

# 金刚石涂层刀具铣削高硅铝合金的铣削性能试验研究

陈涤,周利平,江凡,刘小莹,彭旭

西华大学

**摘要:** 针对新型工程材料高硅铝合金的切削性能进行研究,采用金刚石涂层刀具对含硅量 50% 的高硅铝合金 CE11 进行铣削加工性能试验,通过单因素分析法和正交试验分析法得到金刚石涂层刀具铣削 CE11 的最佳铣削参数,并对其进行优化。

**关键词:** 高硅铝合金 CE11;金刚石涂层刀具;正交试验;铣削力与温度

**中图分类号:** TG501;TH140.7

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Friction Characteristics of CE11 Milling Cutter Based on High Silicon Aluminum Alloy

Chen Di, Zhou Liping, Jiang Fan, Liu Xiaoying, Peng Xu

**Abstract:** It has great significance to study the cutting performance of high silicon Aluminium alloy. The milling performance of 50% Silicon content of high Silicon Aluminium alloy CE11 is experimented with diamond coated tools. Through the single factor analysis method and the orthogonal experiment analysis method, the best milling parameters of diamond coated tool milling CE11 are obtained and optimized.

**Keywords:** high Silicon Aluminum alloy CE11; diamond coating cutter; orthogonal experiment; milling force and temperature

## 1 引言

高硅铝合金是指硅含量在 25% - 70% 的合金材料,由于其组织结构类似于硬质相硅增强颗粒分布在韧性铝基体中,决定了它具有比强度和比刚度高、密度小、热膨胀系数低、热稳定性好等特点,被广泛应用于航空航天领域;因其导热性、导电性、耐腐蚀性和耐磨性优良,则被广泛应用于电子装封领域。同时,高硅铝合金的这些性能也提高了它的切削加工难度,属于新型难加工材料。

基于正交试验法,通过金刚石涂层刀具对高硅铝合金的铣削试验,分析铣削速度、进给量  $f_z$ 、铣削宽度  $a_e$  及背吃刀量  $a_p$  对铣削力和铣削温度的影响规律,运用极差分析法分析试验数据得到最优化铣削参数组合,可提高金刚石涂层刀具铣削高硅铝合金的加工效率,为生产提供指导。

## 2 试验方案设计

试验材料为 50% 的高硅铝合金 (Si - 50% Al, 牌号 CE11), 其主要性能参数见表 1。

表 1 高硅铝合金 (Si - 50% Al) 性能参数

热膨胀系数 ( $10^{-6}/K$ )	密度 ( $g/cm^3$ )	热导率 ( $W/m \cdot K$ )	弯曲强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)
11.0	2.5	149	172	125	121

试验刀具: 金刚石涂层四刃立铣刀 (硬质合金基体), D8; 测力设备: 瑞士 Kistler 公司测力系统 (包含 9257B 型压电晶体传感器, 5070A 型电荷放大器、数据采集卡、传感线等附件) 和带有数据采集软件的工业计算机; 测温系统: Raytek 公司的 Thermo View™ Pi20 在线式红外线热成像仪, 测温范围: 200℃ - 2000℃; 数据采集处理软件为 Date Tem Pi; 加工中心型号: CNC - 1270 型 Hartford 数控加工中心。

### 2.1 试验因素与试验指标的确定

铣削加工过程中, 铣削四要素 (铣削速度、进给量  $f_z$ 、铣削宽度  $a_e$  和背吃刀量  $a_p$ ) 的确定直接影响加工零件的质量、铣削效率以及刀具寿命。确定加工刀具最优的切削参数需要大量的理论分析和试验, 为了通过较少的试验得到相对精确的试验结果, 一般采用正交试验设计方案。本次试验是 3 水平 4 因素, 所以采用  $L_9(3^4)$  正交表 (见表 2)。

表中,  $L_9(3^4)$  是正交表的记号, 9 表示所有试验组合, 4 表示有 4 个影响因素, 3 表示每个因素有 3 个不同值即水平值。用普通的方法需要做  $3^4 = 81$

