

DOI: 10.3901/JME.2015.03.206

基于均匀设计法的精密车削参数优化*

李登万¹ 陈洪涛¹ 冯锦春¹ 钟成明²

(1. 四川工程职业技术学院四川装备制造业产业集群技术创新中心 德阳 618099;
2. 东方汽轮机有限公司叶片分厂 德阳 618099)

摘要: 为了探索难加工材料-奥氏体不锈钢精密车削的参数优化问题, 引入伪变量 A 表达车削冷却降温条件, 用均匀设计法设计含定性因素混合水平的精密车削试验方案。在干式、环保型湿式和低温冷风微油雾三种不同车削冷却降温条件下, 实现低成本高效率的精密车削试验。在这三种条件下, 以切削速度、进给量、背吃刀量和刀尖半径为优化变量, 以表面粗糙度、表面残余应力、切削力、切削温度、刀具寿命和切削效率为优化目标函数, 建立了奥氏体不锈钢精密车削参数优化模型, 还对车削参数进行了优化和验证, 效果明显。以刀具磨钝前能车削出的总金属表面积作为刀具寿命, 在工件连续表面不出现接刀现象的前提下进行精密车削参数优化。研究成果对指导大型工件精密车削的参数选择具有实际意义。

关键词: 均匀设计; 精密车削; 参数优化; 刀具寿命; 表面残余应力
中图分类号: TG506

Precision Cutting Parameters Optimization Based on Uniform Design Method

LI Dengwan¹ CHEN Hongtao¹ FENG Jinchun¹ ZHONG Chengming²

(1. Sichuan Technology Innovation Center of Equipment Manufacturing Industry Cluster,
Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618099;
2. Vane Branch, Dongfang Steam Turbine Co., Ltd., Deyang 618099)

Abstract: In order to explore precision turning parameter optimization of austenitic stainless steel which is a difficult cutting material, pseudo-variable A is introduced as a factor of cooling cutting conditions, and a precision turning experiment program is projected by uniform design method, which contains qualitative factors hybrid level. A low cost and high efficiency turning test is carried out in three different conditions of dry cutting, wet cutting and cutting with low temperature air containing micro-oil mist. Under the three cooling cutting conditions, the precision turning parameter optimization model of austenitic stainless steel is established, in which, cutting speed, feed amount, cutting depth and tool nose radius are taken as optimization variables, and surface roughness, surface residual stress, cutting force, cutting temperature, tool life and cutting efficiency are taken as objective functions. Meanwhile, the parameters are optimized and verified, and the test results show that the optimization effect is good. Total metal surface area that can be lathed before cutter blunt is taken as the cutter life, and precision turning parameters are optimized in the condition of workpiece continuous surface without machined trace. The results are useful for precision turning parameters selection in heavy workpiece cutting.

Key words: uniform design; precision turning; parameter optimization; tool life; surface residual stress

0 前言

优化问题的实质是在给定边界条件下得到相对最优的结果。在机械制造领域, 有先进的金属切削机床, 若切削刀具、工艺装备和工艺技术等软环境没有跟上, 同样难达到理想的切削效率与切削加工

表面完整性。在切削加工系统中直接和工件发生干涉关系的是刀具, 机床的高性能必须通过切削刀具才能映射到工件的切削表面上, 为更好地发挥机床和刀具的性能, 就应对切削相关参数进行优化。精密车削的参数优化, 实质是控制切削力、切削温度、表面粗糙度和表面残余应力, 确保刀具拥有合适的寿命, 发挥机床和刀具的优良性能, 而提高切削效率^[1]。

为了优化奥氏体不锈钢精密车削的相关参数, 过去人们常在切削液冷却降温条件下进行车削试验

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划, 2007CB707703-4)。20140305 收到初稿, 20141009 收到修改稿

研究, 用正交试验法设计试验方案^[2]。正交试验法的试验次数多、周期长、成本高。在现代生态文明的大背景下, 节能降减排、提高效率, 已成为社会普遍关心的热点问题, 不仅要研究清洁切削, 同时试验方案也要高效。研究奥氏体不锈钢精密清洁车削, 即在干式车削^[3]、低温冷风微量油雾车削^[4-5]和环保型湿式车削三种冷却降温切削条件下, 用均匀设计方法^[1, 6-7]设计精密车削试验参数。在三种清洁车削冷却降温条件下, 以切削速度、进给量、背吃刀量、刀尖半径为自变量, 以表面粗糙度、切削力、表面残余应力、切削温度、刀具寿命和切削效率为目标函数, 建立多元二次回归模型^[8-9]。在回归模型基础之上建立满足零件表面粗糙度和表面残余应力要求、刀具寿命适度、切削温度与切削力较小、切削效率最高为目标的精密车削的参数优化模型^[8, 10-12]。本模型对指导奥氏体不锈钢大型工件清洁精密车削的参数选用具有实际工程意义。

