

车削去除钛合金棒材表面氧化皮 工艺参数试验研究

史丽晨, 贾永康, 张军锋

(西安建筑科技大学, 西安 710055)

摘要: **目的** 通过车削去除表面氧化皮, 分析车削工艺参数对表面粗糙度的影响规律, 确定可行工艺参数组合, 使车削去除钛合金棒材表面氧化皮的同时, 获得较低的表面粗糙度。**方法** 基于响应曲面法中心复合设计, 采用 YG8 硬质合金车刀, 对表面带有氧化皮的 TC4 钛合金棒材进行车削试验, 建立表面粗糙度预测模型, 并进行显著性分析, 验证模型的准确性。分析车削工艺参数 (包括主轴转速 n 、进给速度 v 及切削深度 a_p) 对表面粗糙度的影响规律。对比在处理氧化皮厚度不同的 TC4 钛合金棒材时, 工艺参数对表面粗糙度的影响。**结果** 表面粗糙度预测模型的误差在 1.66%~3.33%, 模型准确度较高。主轴转速 n 、进给速度 v 及切削深度 a_p 的显著度均小于 0.05。在工艺参数交互作用中, v - a_p 对表面粗糙度的显著度 $P < 0.0004$ 。通过分析车削工艺参数对表面粗糙度的影响规律, 确定了可行车削工艺参数域和可行车削工艺参数组合。**结论** 建立的表面粗糙度预测模型准确度较高, 可作为表面粗糙度的预测模型。去除表面氧化皮的车削工艺参数对工艺指标表面粗糙度的影响次序为 $a_p > v > n$, 在工艺参数交互作用中, v - a_p 的交互作用对表面粗糙度影响更大。车削工艺参数对表面粗糙度的影响趋势不受表面氧化皮厚度的影响。无心车床在可行车削工艺参数组合的工作条件下, 通过车削方式可在完全去除钛合金棒材表面氧化皮的同时, 获得较低的表面粗糙度。

关键词: 钛合金; 表面粗糙度; 表面氧化皮; 车削; 工艺参数; 可行工艺参数域

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)05-0372-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.042

Research on Technological Parameters of Removing Oxide Coating from Titanium Alloy Bar Surface by Turning

SHI Li-chen, JIA Yong-kang, ZHANG Jun-feng

(Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

ABSTRACT: The work aims to research the influence of turning technology parameters on the surface roughness and to determine the appropriate combination of technology parameters, which be beneficial to a lower surface roughness while turning to remove the oxide skin on the surface of titanium alloy bar. Based on the central composite design of response surface method,

收稿日期: 2020-03-16; 修订日期: 2020-08-10

Received: 2020-03-16; **Revised:** 2020-08-10

基金项目: 陕西省重点研发计划 (2020GY-104); 西安市科技创新引导项目 (201805033YD11CG17(9))

Fund: Key Research and Development Plan of Shaanxi Province (2020GY-104), Xi'an Science and Technology Innovation Guidance Project (201805033YD11CG17(9))

作者简介: 史丽晨 (1972—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为机械设计及理论。邮箱: bestslc@163.com

Biography: SHI Li-chen (1972—), Female, Doctor, Professor, Research focus: mechanical design and theory. E-mail: bestslc@163.com

引文格式: 史丽晨, 贾永康, 张军锋. 车削去除钛合金棒材表面氧化皮工艺参数试验研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 372-379.

SHI Li-chen, JIA Yong-kang, ZHANG Jun-feng. Research on technological parameters of removing oxide coating from titanium alloy bar surface by turning[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 372-379.

the turning experiment of titanium alloy bar with oxide coating was carried out by using YG8 cemented carbide turning tool, and the surface roughness prediction model was established, which was verified to be accurate by the significance analysis; the influence of turning process parameters (including spindle speed n , feed speed v and cutting depth a_p) on the surface roughness was also analyzed. The influence of process parameters on the surface roughness of titanium alloy bars with different thickness of oxide skin was compared. The error of the surface roughness prediction model of titanium alloy bar's oxide coating removing is about 1.66%~3.33%, and the accuracy of the model is relatively high. The significance of spindle speed n , feed speed v and cutting depth a_p are all less than 0.05. In the interaction of process parameters, the significance of v - a_p to surface roughness is $P<0.0004$. By analyzing the influence of turning process parameters on surface roughness, the feasible turning process parameter range and feasibility are obtained. It is proved that the accuracy of the model is high and it can be used as the surface roughness prediction model of titanium alloy bar's oxide coating removing. The order of the influence of turning process parameters on the surface roughness is: $a_p > v > n$. In the interaction of process parameters, the interaction of v - a_p has the greatest influence on the surface roughness. The influence trend of turning process parameters on surface roughness is not affected by the thickness of oxide skin. Under the working condition of feasible combination of turning process parameters, the oxide coating of titanium alloy bar can be completely removed and the lower surface roughness can be obtained.

