

刃口钝圆半径对硬质合金刀具性能的影响

马书娟,王 奔*,郑耀辉,王明海

(沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室,辽宁 沈阳 110136)

摘 要 目的 分析刀具刃口钝圆半径对刀具切削性能和加工质量的影响规律,开展切削加工试验及刀具性能变化规律的研究. 方法 采用具有不同刃口钝圆半径的整体硬质合金铣刀,以航空领域广泛应用的 TC4 钛合金材料为切削加工对象,在相同的切削参数下进行切削加工试验;以切削力、表面粗糙度和刀具磨损规律为主要因素对刀具切削性能和加工质量进行分析. 结果 刀具刃口钝圆半径在 $10.35 \sim 13.78 \mu\text{m}$ 内各主要因素的变化趋势:随着刀具刃口钝圆半径的增加,整体硬质合金铣刀切削刃口的强度随之增加,但切削刃口的锋利度随之下落,切削力呈缓慢增加的趋势,刀具磨损速率逐渐减小,且刃口钝圆半径与被加工工件的表面粗糙度呈非线性关系. 结论 笔者研究所得结果可为硬质合金刀具加工钛合金工程领域提供借鉴.

关键词 刃口钝圆半径;切削力;表面粗糙度;刀具磨损

中图分类号 TH161+.14

文献标志码 A

Effect of Blunt Radius on Milling Performance of Carbide Cutter

MA Shujuan, WANG Ben*, ZHENG Yaohui, WANG Minghai

(Shenyang Aerospace University, Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang, China, 110136)

Abstract: In order to analysis of the influence of rounded radius of cutting edge on cutting performance and machining quality, a cutting machining test was carried out and the change law of tool performance was studied. TC4 titanium alloy material, which is widely used in aviation industry, was machined by carbide milling cutter. The cutting edges of the milling cutter had different rounded radius, and the cutting parameters was constant in the cutting test. Cutting force, surface roughness and tool wear law was taken as main factors during analysis of cutting performance and machining quality. When the rounded radius of cutting was $10.35 \sim 13.78 \mu\text{m}$, the result shows that: with the increasing of the rounded radius, the strength of the cutting edge increases, but the sharpness of the cutting edge decreases; cutting force is slowly increasing, and the relationship between the rounded radius of cutting edge and surface machining quality is nonlinear. This study can

收稿日期:2019-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51875367);辽宁省创新团队项目(LT2016008)

作者简介:马书娟(1979—),女,工程师,主要从事数控刀具方面研究.

通信作者:王奔(1984—),男,教授,博士,主要从事航空难加工材料切削方面研究.

provide a reference for the machining of titanium alloy using carbide tools.

Key words: rounded radius of cutting edge; milling force; surface roughness; tool wear

随着刀具制造技术的快速发展,新兴的刀具钝化技术不断涌现,包括电解钝化、磨粒钝化、刷式钝化等. 刀具刃口的钝化在去除刀具表面残余应力的同时减小了刃口的微观缺口和缺陷,使刃口表面光滑平整且有一定圆弧,从而延长刀具的使用寿命^[1]. 刀具刃口钝化处理既缩短了切削加工初期的刀具速磨损时间,又减少了刀具前刀面因加工过程而产生的积屑瘤,从而大幅改善工件的被加工表面质量^[2].

在磨刀机和金刚石砂轮磨削成形的硬质合金刀具刃口处,磨削过程中的切削力、切削热、切削振动等因素导致刃口存在大量宽度为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 微观缺口. 这不仅使刀具的表面质量和强度有所降低,而且使刀具表面微损伤因切削加工中的力、热及振动等多因素作用下产生扩展及延伸,从而导致了体硬质合金刀具的快速磨损以及破损失效,不仅大幅降低了刀具的使用寿命,而且导致加工质量难以保证^[3-4]. 因此,如何降低或减少硬质合金刀具刃口处的磨削损伤对于提高刀具的切削性能至关重要.