1 试验条件和方案

试验对象: 奥氏体不锈钢(022Cr19Ni10)。试验机床: CK6143。试验刀具: CNMG120404FP、CNMG120408FP 和 CNMG120412FP 肯纳刀片, 装刀后的车刀几何角度: 主偏角 $\kappa_r = 93^\circ$ 、副偏角 $\kappa'_r = 7^\circ$ 、刃倾角 $\lambda_s = -8^\circ$ 、前角 $\gamma_o = 10^\circ$ 、后角 $\alpha_o = 5^\circ$ 、副后角 $\alpha'_o = 6^\circ$ 。

冷风源: CTL-50/3 冷风机, 设定温度 -30°C 、压力 $0.4 \sim 0.6 \text{ MPa}$ 、流量 $3.0 \text{ m}^3/\text{min}$, 冷风微油雾(加油量 50 mL/h)从前刀面射入。

力传感器: Kistler 三分量测力计 9257B, 切削力测量范围 $-5 \text{ kN} \sim 5 \text{ kN}$, 检测灵敏度 2.3 pc/N 。

采集系统: 与力传感器配套的 Dewetron 数据采集系统 DEWE-3021, 有 16 通道, 每通道最高采样率 100 kHz 。

粗糙度检测设备: SURFCOM480A。温度检测: 固定式 VH-480HS 红外热像仪。应力检测: X-350A 型 X 射线应力测定仪。数据分析处理软件: 均匀设计软件 5.0 版。

为了车削试验数据的准确采集记录, 试件设计成如图 1 所示。在车削试验时, 每个因素水平组合试验一般会有多次走刀, 当车刀后刀面磨损值 $VB \geq 0.3 \text{ mm}$ 时即停止该次试验。每次试验的每次走刀到距试件台阶 5 mm 位置时检测切削力 F_x 、 F_y 、 F_z , 走刀结束时采集切削温度 T , 取下试件同样在距台阶 5 mm 位置检测表面粗糙度 R_a 和表面残余应

力 σ_r , 取下刀片检测后刀面磨损量 VB , 每次试验结束按式(1)计算刀具寿命。

$$\text{SCL} = \sum_{i=1}^n \frac{D_{mi} \times \pi}{1\,000} \times \frac{l_m}{f} \quad (1)$$

式中, SCL 为刀具寿命, 即螺旋切削长度, 单位 km ; D_{mi} 为第 i 次走刀时已加工表面直径, 单位 mm ; l_m 为试件切削加工长度, 单位 mm , 本试验 $l_m = 245.0 \text{ mm}$; n 为每次试验走刀次数; f 为进给量, 单位 mm/r 。

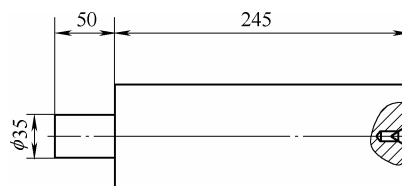


图 1 试件图

用均匀设计软件优化运算产生如表 1 所示奥氏体不锈钢精密车削试验含定性因素均匀混合水平表, 该试验设计表格的均匀性中心化偏差 $C_{D2} = 0.025\,76$, 非常理想。精密车削试验选定的定量因素有切削速度 v 、背吃刀量 a_p 、进给量 f 和刀尖半径 r_s ; 定性因素为车削冷却降温条件 A , A 是伪变量, 干式车削 A_1 用 ($A_1 = 1, A_2 = 0$) 表达, 低温冷风微量油雾车削 A_2 用 ($A_1 = 0, A_2 = 1$) 表达、环保型湿式车削 A_3 用 ($A_1 = A_2 = 0$) 表达。精密车削试验方案与试验结果的刀具磨损情况如表 1。为了减小检测误差对车削试验研究结果产生不良影响, 从每次车削试验的刀具稳定磨损阶段选取 14 组数据(若稳定磨损阶段走刀次数不够 14 次的则重复一轮试验)作为车削试验研究的重复试验分析数据, 如表 2 所示(仅列出一组数据, 切削力仅列 F_z)。