KEY WORDS: titanium alloy; surface roughness; surface oxide scale; turning; process parameters; feasible process parameter domain

钛及钛合金具有比强度高、中温性能好、耐腐蚀、无磁、焊接性能好等优点, 广泛应用于航空、航天、船舶、石油、化工、冶金、生物医学等领域。随着钛合金的应用量急剧上升, 钛合金的加工进入了一个新的发展时期^[1]。高温成形后的钛合金棒材在空气中放置后, 表面会形成一层氧化皮^[2], 如图 1 所示。由于机械零件的疲劳性能及其使用安全性多取决于零部件的表面纹理, 而钛合金棒材表面形成的氧化皮极大地影响了其表面质量, 去除表面氧化皮来提高表面质量显得尤为重要^[3-6]。



图 1 表面带氧化皮缺陷的钛合金棒材
Fig.1 Titanium alloy bar with oxide skin defect

通常, 去除材料表面氧化皮的方法有磨削加工法、混合酸洗法、熔融碱浸处理法、苛性钠-高锰酸钾溶液浸洗处理法等。张来祥^[7]等通过快速脱模-钝化工艺对高温加工后的铜合金表面产生的氧化皮进行了去除, 并提高了表面粗糙度。乔永莲^[8]等采用先热碱洗后酸洗的工艺实现了对 TC4 钛合金表面氧化皮的去除, 并对去除氧化皮后的钛合金氢质量分数进行了测定, 结果表明, 通过采用先热碱洗、后酸洗的工艺, TC4 钛合金表面的氧化皮可以被完全去除。刘岩^[9]

等采用喷淋酸洗技术对钛合金板材及带材表面的氧化皮进行去除, 提高了材料的成材率以及表面的光洁度。但是, 通过化学方法去除材料表面氧化皮容易造成环境污染, 而且化学试剂对材料易产生轻微化学腐蚀, 致使表面产生麻点, 从而使表面粗糙度增大^[10-11]。同时, 磨削加工法去除表面氧化皮会造成粉尘污染, 且钛合金的导热系数小, 利用磨削加工去除钛合金棒材表面氧化皮时, 容易造成表面烧伤和塑性变形^[12]。

针对以上缺陷和不足, 本文利用自主设计制造的 XF-WXC 无心车床, 通过表面车削的方式实现钛合金棒材表面氧化皮的去除, 无心车床结构如图 2 所示。其工作原理为: 棒材由空心主轴前部的前夹送辊和前导向送入空心主轴; 电动机通过带传动带动空心主轴旋转, 继而带动空心主轴前端的刀盘(刀盘周向均布四把刀具)高速旋转, 对前夹送辊送入的棒材进行表面氧化皮的去除; 当棒材脱离前夹送辊时, 由后夹送辊和后导向确保棒材做持续的轴向运动, 完成整根棒材表面氧化皮的去除^[13-14]。这种去除表面氧化皮的方式高效、环保, 经验证, 去除氧化皮后, 棒材的表面粗糙度小于 $0.8 \mu\text{m}$, 达到了较高的加工精度。

国内外对钛合金加工工艺的研究已取得了很多成果。李登万、杨翠蕾等人^[15-16]对 TC4 钛合金进行了车削试验, 分析了车削工艺参数与表面粗糙度之间的关系, 结果表明, 进给量对表面粗糙度影响最大, 切削深度次之, 切削速度影响最小。王丹等人^[17]对 TC4 钛合金车削工艺参数进行了优化, 得到了精车 TC4 钛合金时的最佳切削参数, 其中, $n=60 \text{ m/min}$, $v=0.1 \text{ mm/r}$, $a_p=0.2 \text{ mm}$ 。Safari 等^[18]采用端铣, 对 TC4 表面粗糙度进行了研究, 结果表明, 表面粗糙度随主轴转速的增大而增大。Zhang 等^[19]研究了切削条件对 TC4 钛合金高速干式铣削后表面粗糙度的影响, 发现在较低的主轴转速下, 以较高的进给速度进行端

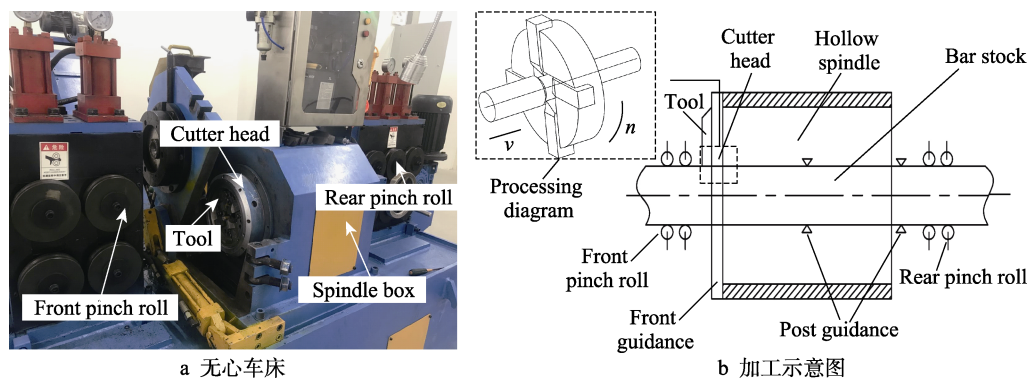


图2 试验装置及加工示意图

Fig.2 Test device and processing diagram: a) centerless lathe; b) processing diagram

铣可降低表面粗糙度。目前相关的研究主要集中在 TC4 钛合金的精加工以及半精加工工艺过程,对如何在生产实际中通过粗加工去除钛合金表面氧化皮,并同时降低表面粗糙度的研究尚不多见。

本文利用无心车床,以表面车削的方式去除 TC4 钛合金棒材表面氧化皮,基于响应曲面法进行试验设计,分析了表面处理过程中车削工艺参数对表面粗糙度的影响规律。确定了可行车削工艺参数域和工艺参数组合,为实际生产过程提供了更多工艺参数选择,使无心车床在大进给、大切削深度的工作条件下,高效、绿色地去除 TC4 钛合金棒材表面氧化皮的同时,还能获得较低的表面粗糙度。

1 试验

试验设备采用 XF-WXC 无心车床,通过表面车削的方式去除钛合金棒材表面氧化皮。刀具选用抗弯强度高,抗冲击、抗振性较好的 YG8 硬质合金刀具,刀具前角 2° ,后角 5° ,刃倾角 0° ,主偏角 90° ,刀尖圆弧半径为 0.3 mm 。试件材料为高温成形后在空气中放置的 TC4 钛合金棒材,直径为 27 mm ,表面氧化皮厚度小于 0.5 mm ,化学成分如表 1 所示,室温下的拉伸性能如表 2 所示。

表1 TC4 钛合金棒材的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TC4 titanium alloy bar wt %

Al	V	Fe	N	C	O	H	Ti
6.0	4.0	0.3	0.05	0.1	0.2	0.013	Bal.