基金项目: 四川省科技厅“四川省应用基础研究计划项目”(2015JY0276); 四川省大学生创新创业计划项目(201610623037); 西华大学研究生创新基金(yejj2016032)  
收稿日期: 2017年5月

组试验,比较繁琐且统计难度大,而用正交试验方法只需要 9 组试验,大大降低了试验难度。

表 2 正交表  $L_9(3^4)$

试验号	列号			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

### 2.2 试验正交表设计

试验主要研究铣削过程中铣削力的变化,以确定最优铣削方案。综合某公司对 CE11 实际加工经验及本实验室对硬质合金加工 CE11 的研究,确定刀具(直径为 8mm 的四刃铣刀)的铣削用量因素水平表(见表 3)。根据表 3 制定具体的正交试验表(见表 4)。

表 3 金刚石铣削用量因素水平表

水平	主轴转速 $n$ (r/min)	进给量 $f_z$ (mm/z)	铣削宽度 $a_e$ (mm)	背吃刀量 $a_p$ (mm)
1	2500	0.1	3	3
2	3500	0.12	4	4
3	4500	0.14	5	5

表 4 金刚石刀具正交实验方案设计

试验序号	主轴转速 $n$ (r/min)	进给量 $f_z$ (mm/z)	铣削宽度 $a_e$ (mm)	背吃刀量 $a_p$ (mm)
1	2500	0.1	3	3
2	2500	0.12	4	4
3	2500	0.14	5	5
4	3500	0.1	4	5
5	3500	0.12	5	3
6	3500	0.14	3	4
7	4500	0.1	5	4
8	4500	0.12	3	5
9	4500	0.14	4	3

### 2.3 单因素试验设计

为了分析单一因素的变化对试验结果的影响,进一步研究高硅铝合金铣削原理,制定了单因素试验方案。

①主轴转速  $n$  的影响分析:其它三个因素保持定值不变,主轴转速分别取 2500、3500、4500r/min(见表 5)。

②进给量  $f_z$  的影响分析:其它三个因素保持定值不变,进给量分别取 0.1、0.12、0.14mm/z(见表 6)。

③铣削宽度  $a_e$  的影响分析:其它三个因素保持定值不变,铣削宽度分别取 3、4、5mm(见表 7)。

④背吃刀量  $a_p$  的影响分析:其它三个因素保持定值不变,背吃刀量分别取 3、4、5mm(见表 8)。

表 5 主轴转速单变量试验设计

主轴转速 $n$ (r/min)	进给量 $f_z$ (mm/z)	铣削宽度 $a_e$ (mm)	背吃刀量 $a_p$ (mm)
2500	0.12	4	4
3500			
4500			

表 6 进给量单变量试验设计

主轴转速 $n$ (r/min)	进给量 $f_z$ (mm/z)	铣削宽度 $a_e$ (mm)	背吃刀量 $a_p$ (mm)
3500	0.1	4	4
	0.12		
	0.14		

表 7 铣削宽度单变量试验设计

主轴转速 $n$ (r/min)	进给量 $f_z$ (mm/z)	铣削宽度 $a_e$ (mm)	背吃刀量 $a_p$ (mm)
3500	0.12	3	4
		4	
		5	

表 8 背吃刀量单变量试验设计

主轴转速 $n$ (r/min)	进给量 $f_z$ (mm/z)	铣削宽度 $a_e$ (mm)	背吃刀量 $a_p$ (mm)
3500	0.12	4	3
			4
			5

