

铣削加工透波性Si₃N₄陶瓷表面质量研究

魏士亮^{1,2} 房丰洲¹ 刘立飞² 翟学智³

(1 天津大学微纳制造实验室, 天津 300072)

(2 哈尔滨理工大学高效切削及刀具国家地方联合工程实验室, 哈尔滨 150080)

(3 航天科工哈尔滨风华有限公司, 哈尔滨 150001)

文 摘 为了探索透波性Si₃N₄陶瓷铣削中加工表面生成机理及加工工艺参数对其影响规律,对加工表面形貌和边缘破损特征,以及加工参数与切削力、表面粗糙度、边缘破损的映射关系等开展了试验研究。首先对加工表面形貌进行了分析,由于存在陶瓷粉末去除和破碎性颗粒去除两种形式,造成加工表面形貌结构一种体现为变化平缓,而另一种包含微裂纹、层状结构体等,且存在凹坑、沟槽等缺陷。其次研究了边缘破损形式及产生机理,当刀具运动到出口棱边处,刀尖应力集中处将产生微裂纹,并向工件侧面扩展,从而在加工表面和加工侧面诱导形成边缘破损。最后基于均匀设计试验,分析了工艺条件对加工性能的影响。结果表明:随着切削深度从0.2增加到0.5 mm和切削宽度从1增加到4 mm时,x轴切削力呈耦合增长,y轴切削力呈二次方增长;当切削深度和切削宽度分别为0.2 mm和1 mm、进给速度为500 mm/min时,加工表面粗糙度值最小;转速为2 000 r/min、切削深度和切削宽度最小时,边缘破损幅值最小。此结果可为提高透波性Si₃N₄陶瓷铣削加工质量提供技术支撑。

关键词 透波性Si₃N₄陶瓷,加工工艺,表面形貌,边缘破损

中图分类号:TH16

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2020.02.011

Effect of Milling on the Surface Quality of Wave-transmitting Si₃N₄ Ceramics

WEI Shiliang^{1,2} FANG Fengzhou¹ LIU Lifei² ZHAI Xuezh³

(1 Center of Micro/Nano Manufacturing Technology (MNMT), Tianjin University, Tianjin 300072)

(2 The Key Lab of National and Local United Engineering for "High-Efficiency Cutting & Tools", Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

(3 China Aerospace Science & Industry Corp Harbin Fenghua CO. LTD, Harbin 154001)

Abstract To investigate on the surface generation mechanism and the influence of milling process of the wave-transmitting Si₃N₄ ceramics, experimental study on the surface topography and edge chipping characteristics, as well as the mapping relationship between machining parameters and cutting force, surface roughness and edge chipping had been carried out. Firstly, the surface morphology of the machined surface had been analyzed. Due to the existence of ceramics powder removal and broken particle removal, the surface topography was characterized by gentle change, while the other contains micro-cracks, layered structures, etc. And there were defects such as pits and grooves. Secondly, the edge chipping shape and its mechanism had been studied. When the tool moves to the edge of the exit, micro-cracks would be generated at the stress concentration of the tool tip and spread to the side of the workpiece, thus causing edge chipping on the machined surface and the side. Finally, the influence of process conditions on the processing performance has been analyzed based on the uniform design experiments. The experimental results show that with the cutting depth increases from 0.2 mm to 0.5 mm and the cutting width increases from 1 mm to 4 mm, the cutting force of the x-axis is coupled growth, and that of of the y-axis increases quadratically. The machining surface roughness value is minimum when the cutting depth is 0.2 mm, the cutting width is 1mm and the feed speed is 500 mm/min, respectively. As the rotation speed is 2 000 r/min, the edge chipping amplitude is the smallest when the cutting depth and the cutting width are the smallest. Machining process control can be implemented to improve the

收稿日期:2019-07-22

基金项目:国家自然科学基金(51705111)和装备预研联合基金(6141B070602)

第一作者简介:魏士亮,1987年出生,博士,讲师,研究方向为特种陶瓷材料加工。E-mail:weishiliang@hrbeu.edu.cn

milling surface integrity of the wave-transmitting Si_3N_4 ceramics.