刀具寿命 SCL 通过式(1)根据表 1 记录的走刀次数、每次走刀车削的直径和进给量计算得出, 用 SCL 作为刀具寿命的计量指标可较为客观地反映刀具的耐磨性, 但在金属切削加工中刀具成本往往较低, 一般不会超过 $2\% \sim 4\%$, 因此在作精密车削参数优化时, 本文追求的主要目标不仅仅是刀具寿命 SCL 的长度, 而是在保证工件表面完整性前提下的切削效率。往往是在精密车削参数优化前就需要明确刀具能车削出多少个工件的完整表面, 以保证在走刀车削过程中不换刀, 在工件连续表面不出现接刀痕迹, 在此前提下来提高切削效率。因此有必要提出在刀具磨钝前能车削出的总金属表面积这个指标作为刀具寿命, 记为切削表面积 S , $S = \text{SCL} \times f$ 。两种刀具寿命数据同样列入表 2。

表 1 奥氏体不锈钢精密车削试验方案及刀具磨损情况

编号	切削速度 $v/(m/min)$	背吃刀量 a_p/mm	进给速度 $f/(mm/r)$	刀尖半径 r_e/mm	冷却降温条件	走刀次数	后刀面磨损 值 VB/mm	备注
1	190	2.0	0.13	0.8	A_1	57	0.304	
2	170	1.2	0.25	0.4	A_1	53	0.306	
3	200	1.0	0.21	1.2	A_3	200	0.168	
4	250	2.0	0.25	0.8	A_3	11	刀尖崩裂	重复一轮
5	180	1.6	0.29	1.2	A_2	76	刀尖崩裂	
6	210	1.8	0.33	0.4	A_2	8	刀尖崩裂	重复一轮
7	270	1.8	0.21	1.2	A_1	18	刀尖崩裂	
8	240	1.4	0.13	1.2	A_2	74	0.314	
9	220	1.6	0.17	0.4	A_3	20	0.326	
10	260	1.2	0.17	0.4	A_2	14	刀尖崩裂	重复一轮
11	230	1.0	0.33	0.8	A_1	13	刀尖崩裂	重复一轮
12	280	1.4	0.29	0.8	A_3	10	刀尖崩裂	重复一轮

表 2 奥氏体不锈钢车削试验数据

切削速度 $v/(m/min)$	背吃刀量 a_p/mm	进给速度 $f/(mm/r)$	刀尖半径 r_e/mm	冷却降 温条件		主切削力 F_z/N	表面粗 糙度 $R_a/\mu m$	表面残 余应力 σ_r/MPa	切削温度 $T/^\circ C$	刀具寿命 SCL/km	切削表面 积 S/m^2
190	2.0	0.13	0.8	1	0	368.7	0.823	261.7	766.29	20.627	2.682
170	1.2	0.25	0.4	1	0	383.4	2.374	105.2	710.92	9.863	2.466
200	1.0	0.21	1.2	0	0	252.4	1.172	566.9	491.50	48.343	10.152
250	2.0	0.25	0.8	0	0	568.0	2.166	468.7	632.50	2.321	0.580
180	1.6	0.29	1.2	0	1	518.8	2.094	684.1	504.24	11.964	3.470
210	1.8	0.33	0.4	0	1	709.8	4.117	198.9	678.84	1.361	0.449
270	1.8	0.21	1.2	1	0	450.4	0.978	655.2	677.56	3.788	0.795
240	1.4	0.13	1.2	0	1	253.6	0.839	526.4	530.89	24.250	3.153
220	1.6	0.17	0.4	0	0	342.7	1.896	-125.0	382.25	5.150	0.876
260	1.2	0.17	0.4	0	1	270.6	1.482	-45.7	509.06	4.138	0.703
230	1.0	0.33	0.8	1	0	328.7	3.175	761.4	722.99	1.951	0.644
280	1.4	0.29	0.8	0	0	460.7	2.232	550.8	625.83	1.741	0.505

2 建立回归模型

2.1 多元二次回归模型

为了很好地反映在三种清洁车削冷却降温条件下, 切削速度 v 、进给量 f 、背吃刀量 a_p 和刀尖半径 r_e 四个自变量及交互作用对主切削力 F_z 、表面粗糙度 R_a 、表面残余应力 σ_r 、切削温度 T 和刀具寿命 S 的影响, 用均匀设计软件 5.0 版按最优回归子集法进行运算处理, 可得

