

7075 铝合金切削参数优化试验研究*

Test Research of the Cutting Parameters Optimizing for 7075 Aluminium Alloy

北京航空制造工程研究所

向颖 裘力博 许鹏

[摘要] 本文利用基于铣削加工动力学原理的参数测试分析和动力学仿真计算软件,研究了7075铝合金高速切削加工工艺的参数优化方法和实现过程,提出了信息采集、数据计算、参数验证过程中应注意的问题。试验表明,在稳定切削状态下,合理地选择工艺参数可以有效地提高单位时间的金属去除率。

关键词: 去除率 切削参数优化 稳定状态

[ABSTRACT] The method of optimizing the parameters of high speed machining for 7075 aluminium alloy and the process to realize it are researched through kinetic theory of parameters testing analysis and dynamics emulation software, and problems in information collecting, calculating and data validation that should be noticed are also proposed in this article. The experiments indicate that in the stable condition, the reasonable choice of cutting parameters can improve the removal rate effectively.

Keywords: Removal rate Cutting parameters optimizing Stable condition

随着飞机飞行度、机动性能要求的不断提高,飞机上开始越来越多的采用整体结构件。整体结构件尺寸大,结构复杂,精度要求高,在航空工业中得到了广泛的应用^[1]。在这些结构件中,有相当一部分为7075铝合金框类和薄壁类零件,这类零件具有高的强度和韧性,但加工时容易产生各种表面缺陷。所以加工此类铝合金通常采用高速加工,不仅能够提高生产效率,而且能获得较高的加工精度和表面完整性,并且能获得较好的能耗性,节约制造资源。但高速切削中,切削颤震影响切削质量,而选择合适的加工参数不仅能降低颤震,提高零件质量,更能成倍提高加工效率。可是切削参数的选择并没有固定的理论和依据,一般是凭经验或切削试验得出,不易找出最优方案。

针对此种情况,本文先利用基于铣削加工动力学原理参数测试分析和动力学仿真软件测试出切削参数的较优值,再用优化评估模型对其较优值进行评估,找出最优方案,并在工艺中得到了验证。

* 国防基础科研项目(B0520080056)。

1 试验条件和方案

试验材料为7075-T7351铝合金,其化学成分和机械性能分别见表1、表2。

数控加工设备为桥式龙门高速铣(型号QW25-80),其主轴最大转速为24000r/min,机床主轴功率为44kW;采用硬质合金二齿圆柱立铣刀 $\phi 16$;使用的其他仪器如图1所示,包括力锤、加速度计、电荷放大器、数据采集器和一台电脑。测得的试验信号显示结果如图2所示。

2 数据分析

试验得到机床X和Y方向的激励信号数据和加速度响应数据。这些数据是对“主轴+刀具+工件”整个切削系统进行的模态参数测试数据。在对数据进行传函分析和稳定域仿真后,获取切削力、切削转矩、切削稳定域曲线等力学信息,用于数控加工参数的优化选择,切削稳定域曲线如图3所示。

图3中,实线、虚线、点线分别代表硬质合金二齿圆柱立铣刀 $\phi 16$ 在高速铣机床上,切宽为10mm、5mm、2.5mm时候的颤震稳定域曲线。曲线下方的区域理论上认定是不易发生颤震的区域,此区域是对“主轴-刀具-工件”系统,利用设备和软件经过仿真得出。曲线下方的点为切削参数可选择参考点,应尽量把点选在切深大,转速高的位置,如B1点,旨在提高单位时间材料去除率。图3所示,点A₁、B₁、C₁是切宽为4mm时,参考稳定域曲线而选择的切削参数。点A₂、B₂、C₂是切宽为8mm时,参考稳定域曲线而选择的切削参数,依次类推。具体的值如表3。

表1 7075铝合金成分组成表^[2]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其他	Al
0.40	0.50	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	0.20	0.15	余量

表2 7075-T7351力学性能^[2]