表2 TC4 钛合金棒材的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of TC4 titanium alloy bar

Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Reduction of area/%
902	824	10	30

在试验过程中,采用响应曲面设计中的中心复合设计法(Central Composite Design, CCD)规划了主

轴转速(n)、进给速度(v)和切削深度(a_p)等自变量因子^[20-21]。考虑到材料的难加工性、车床性能、刀具特性以及表面氧化皮厚度等多方面因素,车削工艺参数水平的设定如表 3 所示。为提高测量数据的准确率,选择试件长度为 1300 mm ,在装夹好试件后,先在试件前端往后 300 mm 的试件长度上进行试刀,在剩余的 1000 mm 试件长度上进行试验工艺参数加工。

表3 试验车削工艺参数及编码

Tab.3 Test turning process parameters and codes

ID	$x_1(n)$ /(r·min ⁻¹)	$x_2(v)$ /(mm·min ⁻¹)	$x_3(a_p)$ /mm
-1.682	400	900	0.50
-1	481	981	0.58
0	600	1100	0.70
1	719	1219	0.82
1.682	800	1300	0.90

2 结果及分析

2.1 表面粗糙度模型的建立

采用 TIME TR200 粗糙度仪测量表面粗糙度。为了减小随机误差和测量误差,随机选取表面处理后外圆柱面上不同位置的 3 个点,取 3 次测量的平均值作为该组参数下的表面粗糙度值。试验参数及结果如表 4 所示。为获得去除表面氧化皮工艺的自变量(车削工艺参数)对因变量(表面粗糙度)的影响规律,构建响应曲面法中目标响应和输入因子之间的二阶数学预测模型^[22],如式(1)所示。

$$y(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^3 \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^3 \alpha_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^3 \alpha_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (1)$$

式中,输出因子 $y(x)$ 为表面粗糙度 Ra ; 输入因子 x_1 、 x_2 、 x_3 分别表示主轴转速 n 、进给速度 v 、切削深度 a_p ; α_0 、 α_i 、 α_{ij} 、 α_{ii} 为模型系数; ε 为误差。

根据试验所得数据,利用 MINITAB 对其进行非线性回归后,得到在去除表面氧化皮时,表面粗糙度

表 4 表面粗糙度 (Ra) 的试验结果
Tab.4 Test results of surface roughness

ID	$x_1(n)$ /(r·min ⁻¹)	$x_2(v)$ /(mm·min ⁻¹)	$x_3(a_p)$ /mm	$y(x)/\mu\text{m}$
1	481	981	0.58	0.832
2	719	981	0.58	0.854
3	481	1219	0.58	0.873
4	719	1219	0.58	0.964
5	481	981	0.82	0.874
6	719	981	0.82	0.995
7	481	1219	0.82	1.204
8	719	1219	0.82	1.407
9	400	1100	0.70	1.089
10	800	1100	0.70	1.267
11	600	900	0.70	0.897
12	600	1300	0.70	1.206
13	600	1100	0.50	0.695
14	600	1100	0.90	1.133
15	600	1100	0.70	0.728
16	600	1100	0.70	0.739
17	600	1100	0.70	0.735
18	600	1100	0.70	0.741
19	600	1100	0.70	0.725
20	600	1100	0.70	0.735

与工艺参数之间的多元二阶预测模型，如式(2)。

$$\begin{aligned} Ra= & 18.138\ 06-0.0144\ 14x_1-0.018\ 792x_2- \\ & 10.625\ 48x_3+1.332\ 89\times10^{-6}x_1x_2+ \\ & 1.846\ 99\times10^{-3}x_1x_3+5.173\ 32\times10^{-3}x_2x_3+ \\ & 1.009\ 02\times10^{-5}x_1^2+6.927\ 67\times10^{-6}x_2^2+ \\ & 3.474\ 09x_3^2 \end{aligned} \tag{2}$$

2.2 表面粗糙度预测模型的方差分析

表 5 中,模型的 F 代表整个回归方程模型的显著性, P 代表回归方程模型的显著性水平。给定显著性水平的标准 F 值为 $F_{0.05}(9,10)=3.020$,模型的 $F=57.28>3.020$, 且 $P<0.0001$, 小于置信系数 0.05, 表明模型的可信度较高。 R -Sq 表示预测值和试验数据的吻合