$$\begin{aligned}
 y_1 = & 408.174 + 254.715(x_2 - 1.5) + \\
 & 1359.497(x_3 - 0.229) + 9.175A_1 - \\
 & 1.016(x_1 - 220)(x_2 - 1.5) + \\
 & 1.217(x_1 - 220)(x_4 - 0.8) - 1.129(x_1 - 220)A_1 + \\
 & 1828.061(x_2 - 1.5)(x_3 - 0.229) + \\
 & 192.125(x_3 - 0.229)A_2 + 100.412(x_4 - 0.8)A_1 - \\
 & 13.188(x_4 - 0.8)A_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_2 = & 2.237 + 0.226(x_2 - 1.5) + 12.044(x_3 - 0.229) - \\
 & 1.06(x_4 - 0.8) + 0.013A_2 - 0.0002(x_1 - 220)^2 + \\
 & 0.002(x_1 - 220)A_2 - 1.019(x_2 - 1.5)^2 + \\
 & 10.908(x_3 - 0.229)^2 - \\
 & 4.439(x_3 - 0.229)(x_4 - 0.8) - \\
 & 0.247(x_4 - 0.8)A_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_3 = & 389.362 + 2360.406(x_3 - 0.229) + \\
 & 736.609(x_4 - 0.8) + 76.563A_1 + \\
 & 0.353(x_1 - 220)(x_2 - 1.5) + 0.553(x_1 - 220)A_1 + \\
 & 66.982(x_2 - 1.5)^2 + \\
 & 470.72(x_2 - 1.5)(x_3 - 0.229) + \\
 & 5909.492(x_3 - 0.229)^2 - \\
 & 1135.879(x_3 - 0.229)A_2 - 618.341(x_4 - 0.8)^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_4 = & 556.236 - 0.4(x_1 - 220) + 6.675(x_2 - 1.5) + \\
 & 340.601A_1 + 0.024(x_1 - 220)^2 -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 0.901(x_1 - 220)(x_4 - 0.8) - 0.048(x_1 - 220)A_2 + 2.931(x_4 - 0.8)A_2 \\
& 5\,539.881(x_2 - 1.5)(x_3 - 0.229) - \\
& 230.072(x_2 - 1.5)(x_4 - 0.8) + \\
& 10\,863.581(x_3 - 0.229)^2 - 1180.658(x_4 - 0.8)^2 \\
y_5 = & 1.457 - 0.05(x_1 - 220) + 4.646(x_4 - 0.8) + \\
& 0.578A_1 + 0.001(x_1 - 220)^2 - \\
& 24.134(x_2 - 1.5)(x_4 - 0.8) - \\
& 0.594(x_2 - 1.5)A_1 - 11.193(x_2 - 1.5)A_2 - \\
& 120.544(x_3 - 0.229)^2 + 4.875(x_4 - 0.8)^2 -
\end{aligned}$$

令 $v = x_1$ 、 $a_p = x_2$ 、 $f = x_3$ 、 $r_e = x_4$ 、 $F_z = y_1$ 、 $R_a = y_2$ 、 $\sigma_r = y_3$ 、 $T = y_4$ 、 $S = y_5$ ，则有五个因变量模型，如式(2)所述，且满足以下条件

$$\begin{aligned}
& 170 \leq v \leq 280 \quad 1 \leq a_p \leq 2 \\
& 0.13 \leq f \leq 0.33 \quad 0.4 \leq r_e \leq 1.2 \\
& A_1 = 0 \quad A_2 = 0 \quad A_3 \\
& A_1 = 0 \quad A_2 = 1 \quad A_2 \\
& A_1 = 1 \quad A_2 = 0 \quad A_1
\end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{aligned}
F_z &= 408.174 + 254.715(a_p - 1.5) + 1\,359.497(f - 0.229) + 9.175A_1 - 1.016(v - 220)(a_p - 1.5) + \\
& 1.217(v - 220)(a_p - 1.5) - 1.129(v - 220)A_1 + 1\,828.061(a_p - 1.5)(f - 0.229) + \\
& 192.125(f - 0.229)A_2 + 100.412(r_e - 0.8)A_1 - 13.188(r_e - 0.8)A_2 \\
R_a &= 2.237 + 0.226(a_p - 1.5) + 12.044(f - 0.229) - 1.06(r_e - 0.8) + 0.013A_2 - 0.0002(v - 220)^2 + \\
& 0.002(v - 220)A_2 - 1.019(a_p - 1.5)^2 + 10.908(f - 0.229)^2 - 4.439(f - 0.229)(r_e - 0.8) - \\
& 0.247(r_e - 0.8)A_1 \\
\sigma_r &= 389.362 + 2\,360.406(f - 0.229) + 736.609(r_e - 0.8) + 76.563A_1 + 0.353(v - 220)(a_p - 1.5) + \\
& 0.553(v - 220)A_1 + 66.982(a_p - 1.5)^2 + 470.72(a_p - 1.5)(f - 0.229) + \\
& 5\,909.492(f - 0.229)^2 - 1\,135.879(f - 0.229)A_2 - 618.341(r_e - 0.8)^2 \\
T &= 556.236 - 0.4(v - 220) + 6.675(a_p - 1.5) + 340.601A_1 + 0.024(v - 220)^2 - \\
& 0.901(v - 220)(r_e - 0.8) - 0.048(v - 220)A_2 + 5\,539.881(a_p - 1.5)(f - 0.229) - \\
& 230.072(a_p - 1.5)(r_e - 0.8) + 10\,863.581(f - 0.229)^2 - 1\,180.658(r_e - 0.8)^2 \\
S &= 1.457 - 0.05(v - 220) + 4.646(r_e - 0.8) + 0.578A_1 + 0.001(v - 220)^2 - \\
& 24.134(a_p - 1.5)(r_e - 0.8) - 0.594(a_p - 1.5)A_1 - 11.193(a_p - 1.5)A_2 - \\
& 120.544(f - 0.229)^2 + 4.875(r_e - 0.8)^2 - 2.931(r_e - 0.8)A_2
\end{aligned} \right. \quad (2)$$