屈服强度 / MPa	拉伸强度 / MPa	延伸率 / %
475.30	540.96	11.5

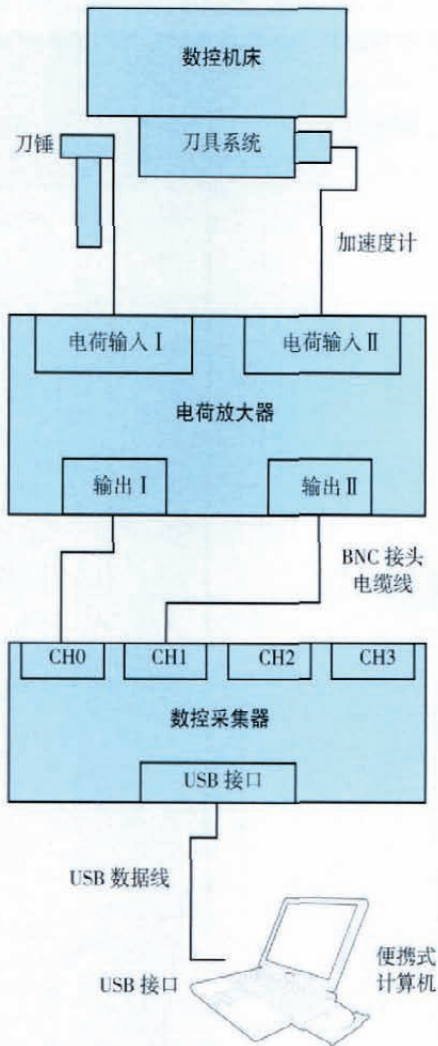


图1 实验仪器硬件结构示意图
Fig.1 Structure of instruments hardware

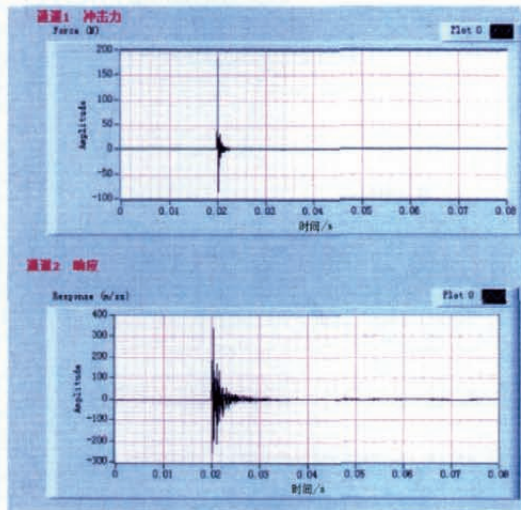


图2 试验信号显示结果
Fig.2 Experiment results

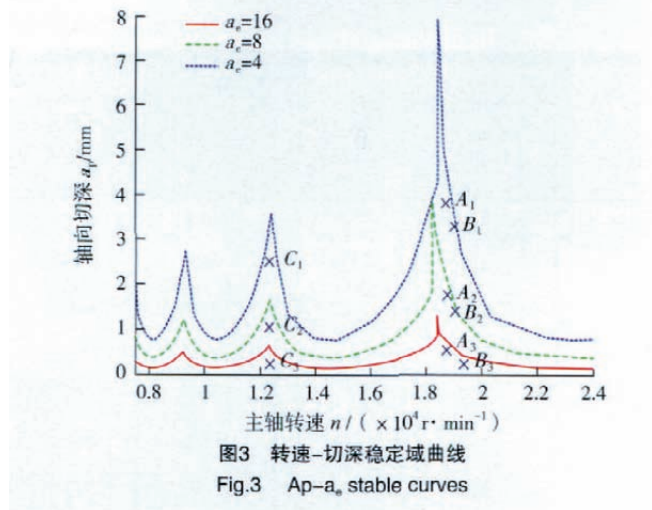


图3 转速-切深稳定域曲线
Fig.3 A_p - a_e stable curves

表3 切削参数对应值

切削参数对应点	径向切宽 a_e /mm	轴向切深 a_p /mm	主轴转速 n / ($r \cdot \min^{-1}$)
A_1	4	3	18500
B_1	4	2.5	18900
C_1	4	2	12300
A_2	8	1.5	18500
B_2	8	1.2	18900
C_2	8	0.9	12300
A_3	16	0.5	18500
B_3	16	0.3	19000
C_3	16	0.3	12300