对以上 12 组试验结果进行单因素分析,由于温度均不高于 200℃,对铣削材料的影响都不是很大,因此只对切削力进行分析。测得的单因素试验结果见表 9。

表 9 单因素分析

序号	$n$	$f_z$	$a_e$	$a_p$	$F_x$	$F_y$	$F_z$
1	2500	0.12	4	4	149.1	67.74	59.47
2	3500	0.12	4	4	155.8	66.69	64.49
3	4500	0.12	4	4	164.9	61.09	64.02
4	3500	0.1	4	4	134.5	57.90	53.46
5	3500	0.12	4	4	155.3	66.23	64.04
6	3500	0.14	4	4	177.7	73.40	72.40
7	3500	0.12	3	4	127.2	34.78	48.13
8	3500	0.12	4	4	154.4	66.08	63.89
9	3500	0.12	5	4	173.6	100.7	73.67
10	3500	0.12	4	3	116.6	48.22	44.96
11	3500	0.12	4	4	154.6	67.09	58.47
12	3500	0.12	4	5	220.2	40.22	89.15

## 3 试验结果与分析

### 3.1 单因素试验分析

表 5 中 1、2、3 组数据只改变转速,其它三因素

保持不变,主要研究主轴转速对切削力的影响。根据试验测得的结果绘制随着转速变大铣削力的变化趋势(见图1)。从图中可以看出,随着转速的增大,铣削力变化不大,可知,主轴转速对铣削力的影响不大。

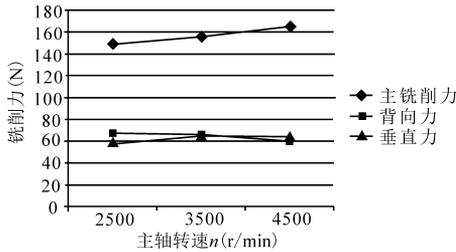


图1 主轴转速对铣削力的影响

表6中4、5、6组数据只改变进给量,其它三因素保持不变,主要研究了进给量对铣削力的影响。根据试验测得的结果绘制随着进给量变大铣削力变化的趋势(见图2)。

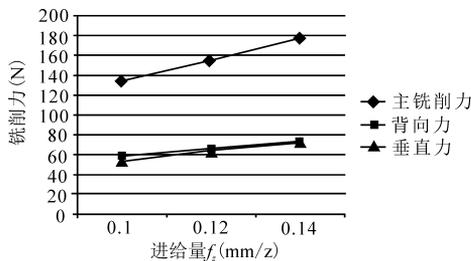


图2 进给量对铣削力的影响

从图中可以看出,随着进给量的增大,铣削力增大,其中主铣削力的增加幅度最大。可以得出,进给量对铣削力影响很大,尤其对主铣削力的影响最大。

表7中7、8、9组数据只改变铣削宽度,其它三因素保持不变,主要研究了铣削宽度对切削力的影响。根据试验测得的结果,绘制了随着铣削宽度变大铣削力变化的趋势(见图3)。

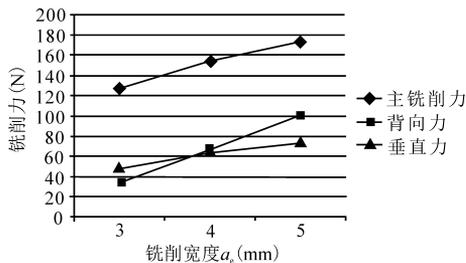


图3 铣削宽度对铣削力的影响

从图中可以看出,随着铣削宽度的增大,铣削力增大,背向力几乎增加了2倍。可以得出,铣削宽度对切削力的影响都很大,尤其是背向力。

表8中10、11、12组数据只改变背吃刀量,其它三因素保持不变,主要研究背吃刀量对切削力的影响。

根据试验测得的结果绘制随着背吃刀量变大铣削力变化的趋势(见图4)。从图中可以看出,随着背吃刀量的增大,主铣削力、垂直力都在增大,主铣削力几乎增加了100N。可以得出,背吃刀量对主铣削力的影响很大。

