

# AerMet100 超高强度钢拉削工艺仿真

王运<sup>1</sup>, 张昌明<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>陕西理工大学机械工程学院; <sup>2</sup>陕西省工业自动化重点实验室

**摘要:** 为更好地预测机加工中的切削力及切削温度,利用 AdvantEdge 软件对 AerMet100 超高强度钢的拉削工艺进行仿真研究,通过单因素试验法分析了不同切削参数对切削力及切削温度的影响规律。采用多元线性回归分析法对正交仿真试验数据进行分析,建立切削力及切削温度的模型公式,并利用极差分析法筛选出最优组合,对模型进行验证。结果表明:齿升量是影响切削力的主要因素,切削速度和拉刀前角次之;齿升量和切削速度也是影响切削温度的主要因素,拉刀后角对切削力及切削温度的影响较小,且建立的模型公式能较好地预测切削力及切削温度。

**关键词:** AerMet100 超高强度钢;正交试验;切削力模型;切削温度模型;极差分析

**中图分类号:** TG57;TH162

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2020.09.011

## Simulation on Broaching Process of AerMet100 Ultra-high Strength Steel

Wang Yun, Zhang Changming

**Abstract:** In order to predict machining of cutting force and cutting temperature preferably, by using AdvantEdge software for AerMet100 ultra-high strength steel broaching process simulation, through single factor experiment method, the different cutting parameters on cutting force and cutting temperature are analyzed. Multiple linear regression analysis is used to analysis the orthogonal simulation test data, and the model formulas of cutting force and cutting temperature are established, the optimal combination is selected by range analysis method and the model is verified. The results show that the tooth lift is the main factor affecting the cutting force, the cutting speed and the broach rake angle are the second. Tooth lift and cutting speed are also the main factors affecting the cutting temperature. The relief angle of broach has little influence on the cutting force and cutting temperature, and the established model formula can predict cutting force and cutting temperature much better.

**Keywords:** AerMet100 ultra-high strength steel; orthogonal test; cutting force model; cutting temperature model; range analysis

## 1 引言

AerMet100 是一种新型超高强度钢,具有强度高、硬度高、断裂韧性和抗疲劳性能好等优良的综合性能,可用来制造更轻、更小和更韧的零部件且保持其强度不变,因此被广泛应用于飞机起落架和飞机旋翼等零部件的制造<sup>[1,2]</sup>。由于 AerMet100 钢在机加工时表现出加工质量差和刀具磨损严重的特点,属于难加工材料<sup>[3]</sup>。

目前,国内外学者主要对 AerMet100 超高强度钢的组织结构、力学性能和加工表面质量等方面开展了研究, Y. Q. Xu 等<sup>[4]</sup>对 AerMet100 钢进行了磨削试验,基于瞬态热传导方程建立残余应力计算模型,分析了残余应力形成的机理;张胜男等<sup>[5]</sup>对 AerMet100 超高强度钢淬火后深冷处理,在不同温度下进行回火,研究了深冷处理及回火温度对 Aer-

Met100 超高强度钢性能的影响;王涛等<sup>[6]</sup>采用试验和数值分析的方法研究了单晶刚玉砂轮磨削 AerMet100 超高强度钢表面完整性的形成机理,通过磨削力和温度的测量试验建立数值分析模型,分析了宏观磨削区温度场和微观磨削点温度场的特征及对工艺参数的影响;孟云龙等<sup>[7]</sup>通过对 AerMet100 超高强度钢进行激光熔凝,探究了不同激光熔凝参数对 AerMet100 钢显微组织及耐磨耐腐蚀性能的影响;孙朝远等<sup>[8]</sup>对 AerMet100 超高强度钢进行了热模拟压缩试验,研究了合金在不同变形温度及应变速率下的动态再结晶变化规律,并建立了 AerMet100 钢热变形中的动态再结晶百分数模型,通过将试验值与模型计算值进行比较,验证了模型的可靠性;Walker K. F. 等<sup>[9]</sup>对激光熔覆技术修复后的 AerMet100 钢的疲劳性能进行了研究,通过定量断口形貌分析了疲劳裂纹扩展行为,并建立了非线性弹塑性分析裂缝闭合基础模型;Jie L. 等<sup>[10]</sup>对回火后的 AerMet100 钢的力学性能进行了研究,得出 AerMet100 钢的力学性能在回火温度 482℃ 时变化

