$n_s$=5 000 r/min,$v_r$=0.15 mm/min时V型缺口底部三维形貌图,其中(Ⅰ)为三维形貌原始图,(Ⅱ)为展开图,从图中可以看出缺口底部磨削纹路较浅,没有较深的波谷和凸起波峰,整体形貌较好.

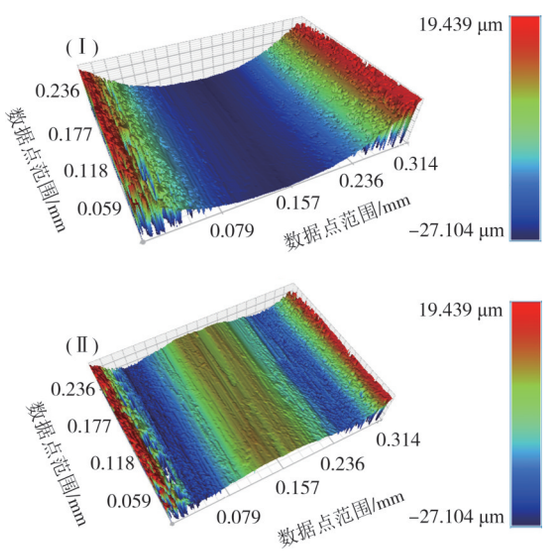



图9 V型缺口底部三维形貌图

Fig.9 3D morphology of V-shaped notch bottom

## 3 结论

本文针对18CrNiMo7-6硬质合金钢开展单因素试验和正交试验,探究V型缺口的成形加工过程中不同加工工艺参数对缺口底部三维表面粗糙度的影响规律,得到以下结论:

1)随着工件转速、砂轮转速及砂轮径向进给速度的增大,同一加工工艺参数下表面粗糙度$S_a$和均方根粗糙度$S_q$变化趋势一致,而表面偏斜度$S_{sk}$和表面峭度$S_{ku}$变化规律不明显.

2)在单因素试验中,当工件转速为800 r/min,砂轮转速为5 000 r/min,砂轮径向进给速度为0.1 mm/min时,表面粗糙度分别取得最小值.

3)V型缺口成形加工过程中加工工艺参数对三维表面粗糙度指标的影响程度由大到小依次为:砂轮转速、砂轮径向进给速度、工件转速.

4)在正交试验中,利用灰色关联法分析试验结果得出较优工艺参数组合为工件转速为900 r/min,砂轮转速为5 000 r/min,砂轮径向进给速度为0.15 mm/min.

5)对单因素试验和正交试验结果进行对比分析,最终得出最优工艺参数组合为:工件转速900 r/min,砂轮转速5 000 r/min,砂轮径向进给速度0.15 mm/min.

## 参考文献

[1] 黄向明,张特,尹人奇,等. 基于机液联合仿真的剪叉机构疲劳寿命分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(2):21-30.
HUANG X M,ZHANG T,YIN R Q,et al. Fatigue life analysis of scissor mechanism based on mechanical and hydraulic co-simulation[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2021,48(2):21-30.(in Chinese)

[2] 律谱. 粗糙度对18CrNiMo7-6疲劳寿命的影响研究[D]. 郑州:郑州大学,2019.
LÜ P. Effect of roughness on fatigue life of 18CrNiMo7-6[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2019.(in Chinese)

[3] 王刚,韩晓宋,张悦,等.表层改性及应力集中对18CrNiMo7-6合金钢疲劳分散性的影响[J].钢铁,2023,58(8):202-211.
WANG G,HAN X S,ZHANG Y,et al. Effect of surface layer modification and stress concentration on fatigue dispersion of 18CrNiMo7-6 steel [J]. Iron & Steel,2023,58(8):202-211.(in Chinese)

[4] OHMORI H,GUO J Q,LIN W M,et al. New fabrication process of deep paraboloidal mirror by combination of elid-grinding and electro-forming techniques for laman spectroscopy instrument [M]//Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium. Boston,MA:Springer US,2002:371-375.