度, R -Sq(adj)=96.38%, 且 R -Sq 和 R -Sq(adj)很接近, 表明吻合度很高。主轴转速、进给速度、切削深度对应的 F 值代表工艺参数对表面粗糙度的显著性, 且对应的 F 值均大于 3.020, P 值代表工艺参数对表面粗糙度的显著性水平, 对应的 P 值均小于置信系数 0.05, 表明表面粗糙度值由主轴转速、进给速度、切削深度共同决定。结合表 5 中主轴转速、进给速度、切削深度的 P 值以及 $F_{a_p}>F_v>F_n$, 可以发现, 切削深度对表面粗糙度影响更显著, 进给速度次之, 主轴转速影响最小。在工艺参数交互作用中, v - a_p 交互作用所对应的表面粗糙度的显著性水平 $P<0.0004$, 对 Ra 的影响最大。图 3a 为表面粗糙度实际值-预测值分布, 表面粗糙度实际值大部分都分布在拟合线周围且都处于显著性曲线内部。图 3b 为表面粗糙度预测值-实际值柱状对比, 预测值与实际值之间无明显差别, 误差值范围在 1.66%~3.33%, 精度较高。综上所述, 基于响应曲面法得到的表面粗糙度与车削工艺参数之间的多元二阶预测模型, 可作为表面粗糙度的预测模型。

表 5 表面粗糙度预测模型方差分析结果
Tab.5 Variance analysis results of prediction model of surface roughness and process parameters

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean-square	F	P
Model	0.86	9	0.095	57.28	<0.0001
n	0.04	1	0.040	23.90	0.0006
v	0.15	1	0.15	87.98	<0.0001
a_p	0.21	1	0.21	126.39	<0.0001
n - v	2.850×10^{-3}	1	2.850×10^{-3}	1.72	0.2195
n - a_p	5.565×10^{-3}	1	5.565×10^{-3}	3.35	0.0971
v - a_p	0.044	1	0.044	26.28	0.0004
n^2	0.29	1	0.29	176.90	<0.0001
v^2	0.14	1	0.14	83.39	<0.0001
a_p^2	0.035	1	0.035	21.11	0.0010
Residual	0.017	10	1.661×10^{-3}	—	—
Standard deviation	R -Sq=98.1%		R -Sq(adj)=96.38%		

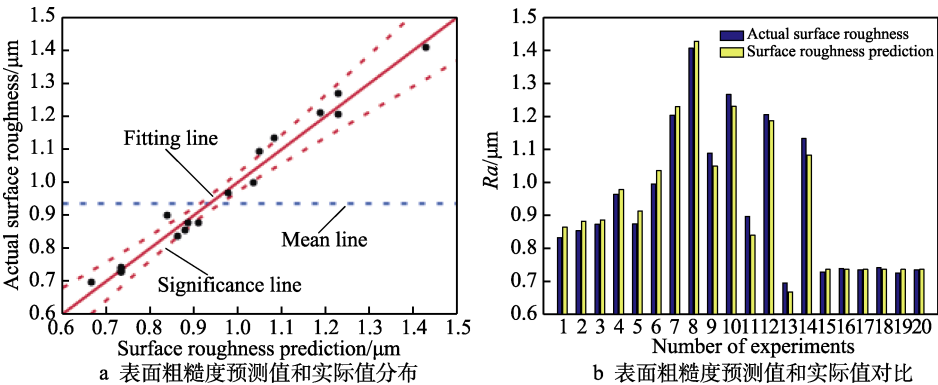


图 3 表面粗糙度预测值与实际值的分布和对比

Fig.3 Distribution and comparison of predicted and actual surface roughness-comparison: a) distribution of predicted and actual surface roughness values; b) comparison between predicted and actual surface roughness

2.3 工艺参数对表面粗糙度的影响规律分析

2.3.1 表面粗糙度对车削工艺参数的敏感度分析

为选择合适的车削工艺参数,获得较低的表面粗糙度值,往往要定量分析表面粗糙度对车削工艺参数的敏感性特征^[23]。图4中的实线为表面氧化皮厚度小于0.5 mm的钛合金棒材的表面粗糙度与车削工艺参

数之间的因素-效应曲线。同时,考虑到不同氧化皮厚度的钛合棒材在表面处理后,表面粗糙度的变化趋势受工艺参数影响是否一致,通过调整切削深度,对直径为27 mm、表面氧化皮厚度小于0.7 mm的钛合金棒材进行了如表6所示的单因素试验,试验条件与处理表面氧化皮厚度小于0.5 mm的钛合金棒材一致,结果如图4中虚线所示。

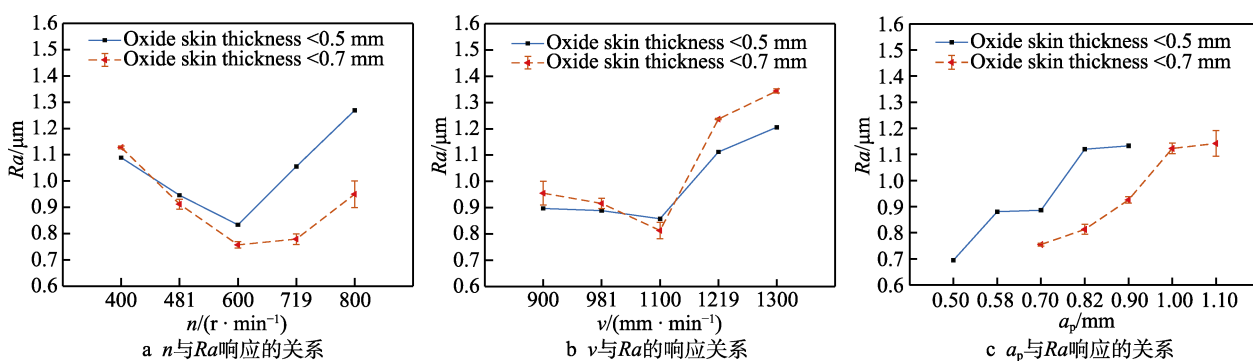


图4 表面粗糙度 Ra 与车削工艺参数之间的响应关系

Fig.4 Response relationship between surface roughness and turning process parameters: a) relationship between n and Ra response, b) relationship between v and Ra response, c) relationship between a_p and Ra response