2.2 回归显著检验

对表面粗糙度 R_a 、表面残余应力 σ_r 、切削力 F_z 、切削温度 T 和刀具寿命 S 五个因变量的方差分析结果见表 3，可见五个因变量的均方与平方和的残差都很小。若取显著水平为 $\alpha = 0.03$ ，查 F 分布表则有临界值 $F_{0.03}(10,1) = 672.546$ 。表面粗糙度的 $F = 144\,807 \gg 672.546$ ，回归效果非常显著；表面残余应力的 $F = 532\,811.9 \gg 672.546$ ，回归效果非常显著；主切削力的 $F = 409\,368.3 \gg 672.546$ ，回归效果非常显著；切削温度的 $F = 545\,400.7 \gg 672.546$ ，回归效果非常显著；刀具寿命的 $F = 750.6 > 672.546$ ，回归效果显著。

3 多目标优化

3.1 优化变量

试验选用肯纳硬质合金涂层刀片，刀具商已针

表 3 方差分析结果

	来源	回归	残差	总和
平方和	F_z	213 155.0	0.1	213 155.0
	R_a	10.8	0	10.8
	σ_r	965 438.4	0.2	965 438.5
	T	150 350.4	0	150 350.4
	S	83.0	0	83.0
均方	F_z	21 315.5	0.1	—
	R_a	1.1	0	—
	σ_r	96 543.8	0.2	—
	T	15 035.1	0	—
	S	8.3	0	—
F 值	F_z	409 368.3	—	—
	R_a	144 807.0	—	—
	σ_r	53 2811.9	—	—
	T	545 400.7	—	—
	S	750.6	—	—

对不同被切材料做了大量试验研究，刀片几何角度

已针对不同被切材料的加工精度要求进行了优化设计,除刀尖半径以外的几何角度都已固定,只有刀尖半径可选。因此本试验研究将切削速度 v 、背吃刀量 a_p 、进给量 f 、刀尖半径 r_e 和冷却降温条件 A 作为优化变量,五个优化变量可看作五维欧氏空间 E^5 中的一个点,相应优化变量可表示为

$$x = (v, a_p, f, r_e, A) = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \in E^5 \quad (3)$$

3.2 目标函数

选定的精密车削参数优化目标有:切削效率 Q' 或 S' 、刀具寿命 SCL 或 S 、表面粗糙度 R_a 、表面残余应力 σ_r 、切削力 F_z 和切削温度 T 。这六个目标可表达成如下六个目标函数。

(1) 切削效率。在金属切削加工中,粗加工的效率追求目标是尽快切除毛坯余量,而精密加工的效率追求目标则是尽快形成符合技术要求的表面积。因此,粗加工的切削效率常用单位时间内切除的金属体积 Q' 作为目标函数,而精密加工的切削效率则常用单位时间内形成的表面积 S' 作为目标函数。本车削试验研究用表面切出率 S' 作目标函数

$$S' = 1000vf = f_1(v, f) = f_1(x) \quad (4)$$

切削效率优化的目标取极大值。

(2) 刀具寿命。精密车削的刀具寿命,可用切削表面积 S 作为目标函数

$$S = f \times SCL = f \sum_{i=1}^n \frac{D_{mi} \times \pi}{1000} \times \frac{l_m}{f} = f_2(v, a_p, f, r_e, A) = f_2(x) \quad (5)$$

