α/β-SiAlON陶瓷刀具高速铣削GH4169性能与表面完整性

王晓沁[2] 殷增斌[2*] 唐海权[1] 洪东波[2] 袁军堂[2]
1.成都工具所有限公司高性能工具全国重点实验室,成都,610500
2.南京理工大学机械工程学院,南京,210094

摘要:利用微波烧结技术制备了可转位带槽形α/β-SiAlON陶瓷刀具,系统研究了微波烧结的复杂刃形SiAlON陶瓷刀具高速干切削镍基高温合金GH4169的切削性能、失效机理和加工表面完整性。研究结果表明:微波烧结的复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀具寿命随铣削速度先增长后缩短,铣削深度对刀具寿命影响不明显,可转位复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀具更适合高速大切深的粗加工,最优切削参数为铣削速度800 m/min、铣削深度1.5 mm、每齿进给量0.12 mm;在不同切削参数下,黏结磨损是造成SiAlON陶瓷刀具失效的主要原因;加工表面粗糙度随着铣削速度的提高而增大;加工表面硬化程度随着铣削速度的提高(600~1000 m/min)由177%增大至221%,随铣削深度的变化较小,介于180%~190%;硬化深度随着铣削速度和铣削深度的增大变化均不明显,介于240~300 μm。

关键词:陶瓷刀具;SiAlON陶瓷;微波烧结;切削性能;GH4169高温合金
中图分类号:TG711
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.023 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Performance and Surface Integrity of High-speed Milling of GH4169 with α/β-SiAlON Ceramic Tools

WANG Xiaoqin[2] YIN Zengbin[2*] TANG Haiquan[1] HONG Dongbo[2] YUAN Juntang[2]
1.State Key Laboratory for High Performance Tools, Chengdu Tool Research Institute Co., Ltd., Chengdu, 610500
2.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094

Abstract: A type of replaceable α/β-SiAlON ceramic cutting tool with chip-breaking grooves was fabricated by microwave sintering technology. The cutting performance, failure mechanism and surface integrity of the complex-edge-shaped SiAlON ceramic cutting tools during high-speed dry cutting of nickel-based superalloy GH4169 were systematically investigated. The results showed that the service life of the microwave-sintered complex-edge-shaped α/β-SiAlON ceramic cutting tools increased initially and then decreased with increasing cutting speed, while the cutting depth had no significant effect on tool life. The replaceable complex-edge-shaped α/β-SiAlON ceramic cutting tools are more suitable for high-speed and deep-cutting rough processing. The optimal cutting parameters are a cutting speed of 800 m/min, a cutting depth of 1.5 mm, and a feed rate of 0.12 mm per tooth. Under different cutting parameters, bond wear is the main cause of failure of the SiAlON ceramic cutting tools. The surface roughness increased with the increase of cutting speed, and the average surface hardening degree increased from 177 % to 221% when the cutting speed ranged from 600 to 1000 m/min. The variation in surface hardening depth was not obvious with increasing cutting speed and cutting depth, ranging from 240 to 300 μm.

Key words: ceramic tool; SiAlON ceramic; microwave sintering; cutting performance; GH4169 superalloy

0 引言

航空发动机中高温合金占零件材料总量的40%~60%,尤以镍基高温合金用量最多,主要用于整体叶盘/环、机匣、涡轮盘/涡轮叶片等热端零部件。高温合金优异的性能也给切削加工带来了难题。高温合金切削温度最高可达1200 ℃左右,切削力是普通钢材的2~4倍,加工硬化严重等特点使得刀具快速磨损,使用传统硬质合金和涂层刀具切削加工镍基高温合金的铣削速度仅20~100 m/min,高温合金构件的加工效率低[1]。

高速切削是提高加工效率最有效的途径之一,其中高性能切削刀具尤为重要。塞隆(SiAlON)陶瓷刀具材料是一种由Si-Al-O-N元素组成的结构陶瓷,是高速切削高温合金最具潜力

收稿日期:2025-09-02
基金项目:高性能工具全国重点实验室开放课题(GXNGJSKL-2025-16)

的刀具材料之一，SiAlON陶瓷刀具铣削镍基高温合金的速度可达1000 m/min，是硬质合金刀具的5～10倍，材料去除率达到其10倍以上，可以大幅度提高高温合金的加工效率[2-3]。现代刀具正朝着高效率、高精度、高可靠性和专用化方向发展，除了刀具材料不断进步，新的刀具结构也在不断被开发。目前市售的SiAlON陶瓷刀具采用热压烧结方式制备，受制于热压烧结过程中加压工艺的限制，制备的SiAlON陶瓷刀具均为平前刀面的简单刃形刀具。国内外学者对SiAlON陶瓷刀具高速切削镍基高温合金的切削性能和磨损机理进行了大量研究[4-11]，但是研究中使用的陶瓷刀具大都基于热压烧结制备。