国内外一些学者对刀具刃口钝化技术进行了多个方面研究. J. Rech 等^[5]通过对不同切削刃半径的高速钢铣刀片的仿真研究,证实了最佳切削刃半径的存在并且可以有效提高刀具性能;K. D. Bouzakis 等^[6]通过对硬质合金 PVD 涂层刀片铣削过程中的磨损规律研究,得出较大的刃口半径可以提高刀具寿命;J. D. Thiele 等^[7]采用立方氮化硼镶块刀具针对 AISI 52100 淬火钢条材料进行切削试验,证实了加工刀具的刃口边缘几何形状和被加工材料的硬度及两者间的交互作用对被加工工件表面粗糙度有影响且具有统计学意义;陈德洪等^[8]通过对多齿螺纹刀片做刃部强化研究,得出刃部强化均匀的刀片可以

提高加工稳定性且强化参数和刀片材料同等重要;刘海涛等^[9-10]采用 PCBN 人造立方氮化硼超硬材料复合刀片,以(ADI)等温淬火球墨铸铁材料为加工对象进行断续切削试验,得出了刃口钝圆半径对加工过程的准静态切削力和断续冲击力的影响趋势相同,合理的刃口钝圆半径可以提高刀具的使用寿命;郑维娟等^[11]通过 Advantedge 3D 仿真的方法,研究了不同刃口半径的硬质合金立铣刀的加工性能,并得到了不同刃口钝圆半径时 45 钢的切削力、切削温度和切屑形貌;赵雪峰等^[12-15]基于离散元基本理论采用 EDEM 等软件建立刀具刃口钝化仿真模型,研究了立式旋转钝化过程中钝化参数对刀具刃口的磨损及累积能量的影响规律,并通过切削铝合金试件得出了钝化后涂层刀具性能的变化规律;贾秀杰等^[16-17]采用钝化刀具和未钝化刀具通过干式稳态切削钛合金的对比试验,研究了相同铣削参数下两种刀具在加工时产生的铣削力和被加工工件表面粗糙度的变化规律;徐微等^[18]采用正交试验设计和直观分析法,以刀具刃口半径和切削参数为主要影响因素,揭示了铣削加工淬硬模具钢材料时的磨损机理和工件表面粗糙度的变化规律.

由于钛合金具有高强度、低密度、抗腐蚀性好等优良的使用性能,其在航空发动机、飞机结构件等多个领域中得到广泛应用. 然而,由于钛合金的化学活性大、弹性模量低、导热系数低、加工硬化现象严重等一系列特点,导致其是典型的难加工材料. 钛合金切削过程中的刀具磨损问题十分突出,也使得大型钛合金结构件的加工成本居高不下且加工质量难以保证^[19].

目前,针对整体硬质合金刀具刃口钝圆半径对刀具性能和加工质量影响的研究较少,钝化后的刀具在钛合金难加工材料切削

过程中的使用性能尚难以准确评价. 基于此, 笔者以典型的中强度钛合金 TC4 为加工对象, 在切削参数相同的条件下采用不同刃口钝圆半径的整体硬质合金立铣刀对 TC4 钛合金进行铣削加工试验, 并分析加工过程中切削力、加工后被加工工件的表面粗糙度和刀具磨损值的影响规律. 研究表明: 刀具刃口钝圆半径在 $10.35 \sim 13.78 \mu\text{m}$, 随着刀具刃口钝圆半径的增加, 整体硬质合金铣刀切削刃口的强度随之增加, 但切削刃口的锋利度随之下降, 切削力呈缓慢增加的趋势, 刀具磨损速率逐渐减小, 且刃口钝圆半径与被加工工件的表面粗糙度呈非线性关系.