对精密车削,在车削参数优化前就需要明确刀具能车削出多少个工件完整表面,以保证在一次车削走刀过程中不换刀,因此可将其作为约束函数。

(3) 表面粗糙度

$$R_a = f_3(v, a_p, f, r_e, A) = f_3(x) \quad (6)$$

表面粗糙度优化的目标过去一般是取极小值,但现代制造技术经济学观点,保证的工艺技术要求粗糙度即可,不必追求极小。因此,表面粗糙度也可作为约束函数。

(4) 表面残余应力

$$\sigma_r = f_4(v, a_p, f, r_e, A) = f_4(x) \quad (7)$$

表面残余应力为“正”时,属于拉应力,极易引起表面的微裂纹,而降低零件的疲劳寿命;表面残余应力为“负”时,属于压应力,非常有益于疲劳寿命的提高。但从现代制造技术经济学观点,表面残余应力在一定范围即可,因此表面残余应力也可作为约束函数。

(5) 切削力。精密车削试验检测有切削力的三个分力 F_x 、 F_y 、 F_z ,为了简化精密车削参数优化目标,本文仅选主切削力 F_z 作为目标函数

$$F_z = f_5(v, a_p, f, r_e, A) = f_5(x) \quad (8)$$

切削力的大小对工艺系统变形有较大负面影响,切削力优化目标取极小值。

(6) 切削温度

$$T = f_6(v, a_p, f, r_e, A) = f_6(x) \quad (9)$$

切削温度对工艺系统工作稳定性、切削效率和表面完整性的影响较为复杂,一般情况下车削参数优化目标应该是切削温度在一定范围内。基于本试验是高速车削,切削温度较高,切削温度优化目标取极小值。

上面六个目标函数可抽象为 $(f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x), f_5(x), f_6(x))^T$

从现代制造技术经济学角度出发考虑将 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 、 $f_4(x)$ 作为约束函数,相应目标函数可抽象为

$$(f_1(x), f_5(x), f_6(x))^T \quad (10)$$

3.3 约束函数

在精密车削优化试验中,机床功率、主轴扭矩、主轴转速、进给速度、刀具强度及几何角度、切削温度、切削冷却降温条件等因素构成参数优化的约束函数。在精密车削试验方案设计时,一部分约束已通过确定优化变量的取值范围得到体现,另一部分约束直接在数学模型中体现。约束函数可表达为

$$g_i(v, a_p, f, r_e, A) = g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

表面粗糙度、表面残余应力、刀具寿命、优化变量取值范围和车削冷却降温条件分别表达为 $g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ 、 $g_3(x)$ 、 $g_4(x)$ 、 $g_5(x)$ 。

3.4 优化数学模型

若记:优化目标函数为

$$f(x) = (f_1(x), f_5(x), f_6(x))^T$$

优化约束函数为

$$g(x) = (g_1(x), g_2(x), g_3(x), g_4(x), g_5(x))^T$$

则约束空间为 $R = \{x \in E^5 | g(x) \leq 0\}$ 。切削效率 S' 优化目标取极大值、切削力 F_z 和切削温度 T 优化目标取极小值,则精密车削参数优化模型可表达为

$$\min f(x) = \min(-f_1(x), f_5(x), f_6(x))^T \quad (12)$$

$$x \in R$$

工程实际中,由工艺技术要求给定表面粗糙度

和表面残余应力取值范围, 即 $a \leq R_a \leq b$ 、 $c \leq \sigma_r \leq d$; 刀具寿命 S 根据工程实践经验初步提出再经试切而最终确定, $S \geq eph$, e 为安全系数, 以保证刀具在正常磨损阶段工作, P 为刀具磨钝前能车削出的工件个数, h 为工件的车削表面积。约束空间可具体化为

$$R' = \left\{ \begin{array}{l} x \in R \\ \left\{ \begin{array}{l} a \leq R_a \leq b \\ c \leq \sigma_r \leq d \\ S \geq eph \\ 170 \leq v \leq 280 \\ 1.0 \leq a_p \leq 2.0 \\ 0.13 \leq f \leq 0.33 \\ 0.4 \leq r_e \leq 1.2 \\ A_1 = 0 \quad A_2 = 0 \quad A_3 \\ A_1 = 0 \quad A_2 = 1 \quad A_2 \\ A_1 = 1 \quad A_2 = 0 \quad A_1 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (13)$$

精密车削参数优化模型可转化为

$$\min(-S', F_z, T)^T \\ x \in R' \quad (14)$$

为了方便现场运用, 可将模型具体化表达为

$$\left\{ \begin{array}{l} -kS' + lF_z + mT = \min \\ a \leq R_a \leq b \\ c \leq \sigma_r \leq d \\ S \geq eph \\ 170 \leq v \leq 280 \\ 1.0 \leq a_p \leq 2.0 \\ 0.13 \leq f \leq 0.33 \\ 0.4 \leq r_e \leq 1.2 \\ A_1 = 0 \quad A_2 = 0 \quad A_3 \\ A_1 = 0 \quad A_2 = 1 \quad A_2 \\ A_1 = 1 \quad A_2 = 0 \quad A_1 \end{array} \right. \quad (15)$$