Key words Wave-transmitting Si_3N_4 ceramics, Machining process, Surface morphology, Edge chipping

0 引言

透波性 Si_3N_4 陶瓷材料是一种广泛应用于航空航天领域的特种陶瓷材料,具有耐高温、防热、抗冲击等特点,同时具有透波功能,主要制造成天线窗、雷达罩等,应用于各种高超声速飞行器、空间卫星等^[1-2]。透波性 Si_3N_4 陶瓷材料具有较低的断裂韧性值,约为 $2\sim 4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,且由于致密度低,其硬度也较低,属于典型脆性材料。由于功能要求,只能采用干切削加工方式。加工过程中刀具及加工表面黏附大量粉末切屑,铣削中刀具磨损严重,造成切削力增大,且材料具有脆性,进一步造成加工表面凹坑、崩边等缺陷,与技术要求存在一定差距。

透波性 Si_3N_4 陶瓷作为新型材料,其铣削加工技术研究较少。针对脆性材料加工,许多学者主要以石墨为对象开展了相关研究。王成勇等针对石墨铣削参数和刀具几何角度开展了大量试验和理论研究,认为石墨切削过程是正前角刀具的切削和负前角刀具的磨削作用综合结果^[3-4]。周莉针对石墨高速铣削加工中切屑形成机理进行初步研究,提出了脆性陶瓷切屑以挤压颗粒切屑和断裂块屑为主,不同切屑形成过程对应了不同的切屑粒径分布规律,且已加工表面由许多残留的深浅不一的断裂凹坑和石墨鳞片碎屑构成^[5-7]。杨小璠采用金刚石涂层刀具开展了石墨铣削加工试验,认为超细晶粒金刚石涂层刀具具有良好的涂层性能和刀具耐磨性,更适合于石墨等脆性材料的高速切削加工^[8]。MASUDA 通过试验研究了工艺条件对脆性材料加工的影响,得出切削速度对切削力影响较小,但是每齿进给量和切削深度对切削力影响显著;同时增大切削速度和进给量可使表面质量下降^[9-10]。除石墨外,葛英飞等针对脆性材料 SiC_p/Al 进行了车削和高速铣削研究,表明切削速度对加工刀具耐用度的影响最为显著,每齿进给量次之;加工表面的粗糙度和质量对刀具磨损有显著的敏感性^[11-12]。对于脆性材料加工,边缘破损是其典型加工表面缺陷。NG、ALMOND 等学者通过研究认为加工参数对边缘破损影响最为显著^[13-14]。

透波性 Si_3N_4 陶瓷与石墨在材料性能上具有一定相似性,但是断裂韧性值更低,且粉末硬度也远高于石墨,其加工性能与石墨仍具有一定差异。透波性 Si_3N_4 陶瓷零件既是结构件,又是功能件,其加工表面完整性要求更高,对于铣削过程中表面创成机理、工艺条件影响规律等仍有待于进一步细致研究。本文

将试验研究与理论分析结合,开展透波性 Si_3N_4 陶瓷铣削加工工艺过程研究,重点分析表面形貌特征及创成机理、边缘破损特征及断裂机理,以及加工参数与切削力、表面质量等映射关系,拟为透波性 Si_3N_4 陶瓷铣削加工表面完整性控制奠定基础。

1 试验设计

设计了不同加工工艺参数下透波性 Si_3N_4 陶瓷铣削加工试验。透波性 Si_3N_4 陶瓷由哈尔滨工业大学特种陶瓷研究所制备,制造工艺为反应烧结,尺寸大小为 $40 \text{ mm}\times 40 \text{ mm}$,主要材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material properties

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	断裂韧性 /MPa·m ^{1/2}	硬度 /MPa
Si_3N_4	104	0.23	2.6	210

