

TiAlN 涂层铣刀铣削 CE11 高硅铝合金的刀具磨损分析

余宗宁,周利平,刘晓莹,陈涤

西华大学

摘要: 在分析高硅铝合金切削摩擦磨损特性的国内外研究现状基础上,以正交试验法为基础,利用 DEFORM 3D 有限元仿真软件对 TiAlN 涂层铣刀铣削 CE11 高硅铝合金的铣削过程进行虚拟仿真分析,研究铣削用量的改变对刀具磨损的影响规律。基于仿真试验结果,对 TiAlN 涂层刀具铣削高硅铝合金的铣刀磨损量试验数据进行极差分析,优选出最小磨损量的最佳切削用量方案,并通过试验验证仿真结果的正确性。

关键词: 高硅铝合金;TiAlN 涂层铣刀;仿真;摩擦磨损

中图分类号: TG714;TH161

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.011

Tool Wear Analysis of TiAlN Coated Milling Cutter in High Silicon Aluminum Alloy CE11

Yu Zongning, Zhou Liping, Liu Xiaoying, Chen Di

Abstract: On the basis of current domestic and foreign research status of the friction and wear of cutting high silicon aluminum alloy, the milling process of high silicon aluminum alloy CE11 with TiAlN coated milling cutter is analyzed by the finite element simulation software DEFORM 3D based on the orthogonal experiment method. The effects of milling parameters on tool wear are studied. According to the results of simulation experiment, the range analysis is made on the experimental data of milling cutter wear in cutting high silicon aluminum alloy by TiAlN coated tools, and the best cutting parameter scheme is selected. The correctness of the simulation results is verified by experiments.

Keywords: high silicon aluminum alloy; TiAlN coated milling cutter; simulation; friction and wear

1 引言

高硅铝合金作为一种新型合金材料,具有导电性好、密度小、热膨胀系数低、化学性质稳定和力学性能优越等优点^[1],广泛应用于飞机、高铁、军事、电子、汽车及化学工业等领域。但随着硅含量的不断增加,硅颗粒含量也明显增加,使摩擦增大,而且高硅铝合金塑性差且脆性强,很难加工成形^[2],此外,加工时易产生粘结,对刀具产生磨损。因此,对其进行切削原理和摩擦机理等方面的研究具有重要意义。

近年来,日本的 Hiromichi Yoshikawa 等^[3]运用 CVD(化学气相沉积)金刚石涂层刀片对高硅铝合金进行切削试验,研究切削过程中刀具的磨损情况,确定了延长刀具使用寿命的方法;哈尔滨工业大学的胡富强等^[4]采用超声电火花复合加工技术对高硅铝合金材料表面进行探究,对加工表面进行了显微硬度、耐磨性、耐腐蚀性和元素分析等。

国内外关于高硅铝合金(含硅量在 50% 以上)的切削摩擦磨损特性的研究很少,特别是用切削性能更好的涂层刀具对高硅铝合金进行切削的摩擦磨损特性的研究就更少了。因此,对涂层铣刀铣削高硅铝合金的摩擦磨损特性进行研究具有重要意义。本文对 TiAlN 涂层铣刀在不同加工参数下铣削高硅铝合金进行有限元模拟仿真,分析其磨损特性,为在实际加工中合理选择切削 CE11 高硅铝合金的切削参数提供参考。

2 高硅铝合金的物理性能

英国 Osprey 公司研制出可控制热膨胀系数的高硅铝合金,将其命名为 CE(Controlled Expansion)合金,其性能参数见表 1。

表 1 CE11 高硅铝合金性能

材料名称	化学成分	密度 (g/cm ³)	热膨胀系数 25-100℃ (×10 ⁻⁶ /K)	热导率 (W/(m·K))
CE11 高硅 铝合金	Al-50%Si	2.50	11.0	149
材料名称	弯曲强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比
CE11 高硅 铝合金	172	125	121	0.25