表6 表面氧化皮厚度为0.7 mm的TC4钛合金棒材单因素试验
Tab.6 Single factor test of TC4 titanium alloy bar with 0.7 mm surface oxide thickness

Group	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$v/(mm \cdot \min^{-1})$	a_p/mm
1	400, 481, 600, 719, 800	1100	0.90
2	600	900, 981, 1100, 1219, 1300	0.90
3	600	1100	0.70, 0.82, 0.90, 1.0, 1.1

图4a为主轴转速对表面粗糙度的影响趋势。从图中可以看出,主轴转速由400 r/min增加到800 r/min的过程中,表面粗糙度呈现先减小后增大的趋势。在转速较低时,主轴转速的增大会使刀具带走更多的切削热;但当主轴转速大于某个临界值(大约为600 r/min)时,传动系统中的带传动出现较大抖动,从而引起刀具产生较大的振动,使表面粗糙度增大。通过图中的转折点可知,不能一味地通过增大主轴转速来获得较低的表面粗糙度,还要关注到主轴转速增大到某个临界值时,表面粗糙度变化趋势的改变。在主轴转速的临界值附近,可获得较为理想的表面粗糙度。

图4b为进给速度与表面粗糙度间的关系。从图中可以看出,进给速度在900~1300 mm/min增加时,表面粗糙度值呈先减小后增大的趋势。进给速度的降低使得刀具和被加工材料之间的摩擦和挤压剧烈,单位时间产生的切削热停留在被加工表面的时间延长,由于钛合金的导热系数小,从而更容易使被加工工件产生塑性变形,甚至粘附在刀具的车削刃上,使表面粗糙度增大。而当进给速度大于某个临界值(大约为1100 mm/min)时,进给速度的增大会迅速提高切削温度,加剧刀具磨损,导致表面质量变差。进一步分

析图4b,对比转折临界进给速度左右两边的粗糙度值可以发现,左边的粗糙度值要低于右边的粗糙度值,说明在进给速度相对较低时,可以获得较低的表面粗糙度。对比图4b中的实线和虚线可以发现,在大致相同区域的折线段中,氧化皮厚度约为0.7 mm的曲线斜率大于氧化皮厚度为0.5 mm的值,可见在相同工艺参数条件下,氧化皮厚度越大的钛合金棒材对进给速度的敏感度越大。

图4c为切削深度对表面粗糙度的影响趋势。在保证表面氧化皮去除完全的前提下,表面粗糙度随着切削深度的增大而增大。切削深度增加会导致切削力增大,从而加剧刀具的振动,导致表面质量变差。

由图4a—4c中 Ra 最小时对应的工艺参数可知,选择中主轴转速、中进给速度和小切削深度可获得较低的表面粗糙度。以上分析还表明,处理不同氧化皮厚度的钛合金棒材时,车削工艺参数对表面粗糙度的影响趋势相似。

2.3.2 车削工艺参数交互作用对表面粗糙度的影响

以上分析还表明,处理不同氧化皮厚度的钛合金棒材时,削工艺参数对表面粗糙度的影响趋势相似,因此对氧化皮厚度小于0.5 mm的钛合金棒材展开分

析。根据表面粗糙度的预测方程, 在确定某一影响因素的水平后, 可得到其余两种因素之间交互作用对表面粗糙度的影响规律^[24]。以工艺参数的零水平为参考, 分别讨论工艺参数之间的交互作用对表面粗糙度的影响规律。各车削工艺参数交互作用对表面粗糙度 Ra 的影响规律如图 5 所示。由图 5a 和 5b 可知, 在试验参数范围内, 随着 n 的增大, 表面粗糙度表现出先减小后增大的趋势, 但变化不明显; 由图 5a 和 5c 可知, 随着 v 的增大, 表面粗糙度呈先减小后增大的趋势, 变化幅值相对较大。结合图 5b 和 5c, 发现表

面粗糙度随 a_p 的增大, 表现出先减小后增大的趋势, a_p 从 0.5 mm 增大到 0.58 mm 过程中, 表面粗糙度有略微减小的趋势, 但变化的幅值很小; 随着 a_p 从 0.6 mm 增大到 0.9 mm 时, 表面粗糙度有明显增大趋势。在图 5a—5c 的曲面图中寻找曲面的最高点和最低点, 发现图 5c 中的最高点 Ra 为 1.741 μm , 是图 5a—5c 的曲面图中表面粗糙度的最大值; 最低点的 Ra 表面粗糙度为 0.659 μm , 是图 5a—5c 的曲面图中表面粗糙度的最小值。表明在工艺参数的交互作用中, v - a_p 之间的交互作用对表面粗糙度的影响更显著。