微波烧结不同于传统热压烧结的辐射传热，它是利用微波具有的特殊波段与材料微观组织耦合，材料介质损耗产生热量至烧结温度而实现致密的。微波烧结时材料整体自身发热，材料内部无温度梯度，发热速率可达50～300 ℃/min，是传统热辐射传热烧结加热速率的4～10倍。除此之外，微波烧结是一种无压烧结技术，能够克服传统热压烧结只能制备平刀面陶瓷刀具的弊端，为复杂刃形陶瓷刀具制造创造了条件。前期已对复杂刃形陶瓷刀具微波烧结技术进行了研究[12]，并利用微波烧结技术成功制备了复杂刃形可转位α/β-SiAlON陶瓷铣刀片[13]。本文在前期工作的基础上，进一步研究微波烧结的复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀具高速切削镍基高温合金GH4169的加工机理、刀具磨损机理和加工表面完整性。

1 切削试验

1.1 SiAlON陶瓷刀具制备

SiAlON陶瓷以α-SiAlON和β-SiAlON为主相，α∶β质量比为65∶35。原材料为Si_3N_4（粒径500 nm）、Al_2O_3（粒径200 nm）、AlN（粒径1000 nm）与Y_2O_3（粒径50 nm）粉末。将粉末按比例混合后，经球磨、干燥、过筛得到最终粉末。将处理后的粉末压制成形后置于微波高温烧结炉（TK-8000W）中烧结，其中，烧结温度1750 ℃，保温时间10 min，升温速率30 ℃/min，氮气气氛。

1.2 切削试验设计

微波烧结的α/β-SiAlON陶瓷铣刀片前角4°、径向前角－6°、径向后角10°、轴向前角－10°、底刃后角10°。工件材料为镍基高温合金GH4169，采用立式加工中心（KVC1050N）进行铣削加工，铣削方式为逆铣，干切削，铣削宽度为33.33 mm，刀盘上安装1个刀片，如图1所示。设计9组切削参数以研究不同铣削速度（v_c=600～1000 m/min）和铣削深度（a_p=0.50～1.50 mm）下刀具的切削性能和加工表面完整性。一次走刀长度100 mm，每完成一次走刀测量后刀面磨损量、后刀面平均磨损量V_B、后刀面缺口磨损量V_{BN}、后刀面底刃磨损量V_{BC}。刀具达到失效标准后停止切削。刀具失效标准如下：①后刀面缺口磨损量V_{BN}达到1.5 mm；②后刀面平均磨损量V_B达到1.0 mm；③前刀面破碎或刀片破碎。

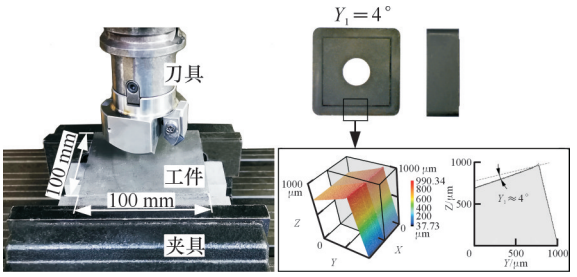


图1 切削试验图和SiAlON陶瓷刀具

Fig.1 Cutting test diagram and SiAlON ceramic cutting tools

1.3 性能表征

使用数码显微镜（ISM-PM 200S）测量刀具后刀面磨损量，采用测力仪（5698A）进行三向切削力数据采集，使用场发射扫描电子显微镜（SEM，Quanta 250）观察刀具微观磨损形貌，使用手持粗糙度仪（TR200）测量工件表面粗糙度，使用显微硬度计（HDT-VH05）测量工件加工表面硬度。

2 结果与讨论

2.1 切削力与切屑

图2所示为切削力随铣削速度和铣削深度的变化规律。随着铣削速度v_c从600 m/min提高至1000 m/min，切削力F从（2539±178）N降至（998±46）N；随着铣削深度a_p从0.5 mm增大到1.5 mm，切削力从（1563±70）N增大至（2534±193）N。基于Third Wave Advantedge建立三维复杂刃形SiAlON陶瓷刀片铣削镍基高温合金GH4169的有限元分析模型[13]，根据仿真结果得到刀尖平均温度随铣削速度和铣削深度的变化规律。SiAlON陶瓷刀具在800 m/min下的平均温度已经达到1200 ℃，接近镍基高温合金的熔点（1250～1350 ℃[14]）。高切削温度导致工件发生热致软化，从而减小了切削过程中的切削力。铣削速度超过900 m/min时切削力在快速下降，说明热致软化作用明显。