基金项目: 四川省科技厅应用基础研究计划(2015JY0276);西华大学重点科研基金(Z1020212);四川省教育厅自然科学重点研究项目(18ZA0454)

收稿日期: 2018年8月

CE11 高硅铝合金是一种新型材料,可通过 DEFORM 3D 软件自定义模块建立 J-C 模型。Johnson-Cook 材料模型可表示为

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left(1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left(1 - \frac{\theta - \theta_t}{\theta_m - \theta_t} \right)^m \quad (1)$$

式中, A 为准静态条件下的初始屈服应力, $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ 为准静态参考应变率; $\bar{\epsilon}$ 为等效塑性应变率; $\bar{\epsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变; B 、 n 为应变硬化参数, 其中, B 为应变硬化模量, n 为材料硬化指数; C 为应变强化参数; θ_t 、 θ_m 分别为常温参考温度、材料熔点温度, 也可写成 T_r 与 T_m , 其中, m 为材料软化系数。

3 摩擦试验方法

3.1 刀—屑摩擦系数计算方法

运用有限元分析技术研究 TiAlN 涂层铣刀在铣削加工过程中的磨损特性, 必须获得 TiAlN 涂层铣刀在不同铣削参数下的摩擦系数。本文通过测试铣削过程中铣刀的主切削力和切深抗力计算刀—屑摩擦系数^[5]。铣削受力分析见图 1。同时, 通过切削力与角度的关系(见图 2)最终可以得出摩擦系数 μ 的计算公式为

$$\mu = \frac{F_c \sin \gamma_0 + F_p \cos \gamma_0}{F_c \cos \gamma_0 - F_p \sin \gamma_0} \quad (2)$$

式中, F_c 为主切削力; F_p 为切深抗力; γ_0 为刀具前角。

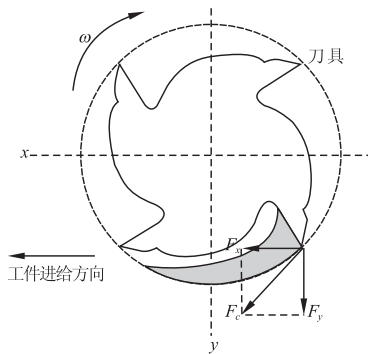


图 1 铣削受力分析

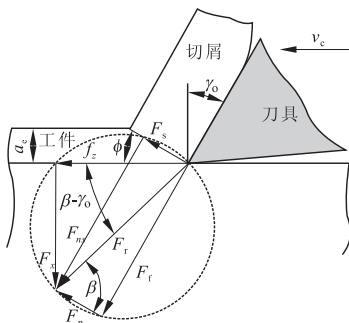


图 2 切削力与角度的关系

3.2 摩擦试验方案

试验主要研究主轴转速、进给量、铣削宽度和背吃刀量对刀具摩擦系数的影响。结合前期相关研究工作^[6,7]以及企业实际加工经验, 在进行多次试验后确定出各切削参数用量(见表 2)。

表 2 TiAlN 铣刀铣削用量因素水平

试验编号	主轴转速 n (r/min)	每齿进给量 f_z (mm/z)	铣削宽度 a_e (mm)	背吃刀量 a_p (mm)
1	1800	0.08	2	2
2	2600	0.10	2.5	2.5
3	3400	0.12	3	3
4	4200	0.14	3.5	3.5

采用正交试验设计, 根据表 2 的各参数用量得出 TiAlN 涂层铣刀正交试验设计方案, 见表 3。

表 3 TiAlN 涂层铣刀正交试验设计

试验编号	主轴转速 n (r/min)	每齿进给量 f_z (mm/z)	铣削宽度 a_e (mm)	背吃刀量 a_p (mm)
1	1800	0.08	2	2
2	1800	0.10	2.5	2.5
3	1800	0.12	3	3
4	1800	0.14	3.5	3.5
5	2600	0.08	2.5	3
6	2600	0.10	2	3.5
7	2600	0.12	3.5	2
8	2600	0.14	3	2.5
9	3400	0.08	3	3.5
10	3400	0.10	3.5	3
11	3400	0.12	2	2.5
12	3400	0.14	2.5	2
13	4200	0.08	3.5	2.5
14	4200	0.10	3	2
15	4200	0.12	2.5	3.5
16	4200	0.14	2	3