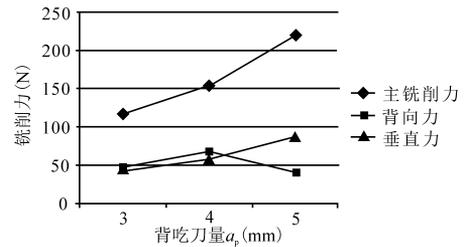


图4 背吃刀量对铣削力的影响

综上所述,本次试验进行了金刚石涂层刀具单因素研究,分析了每个因素对铣削力的影响,其中进给量和铣削宽度对主铣削力影响较大,铣削宽度对铣削力起最主要影响作用。

### 3.2 正交结果与分析

正交试验结果见表10, $n$ 为主轴转速, $f_z$ 为进给量, $a_e$ 为铣削宽度, $a_p$ 为背吃刀量, $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 分别为主铣削力、背向力和垂直力, $T$ 为铣削温度。

表10 金刚石刀具正交试验结果

试验号	$n$	$f_z$	$a_e$	$a_p$	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$T$
1	2500	0.1	3	3	81.69	23.94	28.39	103
2	2500	0.12	4	4	148.5	68.2	62.93	106
3	2500	0.14	5	5	235.00	146.5	113.8	149
4	3500	0.1	4	5	165.1	72.19	73.36	140
5	3500	0.12	5	3	129.8	76.86	53.36	170
6	3500	0.14	3	4	144.5	40.06	55.43	100
7	4500	0.1	5	4	159.0	86.36	65.11	170
8	4500	0.12	3	5	164.3	40.98	63.63	140
9	4500	0.14	4	3	139.2	48.56	52.03	120

针对采集到的正交试验数据,运用极差法对各个因素进行分析,选出对铣削力和温度影响大的因素,综合出最优加工方案(见表11-表14)。

表11 主铣削力  $F_x$  分析计算

因素	A (转速)	B (进给量)	C (铣削宽度)	D (背吃刀量)	
$F_x$	$K_1$	465.19	405.79	390.40	350.69
	$K_2$	439.4	442.60	452.8	452.00
	$K_3$	462.5	518.70	523.8	564.40
	$k_1$	155.06	135.26	130.13	113.90
	$k_2$	154.16	147.53	150.93	150.67
	$k_3$	154.17	172.90	174.6	188.13
	极差 $R$	0.89	37.64	44.47	74.23
因素主→次	D C B A				
优方案	D1C1B1A1( $X$ 方向力越小越好)				

表 12 背向力  $F_y$  分析计算

因素		A (转速)	B (进给量)	C (铣削宽度)	D (背吃刀量)
$F_y$	$K_1$	238.64	182.49	104.98	149.36
	$K_2$	189.11	186.04	188.95	194.62
	$K_3$	175.9	235.12	309.25	259.67
	$k_1$	79.54	60.83	34.99	49.79
	$k_2$	63.04	62.01	62.98	64.87
	$k_3$	58.63	78.37	103.08	86.56
	极差 $R$	20.91	17.54	68.09	36.77
	因素主→次	C D A B			
优方案	C1 D1 A3 B1 (Y方向力越小越好)				

表 13 垂直力  $F_z$  分析计算

因素		A (转速)	B (进给量)	C (铣削宽度)	D (背吃刀量)
$F_z$	$K_1$	205.12	166.86	147.45	133.78
	$K_2$	182.15	179.92	188.32	183.47
	$K_3$	180.77	221.26	232.27	250.52
	$k_1$	68.37	55.62	49.15	44.59
	$k_2$	60.72	59.97	62.77	61.16
	$k_3$	60.26	73.75	77.42	83.51
	极差 $R$	8.11	17.54	28.27	38.92
	因素主→次	D C B A			
优方案	D1 C1 B1 A3 (Z方向力越小越好)				