较明显的结论;Wang L. D. 等<sup>[11]</sup>对 AerMet100 超高强度钢组织和力学性能与双时效工艺的关联性进行研究,分析了延长疲劳寿命和提高奥氏体稳定性的物理机理,得出了双时效工艺可延长疲劳寿命和提高断裂韧性的结论;Sundaram P. A. 等<sup>[12]</sup>研究室温下 AerMet100 钢中氢的扩散特性,得出室温下 AerMet100 中氢的扩散率为  $2.91 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$  的结论;Chhabildas L. C. 等<sup>[13]</sup>对 AerMet100 钢进行了球面冲击和圆筒膨胀试验,研究了 AerMet100 钢的抗断裂性能,并分析了断裂韧性对材料断裂和破碎过程的影响;Uluc A. V. 等<sup>[14]</sup>对淬火及时效工艺下的 AerMet100 超高强度钢的吸氢性能进行了研究,提出了快速半定量电化学方法,并分析了热处理和合金化元素对吸氢性能的影响;Huang X. 等<sup>[15]</sup>依据磨削热力耦合及烧伤测试方法研究了 AerMet100 超高强度钢磨削烧伤问题,通过正交试验建立磨削力及磨削温度回归经验模型,并分析了磨削工艺参数对磨削烧伤的影响规律;王鑫等<sup>[16]</sup>对热锻后的 AerMet100 钢利用不同的时效工艺进行热处理,研究了不同时效工艺对 AerMet100 钢回火组织及力学性能的影响;陈蓬等<sup>[17]</sup>通过对 AerMet100 超高强度钢进行激光相硬化试验,观察并分析了淬硬层的显微硬度分布及其物相变化情况。目前很少有文献涉及到对 AerMet100 超高强度钢拉削工艺的研究,因拉削加工的工件表面粗糙度低、耐用度高且拉削效率高,常用于飞机起落架等航空零部件的加工,因此对 AerMet100 超高强度钢拉削工艺的研究至关重要。

本文以 AerMet100 超高强度钢为研究对象,通过单因素试验法分析了拉刀前角、拉刀后角、齿升量和切削速度 4 个切削参数对切削力及切削温度的影响规律,设置了多因素正交试验,并根据试验数据,利用多元线性回归分析法建立切削力和切削温度的模型公式,利用极差分析法筛选出最优参数组合,并对模型公式进行验证。

## 2 工件和刀具的确定

拉刀是多齿刀具,在拉削过程中依靠拉刀上刀齿尺寸变化来切除加工余量。每个工作刀齿在拉削过程中只切削一次,并且每个刀齿所承受切削力大小和方向不断变化,为了便于分析,假定总切削力作用在某个刀齿上,故将拉刀简化为单齿模型来进行分析。

利用 AdvantEdge 软件建立拉削模型,工件长度为 6mm,高度为 4mm,工件材料为 AerMet100,其化

学成分和机械物理特性见表 1 和表 2。选取刀具材料为硬质合金钢<sup>[18]</sup>,刀具圆弧半径为 0.04mm,切削长度为 2mm,刀具表面涂层为 0.001mm 的 TiN 涂层,不添加冷却液。

表 1 AerMet100 的主要化学成分 (%)

C	Ni	Co	Cr	Mo	Si	S	Mn
0.23	11.1	13.4	3.1	1.2	≤0.1	≤0.004	≤0.05

表 2 AerMet100 的物理力学特性

抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	抗断裂韧性 ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )	硬度 (HRC)
1965	1530	126	54

## 3 单因素试验方案设计

### 3.1 单因素试验模拟参数的确定

在拉削加工过程中影响切削力和切削温度的因素较多,但当机床特征和工件材料等次要因素确定后,拉刀前角、拉刀后角、齿升量和切削速度 4 个切削参数成为影响切削力及切削温度的主要因素。设置了 9 组模拟参数进行单因素试验,研究 4 个切削参数对切削力及切削温度的影响规律,其中以序号 1、2、3 来研究齿升量对切削力及切削温度的影响,以序号 1、4、5 来研究切削速度对其影响,以序号 1、6、7 来研究拉刀后角对其影响,以序号 1、8、9 来研究拉刀前角对其影响,详细参数见表 3。