3.3 试验数据采集

在 PL700A 加工中心上进行试验, 搭建如图 3 所示的摩擦试验平台。测力系统为瑞士 Kistler 公司 5070A 型多通道电荷放大器和 9257B 型三向多功能压电晶体传感器, 工件为 Osprey Metal 公司 CE 系列的 CE11 高硅铝合金, 选用直径为 10mm 的 TiAlN 涂层四刃立铣刀。用安装好的测力系统测试 X、Y、Z 方向的铣削力, 分别为 F_x 、 F_y 、 F_z 。主切削力 F_c 为 F_x 、 F_y 的合力, 切深抗力 $F_p = F_z$ 。

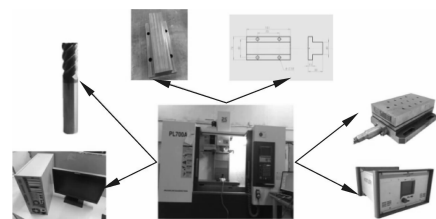


图 3 摩擦试验平台

图4为利用DynaWare Type软件记录的铣削力,表4为铣削力的采集及计算结果。

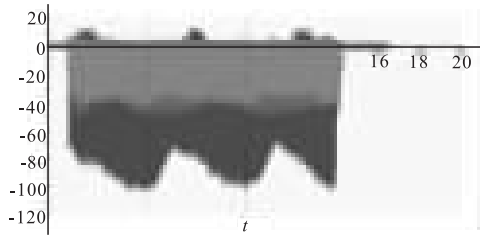


图4 铣削力曲线(未过滤)

表4 TiAlN 涂层铣刀正交试验结果

试验序号	主轴转速 n (r/min)	每齿进给量 f_z (mm/z)	铣削宽度 a_e (mm)
1	1800	0.08	2
2	1800	0.10	2.5
3	1800	0.12	3
4	1800	0.14	3.5
5	2600	0.08	2.5
6	2600	0.10	2
7	2600	0.12	3.5
8	2600	0.14	3
9	3400	0.08	3
10	3400	0.10	3.5
11	3400	0.12	2
12	3400	0.14	2.5
13	4200	0.08	3.5
14	4200	0.10	3
15	4200	0.12	2.5
16	4200	0.14	2

试验序号	背吃刀量 a_p (mm)	主切削力 F_c (N)	切深抗力 F_p (N)	摩擦系数 μ
1	2	14.23	2.015	0.2504
2	2.5	19.24	4.405	0.3423
3	3	32.48	13.25	0.5360
4	3.5	50.30	16.95	0.4583
5	3	22.57	4.536	0.3127
6	3.5	25.86	5.957	0.3438
7	2	23.28	10.38	0.5781
8	2.5	30.62	11.17	0.4886
9	3.5	32.53	9.076	0.3957
10	3	29.87	10.38	0.4367
11	2.5	21.28	5.422	0.3698
12	2	12.79	2.575	0.3131
13	2.5	21.67	8.115	0.4992
14	2	21.03	3.889	0.2958
15	3.5	35.21	11.12	0.4354
16	3	28.10	4.484	0.2692