式中, k, l, m 为权系数, 可根据优化的侧重而确定具体权值。

4 优化模型验证

同样以图 1 所示试件作为验证件, 要求车削到 $\phi 60.00 \text{ mm}$, 留有车削余量 1.0 mm , 表面粗糙度控制在 $0.8 \mu\text{m} \leq R_a \leq 1.6 \mu\text{m}$ 内, 表面残余应力控制在 $80 \text{ MPa} \leq \sigma_r \leq 300 \text{ MPa}$ 内, 要求至少车削加工 50 件才能换刀。

根据上述技术要求可确定: $a = 0.8$, $b = 1.6$, $c = 80$, $d = 300$, $p = 50$, $e = 1.2$, $h = 0.046$ 。

通过调试三个权系数 k, l, m 进行优化运算, 其结果优化变量分别叙述如下。

干式车削 $A_1(193.1, 1.0, 0.21, 0.49)$, 即 $v = 193.1 \text{ m/min}$ 、 $a_p = 1.0 \text{ mm}$ 、 $f = 0.2 \text{ mm/r}$ 、 $r_e = 0.49 \text{ mm}$ 。

低温冷风微油雾车削 $A_2(216.2, 1.0, 0.23, 0.85)$, 即 $v = 216.2 \text{ m/min}$ 、 $a_p = 1.0 \text{ mm}$ 、 $f = 0.23 \text{ mm/r}$ 、 $r_e = 0.85 \text{ mm}$ 。

环保型湿式车削 $A_3(238.6, 1.0, 0.19, 0.76)$, 即 $v = 238.6 \text{ m/min}$ 、 $a_p = 1.0 \text{ mm}$ 、 $f = 0.19 \text{ mm/r}$ 、 $r_e = 0.76 \text{ mm}$ 。

因刀尖半径受尺寸系列($r_e = 0.4, 0.8, 1.2$)限制, 需圆整刀尖半径后使其固定再做预测。

最终结果优化变量分别综合如下。

干式车削 $A_1(183, 1.0, 0.22, 0.4)$ 即 $v = 183 \text{ m/min}$ 、 $a_p = 1.0 \text{ mm}$ 、 $f = 0.22 \text{ mm/r}$ 、 $r_e = 0.4 \text{ mm}$ 。

低温冷风微油雾车削 $A_2(223, 1.0, 0.21, 0.8)$, 即 $v = 223 \text{ m/min}$ 、 $a_p = 1.0 \text{ mm}$ 、 $f = 0.21 \text{ mm/r}$ 、 $r_e = 0.8 \text{ mm}$ 。

环保型湿式车削 $A_3(253, 1.0, 0.19, 0.8)$, 即 $v = 253 \text{ m/min}$ 、 $a_p = 1.0 \text{ mm}$ 、 $f = 0.19 \text{ mm/r}$ 、 $r_e = 0.8 \text{ mm}$ 。

在上述优化变量下, 六个因变量的预测结果及验证见表 4, 可见干式车削的表面切出率 $S' = 0.0677 \text{ m}^2/\text{min}$, 40.8 s 可车削完一个工件, 在刀具磨钝前可车削出 62 个工件, 建议车削出 62 个工件换刀; 低温冷风微油雾车削的表面切出率 $S' = 0.0741 \text{ m}^2/\text{min}$, 37.3 s 可车削完一个工件, 在刀具磨钝前可车削出 61 个工件, 建议车削出 61 个工件换刀; 环保型湿式车削的表面切出率 $S' = 0.0805 \text{ m}^2/\text{min}$, 34.3 s 可车削完一个工件, 在刀具磨钝前可车削 207 个工件, 建议车削出 207 个工件换刀。从表 4 还可发现预测值与验证值的误差在 15% 以内, 且表面粗糙度和表面残余应力的验证值在工艺技术要求范围内。