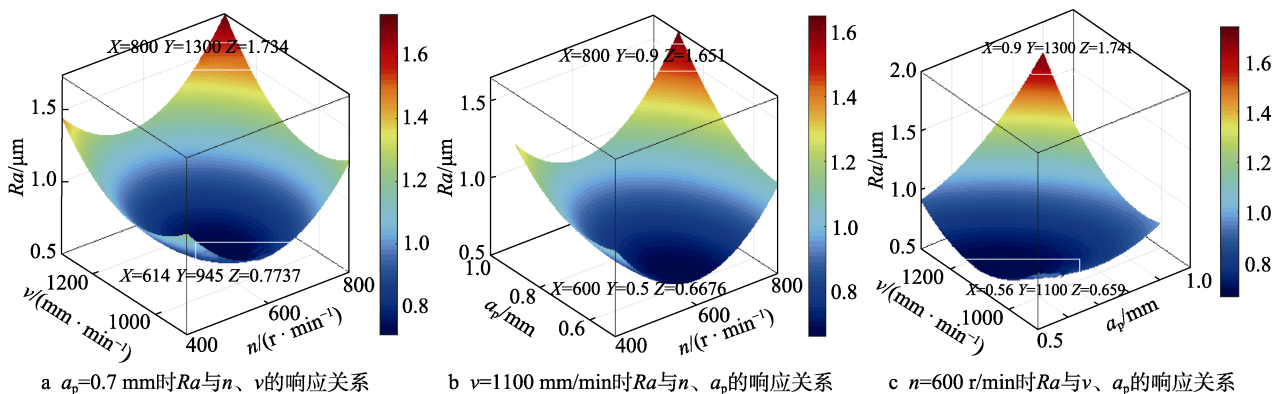


图 5 Ra 与车削工艺参数之间的响应关系

Fig.5 Response relationship between Ra and turning process parameters: a) response relationship between Ra and n , v ($a_p=0.7$ mm); b) response relationship between Ra and n , a_p ($v=1100$ mm/min); c) response relationship between Ra and v , a_p ($n=600$ r/min)

3 可行工艺参数域的确定

在精加工车削钛合金时, 采用较小进给量 (0.1~0.15 mm/r) 和较小切削深度 (0.1~0.4 mm) 可获得较低的表面粗糙度值 (小于 0.8 μm)^[25]。而本文在去除钛合金棒材表面氧化皮时, 根据表面氧化皮厚度确定的切削深度相对较大, 进给速度相对于普通车床也较大。在大进给、大切削深度的工作条件下, 利用无心车床车削去除钛合金棒材表面氧化皮的同时, 是否能获得较低的表面粗糙度值, 还需进一步验证。本文依据工艺参数对表面粗糙度的影响规律, 得到图 6 所示

的等值线图。

通过获取图 6a—6c 中 Ra 最小时对应的等值线边界值或拐点, 从而确定可行工艺参数域的取值范围, 如表 7 所示。对表 7 中 Ra 小于 0.8 μm 对应的工艺参数范围取交集, 将结果作为确定可行工艺参数域的参考。由等值线图可知, 当 $a_p>0.8$ mm 时, 表面粗糙度值均大于 0.8 μm , 进一步说明, 切削深度对表面粗糙度的影响显著。同时, 如图 7 所示, 利用 MINITAB 响应优化器的响应曲面优化法对表面粗糙度预测模型进行优化分析, 得到满意度为 1 的理论最优解 $Ra=0.6576$ μm , 小于 0.8 μm , 其对应 $n=590$ r/min, $v=1090$ mm/min, $a_p=0.56$ mm, 这组工艺参数可作为

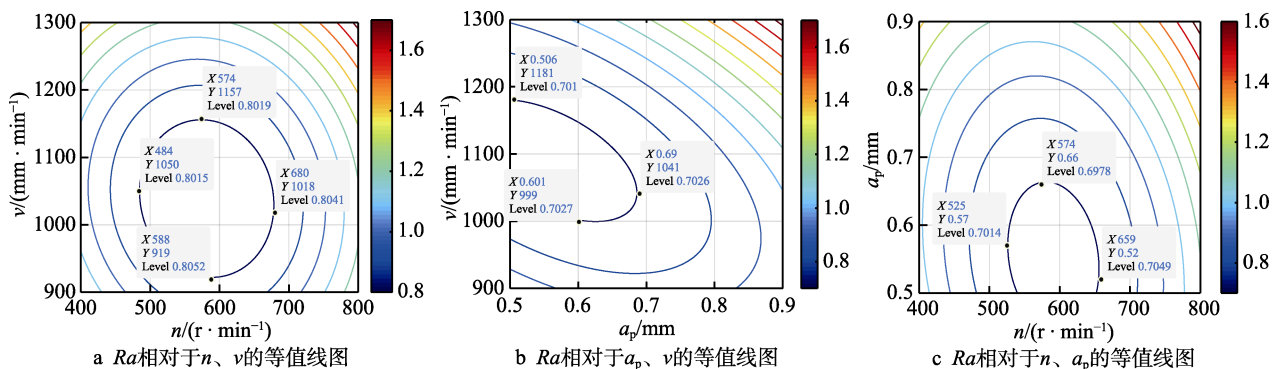


图 6 Ra 相对于车削工艺参数的等值线图

Fig.6 Contour map of Ra relative to turning process parameters: a) contour map of Ra relative to n and v ; b) contour map of Ra relative to a_p and v ; c) contour map of Ra relative to n and a_p

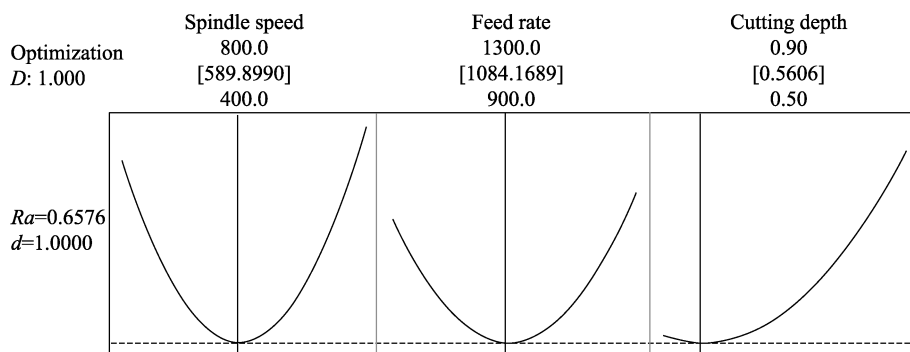


图 7 利用响应优化器得到的最优参数组合

Fig.7 Optimal parameter combination obtained by response optimizer

表 7 可行工艺参数域
Tab.7 Feasible process parameter field

Interaction-factors	Process parameters		
	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p/mm
$n-v$	484~680	919~1157	—
$n-a_p$	525~659	—	0.5~0.66
$v-a_p$	—	999~1181	0.5~0.69
Intersection	600	1000, 1100, 1150	0.5~0.66