4 仿真结果与分析

4.1 正交仿真结果

按表3中的正交试验方案以及将表4中的摩擦系数 μ 值代入DEFORM 3D软件进行仿真。每组数据模拟铣削的长度为4mm,得到各组数据刀具的磨

损量。部分仿真结果见图5,数据整理后得到仿真结果见表5。

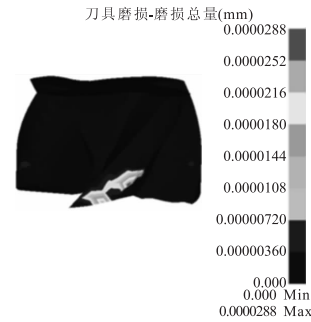


图5 铣刀磨损量

表5 TiAlN 涂层铣刀正交试验结果

试验序号	主轴转速 n (r/min)	每齿进给量 f_z (mm/z)	铣削宽度 a_e (mm)	背吃刀量 a_p (mm)	磨损量 (mm)
1	1800	0.08	2	2	0.0000288
2	1800	0.10	2.5	2.5	0.0000325
3	1800	0.12	3	3	0.0000331
4	1800	0.14	3.5	3.5	0.0000346
5	2600	0.08	2.5	3	0.0000419
6	2600	0.10	2	3.5	0.0000413
7	2600	0.12	3.5	2	0.0000422
8	2600	0.14	3	2.5	0.0000437
9	3400	0.08	3	3.5	0.0000515
10	3400	0.10	3.5	3	0.0000521
11	3400	0.12	2	2.5	0.0000496
12	3400	0.14	2.5	2	0.0000489
13	4200	0.08	3.5	2.5	0.0000598
14	4200	0.10	3	2	0.0000592
15	4200	0.12	2.5	3.5	0.0000574
16	4200	0.14	2	3	0.0000587

4.2 仿真结果分析

采用极值法对表5的仿真结果进行分析,结果见表6。由表可知:对TiAlN涂层铣刀磨损量影响最大的铣削参数是因素A(主轴转速),其次是因素C(铣削宽度)。随着主轴转速的增加,磨损量明显增加;铣削时磨损量最小的一组铣削参数组合是:主轴转速 $n = 1800\text{r/min}$,每齿进给量 $f_z = 0.08\text{mm/z}$,铣削宽度 $a_e = 2\text{mm}$,背吃刀量 $a_p = 2\text{mm}$ 。

5 试验验证

5.1 试验方案设计

试验主要验证仿真磨损量与试验磨损量变化规律是否一致,故只验证随着主轴转速的增加,加工5m距离时磨损量的变化情况,因此验证试验方案见表7。试验结束后应用MM-8C金相显微镜对前后刀面的磨损深度进行测量。

表6 TiAlN 涂层铣刀正交仿真试验磨损量结果分析

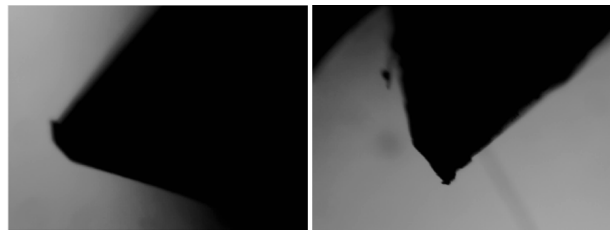
因素		A (主轴转速)	B (进给量)	C (铣削宽度)	D (背吃刀量)
磨损量 (mm)	K_1	0.0001290	0.0001820	0.0001784	0.0001792
	K_2	0.0001691	0.0001851	0.0001807	0.0001856
	K_3	0.0002021	0.0001823	0.0001875	0.0001858
	K_4	0.0002351	0.0001857	0.0001887	0.0001848
	k_1	0.0000323	0.0000455	0.0000446	0.0000448
	k_2	0.0000423	0.0000463	0.0000452	0.0000464
	k_3	0.0000505	0.0000456	0.0000469	0.0000465
	k_4	0.0000588	0.0000464	0.0000472	0.0000462
	极差 R	0.0001061	0.0000030	0.0000103	0.0000066
	因素主 →次	A C D B			
最优方案	A ₁ C ₁ D ₁ B ₁ (磨损量越小越好)				

表7 TiAlN 涂层铣刀磨损试验方案

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	1800	0.08	2	2
2	1800	0.14	3.5	3.5
3	2600	0.08	2.5	3
4	2600	0.14	3	2.5
5	3400	0.08	3	3.5
6	3400	0.14	2.5	2
7	4200	0.08	3.5	2.5
8	4200	0.14	2	3