为了研究耦合效应下加工工艺参数对透波性 Si_3N_4 陶瓷材料加工表面完整性影响规律,加工工艺试验采用均匀设计方法,因素和水平分别如表 2 所示,为 4 因素 4 水平。试验次数为 4 次,按照均匀设计试验理论,试验安排顺序如表 3 所示。

表 2 因素和水平表

Tab. 2 Factors and levels

水平	主轴转速 $X_1/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	切削深度 X_2/mm	进给速度 $X_3/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	切削宽度 X_4/mm
1	2000	0.2	200	1
2	3000	0.3	300	2
3	4000	0.4	400	3
4	5000	0.5	500	4

表 3 试验安排

Tab. 3 Uniform design table

试验号	主轴转速 $X_1/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	切削深度 X_2/mm	进给速度 $X_3/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	切削宽度 X_4/mm
1	2000	0.3	400	4
2	3000	0.5	200	3
3	4000	0.2	500	2
4	5000	0.4	300	1

试验机床为 JDGR200_A10H CNC 铣床,刀具材料为 YL10.2 硬质合金,刃数为 4,前角为 8° ,后角为 10° ,螺旋角为 30° 。透波性 Si_3N_4 陶瓷固定在测力仪上,铣削加工过程见图 1。加工过程中采用 KISTLER 9257A 测力仪和 KISTLER 5070 电荷放大器进行切削力采集;采用 OLS 3000 激光共聚焦显微镜和 FEI

HELIOS NanoLab 600I FIB/SEM对铣削后陶瓷表面形貌进行测量和观察;采用VHX-1000超景深显微镜对边缘破损进行观察。

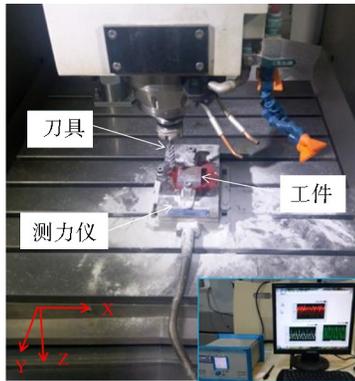


图1 试验设备
Fig. 1 Test equipment

2 结果分析与讨论

2.1 表面形貌及创成机理

采用扫描电镜对4组加工条件下得到的表面形貌进行观察,加工表面形貌如图2所示。

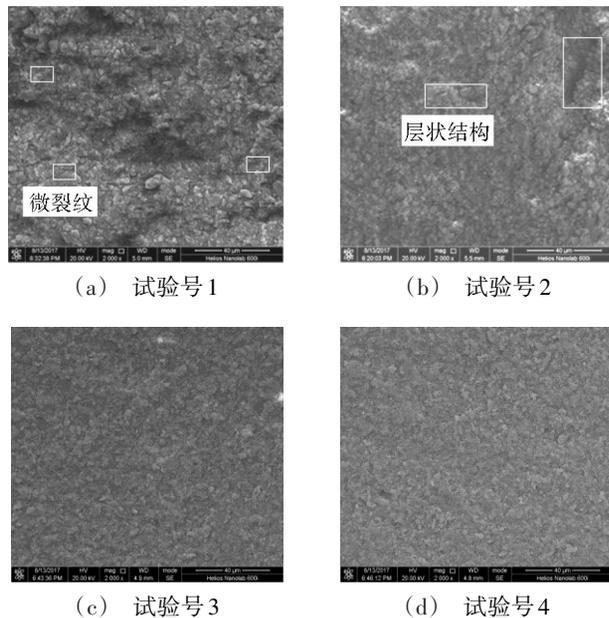


图2 不同加工条件下表面形貌

Fig. 2 Surface morphologies of different machining conditions

可以看出透波性 Si_3N_4 陶瓷铣削加工表面形貌主要由陶瓷粉末颗粒团聚组成。但是前两组试验表面形貌远比后两组粗糙,其表面形貌沟壑明显,且发现了微裂纹和层状结构体。透波性 Si_3N_4 陶瓷铣削加工材料去除机理如图3所示。由于陶瓷材料无明显弹塑性区,切屑一般难以连续。当切削深度和切削力较小时,材料去除以陶瓷粉末分离为主,其切屑主要为粉末,如图3(a)所示。而当切削深度和切削力较大时,铣削刀具刀刃处形成较大应力集中,同时由于