选择以上几点切削参数，利用软件进行理论计算分析得到的主要理论数据如表4。

取 B_2 点的切削参数进行铣削加工时域仿真结果如图4。

这些点都是经试验和仿真得到的参数，只能作为实际加工的参考。由于数控加工过程受到“机床-刀具-工件”加工工艺系统中多种实际因素(如机床精度及其静态特性、工件材料及其状态、工件形状及尺寸、刀具材料及几何参数、刀具磨损、装夹方式、切削液等)及其变化的影响，同时在对“机床-刀具-工件”进行动态参数测试时，也可能由于人为因素导致误差。计算结果可能存在误差，需要经过必要验证。但仿真结果仍为实际切削参数的选择提供理论指导，并且为接下来的测评提供了数据参考，在切削试验后评测出最优值，用于实际加工。

3 切削参数优化评估

优良切削参数的标准是高效高质，并且耗费资源更低。理想的目标是，利用最低的成本将材料去除速

表4 理论数据

序号	切削参数				切削过程仿真结果			
	径向切宽 a_e /mm	轴向切深 a_p /mm	主轴转速 n / (r·min ⁻¹)	切削线速度 v / (m·min ⁻¹)	进给量		XY平面切削力峰值 $F_{xy,max}$ /N	材料去除速率 MRR / (cm ³ ·min ⁻¹)
					每齿进给量 c /mm	进给速度 f / (m·min ⁻¹)		
A_1	4	3	18500	929.91	0.1	3700	277.83	44.4
B_1	4	2.5	18900	950.02	0.1	3780	234	37.8
C_1	4	2	12300	618.27	0.1	2460	189.1	19.68
A_2	8	1.5	18500	929.91	0.1	3700	165.49	44.4
B_2	8	1.2	18900	950.02	0.1	3780	121.47	36.29
C_2	8	0.9	12300	618.27	0.1	2460	99.43	17.71
A_3	16	0.5	18500	929.91	0.1	3700	55.28	29.6
B_3	16	0.3	19000	955.04	0.1	3800	22.11	18.24
C_3	16	0.3	12300	618.27	0.1	2460	22.11	11.81