表 3 确定单因素试验模拟参数

序号	前角 $\gamma$ ( $^\circ$ )	后角 $\alpha$ ( $^\circ$ )	齿升量 $f$ (mm)	切削速度 $v_c$ (m/min)
1	6	3	0.35	120
2	6	3	0.45	120
3	6	3	0.25	120
4	6	3	0.35	60
5	6	3	0.35	180
6	6	5	0.35	120
7	6	7	0.35	120
8	2	3	0.35	120
9	10	3	0.35	120

### 3.2 单因素试验结果分析

#### (1) 切削力仿真结果与分析

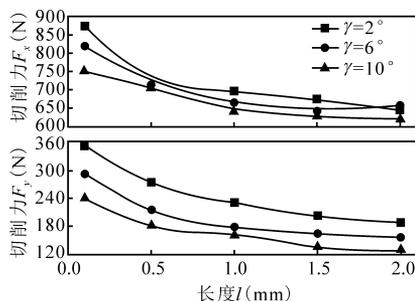
图 1a 为前角与切削力  $F_x$  和  $F_y$  的关系。可知:随着前角  $\gamma$  的增大,切削力  $F_x$  和  $F_y$  均呈下降趋势且切削力  $F_y$  变化幅度较明显。这是因为刀具前角增大,刀刃变得锋利,切削力  $F_y$  方向上刀具更易切入工件,切削变形减少<sup>[19]</sup>,切削力  $F_y$  下降快,说明前角  $\gamma$  对切削力  $F_y$  影响较大。

图 1b 为后角与切削力  $F_x$  和  $F_y$  的关系。可知:随着后角  $\alpha$  值的增大,切削力  $F_x$  无明显变化,但切削力  $F_y$  略微呈上升趋势,这是因为后角增大,切削

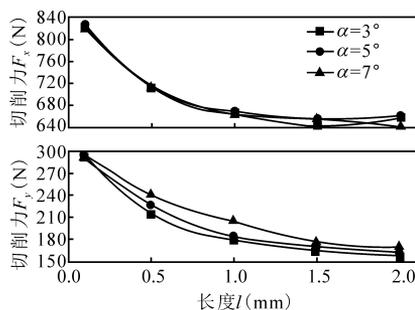
力  $F_Y$  方向上刀具不易切入工件,切削变形稍微增加,切削力  $F_Y$  略微上升,说明后角  $\alpha$  对切削力影响较小。

图 1c 为齿升量与切削力  $F_X$  和  $F_Y$  的关系。可知:随着齿升量  $f$  的增加,切削力  $F_X$  和  $F_Y$  均呈大幅增长趋势,这是因为齿升量的增加使拉削层厚度和拉削面积增加,从而导致拉削变形抗力以及工件和刀具前刀面之间的摩擦力增大,切削力  $F_X$  和  $F_Y$  均增大,说明齿升量  $f$  对切削力影响较大。

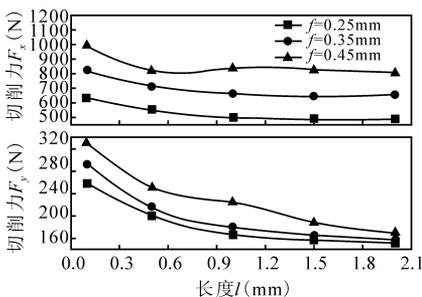
图 1d 为切削速度与切削力  $F_X$  和  $F_Y$  的关系。可知:随着切削速度  $v_c$  的增加,切削力  $F_X$  和  $F_Y$  均呈下降趋势,但趋势逐渐缓和,这是因为 AerMet100 钢传热系数小,高速拉削中产生的热量不能及时传出,引起局部高温。温度升高造成材料的热软化效应大于加工硬化效应且粘结逐渐严重<sup>[19]</sup>,切削力  $F_X$  和  $F_Y$  均下降并最终趋于稳定,说明切削速度  $v_c$  对切削力有影响。通过单因素试验法得出了不同切削参数对切削力的影响规律,该结论为正交试验参数的确定以及对切削力模型的验证提供了参考。