透波性 Si_3N_4 陶瓷较低的断裂韧性,在刀刃处易形成微裂纹,并发生扩展。当微裂纹扩展到自由表面,切屑中将含有大量陶瓷粉末结合的陶瓷颗粒,如图3(a)所示。由于微裂纹的产生及扩展,表面形貌结构将较为复杂,产生明显沟壑,且存在微裂纹和层状结构体。通过对比加工工艺参数,可以看出前两组试验加工深度和加工宽度都较大,其材料去除过程中将产生微裂纹并扩展,切屑中含有陶瓷颗粒,加工表面形貌粗糙。同时对前两组试验加工表面形貌进行更为细致观察,加工表面还存在凹坑、沟槽等缺陷,如图4所示。

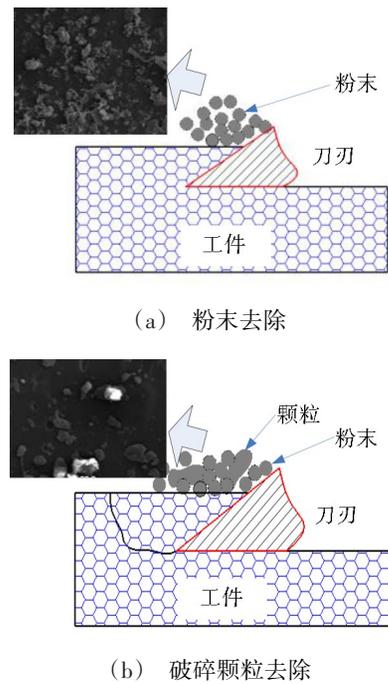


图3 不同材料去除机理

Fig. 3 Different material removal mechanisms

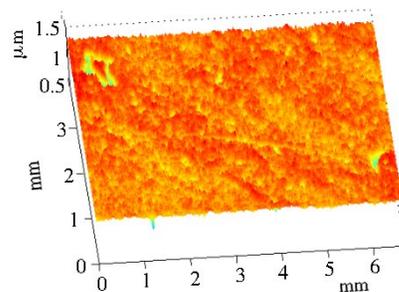


图4 表面缺陷三维形貌

Fig. 4 Three-dimensional topography of surface defects

通过图像二值化处理,其结构更为清晰,如图5所示。加工表面缺陷的存在与材料去除机理密不可分。通过上面分析知前两组试验铣削过程中存在微裂纹的产生及扩展,当裂纹扩展方向与进给方向不一致时,在刀刃处将形成中位裂纹,进而扩展在加工表面形成凹坑。由于碎裂型陶瓷颗粒切屑的存在,

铣削过程中在刀具与工件相对滑动中,产生了犁沟效应,形成了显著沟槽。

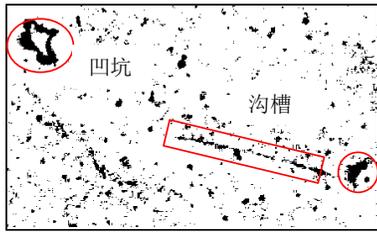


图5 表面缺陷图像二值化处理
Fig. 5 Surface defect image binarization

2.2 边缘破损及断裂机理

通过对加工表面进行观察,透波性 Si_3N_4 陶瓷铣削加工表面还存在显著特征是边缘破损,如图6所示。通过对出现边缘破损工件进行分析,发现边缘破损主要出现在出口棱边处,且加工表面和加工侧面都较为显著。