图3为v_c=800 m/min时不同铣削深度下切

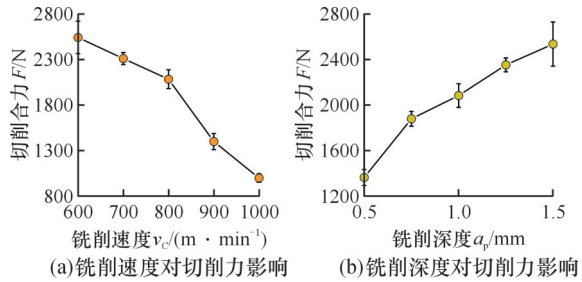


图2　切削参数对SiAlON陶瓷刀具面铣高温合金GH4169切削力的影响规律

Fig.2　The influence of cutting parameters on the cutting force of SiAlON ceramic cutting tools during face milling of the high-temperature alloy GH4169

屑的宏观形貌以及剪切面和自由面的SEM微观形貌。由切屑宏观图可知，当铣削深度较小时，切屑尺寸较小，切屑形态呈点状与连续状分布。随着铣削深度增大至1 mm，连续状切屑占比增大，且切屑卷曲程度提高。由剪切面和自由面的SEM微观形貌可知，切屑尺寸随着铣削深度的增大而增大。此外，切屑的自由面微观形貌相近，说明铣削深度对切屑的锯齿化程度影响较小。

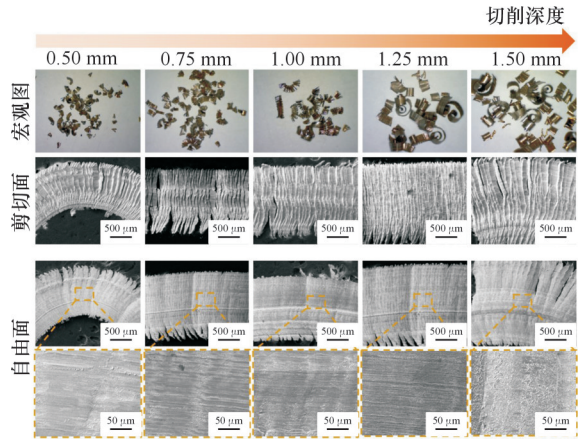


图3　不同铣削深度下切屑的宏观形貌以及剪切面和自由面的SEM微观形貌

Fig.3　The macroscopic morphology of the chips under different milling depth and SEM microscopic morphology of the shear surfaces and free surfaces

图4为a_p=1 mm时不同铣削速度下切屑的宏观形貌以及剪切面和自由面的SEM微观形貌。由宏观图可以看出，v_c=600 m/min时，切屑尺寸较大，切屑形态以连续状切屑为主。随着铣削速度的提高，切屑分离程度提高，点状与片状的切屑占比增加。由剪切面的SEM形貌可以看出，切削的锯齿化程度随着铣削速度的提高而提高。由自由面的SEM形貌可以看出，随着铣削速度的提高，自由面的不平整度增加，表明切屑的卷曲程度增加以及切屑的分离程度提高，v_c≥900 m/min时，切屑形态以不连续的点状和片状为主。

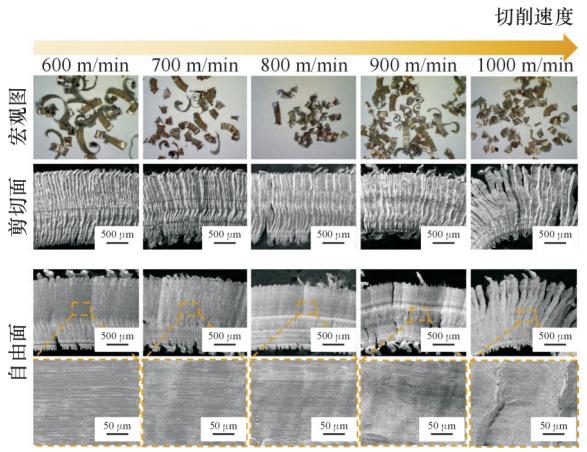


图4　不同铣削速度下切屑的宏观形貌以及剪切面和自由面的SEM微观形貌

Fig.4　The macroscopic morphology of the chips under different milling speed and SEM microscopic morphology of the shear surfaces and free surfaces

2.2　刀具寿命与失效机理

图5所示为v_c=800 m/min时复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片刀具寿命随铣削深度的变化规律。当铣削深度a_p由0.5 mm增大至1.5 mm时，刀具最大铣削距离由1200 mm增加至1400 mm（a_p=0.75 mm），后又逐渐下降至1200 mm，变化幅度较小，说明铣削深度对刀具最大铣削距离影响较小。由于材料去除率与铣削深度成正比，故铣削深度的改变会极大影响工件的加工效率与加工成本。以提高加工效率为目标，本研究的复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片更适用于大切深的粗加工。