可行工艺参数组合的一个试验方案, 记作 $\min-Ra$ 。鉴于可行工艺参数域 a_p 的值介于 0.5~0.66 mm, a_p 取 0.5 mm、0.58 mm (0.5 和 0.66 的均值)、0.66 mm, 其中, a_p 取 0.58 和 $\min-Ra$ 中对应 a_p 值很接近, 从一定程度上说明, 确定的可行工艺参数域范围是合理的。

4 试验验证

利用等值线图 and 响应优化器得到可行工艺参数域, 将主轴转速、进给速度和切削深度适当组合, 作为理论上满足 $Ra < 0.8 \mu\text{m}$ 的工艺参数组合。表 8 为试验方案及表面粗糙度测量结果, 由结果可知, 在采用可行工艺参数组合对钛合金棒材进行表面处理时, 表面粗糙度值 Ra 均小于 $0.8 \mu\text{m}$, 其中方案 $\min-Ra$ 得到的表面粗糙度最小。该试验表明, 在大进给、大切削深度的工作条件下去除钛合金棒材表面氧化皮时, 利用在确定的可行工艺参数域筛选出的可行工艺参数

表 8 可行工艺参数试验方案及 Ra 测量结果Tab.8 Test scheme of feasible process parameter domain test scheme and Ra test results after surface treatment

ID	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p/mm	$Ra/\mu\text{m}$
1	600	1000	0.50	0.681
2	600	1000	0.58	0.717
3	600	1000	0.66	0.752
4	600	1100	0.58	0.693
5	600	1150	0.50	0.698
6	600	1150	0.58	0.713
$\min-Ra$	590	1090	0.56	0.667

组合, 可获得较低的表面粗糙度值。生产实际中, 在满足加工质量的条件下, 兼顾加工效率, 有多种工艺参数方案可供选择。

5 结论

1) 针对钛合金表面氧化皮去除的新工艺, 建立了基于响应曲面法的表面粗糙度与车削工艺参数之间预测模型, 预测值误差在 1.66%~3.33%, 预测模型精度较高, 预测值与实测值无显著差异。

2) 由表面粗糙度预测模型的方差分析可知, 去除表面氧化皮车削工艺参数对表面粗糙度的影响次序为: $a_p > v > n$ 。采用响应曲面法分析了交互作用对表面粗糙度的影响规律, 其中, $v-a_p$ 的交互作用对表面粗糙度的影响最显著。

3) 通过对比不同表面氧化皮厚度的钛合金棒材的车削工艺参数对表面粗糙度的影响规律发现, 车削工艺参数对表面粗糙度的影响趋势不受表面氧化皮厚度的影响, 表面粗糙度随 n 、 v 的增大呈先减小后增大的趋势, 随 a_p 的增大呈现持续增大的趋势。在表面氧化皮完全去除的前提下, 采用中主轴转速、中进给速度、小切削深度可降低表面粗糙度值。

4) 通过试验验证, 采用由等值线图和 MINITAB 响应优化器两种方式得到的可行工艺参数组合作为表面处理的车削工艺参数时, 可获得较低的表面粗糙度。这表明通过分析等值线图, 对表面粗糙度模型优化, 获取工艺参数域的方法是可行的, 可为实际的生产提供多种选择, 也验证了无心车床在大进给、大切削深度的工作条件下去除钛合金棒材表面氧化皮的同时, 可获得较好的表面质量。

参考文献:

- [1] 费有静. 钛及钛合金材料的应用分析[J]. 新材料产业, 2017(3): 15-18.
FEI You-jing. Application analysis of titanium and titanium alloy materials[J]. Advanced material industry, 2017(3): 15-18.