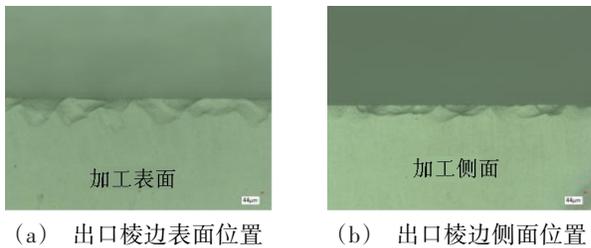


图6 不同位置边缘破损

Fig. 6 Edge chipping of different positions

边缘破损主要出现在出口棱边处,对出口棱边处加工过程进行分析。图7为出口棱边处刀具与工件接触关系示意图。

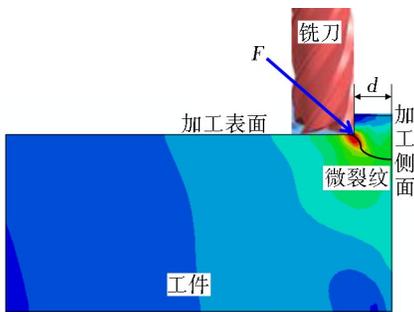


图7 边缘破损机理示意图

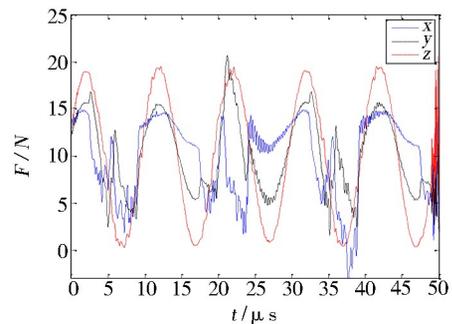
Fig. 7 Edge chipping mechanism

加工过程中,由于法向切削力和切向切削力的存在,且刀刃处存在尖角,将产生应力集中。当刀具运动到工件边缘处,刀尖处应力分布如图所示,可以看出刀尖处最大应力方向指向工件侧面。透波性 Si_3N_4 陶瓷断裂韧性只有 $2.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,但最大应力大于材料断裂应力,应力集中处将产生微裂纹,并向工件侧面扩展,从而在加工表面和加工侧面都形成边缘破损。

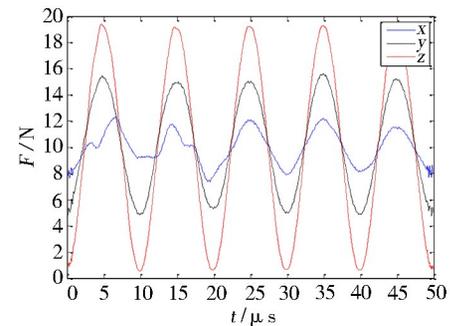
3 加工参数影响规律

3.1 对切削力的影响

切削力是表征加工性能的重要参数。图8是试验条件1和试验条件3下透波性 Si_3N_4 陶瓷铣削加工过程中切削力随时间变化曲线。可以看出加工过程中 x 轴方向切削力波动变化最为明显,且试验条件1下 x 轴波动性更为显著。试验条件1下加工表面形貌更为粗糙, x 轴方向切削力变化也反映了加工表面形貌。试验条件1下材料去除机理复杂,铣削过程中存在微裂纹产生及扩展,其切削力不稳定。



(a) 试验条件1



(b) 试验条件3

图8 不同加工条件下切削力曲线

Fig. 8 Cutting force curve under different processing conditions

通过对数据进行分析,发现不同加工条件下 z 轴方向切削力变化不显著,因此只研究工艺参数对 x 轴和 y 轴切削力影响。基于均匀试验设计理论,得出影响因素与 x 轴和 y 轴切削力关系如公式(1)和(2)所示:

$$F_x = 9.93 - 0.12X_2 * X_4 + 3.42X_2 * X_4 \quad (1)$$

$$F_y = 11.54 + 7.11X_2 * X_2 + 0.3X_4 * X_4 \quad (2)$$

式中, X_2 为切削深度, X_4 为切削宽度。

通过关系式可以看出切削深度和切削宽度对 x 轴和 y 轴切削力影响最为显著。其中切削深度和切削宽度对 y 轴切削力影响为独立效应,随着切削深度和切削宽度的增加, y 轴切削力呈二次方增长。而切削深度和切削宽度对 x 轴切削力呈耦合效应影响,其变化曲线如图9所示。只有切削深度和切削宽度都较小,即刀具与工件接触面积最小时, x 轴切削力取得最小值。