5 结论

(1) 均匀设计法设计的含定性因素混合水平的精密车削试验, 用最优回归子集法建立的各因变量二次回归模型, 其回归效果非常显著。

(2) 在各因变量二次回归模型基础上建立的精密车削参数优化模型, 预测误差在 15% 以内。

表 4 参数优化及验证

冷却降温条件	表面切出率 $S'/(m^2/min)$	主切削力 F_z/N		粗糙度 $R_a/\mu m$		湿度 $T/^\circ C$		应力 σ_r/MPa		面积 S/m^2	
		预测值	验证值	预测值	验证值	预测值	验证值	预测值	验证值	预测值	验证值
A_1	0.067 7	319.9	289.8	1.297	1.175	733.6	684.6	170.9	187.6	2.86	未验证
A_2	0.074 1	316.6	320.4	1.351	1.182	420.4	484.5	190.1	204.3	2.85	未验证
A_3	0.080 5	311.7	275.7	1.198	1.233	406.8	426.6	285.5	295.6	9.56	未验证

(3) 在精密车削试验参数范围内, 环保型湿式车削的刀具寿命很长, 而低温冷风微油雾车削和干式车削的刀具寿命相对较短。

(4) 在精密车削试验参数范围内, 环保型湿式车削的切削效率最高, 干式车削的切削效率最低。

(5) 在精密车削试验参数范围内, 低温冷风微油雾车削和干式车削的刀具寿命都较短, 低温冷风微油雾车削的刀具寿命影响因素值得进一步研究, 尤其是油雾微粒大小与加油量值得深入研究。

参 考 文 献

- [1] 李登万. 两种难加工材料的切削试验研究及其工艺参数优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
LI Dengwan. Researches on cutting tests and cutting parameter optimizations of two hard-to-cut materials[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [2] 李波. 空间润滑谐波减速器传动性能正交试验分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 82-87.
LI Bo. Orthogonal experiment analysis on transmission performance of space lubricated harmonic drive[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 82-87.
- [3] 李先广, 刘飞, 曹华军. 齿轮加工机床的绿色设计与制造技术[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 140-145.
LI Xianguang, LIU Fei, CAO Huajun. Green design and manufacturing technology of gear cutting machine [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 140-145.
- [4] 李登万, 陈洪涛, 甘建水, 等. 钛合金加工切削力试验研究[J]. 广西大学学报, 2010, 35(5): 733-737.
LI Dengwan, CHEN Hongtao, GAN Jianshui, et al. Test study on cutting force in titanium alloy machining[J]. Journal of Guangxi University, 2010, 35(5): 733-737.
- [5] 横川和彦, 横川宗彦. 环境にやさしい冷风加工技术[J]. 机械と工具, 1998(7): 46-56.
KAZUHIO Y, MUNEHIO Y. Environment-friendly cold blast machining technology[J]. Tools and Machinery, 1998(7): 46-56.
- [6] 李响, 李为吉, 彭程远. 基于均匀试验设计的响应面方法及其在无人机一体化设计中的应用[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(5): 575-577, 619.
LI Xiang, LI Weiji, PENG Chengyuan. Response surface methodology based on uniform design and its application to complex engineering system optimization[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(5): 575-577, 619.
- [7] 李晓燕, 张曙, 余灯广. 三维打印成形粉末配方的优化设计[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(11): 1343-1346.
LI Xiaoyan, ZHANG Shu, YU Dengguang. Optimal design of powder mixtures for three dimensional printing[J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(11): 1343-1346.
- [8] 李登万, 陈洪涛, 许明恒, 等. 基于均匀设计法的钛合金切削参数优化试验研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(5): 689-692.
LI Dengwan, CHEN Hongtao, XU Mingheng, et al. A test study of the cutting parameters optimization of titanium alloy based on uniform design method[J]. Mechanical Science and Technology, 2011, 30(5): 689-692.
- [9] CHEHARON C, GINTING A, ARSHAD H. Performance of titanium alloy Ti-6242s[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 185: 77-82.
- [10] HARTUNG P, KRAMER B. Massachusetts institute of technology[J]. Tool Wear in Titanium Machining, Annals of the CIRP, 1982, 31: 75-80.
- [11] 李忠群, 刘强. 圆角铣削颤振稳定域建模与仿真研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(7): 181-186.
LI Zhongqun, LIU Qiang. Modeling and simulation of chatter stability for circular milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(7): 181-186.
- [12] 张磊, 张志胜, 周一帆, 等. 基于半参数回归模型的制造过程加工误差流建模与分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 181-185.
ZHANG Lei, ZHANG Zhisheng, ZHOU Yifan, et al. Stream of variation modeling and analysis for manufacturing processes based on a semi-parametric regression model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 181-185.

作者简介: 李登万(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授级高工。主要研究方向为绿色制造。
E-mail: ldw@scetc.net
陈洪涛, 男, 1967 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为数控控制加工技术。
E-mail: cht@scetc.net
冯锦春, 女, 1971 年出生, 硕士, 教授。主要研究方向为设备控制技术。
E-mail: catsmiling@163.com