表 14 温度  $T$  分析计算

因素		A (转速)	B (进给量)	C (铣削宽度)	D (背吃刀量)
$F_z$	$K_1$	358	413	343	393
	$K_2$	410	416	366	376
	$K_3$	430	369	489	429
	$k_1$	119.33	137.67	114.33	131.00
	$k_2$	136.67	138.67	122.00	125.33
	$k_3$	143.33	123.00	163.00	143.00
	极差 $R$	24.00	15.67	48.67	17.67
	因素主→次	C A D B			
优方案	C1A1D2B3 (T未超过200℃,温度越大越好)				

通过计算极差确定因素的主次顺序得到表 15。

表 15 初选优化方案

	主→次	初选最优
$F_x$	D C B A	D1C1B1A1
$F_y$	C D A B	C1D1A3B1
$F_z$	D C B A	D1C1B1A3
$T$	C A D B	C1A1D2B3

综合平衡选取最优生产条件如下:

因素 A(转速):对几个指标的影响都不大,对  $T$  影响较大,但是整个试验温度都很低。考虑到实际生产中温度稍高更有利于铣削加工,故选取  $A_3$ 。

因素 B(进给量):对三个方向的力都有影响,但不起主要作用,为了提高加工效率,选取  $B_3$ 。

因素 C(切削宽度):对  $Y$  方向的力和温度起主要作用,对  $X$ 、 $Z$  方向的力影响也很大。 $Y$  方向的力

为背向力,作用于刀具径向。综合考虑选取较小的参数,故选取  $C_1$ 。

因素 D(背吃刀量):对  $X$  方向的力和垂直方向的力起主要作用,故选取  $D_1$ 。

通过综合分析平衡后,直径为 8mm 的金刚石涂层刀具四刃立铣刀加工 CE11 的最优切削用量参数组合为 A3B3C1D1。即主轴转速  $n = 4500\text{r/min}$ 、铣削宽度  $a_e = 3\text{mm}$ 、背吃刀量  $a_p = 3\text{mm}$ 、进给量  $f_z = 0.14\text{mm/z}$ 。

## 4 结语

(1)综合单因素分析法与正交试验分析法的结果,可得出结论:铣削宽度和背吃刀量对主铣削力起最主要的影响作用,因此铣削宽度和背吃刀量应尽可能取最小。

(2)在铣削过程中,主轴转速对铣削力的影响不大,对温度的影响较大,且温度均不超过  $200^\circ\text{C}$ 。由于金刚石涂层刀具具有耐高温、高强度和高硬度的特性,主轴转速应尽可能大,以提高加工效率。

(3)由两个试验分析结果可知,虽然进给量对铣削力有影响,但都不起主要影响作用。在单因素分析中,进给量影响最大的是主切削力,但增加不到 50N,因此进给量在一定范围内应取大一点。

(4)在给定的铣削四要素的用量范围内,金刚石涂层四刃立铣刀(硬质合金基体)铣削含硅量 50% 的高硅铝合金 CE11 的最优铣削参数组合为:主轴转速  $n = 4500\text{r/min}$ ,进给量  $f_z = 0.14\text{mm/z}$ ,铣削宽度  $a_e = 3\text{mm}$ ,背吃刀量  $a_p = 3\text{mm}$ 。

## 参考文献

- [1]甘卫平,陈招科,杨伏良,等.高硅铝合金轻质电子封装材料研究现状及进展[J].材料导报,2004,18(6):79-82.
- [2]王和照,朱万玉,张庆远.金刚石薄膜涂层刀具切削性能研究[J].微细加工技术,1997(3):70-74.
- [3]杨小璠,李友生,鄢国洪,等.金刚石涂层刀具铣削高硅铝合金的性能研究[J].工具技术,2012,46(5):7-10.
- [4]刘东,陈五一.硅铝合金车削中切削力和切削温度的研究[J].有色金属,2006,58(1):39-41.
- [5]周晓辉.高硅铝合金 CE11 铣削加工的切削性能研究[D].成都:西华大学,2016.
- [6]苏均和.试验设计[M].上海:上海财经大学,2005.

第一作者:陈涤,硕士研究生,西华大学机械工程学院,610039 成都市

First Author: Chen Di, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China