表1 TC4 钛合金化学成分表
Table 1 TC4 titanium alloy chemical composition list

主要成分质量分数/%			杂质质量分数/%					
Al	V	Ti	Fe	C	N	H	O	其他
2.5~6.8	3.5~4.5	余量	≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.25	≤0.50

表2 刀棒材料的主要热物属性
Table 2 The main thermal properties of knife and rod materials

密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	硬度/HRA	抗弯强度/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	弹性模量/GPa	泊松比	热传导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
14.10	92.5	4200	600	0.23	50

表3 刀具参数表
Table 3 Tool parameter list

类型	刃数	旋角/(°)	前角/(°)	后角/(°)	刃长/mm	铣刀总长/mm
铣刀	4	42	5	12	50	100

1.2 试验设备

磨削设备: 瓦尔特 HELITRONIC POWER 数控工具磨床(见图1).

钝化设备: 昆山乐升 YH04 刀具钝化抛光机(见图2).

检测设备: KEYENCE VMC-2000 超景深光学三维显微镜(见图3).

加工设备: 沈阳机床 VMC850B 立式数控加工中心(见图4).

1.3 试验过程

在 HELITRONIC POWER 数控工具磨床进行整体硬质合金立铣刀磨削加工, 刀具

1 试验设计

采用不同刃口钝圆半径的整体硬质合金立铣刀进行切削加工试验, 并对加工过程中产生的切削力、表面粗糙度和刀具磨损进行分析.

1.1 试验材料

工件材料: 中强度钛合金(牌号 TC4), 具体成分如表1所示.

刀具材料: 选取厦门金鹭公司 GU25UF 碳化钴类硬质合金刀棒材料(钴元素质量分数 12%), 其热物属性如表2所示, 刀具参数如表3所示.



图1 数控工具磨床
Fig.1 CNC tool grinding machine



图 2 刀具钝化抛光机

Fig. 2 Tool passivation polishing machine



图 3 超景深光学三维显微镜

Fig. 3 Ultra depth of field optical 3D microscope

数量为 9 把,编号依次为 M1 ~ M9. 在数控工
具磨床上用同一数控程序按顺序号 M1 ~ M9
进行磨削加工,磨削成形后的刀具及其刃口
处表面形貌如图 5 所示.

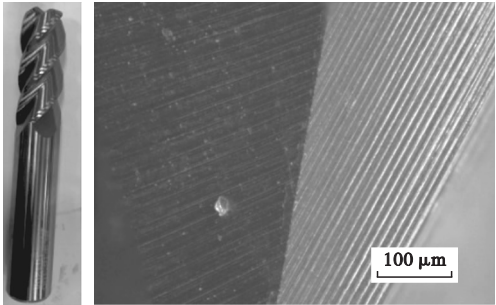


图 5 铣刀及刃口表面形貌图

Fig. 5 Surface topography of milling cutter and cutting edge

结合 YH04 刀具钝化抛光机的特点,根据初步试验时钝化效果基本达到要求时所采用的钝化参数情况,选择三个主要影响因素:钝化时间、正反转时间比、机床公转转速. 每个因素选取 3 个水平,依据正交试验设计原则确定 $L_9(3^4)$ 正交试验方案,如表 4 所示.

表 4 正交试验方案

Table 4 Orthogonal test scheme

刀具号	钝化时间/ min	正反转 时间比	公转转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	空列
M1	15	1:1	25	1
M2	15	1:2	30	2
M3	15	1:3	35	3
M4	21	1:3	25	2
M5	21	1:1	30	3
M6	21	1:2	35	1
M7	27	1:2	25	3
M8	27	1:3	30	1
M9	27	1:1	35	2

对 M1 ~ M9 整体硬质合金立铣刀按正交试验方案进行钝化,用 KEYENCE 超景深光学三维显微镜观察刀具的表面形貌并测量刀具刃口钝圆半径值,测量方法如图 6 所示. 同一测量位置测量 5 次并取平均值作为测量结果.