5.2 试验数据采集及对比

图6为通过金相显微镜得出各组铣刀试验后的其中一组图片。将数据采集得到的数据与仿真值对比,见表8及图7。



(a) 磨损前 (b) 磨损后

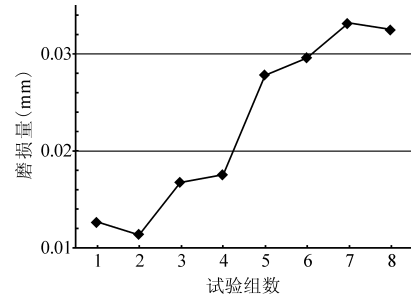
图6 TiAlN 涂层铣刀磨损前后对比

表8 TiAlN 涂层铣刀试验值与仿真值对比

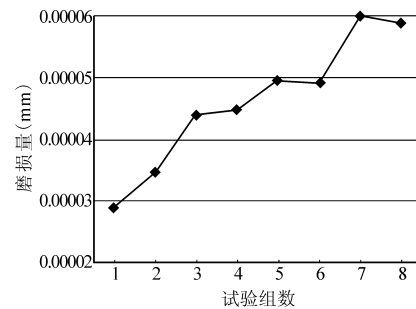
试验编号	试验值(mm)	仿真值(mm)
1	0.0126	0.0000288
2	0.0113	0.0000346
3	0.0167	0.0000439
4	0.0175	0.0000447
5	0.0277	0.0000495
6	0.0296	0.0000489
7	0.0331	0.0000598
8	0.0324	0.0000587

从试验与仿真的结果可以看出,随着主轴转速的增大,磨损量呈两两阶梯性增加。TiAlN 涂层铣

刀磨损试验和仿真试验的磨损量变化规律一致,且都是随着主轴转速的增加磨损量也随之增加,并且仿真与磨损试验的磨损位置也基本一致。此外,TiAlN 涂层铣刀的刃尖出现明显的磨损,涂层材料出现了部分脱落,但无明显的粘结现象,说明 TiAlN 涂层铣刀具有良好的润滑性。



(a) 试验曲线



(b) 仿真曲线

图7 TiAlN 涂层铣刀磨损量随转速的变化

6 结语

(1)由正交试验分析结果可以得出主轴转速对铣刀的磨损影响最大。在用 TiAlN 涂层铣刀铣削含硅量 50% 的高硅铝合金试验中,磨损量最小的一组铣削参数是:主轴转速 $n = 1800$ r/min,每齿进给量 $f_z = 0.08$ mm/z,铣削宽度 $a_e = 2$ mm,背吃刀量 $a_p = 2$ mm。

(2)通过试验可知,TiAlN 涂层铣刀铣削高硅铝合金的磨损量很小,且无明显的粘结现象,因此在加工中推荐采用 TiAlN 涂层铣刀加工高硅铝合金。

(3)对 TiAlN 涂层铣刀磨损的仿真结果进行可行性试验验证说明,仿真与试验结果基本一致,验证了 DEFORM 3D 有限元仿真软件模拟分析涂层铣刀铣削高硅铝合金时铣刀摩擦磨损的可行性与可靠性。

参考文献

- [1]唐鹏钧,何晓磊,王兴元,等.快速凝固/粉末冶金 Al-20Si-7.5Ni-3Cu-1Mg-0.25Fe 合金的显微组织与力学性能[J].航空材料学报,2013,33(3):12-17.