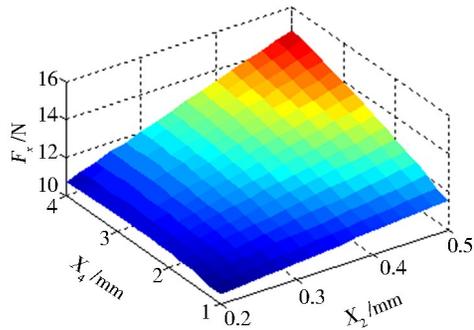


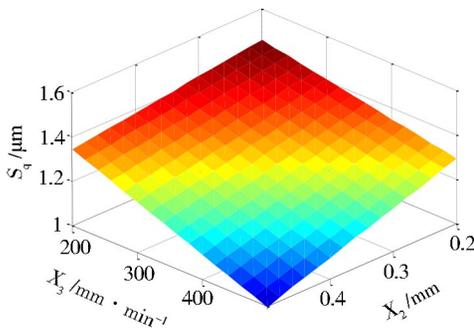
图9 切削深度和切削宽度对x方向切削力影响

Fig. 9 Effect of cutting depth and cutting width on cutting force in the x direction

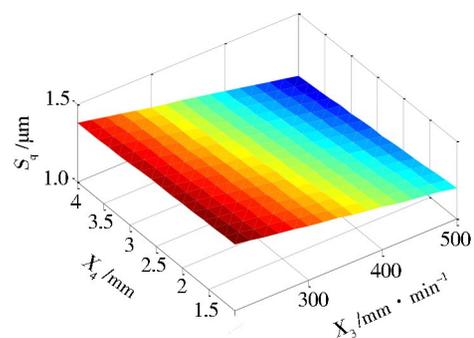
3.2 对表面粗糙度的影响

透波性Si₃N₄陶瓷加工表面幅值参数值直接影响零部件与高速流动气体间摩擦。以表面均方根值S_q表征表面粗糙度,通过试验结果得到影响因素与表面均方根偏差关系如公式(3)所示:

$$S_q = 1.56 - 0.002X_2 * X_3 - 0.00007X_3 * X_4 \quad (3)$$



(a) 进给速度和切削深度的影响



(b) 切削宽度和进给速度的影响

图10 耦合效应对表面粗糙度影响

Fig. 10 Effect of cross effect on surface roughness

式中,X₃为进给速度。

可以看出,切削深度、进给速度和切削宽度是影响加工表面粗糙度的主要因素,且为耦合效应影响。各耦合效应对表面粗糙度影响如图10所示。当切削深度和切削宽度较小时,即切削深度为0.2 mm和切削宽度

为1 mm时,切削力也取得最小值,材料去除机理主要为陶瓷粉末去除,加工表面形貌变化平缓。进给速度主要影响刀具与工件表面之间的摩擦,当进给速度增加时,摩擦力减小,进而降低了加工表面粗糙度值^[15]。

3.3 加工参数对边缘破损影响

边缘破损不仅影响陶瓷零部件加工效率和几何精度,而且影响透波性Si₃N₄陶瓷零部件工作可靠性。为了研究加工参数对边缘破损影响,通过图像处理对边缘破损曲线进行了提取,并根据比例尺进行了数值量化,如图11所示。