图 4 立式数控加工中心

Fig. 4 Vertical CNC machining center

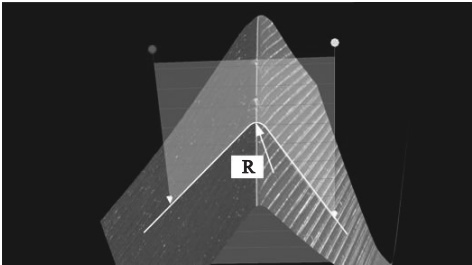


图6 刃口钝圆半径测量图

Fig. 6 Edge blunt circle radius measurement diagram
在VMC850B立式数控加工中心进行铣

表5 铣削参数

Table 5 Milling parameter

刀具转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	每齿进给量/ mm	铣削深度/ mm	铣削宽度/ mm	铣削速度/ ($m \cdot \min^{-1}$)	进给速度/ ($mm \cdot \min^{-1}$)
1 500	0.1	0.5	16	75.36	600

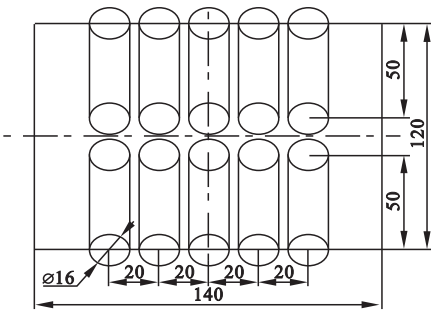


图7 铣削方案图

Fig. 7 Milling scheme drawing

周期数: 1 平均95.70 最小77.33 最大125.6 积分469.0

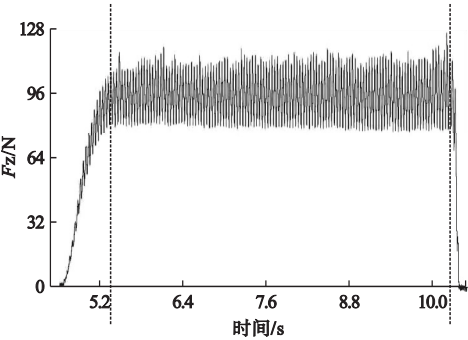


图8 铣削力测量图

Fig. 8 Milling force measurement diagram

用 TR240 便携式表面粗糙度仪测量钛合金工件在铣削长度为 10 mm、25 mm、40 mm 处的表面粗糙度值. 测量过程中, 取样长度为 0.8mm, 每一测量点测量 5 次并取平均值作为测量结果.

削试验, 铣削过程加乳化液冷却, 铣削参数见表 5. 铣削方案如图 7 所示. 铣削过程中采用 Kistler9257B 测力仪对切削力进行测量, 并采用 DynoWare 软件进行对进给抗力 F_x 、切深抗力 F_y 、主切削力 F_z 进行分析计算. 铣削力测量如图 8 所示.

用 KEYENCE 超景深光学三维显微镜观察并用 3D 测量软件测量刀具切削刃口的磨损值, 如图 9 所示.

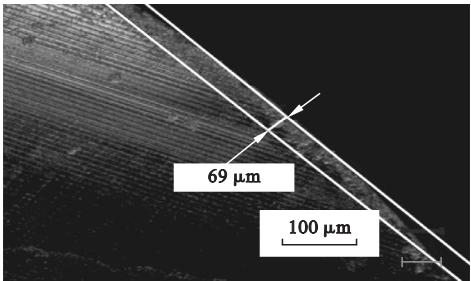


图9 刀具磨损测量图

Fig. 9 Tool wear measurement diagram

2 试验结果及分析

对 9 把试验刀具刃口钝圆半径进行测量, 得到正交试验结果, 对铣削力、表面粗糙度、刀具磨损结果进行分析.

2.1 铣削力结果及分析

按刀具刃口钝圆半径值从小到大的顺序绘制铣削力曲线图, 如图 10 所示.

试验结果表明, 切削过程中产生的铣削力与刀具刃口钝圆半径呈非线性关系, 且 $F_x > F_z > F_y$.

(1) 对于进给抗力 F_x , 刀具刃口钝圆半径值从 10.88 μm 增加到 11.26 μm 时, F_x 减小 12.37%, 从 11.65 μm 增加到 12.87 μm 时, F_x 呈平稳增加趋势, 从 12.78 μm 增加到 13.16 μm 时, F_x 减小 11.56%, 从 13.16 μm 增加到 13.68 μm 时, F_x 增大 10.29%.