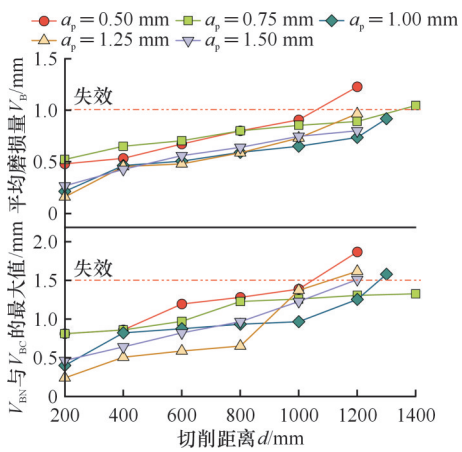
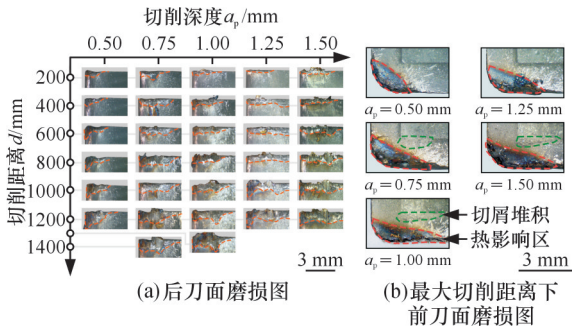


图5　不同铣削深度下复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片刀具寿命

Fig.5　Tool life of complex-edge α/β-SiAlON ceramic cutting tools under different milling depth

图6为v_c=800 m/min时不同铣削深度下复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片后刀面磨损图及最大切削距离下前刀面磨损图。由图6a可知，当a_p=0.5 mm时，后刀面磨损形式以底刃的缺口磨

损为主。当a_p>0.75 mm时，底刃缺口磨损减小，磨损形式转为均匀的后刀面磨损或主切削刃顶部的缺口磨损。由图6b可以看出，当a_p=0.5 mm时，前刀面的热影响区集中在刀尖圆弧区域，说明刀-屑接触区域以圆弧角为主。当铣削深度增大时，热影响区由底刃向主切削刃拓展。此外，当铣削深度大于1 mm时，在断屑槽区域有切屑堆积，说明断屑槽与切屑发生接触，促进了切屑分离。

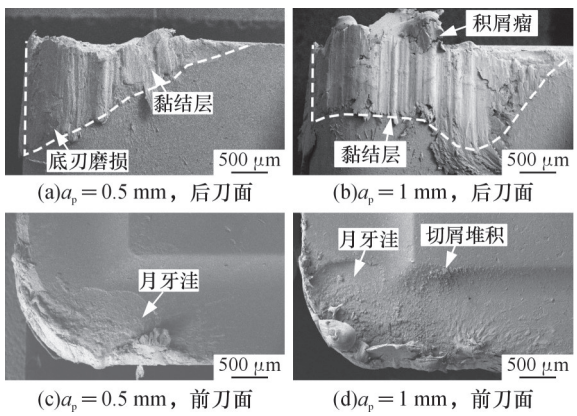


(a)后刀面磨损图　(b)最大切削距离下前刀面磨损图

图6　不同铣削深度复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片磨损

Fig.6　Wear diagrams of complex-shaped α/β-SiAlON ceramic cutting tools after machining at different milling depths

图7为a_p=0.5、1 mm时复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片失效时的前刀面与后刀面SEM形貌图。由后刀面SEM形貌可以看出，黏结磨损仍是主要的失效机理，在后刀面未观察到明显的剥落与破碎。同时，a_p=1 mm时在切削刃处有积屑瘤形成，说明切屑黏结严重。在不同铣削深度下刀具前刀面均有微剥落现象，但是后刀面黏结磨损仍是刀具失效的主要原因。



(a)a_p=0.5 mm，后刀面　(b)a_p=1 mm，后刀面

(c)a_p=0.5 mm，前刀面　(d)a_p=1 mm，前刀面

图7　不同铣削深度复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片SEM形貌

Fig.7　SEM morphologies of complex-profiled α/β-SiAlON ceramic inserts under different milling depths

图8所示为a_p=1 mm时复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片刀具寿命随铣削速度的变化规律。铣削速度由600 m/min提高至800 m/min时，刀具的最大切削距离由700 mm增大至1300 mm，说明刀具切削性能提高。这是因为铣削速度提高在一定程度减小了切削力，如图2a所示。