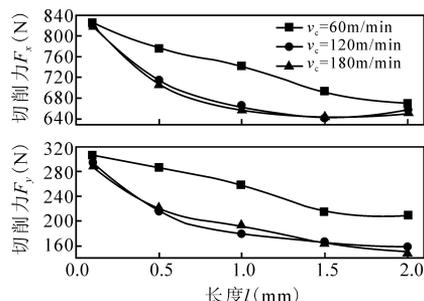
(a) 前角与切削力的关系



(b) 后角与切削力的关系



(c) 齿升量与切削力的关系



(d) 切削速度与切削力的关系

图 1 不同切削参数与切削力的关系

## (2) 切削温度仿真结果与分析

图 2a 为前角与切削温度的关系。可知:随着前角  $\gamma$  的增加,切削温度  $T$  呈先减小后增加趋势,这是因为刀具前角增大使得刀具与工件之间的挤压变小,进给抗力减小,因此切削变形和摩擦产生的热量减少,散热面积增大,排屑流畅,切削温度下降;但当前角过大时,刀具的楔角减小,散热条件变差,切削温度上升<sup>[19]</sup>,说明刀具前角对切削温度有一定影响。

图 2b 为后角与切削温度的关系。可知:随着后角  $\alpha$  值的增加,切削温度呈上升趋势并最终趋于缓和,这是因为拉刀后角增大使得切削刃强度降低且散热条件差,切削温度升高,说明拉刀后角对切削温度影响较小。

图 2c 为齿升量与切削温度的关系。可知:随着齿升量  $f$  的增加,切削温度呈现先减小后增加趋势,当齿升量  $f$  在 0.25 ~ 0.35 mm 内增加时,切削温度降低,这是因为齿升量增加使工件变形和摩擦产生热量的同时切削刃工作长度增加,改善了散热条件,切削温度降低;但当齿升量  $f$  超过 0.35 mm 时,切削温度升高,这是因为齿升量过大使工件变形较大,工件变形和摩擦产生的热量增加,热量不能及时传出,导致温度升高。

图 2d 为切削速度与切削温度的关系。可知:随着切削速度  $v_c$  的增加,切削温度呈升高趋势且变化幅度较大,这是因为切削速度的提高使单位时间内切除的金属层增多,消耗的功率增大,转化产生的热量较多,同时切屑、工件和刀具之间摩擦产生的热量增加,切削温度升高;随着拉削速度继续增加,切屑流动速度加快,大部分热量被切屑带走,切削温度升高趋势有所减缓<sup>[19]</sup>,说明切削速度对切削温度的影响较大。通过单因素试验法得出不同切削参数对切削温度的影响规律,该结论为正交试验参数的确定及对切削温度模型的验证提供了参考。

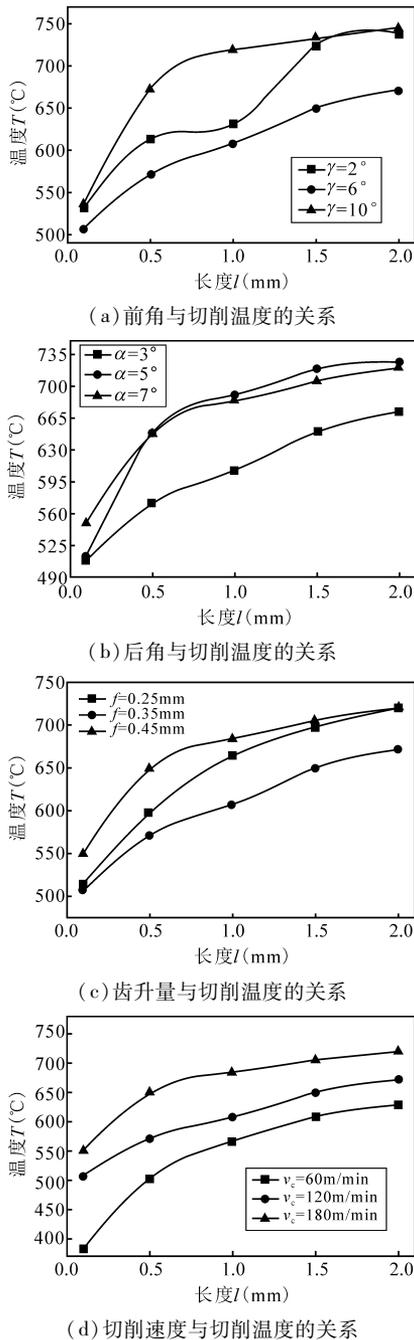


图2 不同切削参数与切削温度的关系

### 4 正交试验方案设计

#### (1) 正交试验模拟参数的确定

拉刀前角、拉刀后角、齿升量和切削速度是影响切削力及切削温度的主要因素,采用多因素正交试验法进行建模分析,探究不同切削参数对切削力及切削温度的影响主次顺序,并得出最优的参数组合。通过单因素试验的分析结论,确定了4因素、4水平的16组模拟参数,详细参数见表4。