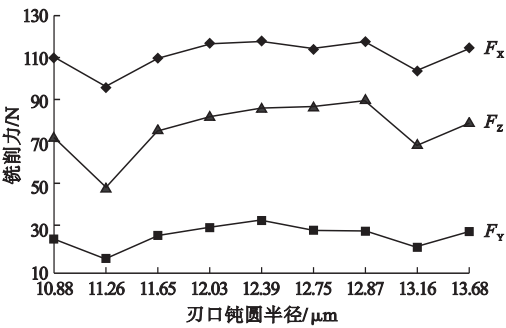


图 10 铣削力曲线

Fig. 10 Curve of milling force

(2) 对于切深抗力 F_y , 刀具刃口钝圆半径值从 10.88 μm 增加到 11.26 μm 时, F_y 减小 35.25%, 从 11.65 μm 增加到 12.39 μm 时, F_y 呈缓慢增加趋势, 从 12.39 μm 增加到 13.16 μm 时, F_y 呈缓慢减小趋势, 从 13.16 μm 增加到 13.68 μm 时, F_y 增大 33.87%。

(3) 对于主切削力 F_z , 刀具刃口钝圆半径值从 10.88 μm 增加到 11.26 μm 时, F_z 减小 32.44%, 从 11.65 μm 增加到 12.87 μm 时, F_z 呈缓慢增加趋势, 从 12.78 μm 增加到 13.16 μm 时, F_z 减小 23.79%, 从 13.16 μm 增加到 13.68 μm 时, F_z 增大 16.04%。

刀具刃口钝圆半径值在 11.26 μm 和 13.16 μm 时, 进给抗力 F_x 、切深抗力 F_y 、主切削力 F_z 均呈减小趋势, 这是由于刀具在加工过程中其刃口锋利度随之改善, 从而使铣削加工趋于平稳且产生的铣削力明显较小。

2.2 表面粗糙度结果及分析

按刀具刃口钝圆半径值从小到大的顺序再每把铣刀铣削长度均为 10 mm、25 mm、40 mm 处测得表面粗糙度值, 分别绘制各铣削距离的表面粗糙度曲线图, 如图 11 所示。

试验结果表明, 刀具刃口钝圆半径在 10.35 ~ 13.78 μm , TC4 材料的表面粗糙度与刀具的刃口钝圆半径值呈非线性关系且无规律上下波动, 这是由于经过正交试验钝化出的刀具其刃口钝圆半径值普遍相差不大且铣削参数相同铣削距离短造成的。

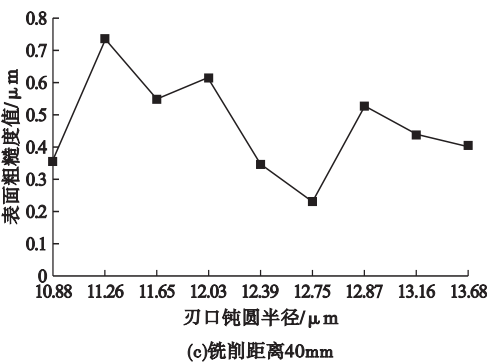
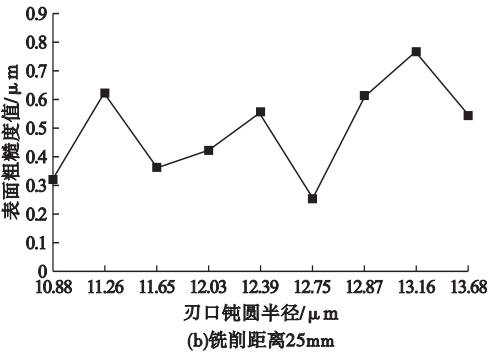
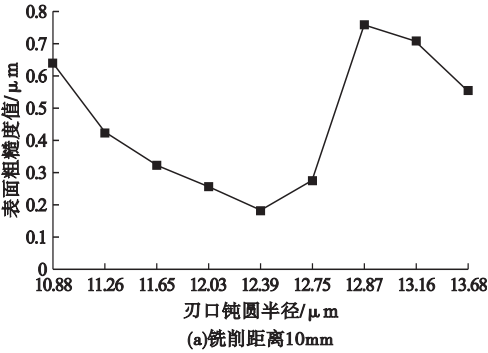