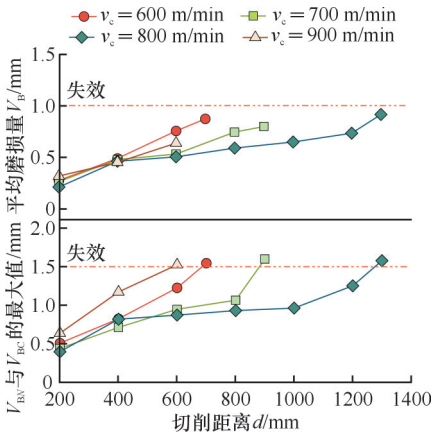
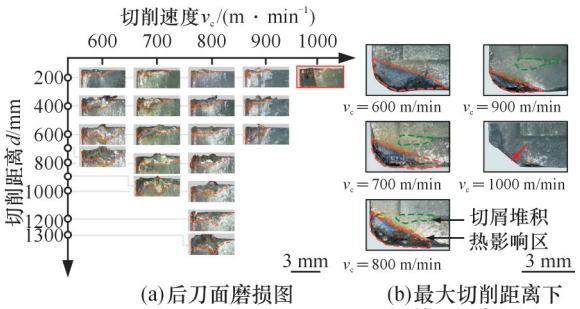


图8　不同铣削速度下复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀具寿命曲线

Fig.8　Life curves of complex-edge α/β-SiAlON ceramic cutting tools under different milling speeds

图9为a_p=1 mm时不同铣削速度下复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片后刀磨损图及最大切削距离下前刀面磨损图。由图9a可知，当铣削速度较低(600～800 m/min)时，刀具磨损形式为后刀面磨损及主切削刃顶部或刀具底刃的缺口磨损。当铣削速度提高到900 m/min时，刀具后刀面底刃的缺口磨损是主要的失效形式。这是因为铣削速度提高导致切削温度升高(>1250 ℃)，使得镍基高温合金发生热致软化，加剧了刀具底刃的工件黏结，导致底刃发生快速磨损。当铣削速度进一步提高到1000 m/min时，切削温度的进一步升高使得底刃黏结进一步加剧，刀具在第一刀切削后便发生后刀面破碎失效。由图9b可以看出，随着铣削速度从600 m/min提高到900 m/min，刀具前刀面的热影响区面积呈下降趋势。这是因为切削过程中的剪切角随铣削速度提高而增大，切屑的卷曲和分离程度增大(图4)，使得刀-屑接触区域面积减小。



(a)后刀面磨损图　(b)最大切削距离下前刀面磨损图

图9　不同铣削速度复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片磨损

Fig.9　Wear diagrams of complex-shaped α/β-SiAlON ceramic cutting tools after machining at different milling speeds

图10为v_c=600、900 m/min时复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片失效时的前刀面与后刀面SEM形貌图。由后刀面磨损图可以看出，黏结磨损是造成刀具失效的主要磨损机理。当v_c=900 m/min时，黏结磨损引发的后刀面剥落成为刀具失效的主要原因。这是因为切削温度升高导致工件热致软化效应增强，使得底刃的黏结加剧，此时大量的黏结层极不稳定，在高速切削中黏结层的剥落导致底刃的快速磨损，引发刀具失效(图10b)。由前刀面磨损图可以看出，虽然工件的热影响区随着铣削速度的增大而减小(图9b)，但是高速下刀具前刀面的切屑堆积显著高于低速下的刀具前刀面(图10c、图10d)，这主要是因为切削温度提高使得切屑与刀具前刀面的黏结效应增强。

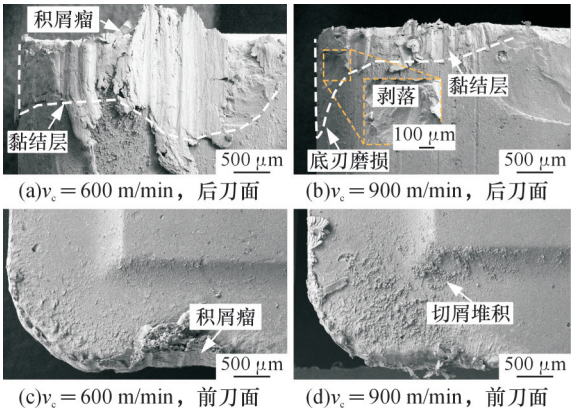


图10　不同铣削速度下复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀片SEM形貌

Fig.10　SEM morphologies of complex-profiled α/β-SiAlON ceramic inserts under different milling speeds

2.3　加工表面完整性

2.3.1　加工形貌

图11为不同加工工况下的工件表面三维形貌图。其中，图11a～图11e为v_c=800 m/min，a_p=0.5～1.5 mm的加工表面。a_p=0.5 mm时加工表面起伏较大，铣削轨迹较深。这是由小切深时刀具底刃缺口磨损较大导致的(图6a)。随着铣削深度增大，刀具底刃磨损减小，a_p=0.75～1.5 mm下的加工表面较为平整。图11c、图11f～图11i为a_p=1 mm，v_c=600～1000 m/min的加工表面，可以看出，v_c≤800 m/min时，加工表面较为平整；当v_c>800 m/min时，由于切削温度的提高，工件软化效应增大，表面切削轨迹间的黏结随着切削速度的增大明显增多，同时，刀具底刃磨损的加剧(图9)也进一步导致表面粗糙度增大。