#### (2) 切削力及切削温度建模的基本原理

在拉削工艺中,影响拉削力和切削温度的因素

较多,但当机床特征和冷却方式等次要因素确定后,拉刀前角、拉刀后角、齿升量和切削速度4个切削参数成为影响切削力及切削温度的主要因素,依据金属切削原理,切削力、切削温度与切削参数之间存在复杂的指数关系<sup>[20]</sup>,因此设本试验的切削力和切削温度模型公式为

$$F = C_0 \alpha^h \gamma^v f^k v^l \quad (1)$$

$$T = C_1 \alpha^s \gamma^t f^w v^z \quad (2)$$

式中, $C_0$ 和 $C_1$ 为常数; $\alpha$ 为拉刀后角; $\gamma$ 为拉刀前角; $f$ 为齿升量; $v$ 为切削速度; $h, j, k, l, s, t, w, z$ 为指数。

表4 正交试验模拟参数的确定

序号	前角 $\gamma$ (°)	后角 $\alpha$ (°)	齿升量 $f$ (mm)	切削速度 $v_c$ (m/min)
1	2	3	0.15	60
2	2	5	0.25	120
3	2	7	0.35	180
4	2	9	0.45	240
5	6	3	0.35	120
6	6	5	0.45	60
7	6	7	0.15	240
8	6	9	0.25	180
9	10	3	0.45	180
10	10	5	0.35	240
11	10	7	0.25	60
12	10	9	0.15	120
13	14	3	0.25	240
14	14	5	0.15	180
15	14	7	0.45	120
16	14	9	0.35	60

#### (3) 正交试验仿真结果

根据16组正交试验模拟参数,利用AdvantEdge软件对拉削过程进行仿真分析,仿真结果见表5。

#### (4) 确定切削力及切削温度公式中的常系数和指数

根据金属切削原理建立的切削力和切削温度模型公式中含有常系数 $C$ 与切削参数对应的指数,因此需要对式(1)和式(2)两边取对数,并转化为多元线性回归方程,切削力线性回归方程为

$$y_F = m_0 + m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + m_4 x_4 \quad (3)$$

切削温度线性回归方程为

$$y_T = n_0 + n_1 x_1 + n_2 x_2 + n_3 x_3 + n_4 x_4 \quad (4)$$

确定线性回归方程后,采用多元线性回归法进行拟合,将正交试验仿真结果中的数据输入SPSS软件线性回归模块中,对式(3)和式(4)进行回归分析,求得回归系数 $m_0, m_1, m_2, m_3, m_4$ 和 $n_0, n_1, n_2, n_3, n_4$ 的值,即: $m_{0x} = 1412.893, m_{0y} = 831.764, m_{1x}$

$= -0.016, m_{1y} = 0.029, m_{2x} = -0.037, m_{2y} = -0.257, m_{3x} = 0.795, m_{3y} = 0.184, m_{4x} = -0.062, m_{4y} = -0.130, n_0 = 199.526, n_1 = 0.031, n_2 = 0.013, n_3 = 0.069, n_4 = 0.223。$

反求式(1)和式(2)中各个系数,从而得到切削力模型公式和切削温度模型公式,切削力模型公式为

$$F_x = 1412.893\alpha^{-0.016}\gamma^{-0.037}f^{0.795}V^{-0.062} (R^2 = 0.995) \quad (5)$$

$$F_y = 831.764\alpha^{0.029}\gamma^{-0.257}f^{0.184}V^{-0.130} (R^2 = 0.856) \quad (6)$$

切削温度模型公式为

$$T = 199.526\alpha^{0.031}\gamma^{0.013}f^{0.069}V^{0.223} (R^2 = 0.959) \quad (7)$$