图 11 表面粗糙度曲线

Fig. 11 Curve of surface roughness

(1) 当铣削距离为 10mm 时, 随刀具刃口钝圆半径的增加, 表面粗糙度呈现先减小后增大再减小的变化规律, 其对应的变化区间: 钝圆半径 10.88 ~ 12.39 μm , 表面粗糙度随之减小; 钝圆半径值 12.39 ~ 12.87 μm , 表面粗糙度显著增高; 钝圆半径 12.87 ~ 13.68 μm , 表面粗糙度减小。

(2) 当铣削距离为 25 mm 时, 刀具刃口钝圆半径从 10.88 μm 增加到 11.26 μm 时, TC4 材料的表面粗糙度随之增加 95.3%; 刀具刃口钝圆半径从 11.26 μm 增加到 11.65 μm 时, TC4 材料的表面粗糙度减小

41.4% ;刀具刃口钝圆半径从 11. 65 μm 增加到 12. 39 μm 时,TC4 材料的表面粗糙度增加 52. 7% ;刀具刃口钝圆半径从12. 39 μm 增加到 12. 75 μm 时,TC4 材料的表面粗糙度减小 54. 9% ;刀具刃口钝圆半径从 12. 75 μm 增加到 13. 16 μm 时,TC4 材料的表面粗糙度增加 206% ;刀具刃口钝圆半径从 13. 16 μm 增加到 13. 68 μm 时,TC4 材料的表面粗糙度减小 29. 6% .

(3) 当铣削距离为 40mm 时,刀具刃口钝圆半径从 10. 88 μm 增加到 11. 26 μm 时,TC4 材料的表面粗糙度随之增加 107% ;刀具刃口钝圆半径从 11. 26 μm 增加到 11. 65 μm 时,TC4 材料的表面粗糙度减小 26% ;刀具刃口钝圆半径从 11. 65 μm 增加到 12. 03 μm 时,TC4 材料的表面粗糙度增加 13% ;刀具刃口钝圆半径从 12. 03 μm 增加到 12. 75 μm 时,TC4 材料的表面粗糙度减小 63% ;刀具刃口钝圆半径从 12. 75 μm 增加到 12. 87 μm 时,TC4 材料的表面粗糙度增加 132% ;刀具刃口钝圆半径从 12. 87 μm 增加到 13. 68 μm 时,TC4 材料的表面粗糙度减小 24% .

2.3 刀具磨损结果及分析

按刀具刃口钝圆半径从小到大的顺序测得刀具磨损结果,如表 6 所示.

表 6 刀具磨损结果
Table 6 Results of tool wear

刀具号	刃口钝圆半径/ μm	刀具磨损值/ μm
M3	10. 88	24. 3
M9	11. 26	21. 1
M2	11. 65	16. 6
M8	12. 03	27. 8
M1	12. 39	33. 3
M4	12. 75	26. 1
M7	12. 87	22. 0
M6	13. 16	21. 8
M5	13. 68	17. 8

按刀具刃口钝圆半径值从小到大的顺序绘制刀具磨损曲线图如图 12 所示.