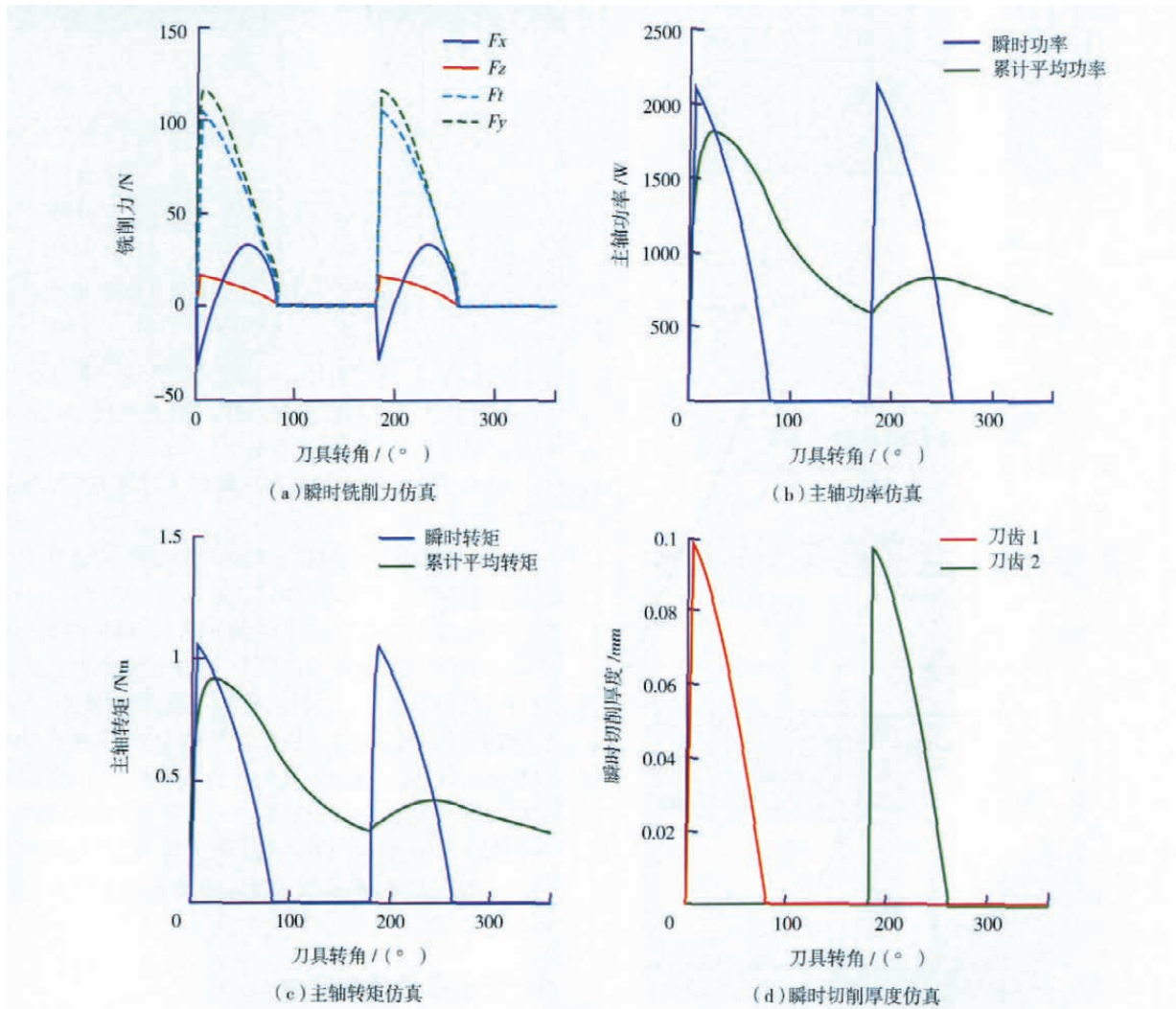


图4 时域仿真(仿真条件: $a_e=8mm$, $a_p=1.2mm$, $n=18900r/min$, $v_t=5500mm/min$)
 Fig.4 Simulation in time scale ($a_e=8mm$, $a_p=1.2mm$, $n=18900r/min$, $v_t=5500mm/min$)

率、加工精度和加工性能达到最大化。对应于切削参数上即是单位时间金属去除率（材料去除速率 $MRR [cm^3/min]$ ）、零件表面质量和切削力，故选定这 3 个因素作为状态变量，得到如公式(1)所示的切削参数评估模型。其中，材料去除率为切宽、切深、速率、主轴转速和刀齿数的乘积，它可以体现数控机床加工效率；零件表面质量可用零件表面粗糙度简化表示；切削力为切削平面的合力。

$$E = P_M(M/B_M) + P_R(B_R/R) + P_F(B_F/F) \quad (1)$$

其中， E 为期望效率损益值； P_M 、 P_R 、 P_F 为相应参数量的状态概率（参数量的重要程度，其值为 0 ~ 100%）； B_M 、 B_R 、 B_F 为相应参数量的基准值； M 为实际材料去除率，单位为 cm^3/min ； R 为实际零件表面粗糙度； F 为实际切削参数对应的切削力切削平面的合力，单位为 N。目标评估分为单项评定（目标项状态概率为 100%，其余为 0，此时 $E=1$ ，可求得相应参数量基准值 BT 、 BC 、 BQ 、 BS ）、综合评定（状态概率可按不同参数量影响程度给出，等