其中  $R^2$  为多元线性回归相关系数,作为评价回归方程与试验数据拟合程度的统计指标,通常  $R^2$  越接近1,拟合程度越好。由式(5)~式(7)中的  $R^2$  值可知,通过多元线性回归得出的切削力和切削温度模型公式拟合程度良好,故该模型公式可作为实际拉削过程中切削参数选取的参考。

表5 正交试验仿真结果

序号	前角 $\gamma$ (°)	后角 $\alpha$ (°)	齿升量 $f$ (mm)	切削速度 $v_c$ (m/min)
1	2	3	0.15	60
2	2	5	0.25	120
3	2	7	0.35	180
4	2	9	0.45	240
5	6	3	0.35	120
6	6	5	0.45	60
7	6	7	0.15	240
8	6	9	0.25	180
9	10	3	0.45	180
10	10	5	0.35	240
11	10	7	0.25	60
12	10	9	0.15	120
13	14	3	0.25	240
14	14	5	0.15	180
15	14	7	0.45	120
16	14	9	0.35	60

序号	切削力 $F_x$ (N)	切削力 $F_y$ (N)	切削温度 $T$ (°C)
1	373.3646	231.3858	510.8698
2	539.4912	237.5498	627.0423
3	678.4898	250.7575	690.6886
4	806.6726	249.7498	767.8859
5	699.9165	222.1598	601.5061
6	918.3649	284.6423	562.7418
7	342.0924	161.8445	719.4564
8	516.4556	178.5691	692.7341
9	798.8281	156.1072	720.1428
10	650.5222	145.9528	776.786
11	529.6897	190.0244	543.6308
12	339.4851	165.995	633.6285
13	477.6705	130.5521	756.2969
14	323.6676	144.5883	636.187
15	782.8623	138.4602	652.1968
16	663.854	176.3079	579.9159

### (5) 极差分析

将多因素正交仿真试验得出的数据按照4因素4水平标准取平均值得到极差分析表并得出相应的极差结果和极差比较,通过极差分析法得到拉刀前角、拉刀后角、齿升量和切削速度对切削力及切削温度的影响主次顺序,并筛选出最优参数组合,分别见表6~表8。

表6 切削力  $F_x$  极差分析

水平与因素	前角 (因素 A)	后角 (因素 B)	齿升量 (因素 C)	切削速度 (因素 D)
水平 1	597.50455	585.694925	344.152425	621.3183
水平 2	618.70735	605.511475	514.07675	590.438775
水平 3	577.131275	582.78355	670.695625	579.360275
水平 4	560.2636	579.616825	824.681975	562.489425
极差结果	58.44375	25.89465	480.52955	58.828875
极差比较	480.52955 > 58.828875 > 58.44375 > 25.89465			
优水平	A <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>4</sub>
优组合	A <sub>4</sub> B <sub>4</sub> C <sub>1</sub> D <sub>4</sub>			

表7 切削力  $F_y$  极差分析

水平与因素	前角 (因素 A)	后角 (因素 B)	齿升量 (因素 C)	切削速度 (因素 D)
水平 1	244.610725	189.051225	176.9534	216.0901
水平 2	213.803925	203.6833	184.42385	192.0412
水平 3	164.26985	185.52165	197.5445	184.505525
水平 4	149.727125	194.15545	213.489875	179.7748
极差结果	94.8836	14.632075	36.536475	36.3153
极差比较	94.8836 > 36.536475 > 36.3153 > 14.632075			
优水平	A <sub>4</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>4</sub>
优组合	A <sub>4</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>4</sub>			

表8 切削温度  $T$  极差分析

水平与因素	前角 (因素 A)	后角 (因素 B)	齿升量 (因素 C)	切削速度 (因素 D)
水平 1	648.87165	645.7039	622.785425	548.289575
水平 2	644.3596	648.689275	654.926025	627.093425
水平 3	666.547025	651.49315	660.97415	682.688125
水平 4	653.64915	667.5411	674.741825	755.3563
极差结果	22.187425	21.8372	51.9564	207.066725
极差比较	207.066725 > 51.9564 > 22.187425 > 21.8372			
优水平	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>
优组合	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>			

### (6) 模型验证

通过极差分析法得出最优组合及最优模拟参数,并利用 AdvantEdge 软件对拉削过程再次进行仿真。将仿真后的模拟测量值与模型的理论预测值进行对比发现,两者之间的误差较小,所以该模型公式能较好地作为拉削工艺研究提供理论依据,理论预测