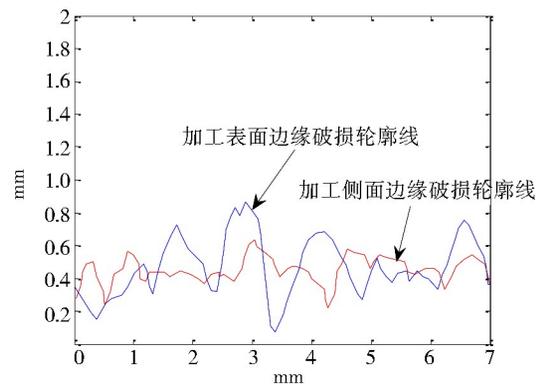


图11 提取后边缘破损轮廓曲线

Fig. 11 Extracting the edge damage contour curve

边缘破损轮廓为复杂曲线,采用轮廓均方根值表征边缘破损幅值,如公式(4)所示:

$$C_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x_i)^2} \quad (4)$$

通过试验结果,得到影响因素与加工表面边缘破损幅值和加工侧面边缘破损幅值关系如公式(5)和(6)所示:

$$C_{q_surface} = -0.39 + 1.77X_2 * X_2 + 0.00005X_1 * X_4 \quad (5)$$

$$C_{q_side} = -0.42 + 1.06X_2 * X_2 - 0.000004X_1 * X_4 \quad (6)$$

式中,X₁为主轴转速。

通过公式(5)可以看出,加工表面边缘破损幅值随切削深度增加呈二次方增长趋势。通过图7可以看出,当切深为0.5 mm时,切削力增加,且由于刀具与工件接触面积更大,造成了边缘破损更为严重。

同时加工表面边缘破损幅值与主轴转速和切削宽度呈相互耦合影响。主轴转速和切削宽度对加工表面边缘破损幅值影响如图12所示。当主轴转速增加时,刀具对工件边缘冲击频率增大;而且切削宽度越大,切削力值也越大,在强烈冲击力作用下,刀刃处应力显著增加,从而使得边缘破损体积增加,加工表面边缘破损幅值增大。

通过公式(6)可以看出,加工侧面边缘破损幅值边缘规律与加工表面一致,也主要受主轴转速、切削

深度和切削宽度的影响。由于加工侧面边缘破损与加工表面边缘破损是同时发生的,且主要受切削力和微裂纹扩展方向的影响,因此其变化规律相同。

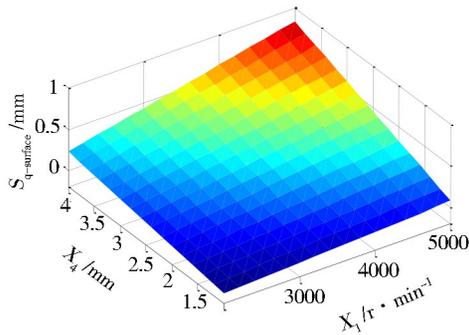


图12 主轴转速和切削宽度对边缘破损的影响

Fig. 12 Effect of spindle speed and cutting depth on edge chipping

4 结论

(1)透波性 Si_3N_4 陶瓷铣削加工材料去除形式主要有陶瓷粉末去除和破碎性颗粒去除,陶瓷粉末去除表面形貌较为平缓,而破碎性颗粒去除表面形貌包含微裂纹、层状结构体等,且存在凹坑、沟槽等缺陷;

(2)透波性 Si_3N_4 陶瓷铣削加工边缘破损主要集中在出刀棱边处,当刀具运动到出口棱边处,刀尖应力集中处将产生微裂纹,并向工件侧面扩展,从而在加工表面和加工侧面诱导形成边缘破损;

(3)影响切削力的主要因素是切削深度和切削宽度,且随着切削深度在0.2~0.5 mm和切削宽度在1~4 mm的增加,x轴切削力耦合增长,y轴切削力呈二次方增长。影响表面粗糙度的主要因素是切削深度、进给速度和切削宽度,且当切削深度和切削宽度分别为0.2 mm和1 mm、进给速度为500 mm/min时,加工表面粗糙度值最小。影响边缘破损幅值的主要因素是主轴转速、切削深度和切削宽度,且转速为2 000 r/min、切削深度和切削宽度最小时,边缘破损幅值最小。