2.3.2　表面粗糙度

图12所示为v_c=800 m/min时不同铣削深度

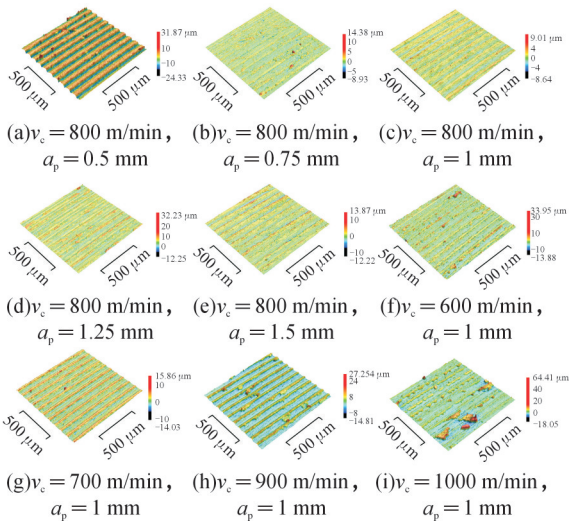


图11　不同工况下加工表面三维形貌

Fig.11　Three-dimensional surface topography under different working conditions

下的表面粗糙度变化趋势。当a_p=0.5 mm时，表面粗糙度*Sa*与*Sz*最高，分别达到(5.40±0.07)μm和(58.43±5.08)μm。当a_p=0.75mm时，表面粗糙度*Sa*与*Sz*分别大幅下降到(1.85±0.03)μm和(28.69±2.32)μm。随着a_p>0.75 mm，表面粗糙度*Sa*与*Sz*先缓慢变大后略有下降。图13所示为a_p=1.00 mm时不同铣削速度下的表面粗糙度变化趋势。当v_c由600 m/min提高到800 m/min时，表面粗糙度*Sa*与*Sz*变化较小。当v_c=900 m/min和1000 m/min时，由于切削温度升高导致工件表面的黏结加剧，加工工件表面粗糙度*Sa*分别提高到(4.21±0.26)μm和(3.33±0.39)μm，而*Sz*则分别提高至(68.45±13.56)μm和(65.30±24.25)μm。

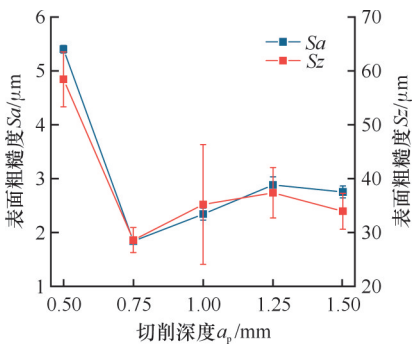


图12　不同铣削深度下的工件表面粗糙度

Fig.12　Surface roughness vs. milling depth

图14进一步分析了三种典型加工工况下的加工表面SEM形貌。其中，图14a为低铣削深度下(v_c=800 m/min，a_p=0.5 mm)的SEM图，铣削轨迹起伏较大，且边缘不平整。这是由于a_p较小时，刀具切削区主要在刀具底刃(图6b)，刀具底

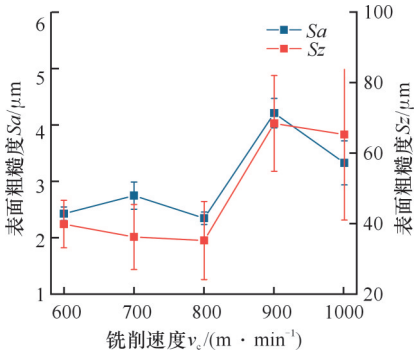


图13 不同铣削速度下的工件表面粗糙度

Fig.13 Surface roughness vs. milling speed

刃出现缺口磨损(图6a)。由于面铣中刀具底刃与加工表面直接接触,底刃的快速磨损导致加工表面粗糙、起伏大。图14b为在v_c=800 m/min时,a_p增大至1 mm的加工表面形貌图。在铣削深度增大后,刀具的底刃磨损减小(图6a),因此加工后的表面质量有了较大改善。图14c为高铣削速度下(v_c=900 m/min,a_p=1.00 mm)的SEM图。铣削速度提高,切削温度随之升高,刀具的磨损区域转为底刃磨损(图9a),这导致加工表面质量降低。此外,在高切削温度下工件发生热致软化,在铣削轨迹间发现了黏结的切屑,使得加工表面粗糙度增大。