试验结果表明,刀具刃口钝圆半径在 10. 35 ~ 13. 78 μm ,刀具磨损与刃口钝圆半

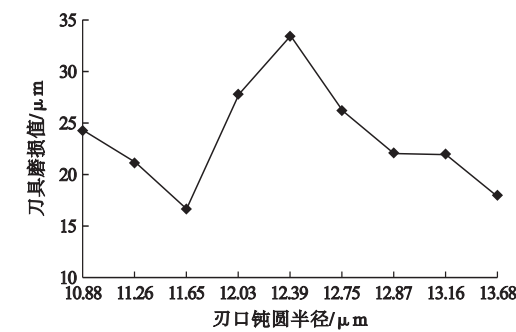


图 12 刀具磨损曲线

Fig. 12 Curve of tool wear
径之间不存在明显的线性关系. 随刃口钝圆半径的增加,刀具磨损值呈现先减小再增大再减小的变化趋势,对应的变化区间:刃口钝圆半径在 10. 88 ~ 11. 65 μm ,刀具磨损值减小;刃口钝圆半径在 11. 65 ~ 12. 39 μm ,刀具磨损值增大;刃口钝圆半径在 12. 39 ~ 13. 68 μm ,刀具磨损值减小. 这是由于刀具刃口钝圆半径值越小其切削刃越锋利,进而使刀具的强度较差从而引起切削刃的磨损,切削刃强度随着刀具刃口钝圆半径值的增大而增强,从而使切削刃的抗磨损性能增强.

3 结 论

试验根据刀具钝化抛光机的加工参数和立式数控加工中心的机床状态以及 TC4 材料的性能得到测量范围,当刀具刃口钝圆半径在 10. 35 ~ 13. 78 μm ,在给定的切削参数下,切削加工 TC4 材料时:

- (1) 刀具刃口钝圆半径和加工时产生的切削力呈非线性关系,整个铣削过程中各切削力始终为 $F_x > F_z > F_y$.
- (2) 刃口钝圆半径对刀具的磨损速率存在一定的影响,但刀具刃口钝圆半径与刀具磨损速率之间并未呈现线性变化关系.
- (3) 刀具刃口钝圆半径和被加工工件的表面粗糙度呈非线性关系.

参考文献

[1] 邵光鹏,任军学,田荣鑫,等. 刀具钝化对铣削 GH4169 表面粗糙度的影响[J]. 航空精密制造技术,2013,49(2):1-3.