参考文献

[1] 方震宇,曹峰,张长瑞,等. 氮化物陶瓷系高温透波材料的研究进展[J]. 材料导报,2011,25(7):54-57.
FANG Zhenyu, CAO Feng, ZHANG Changrui, et al. Progress on temperature nitride based ceramic wave-transparent materials [J]. Materials Review, 2011, 25(7): 54-57.
[2] CHEN M, YIN X, LI M, et al. Electromagnetic interference shielding properties of silicon nitride ceramics reinforced by in situ grown carbon nanotubes [J]. Ceramics International, 2015, 41(2): 2467-2475.
[3] WANG C Y, ZHOU L, FU H, et al. High speed milling of graphite electrode with endmill of small diameter [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(4): 27-31.
[4] 王成勇,秦哲,李文红等. 石墨电极的高速加工[J]. 制造技术与机床,2002(3):25-30.

WANG Chengyong, QIN Zhe, LI Wenhong, et al. High speed machining of the graphite electrode [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2002(3): 25-30.

[5] HU Z L, WANG C Y, ZHOU L, et al. Cutting parameters optimization of high-speed milling of thin-walled graphite electrode [J]. Key Engineering Materials, 2006, 315: 319-323.

[6] HU Z, WANG C, ZHOU L, et al. Influence of cutting parameters on cutting forces in high speed milling of thin walled graphite electrode [J]. Progress of Machining Technology, 2006, 315-316: 319-323.

[7] 周莉. 高性能石墨高速铣削加工研究[D]. 广州:广东工业大学,2007.

HOU Li. Research on high speed milling of high-performanced graphite [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2007.

[8] 杨小璠,李友生,鄢国洪,等. 超细晶粒金刚石涂层刀具高速铣削石墨的切削性能研究[J]. 制造技术与机床,2013(6):58-60.

YANG Xiaopan, LI Yousheng, YAN Guohong, et al. Study on cutting performances of ultra-fine grain diamond coated cutter in high speed milling graphite [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2013(6): 58-60.

[9] MASUDA M, SATO T, KORI T, et al. Cutting performance and wear mechanism of alumina-based ceramic tools when machining austempered ductile iron [J]. Wear, 1994, 174(1-2): 147-153.

[10] MASUDA M, YABUCHI E, KUROSHIMA Y, et al. Machinability of sintered carbon (4th Report) -cutting performance and wear behaviour of ceramic tools when turning three-phase sintered carbon [J]. Journal-Japan Society for Precision Engineering, 1996, 62: 463-478.

[11] 葛英飞,徐九华,杨辉. SiC_p/Al 复合材料的超精密车削试验[J]. 光学精密工程,2009,17(7):1621-1629.

GE Yingfei, XU Jiuhua, YANG Hui. Experiments of ultra precision turning of SiC_p/Al composites [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1621-1629.

[12] 葛英飞,徐九华,傅玉灿. 高速铣削 SiC_p/Al 复合材料时聚晶金刚石刀具的磨损机理[J]. 光学精密工程,2011,19(12):2907-2918.

GE Yingfei, XU Jiuhua, FU Yucha. Wear mechanism of PCD tool in high speed milling of SiC_p/Al composites [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2907-2918.

[13] NG S J, LE D T, TUCHER S R, et al. Control of machining induced edge chipping on glass ceramic [J]. American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, 1996(4): 229-236.

[14] MORRELL R, GANT A J. Edge chipping of hard material [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2001, 19(4-6): 293-301.

[15] 刘运凤,刘献礼,魏士亮. 透波性 Si_3N_4 陶瓷铣削过程刀具-工件摩擦特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(5):109-115.

LIU Yunfeng, LIU Xianli, WEI Shiliang. Tool-workpiece friction characteristics in milling process of wave-transmitting Si_3N_4 ceramics [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(5): 109-115.