单颗磨粒高速磨削 Ti6Al4V 仿真与试验验证

马志飞^{1,2}, 梁国星^{1,2}, 张昊^{1,2}, 田京京^{1,2}

¹太原理工大学; ²精密加工山西省重点实验室

摘要: 基于 ABAQUS 有限元仿真方法, 采用 Johnson-Cook 材料本构模型模拟了不同磨粒负前角下 Ti6Al4V 高速磨削时的磨屑形态、磨屑剪切角和磨削力的变化趋势。结果表明: 随着磨粒负前角的增加, 磨屑剪切滑移程度增大、磨屑厚度增加且趋于扁平状; 磨屑初始剪切角不断增加, 随后磨屑剪切角在一定范围内波动, 随着磨粒负前角的增大, 剪切角不断减小; 磨削力随着负前角的增大周期性波动变得更加显著, 且随着磨粒负前角的增加而不断增加; 仿真得到的磨屑形态和磨削力与试验具有较好的一致性。

关键词: 负前角磨粒; Ti6Al4V; 磨屑形态; 磨削力; 有限元仿真

中图分类号: TG58; TH161

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.012

Simulation and Experimental Investigation of High-speed Grinding Ti6Al4V with Single Grain

Ma Zhifei, Liang Guoxing, Zhang Hao, Tian Jingjing

Abstract: Based on the ABAQUS finite element simulation method, the Johnson-Cook material constitutive model is used to simulate the tendency of chip morphology, shear angle and grinding force during high-speed grinding of Ti6Al4V under different negative angles of single abrasive grain. The results show that, as the negative rake angle of the single abrasive grain increases, the degree of shear slip and the thickness of the chip increases, and the chip morphology usually tends to be flat. The initial shear angle of grinding increases continuously, after the grinding is stabilized, the shear angle of the chip fluctuates within a certain range, as the negative rake angle of the abrasive grain is increased, the shear angle is decreased. The grinding force fluctuation becomes more prominent with the increase of the negative rake angle, and the grinding force increases with the increase of the negative rake angle of the abrasive grain. The simulated results of the chip shape are well consistent with the experimental results.

Keywords: abrasive grain with negative rake angle; Ti6Al4V; chip morphology; grinding force; finite element simulation

1 引言

磨削加工作为一种精密加工方法, 通常用于加工表面质量要求较高的零件^[1]。磨削加工本质上

是磨粒对工件材料的相互作用, 利用大量随机分布的磨粒来去除工件材料, 整个过程中参与磨削的磨粒较多, 磨削过程较为复杂。而单颗磨粒磨削过程不受其他磨粒的影响, 因此单颗磨粒磨削是研究复杂磨削的重要方法与手段^[2,3]。

Ti6Al4V 因其比强度高和耐腐蚀性好等优点,

收稿日期: 2018年8月

- [2] Shen Jun, Xie Zhuangde, Gao Yulai, et al. Microstructure characteristics of a hypereutectic Al-Si alloy-manufactured by rapid solidification/powder metallurgy process[J]. Materials Science Letter, 2001, 20(16): 1513-1515.
- [3] Hiromichi Yoshikawa, Akio Nishiyama. CVD diamond coated insert for machining high silicon aluminum alloys[J]. Diamond and Related Materials, 1999, 8(8-9): 1527-1530.
- [4] 胡富强, 曹福洋, 魏军齐. 高硅铝合金超声电火花复合加工表面性能研究[C]. 第15届全国特种加工学术会议论文集(上), 2015.
- [5] 赵永红, 曹爱民, 阎兵, 等. 圆柱铣刀铣削力过程的物理建模[J]. 新技术新工艺, 2012(9): 7-10.

- [6] 李晓臣, 周利平, 刘小莹, 等. 高硅铝合金切削性能的试验研究[J]. 工具技术, 2017, 51(6): 31-34.

- [7] 陈涤, 周利平, 江凡, 等. 金刚石涂层刀具铣削高硅铝合金的铣削性能试验研究[J]. 工具技术, 2018, 52(5): 56-59.

第一作者: 余宗宁, 硕士研究生, 西华大学机械工程学院, 610039 成都市

First Author: Yu Zongning, Postgraduate, College of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China

通信作者: 周利平, 教授, 西华大学机械工程学院, 610039 成都市

Corresponding Author: Zhou Liping, Professor, College of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China