- (SHAO Guangpeng, REN Junxue, TIAN Rongxin, et al. Influence of cutting tool blade passivation on surface roughness while milling GH4169 [J]. Aviation precision manufacturing technology, 2013, 49(2): 1-3.)
- [2] QI Shi, LIANG Li, NING He, et al. Experimental study in high speed milling of titanium alloy TC21 [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2013, 64: 49-54.
- [3] 桂育鹏, 于启勋. 刀具刃口钝化技术的探讨 [J]. 机械工人(冷加工), 2004(6): 43-44.
(GUI Yupeng, YU Qixun. Discussion on tool edge passivation technology [J]. Machinist metal cutting, 2004(6): 43-44.)
- [4] 顾祖慰, 张奇. 刀具钝化技术应用前景的展望 [J]. 工具技术, 2009, 43(8): 78-80.
(GU Zuwei, ZHANG Qi. Prospect of the technology of cutter blade passivation [J]. Tool engineering, 2009, 43(8): 78-80.)
- [5] RECH J, YEN Y C, SCHAFF M J, et al. Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts [J]. Wear, 2005, 259(7-12): 1168-1176.
- [6] BOUZAKIS K D, MICHAILIDIS N, SKORDARIS G, et al. Optimisation of the cutting edge roundness and its manufacturing procedures of cemented carbide inserts, to improve their milling performance after a PVD coating deposition [J]. Surface & coatings technology, 2003, 163/164: 625-630.
- [7] THIELE J D, MELKOTE S N. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel [J]. Journal of materials processing technology, 1999, 94(2/3): 216-226.
- [8] 陈德洪, 胡荣生, 殷国茂, 等. 硬质合金刀片刃部强化工艺的研究与应用 [J]. 硬质合金, 1999(4): 228-231.
(CHEN Dehong, HU Rongsheng, YIN Guomao, et al. Research and application of the strengthening technology of carbide blade [J]. Cemented carbide, 1999(4): 228-231.)
- [9] 刘海涛, 李嫚, 张弘毅. 刃口钝化对 PCBN 刀具切削性能影响的研究 [J]. 工具技术, 2011, 45(4): 29-32.
(LIU Haitao, LI Man, ZHANG Hongtao. Research on influence of edge preparation to cutting property of PCBN cutting tools [J]. Tool engineering, 2011, 45(4): 29-32.)
- [10] 李玉标, 张弘毅, 刘晓辉, 等. 基于正交试验的 PCBN 刀具断续切削力研究 [J]. 工具技术, 2011, 45(9): 31-34.
(LI Yubiao, ZHANG Hongtao, LIU Xiaohui, et al. Research on interrupted cutting force using PCBN tools base on orthogonal experiment [J]. Tool engineering, 2011, 45(9): 31-34.)
- [11] 郑维娟, 黄勤, 赵雪峰, 等. 铣刀刃口钝圆半径对切削性能影响的有限元分析 [J]. 煤矿机械, 2014, 35(10): 125-127.
(ZHENG Weijuan, HUANG Qin, ZHAO Xuefeng, et al. Finite element analysis on influence of rounded cutting edge radius of milling cutter to cutting property [J]. Coal mine machinery, 2014, 35(10): 125-127.)
- [12] 赵雪峰, 杜宇超, 吴志鹏. 刀具钝化参数对刃口累积能量影响的研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(8): 1-3.
(ZHAO Xuefeng, DU Yuchao, WU Zhipeng. Research on the influence of the edge preparation parameters on the edge cumulated energy [J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2018(8): 1-3.)
- [13] 刘威, 赵雪峰, 张啸尘. 基于 EDEM 的刀具刃口钝化研究 [J]. 现代机械, 2017(1): 1-4.
(LIU Wei, ZHAO Xuefeng, ZHANG Xiaochen. Research on the tool edge preparation based on the EDEM [J]. Modern machinery, 2017(1): 1-4.)
- [14] 赵雪峰, 何林. 硬质合金立铣刀刃口钝化参数对钝圆半径的影响 [J]. 工具技术, 2017, 51(5): 71-73.
(ZHAO Xuefeng, HE Lin. Influence of cutting edge preparation parameter on edge radius [J]. Tool engineering, 2017, 51(5): 71-73.)
- [15] 赵雪峰, 吴志鹏, 杜宇超, 等. 刃口形貌对切削力的影响分析 [J]. 工具技术, 2019, 53(5): 65-68.
(ZHAO Xuefeng, WU Zhipeng, DU Yuchao, et al. Analysis of influence of cutting edge morphology on cutting force [J]. Tool engineering, 2019, 53(5): 65-68.)
- [16] 贾秀杰, 李剑峰, 孙杰. 刀具钝化对切削力及表面粗糙度的影响 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(7): 1430-1434.
(JIA Xiujie, LI Jianfeng, SUN Jie. Influence of cutting tool blade passivation on cutting force and surface roughness [J]. Computer integrated manufacturing systems, 2011, 17(7): 1430-1434.)
- [17] 罗西, 寇自力, 刘腾, 等. PCD 刀具钝化及对车削铝合金表面粗糙度的影响 [J]. 工具技术, 2016, 50(5): 17-20.
(LUO Xi, KOU Zili, LIU Teng, et al. Edge preparation of PCD cutting tools and influence on surface roughness while turning aluminum [J]. Tool engineering, 2016, 50(5): 17-20.)
- [18] 徐微, 郑敏利. 高速铣削淬硬钢刀具刃口对表面粗糙度影响实验研究 [J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(5): 57-59.
(XU Wei, ZHENG Minli. Experimental research on the effect of tool's cutting edge radius to surface roughness of hardened steel in high-speed milling [J]. Aviation precision manufacturing technology, 2010, 46(5): 57-59.)
- [19] 黄旭, 朱知寿, 王红红. 先进航空钛合金材料与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
(HUANG Xu, ZHU Zhishou, WANG Honghong. Advanced aeronautical titanium alloys and applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)