值与模拟测量值比较分析见表9。

表9 理论预测值与模拟测量值比较分析

	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
理论预测值	384.592	154.499	461.939
模拟测量值	337.035	142.871	453.793
误差	14.11%	8.139%	1.795%

### (7)结果与分析

在单因素试验的分析结论下建立了多因素正交试验,并对正交试验仿真结果经多元线性回归拟合,建立切削力和切削温度模型公式,通过极差分析法得出不同切削参数对切削力、切削温度的影响主次顺序。其中齿升量、切削速度是影响切削力  $F_x$  的主要因素,拉刀前角、齿升量是影响切削力  $F_y$  的主要因素,切削速度、齿升量也是切削温度的主要影响因素,拉刀后角对切削力及切削温度的影响较小。

## 5 结语

(1)在 AdvantEdge 软件中建立拉削试验仿真模型,设置单因素仿真试验,并依据仿真结果分析不同切削参数对切削力及切削温度的影响规律,设置多因素正交仿真试验,并将仿真结果通过多元线性回归分析得出了切削力及切削温度模型公式,该模型公式能更好地预测切削力及切削温度。

(2)通过极差分析法得出了不同切削参数对切削力及切削温度影响的主次顺序,其中齿升量是影响切削力的主要因素,切削速度和拉刀前角次之;齿升量、切削速度是影响切削温度的主要因素,拉刀后角对切削力及切削温度的影响较小,所以在拉削工艺中要合理选取切削参数。

(3)通过极差分析法筛选出最优参数组合,并将最优参数利用 AdvantEdge 软件进行仿真,将仿真后的模拟测量值与模型的理论预测值进行对比,从而对模型公式进行了验证。

### 参考文献

[1]李志,赵振业. AerMet100 钢的研究与发展[J]. 航空材料学报,2006(3):265-270.

[2] Haohao Z, Rong Y, Pengle Du, et al. Notch wear prediction model in high speed milling of AerMet100 steel with bull-nose tool considering the influence of stress concentration [J]. Wear, 2018, 408-409.

[3] Desaignes J E, Lescalier C, Bomont Arzur A, et al. Experimental study of built-up layer formation during machining of high strength free-cutting steel[J]. Journal of Materials Pro-

cessing Technology, 2016, 236:204-215.

[4] Y Q Xu, T Zhang, Y M Bai. Analysis of the surface residual stress in grinding AerMet100[J]. Materials Science Forum, 2012, 704:318-324.

[5] 张胜男,程兴旺. AerMet100 超高强度钢的动态力学性能研究[J]. 材料工程, 2015, 43(12):24-30.

[6] 王涛,陈国定. 单晶刚玉砂轮磨削 AerMet100 钢磨削温度场[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7):103-109.

[7] 孟云龙,杨胶溪,张健全,等. 激光熔凝对 AerMet100 钢显微组织及性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2):358-365.

[8] 孙朝远,谢静,苗小浦,等. Aermet100 超高强度钢热变形中的动态再结晶行为研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(20):112-115.

[9] Walker K F, J M Lourenco, Sun S, et al. Quantitative fractography and modelling of fatigue crack propagation in high strength AerMet100 steel repaired with a laser cladding process[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 94:288-301.

[10] Jie L, Li-xin G, Zhi L, et al. Tempering temperature sensitivity of mechanical properties for AerMet100 steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(3):33-36.

[11] Wang L D, Jiang L Z, Zhu M, et al. Combining strength and toughness in ultrahigh strength steel [J]. Journal of Physics D (Applied Physics), 2004, 37(15):2151-2154.

[12] P A Sundaram, D K Marble. Hydrogen diffusivity in Aermet100 at room temperature under galvanostatic charging conditions [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2003, 360(1):90-97.

[13] Chhabildas L C, Reinhart W D, Kipp M E, et al. Fracture resistant properties of Aermet100 Steel [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 26(1):77-91.

[14] Uluc A V, Tichelaar F D, Terryn H, et al. The role of heat treatment and alloying elements on hydrogen uptake in Aermet100 ultrahigh-strength steel [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2015, 739:130-136.

[15] Huang X. Research on the grinding burn of the ultrahigh strength steel AerMet100 [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(9):184.