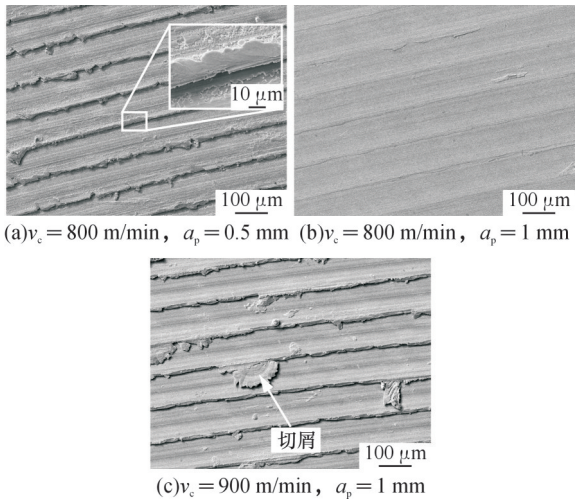


图14 不同工况下加工表面SEM形貌

Fig.14 SEM morphologies of machined surfaces under different working conditions

2.3.3 表面硬化

图15所示为不同切削参数下的工件材料表面硬化程度变化趋势。当v_c=800 m/min时,工件表面的硬化程度随着铣削深度的增大变化较小,介于180%~190%。当a_p=1 mm时,工件表面的硬化程度随着铣削速度的增大而增大。随着v_c从600 m/min提高到1000 m/min,工件表面硬化程度从177%提高到221%。其中,当v_c从800 m/min提高至900 m/min时,工件表面硬化程度明显提高,这是因为随着铣削速度的提高,加工过程中的切削温度升高,刀尖平均温度已经接近高温合金熔点,高温促使金属晶粒更容易发生塑性变形,晶粒拉长、破碎和纤维化程度提高,导致加工表面硬化程度上升。

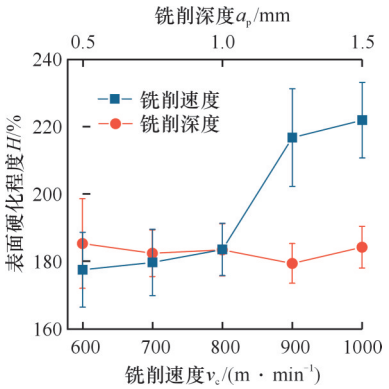


图15 铣削速度和铣削深度对表面硬化程度的影响

Fig.15 Influence of milling speed and milling depth on the degree of surface hardening

图16所示为v_c=800 m/min时不同铣削深度下的工件表层硬化测试结果。表面硬化程度随着深度的增加而下降,硬化深度为240~300 μm。与表面硬化程度影响结果相似(图15),在不同铣削深度下,加工表面截面上的硬化程度变化较小,同时硬化深度变化较小。图17所示为a_p=1 mm时不同铣削速度下的工件表层硬化测试结果。不同铣削速度下,表面硬化深度相近,为240~300 μm。同时,在距离表面相同深度下,硬化程度随着铣削速度的提高而变大。综上可知,复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀具粗加工高温合金GH4169后,工件表面硬化程度大于180%及硬化深度大于0.2 mm,因此,在下一步精加工或者半精加工前,需要预留足够的加工余量,以保证加工后的精度和表面质量。

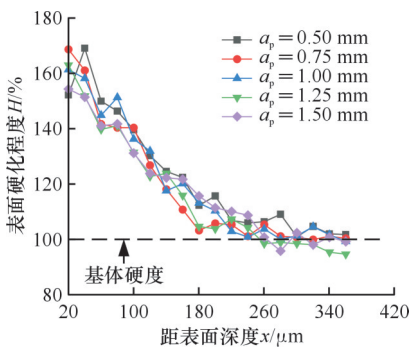


图16 不同铣削深度工件表层硬化测试结果

Fig.16 Test results of surface hardening of workpieces at different milling depths

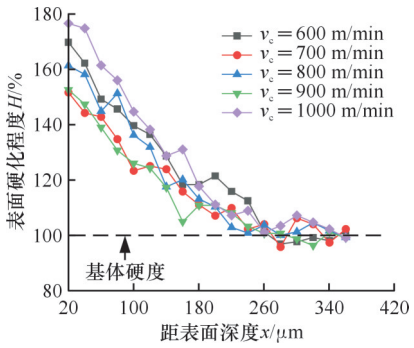


图17　不同铣削速度工件表层硬化测试结果

Fig.17　Test results of surface hardening of workpieces at different milling speeds

3　结论

1)微波烧结的可转位复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀具寿命随着铣削速度的提高呈先增加后减小的趋势，最优铣削速度为800 m/min，在不同铣削深度下(a_p=0.5～1.5 mm)的刀具寿命相近，因此，以提高镍基高温合金加工效率为目标，复杂刃形α/β-SiAlON陶瓷刀具更适用于高速大切深的粗加工，最优切削参数为v_c=800 m/min、a_p=1.5 mm、f_z=0.12 mm。

2)铣削深度对工件表面粗糙度的影响与刀具结构相关。a_p=0.5 mm时刀具底刃磨损严重，当a_p由0.5 mm增大至1.5 mm时，表面粗糙度先减小后缓慢增大。v_c对表面粗糙度的影响与切削温度引起的黏结有关。v_c=600～800 m/min时，工件表面粗糙度变化较小，当v_c≥900 m/min时，切削高温引起黏结现象加剧，导致表面粗糙度变大。

3)加工表面硬化程度随着铣削速度的提高(600～1000 m/min)由177%提高到221%，而随铣削深度变化较小(0.5～1.5 mm)，介于180%～190%。加工表面硬化深度随铣削速度与铣削深度增大变化均不明显，介于240～300 μm。

参考文献：

[1] de BARTOLOMEIS A, NEWMAN S T, JAWAHIR I S, et al. Future Research Directions in the Machining of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117260.