- [2] 湛峰, 李艳. 钛合金在等温锻造时的氧化行为[J]. 热加工工艺, 2008(7): 96-98.
CHEN Feng, LI Yan. Oxidizing behavior of titanium alloy in isothermal forging [J]. Hot working technology, 2008 (7): 96-98.
- [3] 张源, 张爱荔, 李惠娟. TC4 钛合金的表面氧化及其对疲劳性能的影响[J]. 钛工业进展, 2010, 27(1): 25-27.
ZHANG Yuan, ZHANG Ai-li, LI Hui-juan. Surface oxidation and its effect on the fatigue properties of TC4 alloy [J]. Titanium industry progress, 2010, 27(1): 25-27.
- [4] RABINARAYAN B, AMLANA P, ASHOK K S, et al. A perspective review on surface integrity and its machining behavior of AISI 4340 hardened alloy steel[J]. Materials today: Proceedings, 2019, 18(7): 3532-3538.
- [5] HOFFMEISTER H W, HAHMANN W C. Influence of machining with lapping foils on surface integrity of hardened steel[J]. Procedia engineering, 2011, 19: 144-149.
- [6] 林艳华. 机械制造技术基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 25-27.
LIN Yan-hua. Fundamentals of manufacturing technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 25-27.
- [7] 张来祥, 谢洪波, 李荣忠, 等. 超厚氧化皮铜及铜合金零件的表面处理[J]. 电镀与涂饰, 2004(3): 9-12.
ZHANG Lai-xiang, XIE Hong-bo, LI Rong-zhong, et al. Surface treatments for copper and copper alloy parts with super-thick oxide films[J]. Electroplating and finishing, 2004(3): 9-12.
- [8] 乔永莲, 刘会军, 许茜, 等. TC4 钛合金表面氧化皮去除[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(2): 165-169.
QIAO Yong-lian, LIU Hui-jun, XU Qian, et al. Removal of oxide skin on surface of TC4 titanium alloy[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2014, 36(2): 165-169.
- [9] 刘岩, 孙光曦. 喷淋酸洗技术在钛合金表面除氧化皮的应用[J]. 中国西部科技, 2011, 10(14): 33.
LIU Yan, SUN Guang-xi. Application of spray pickling technology in removing oxide skin on titanium alloy surface[J]. Science and technology of west China, 2011, 10(14): 33.
- [10] 张学辉. 合金钢线材的氧化皮去除[J]. 科技资讯, 2019, 17(6): 75-77.
ZHANG Xue-hui. Oxide skin removal of alloy steel wire[J]. Science and technology information, 2019, 17(6): 75-77.
- [11] 张学辉. 碳素钢丝生产中的氧化皮去除[J]. 科技资讯, 2019, 17(4): 76-78.
ZHANG Xue-hui. Scale removal in carbon steel wire production [J]. Science and technology information, 2019, 17(4): 76-78.
- [12] 任敬心. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 322-323.
REN Jing-xin. Grinding principle[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 322-323.
- [13] 史丽晨, 负志达, 王海涛, 等. 无心车床空心主轴系统振动特性分析及结构优化[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(9): 1375-1380.
SHI Li-chen, YUN Zhi-da, WANG Hai-tao, et al. Analysis of vibration characteristics and structure optimization for hollow spindle system of centerless lathe[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2017, 36 (9): 1375-1380.
- [14] 皇甫云峰. 无心车床导向机构系统的特性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- HUANGFU Yun-feng. Analysis of the characteristics of the guide mechanism system of centerless lathe[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [15] 李登万, 陈洪涛, 许明恒, 等. 钛合金车削加工表面粗糙度试验研究[J]. 制造业自动化, 2010, 32(5): 6-7.
LI Deng-wan, CHEN Hong-tao, XU Ming-heng, et al. Experimental study on surface roughness of titanium alloy turning[J]. Manufacturing automation, 2010, 32(5): 6-7.
- [16] 杨翠蕾, 郑清春, 胡亚辉, 等. 车削钛合金 TC4 的表面粗糙度预测模型构建[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(6): 128-130.
YANG Cui-lei, ZHENG Qing-chun, HU Ya-hui, et al. The prediction model of surface roughness based on the experiments of turning titanium alloy of TC4[J]. Modular machine tool and automatic manufacturing technique, 2016(6): 128-130.
- [17] 王丹, 王凌云, 万军. TC4 钛合金车削工艺参数优化[J]. 工具技术, 2016, 50(11): 31-33.
WANG Dan, WANG Ling-yun, WAN Jun. Cutting parameters optimization in turning of TC4 titanium alloys[J]. Tool engineering, 2016, 50(11): 31-33.
- [18] SAFARI H, SHARIF S, IZMAN S, et al. Surface integrity characterization in high-speed dry endmilling of TC4 titanium alloy[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2015, 78: 1-4.
- [19] ZHANG Ming-liang, ZHANG De-yuan, GENG Da-xi, et al. Effects of tool vibration on surface integrity in rotary ultrasonic elliptical end milling of Ti-6Al-4V[J]. Journal of alloys and compounds, 2020, 821: 153266.
- [20] 袁美霞, 刘少楠, 高振莉, 等. 微细铣削不锈钢 310S 表面完整性试验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 240-244.
YUAN Mei-xia, LIU Shao-nan, GAO Zhen-li, et al. Experimental research on surface integrity of micro milling stainless steel 310S[J]. Surface technology, 2017, 46(7): 240-244.
- [21] WILLIAMS H P, SERGIO D. Surface integrity of Inconel 718 turned under cryogenic conditions at high cutting speeds[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 104: 5-8.
- [22] 张军锋, 史耀耀, 蔺小军, 等. 基于灰色关联分析的叶片砂带抛光参数优化[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 806-814.
ZHANG Jun-feng, SHI Yao-yao, LIN Xiao-jun, et al. Parameters optimization in belt polishing process of blade based on grey relational analysis[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2017, 23(4): 806-814.
- [23] 杨东. 基于长疲劳寿命的钛合金 Ti6Al4V 铣削加工表面完整性研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
YANG Dong. Milling induced surface integrity and its effects on fatigue life of the titanium alloy Ti6Al4V[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [24] 袁巨龙, 毛美娇, 李敏, 等. 基于响应曲面法的 YG8 硬质合金刀片化学机械抛光工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2018, 29(19): 2290-2297.
YUAN Ju-long, MAO Mei-jiao, LI Min, et al. Optimization of CMP processing parameters for YG8 cemented carbide inserts based on RSM[J]. China mechanical engineering, 2018, 29(19): 2290-2297.
- [25] 陈日曜. 金属切削原理[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2002: 172-179.
CHEN Ri-yao. Principle of metal cutting[M]. The second edition. Beijing: China Machine Press, 2002: 172-179.