[16] 王鑫,董洪波,袁大庆,等. 时效工艺对 AerMet100 钢强韧性能的影响[J]. 材料研究学报, 2016, 30(11):819-824.

[17] 陈蓬,张建国,秦锋英. AerMet100 超高强度钢激光相变硬化研究[J]. 金属热处理, 2007(5):16-18.

[18] Coelho R T, Ng E G, Elbestawi M A. Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(2):263-272.

# 基于数字孪生技术的五轴联动坐标转换

秦秀, 张文武, 茹浩磊, 张天润, 王吉

中国科学院宁波材料技术与工程研究所; 浙江省航空发动机极端制造技术研究重点实验室

**摘要:** 针对现有坐标变换公式计算繁琐且容易出错的问题, 将数字孪生技术应用到五轴联动设备的坐标变换过程中。在 NX 软件中搭建了五轴设备的精准零部件模型, 并将模型导入 Simscape/Multibody 模块进行了多刚体物理建模。创建五轴联动设备的数字孪生模型后, 开展坐标变换仿真, 并运用公式计算验证了仿真模型的正确性。

**关键词:** 数字孪生; 五轴联动; 坐标变换

**中图分类号:** TG702; TH164; TP391.9

**文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2020.09.012

## Five-axis Coordinate Conversion Based on Digital Twin Technology

Qin Xiu, Zhang Wenwu, Ru Haolei, Zhang Tianrun, Wang Ji

**Abstract:** Aiming at the complicated and error-prone calculation of the existing coordinate transformation formula, the digital twin technology is applied to the coordinate transformation process of five-axis linkage equipment. The accurate part model of five-axis device is built in NX software, and the model is imported into Simscape/Multibody module for multi-rigid body physical modeling. The digital twin model of five-axis linkage device is created, and the coordinate transformation simulation is carried out, the simulation results are verified by formula calculation.

**Keywords:** digital twin; five axis linkage; coordinate transformation

## 1 引言

数字孪生是指针对物理世界中的实体, 通过数字化的手段来构建一个数字世界中一模一样的实体, 以模拟其在现实环境中的行为, 并对过去和现在的行为或流程进行动态呈现, 有效反映系统运行情况, 从而对不可预测的情况进行更加真实和全面的检测。

数字孪生 (Digital Twin) 的概念最早可追溯到 2003 年, 美国密歇根大学的 Michael Grieves 教授在其 PLM (产品生命周期管理) 课程上提出“与物理产品等价的虚拟数字化表达”的概念。受限于当时的

数据采集技术、数字化描述技术、计算机性能以及算法, 数字孪生概念和模型在 2003 年提出时并没有引起国内外学者们的重视。2011 年后, 数字孪生迎来了新的发展契机。2011 年, 数字孪生 (Digital Twin) 一词由美国空军研究实验室 (AFRL, Air Force Research Laboratory) 提出并希望利用数字孪生来解决战斗机机体 (Airframe) 的维护问题。

数字孪生近期得到了广泛关注。全球最具权威的 IT 研究与顾问咨询公司 Gartner 连续两年 (2016 年和 2017 年) 将数字孪生列为当年十大战略科技发展趋势之一。世界最大的武器生产商洛克希德马丁公司于 2017 年 11 月将数字孪生列为未来国防和航天工业 6 大顶尖技术之首; 2017 年 12 月 8 日中国科协智能制造学术联合体在世界智能制造大会上将数字孪生列为世界智能制造十大科技进展之一<sup>[1-5]</sup>。

**基金项目:** 宁波市科技创新 2025 项目 (2018B10059); 浙江省两化融合联合基金 (U1609208); 宁波市科技创新 2025 项目 (2019B10074); 浙江省重点研发项目 (2020C01036)  
**收稿日期:** 2020 年 3 月

[19] Saglam H, Yaldiz S, Unsacar F. The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature[J]. Materials & Design, 2007, 28(1):101-111.

[20] Chen J, Hsu W. Characterizations and models for the thermal growth of a motorized high speed spindle[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(11):1163-1170.

第一作者: 王运, 硕士研究生, 陕西理工大学机械工程学院, 723000 陕西省汉中市

First Author: Wang Yun, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723000, China

通信作者: 张昌明, 教授, 陕西理工大学机械工程学院, 723000 陕西省汉中市

Corresponding Author: Zhang Changming, Professor, School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723000, China