[2] YIN Zengbin, HAO Xiaohua, PENG Haohui, et al. A New β-Sialon Ceramic Tool Prepared by Microwave Sintering and Its Cutting Performance in High-speed Dry Machining Inconel718[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(9/10): 3105-3117.

[3] GUO Fuzhou, YIN Zengbin, HONG Dongbo, et al. Cutting Performance of a New Spark Plasma Sintered SiAlON Ceramic Tool for High-speed Milling of Inconel 718[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(11/12): 7327-7338.

[4] PARENTI P, PUGLIELLI F, GOLETTI M, et al. An Experimental Investigation on Inconel 718 Interrupted Cutting with Ceramic Solid End Mills[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(7): 2173-2184.

[5] MING W, HUANG X, JI M, et al. Analysis of Cutting Responses of Sialon Ceramic Tools in High-speed Milling of FGH96 Superalloys[J]. Ceramics International, 2021, 47(1): 149-156.

[6] LI Y, ZOU B, SHI Z, et al. Wear Patterns and Mechanisms of Sialon Ceramic End-milling Tool during High Speed Machining of Nickel-based Superalloy[J]. Ceramics International, 2021, 47(4): 5690-5698.

[7] FERNÁNDEZ-LUCIO P, PEREIRA NETO O, GÓMEZ-ESCUDERO G, et al. Roughing Milling with Ceramic Tools in Comparison with Sintered Carbide on Nickel-based Alloys[J]. Coatings, 2021, 11(6): 734.

[8] MA Z, XU X, HUANG X, et al. Cutting Performance and Tool Wear of SiAlON and TiC-whisker-reinforced Si_3N_4 Ceramic Tools in Side Milling Inconel 718[J]. Ceramics International, 2022, 48(3): 3096-3108.

[9] OGHBAEI M, MIRZAEE O. Microwave Versus Conventional Sintering: a Review of Fundamentals, Advantages and Applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 494(1/2): 175-189.

[10] THAKUR A, GANGOPADHYAY S. State-of-the-art in Surface Integrity in Machining of Nickel-based Super Alloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 100: 25-54.

[11] BITTERLICH B, BITSCH S, FRIEDERICH K. SiAlON Based Ceramic Cutting Tools[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(5): 989-994.

[12] 殷增斌，朱智勇，王子祥，等. 复杂刃形陶瓷刀具微波烧结技术研究[J]. 中国机械工程，2022，33(8)：899-907.
YIN Zengbin, ZHU Zhiyong, WANG Zixiang, et al. Study on Microwave Sintering Technology of Complex-shaped Ceramic Tools[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(8): 899-907.

[13] 洪东波，殷增斌，陈为友，等. 微波烧结复杂刃形SiAlON陶瓷刀具铣削GH4169高温合金性能研究[J]. 中国机械工程，2023，34(7)：770-779.
HONG Dongbo, YIN Zengbin, CHEN Weiyou, et al. Cutting Performance of Microwave-sintered Complex-shaped SiAlON Ceramic Cutting Tools in Milling GH4169 Superalloys[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(7): 770-779.

[14] MOLAIEKIYA F, STOLF P, PAIVA J M, et al. Influence of Process Parameters on the Cutting Performance of SiAlON Ceramic Tools during High-speed Dry Face Milling of Hardened Inconel 718[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(1): 1083-1098.

(编辑　袁兴玲)

作者简介：王晓沁，女，1972年生，副教授。研究方向为数字化设计与制造、高效加工技术。E-mail：wxq971011@aliyun.com。

殷增斌*(通信作者)，男，1987年生，教授、博士研究生导师。研究方向为高性能陶瓷刀具/智能刀具技术、加工状态智能监测。E-mail：zengbinyin@njust.edu.cn。

本文引用格式：

王晓沁，殷增斌，唐海权，等. α/β-SiAlON陶瓷刀具高速铣削GH4169性能与表面完整性[J]. 中国机械工程，2026，37(10)：2603-2609.

WANG Xiaoqin, YIN Zengbin, TANG Haiquan, et al. Performance and Surface Integrity of High-speed Milling of GH4169 with α/β-SiAlON Ceramic Tools[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(10): 2603-2609.