[5] ZHU P L,CHEN T H,WANG S P. Form grinding technology of an irregular roller and the electrolytic in-process dressing for the form grinding wheel[J]. Key Engineering Materials,2001,202/203:193-198.

[6] MICHALSKI J. Surface topography of the cylindrical gear tooth flanks after machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2009,43(5):513-528.

[7] BEAMUD E M,NÚÑEZ P J,GARCÍA-PLAZA E,et al. Characterization of surface texture in electropolishing processes using 3D surface topography parameters [J]. Procedia Manufacturing,2019,41:114-120.

[8] 吴少洋. 18CrNiMo7-6合金钢外圆及缺口磨削仿真研究与试验验证[D]. 郑州:郑州大学,2022.
WU S Y. Simulation study and experimental verification of cylindrical and notch grinding of 18CrNiMo7-6 alloy steel [D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2020.(in Chinese)

[9] FU P,JIANG C H,JI V. Microstructural evolution and mechanical response of the surface of 18CrNiMo7-6 steel after

multistep shot peening during annealing [J]. Materials Transactions,2013, 54(12): 2180-2184.

[10] 赵文杰,杨绍普, 任学红,等. 高铁齿轮钢18CrNiMo7-6循环变形行为实验和本构模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020,47(6): 52-58.
ZHAO W J, YANG S P, REN X H, et al. Cyclic deformation experiment and constitutive model of high-speed railway gear steel 18CrNiMo7-6[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2020, 47(6): 52-58.(in Chinese)

[11] ZHANG Y X, YUAN S S, YANG X, et al. Dry hard turning versus grinding: the influence of machining-induced surface integrity on fatigue performance[J]. Coatings, 2023,13(5): 809.

[12] ZHANG Y X, YUAN S S, YANG X, et al. Effect of process parameters on hardness and microstructure of 18CrNiMo7-6 carburized steel in high-speed cylindrical grinding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(9): 3137-3147.

[13] 朱浩阳, 郜伟, 张银霞, 等.外圆纵向磨削工艺对18CrNiMo7-6钢表面完整性的影响[J].金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(3):3 00-306.
ZHU H Y, GAO W, ZHANG Y X, et al. The effect of cylindrical longitudinal grinding process on the surface integrity of 18CrNiMo7-6 steel [J]. Diamond and Abrasive Grinding Tool Engineering, 2022,42 (3): 300-306. (in Chinese)

[14] 王栋,林洪旭,赵静雯,等.高速切向车铣对18CrNiMo7-6钢表面完整性影响研究[J].中国机械工程,2023,34(7):812-820.
WANG D, LIN H X, ZHAO J W, et al. Study on the effect of high speed tangential turning and milling on the surface integrity of 18CrNiMo7-6 steel [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(7): 812-820. (in Chinese)

[15] 赵静雯.圆柱形疲劳试样V型缺口成形磨削工艺优化研究[D].郑州: 郑州大学, 2022.
ZHAO J W. Study on optimization of grinding process for V-notch forming of cylindrical fatigue samples[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.(in Chinese)

[16] 童洲, 谈毅, 段海峰, 等. 基于正交试验和灰色关联的模块锻件热处理工艺优化[J]. 锻压技术, 2021, 46(8): 186-192.
TONG Z,TAN Y,DUAN H F,et al. Optimization of heat treatment process for module forgings based on orthogonal test and gray correlation[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(8): 186-192.(in Chinese)

[17] WANG Q F, JIN J J, MI C M, et al. Maximum entropy configuration model of objective index weight based on grey correlation deep coefficient [J]. Control and Decision, 2013, 28(2): 235-240.

[18] 陈真真.高速外圆磨削三维表面粗糙度研究与磨削力测量装置设计[D].郑州: 郑州大学, 2020.
CHEN Z Z. Research on 3D surface roughness of high speed cylindrical grinding and design of grinding force measuring device[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.(in Chinese)