概率时可各取 1/4）。 E 值越大，工艺优化程度越好。

例如，对于 $\phi 16$ 的刀具，在优化前半精加工 7075 材料零件时，通常使用的切削参数为： $a_e=8mm$ ， $a_p=1.5mm$ ， $n=12000r/min$ ， $v_f=3000mm/min$ ；经测量和计算得到： $M=40cm^3/min$ ， $R=1.6$ ， $F=199.714N$ ；利用单项评定方法，算出 $B_M=40$ ， $B_R=1/6$ ， $B_F=199.714$ ；根据每个参数量的重要程度，取 $P_M=0.4$ ， $P_R=0.4$ ， $P_F=0.2$ ；给定新参数 $a_e=8mm$ ， $a_p=1.2mm$ ， $n=18900r/min$ ， $v_f=5500mm/min$ ；带入公式(1)得到： $E=0.4(53.28/40)+0.4(1.6/1.44)+0.2(199.714/190.34)=1.187>1$ 。

得出评定结论，新参数好于原参数。利用公式(1)给出的评估模型，可以对确定的工艺参数做出定量的比较性评估，从而选择出最优的工艺方案进行工件制造。

4 试验验证

表 4 所示的切削参数，经过试切试验，按照上例评定方式计算，得到结果如表 5 所示。

表5 数据评估表

序号	径向切宽 a_e/mm	轴向切深 a_p/mm	主轴转速 $n / (r \cdot min^{-1})$	XY 平面切削力峰值 F_{xy_max} / N	材料去除速率 $MRR / (cm^3 \cdot min^{-1})$	粗糙度	评定值 E
A_1	4	3	18500	277.83	44.4	0.96	1.16
B_1	4	2.5	18900	234	37.8	0.66	1.77
C_1	4	2	12300	189.1	19.68	1.02	1.20
A_2	8	1.5	18500	165.49	44.4	1.13	1.68
B_2	8	1.2	18900	121.47	36.29	0.98	2.37
C_2	8	0.9	12300	99.43	17.71	1.44	1.01
A_3	16	0.5	18500	55.28	29.6	1.57	1.41
B_3	16	0.3	19000	22.11	18.24	1.80	0.72
C_3	16	0.3	12300	22.11	11.81	1.66	0.68

现有参数评定值为 $E=1$ ，评定值大于 1 的切削参数，说明切削效果比现有参数好，可以以最优的参数代替现有切削参数。综合评定值小于 1 的参数，认为不及现有参数，在工艺中不建议选择。 B_2 参数既符合实际加工需要，又能够满足效率提高，质量提高的综合评定要求。故选择 B_2 应用在零件工艺中，实际的粗糙度和切削状况均满足要求，并且效率提高明显。

5 结论

通过上述方法对工艺参数进行优化与评测，提高了 7075 类零件的加工效率。为实际加工中最优参数的确定提供了参考。在实际评测中，不同类型的零件根据机床、零件材料、刀具等情况，评测的参数量和参数的状态

概率也不尽相同。如钛合金、高温合金难加工材料，切削温度和切削力对刀具寿命起到了关键作用。因此在评估切削参数时，应提高切削力的状态概率，增加温度作为评估因子。

在实际中，评估切削参数好坏的方法一般是凭经验和实际加工效果，但切削参数是否最优无从得知。本文从理论和实际两方面入手，通过理论测试和实际评测为切削参数选择提供理论和实践的指导。

参考文献

- [1] 裴旭明, 陈五一, 任炳义. 加工工艺对 7075 铝合金紧固孔表面形貌和组织的影响. 中国有色金属学报, 2001(8):655-660.
- [2] 黄伯云, 李成功, 石力开. 中国材料工程大典第 4 卷. 北京: 化学工业出版社, 2006. (责编 泰山)