

文章编号: 1673-9981(2021)01-0071-06

钛合金切削加工技术研究进展

祁志旭, 陈兴媚

广东理工学院工业自动化系, 广东 肇庆 526114



摘要: 简要介绍了钛合金材料的基本性能以及钛合金切削加工中的问题, 结合近几年对于钛合金切削研究的成果, 从钛合金切削刀具、切削工艺和仿真模拟方面, 对提升钛合金切削性能的研究现状进行了阐述, 并对未来钛合金切削刀具结构、冷却工艺和仿真技术的发展和可能性进行了展望。

关键词: 钛合金; 刀具; 工艺; 仿真技术

中图分类号: TG506.9

文献标识码: A

引文格式: 祁志旭, 陈兴媚. 钛合金切削加工技术研究进展[J]. 材料研究与应用, 2021, 15(1): 71-76.

QI Zhixu, CHEN Xingmei. Research progress of titanium alloy cutting technology[J]. Materials Research and Application, 2021, 15(1): 71-76.

钛合金作为正在崛起的“第三金属”, 已然成为新技术、新设备不可或缺的金属材料^[1]. 至二十世纪 50 年代发展钛合金材料至今, 已被广泛应用于航空航天、军事及民用工业等领域, 如航天器中的压力容器、火箭壳体, 战斗机中部分非承力部件的应用及人体硬组织的缺陷、创伤修复等^[2]. 然而, 钛合金的一些物理及化学特性导致了其难加工属性, 相对加工性能也只有 45 钢的 20%~40%^[3], 尤其是其切削加工性能与普通金属(铝合金、镁合金、钢材等)相比存在很大区别. 钛合金的变形系数相比与常规金属材料而言较小, 也使得其切屑与刀具前刀面间的磨损量增加, 进而加速对刀具的磨损. 钛合金导热系数较小, 在切削过程中容易使得热量集中切削刃口附近(最高可达 1000 °C 以上^[3-4]), 在高温环境下化学活性较大的钛合金容易出现表面硬化现象, 严重影响工件质量和刀具寿命. 而且, 在切削过程中钛合金与刀具材料容易发生化学反应, 较大的切削力和切削温度使刀具易产生粘结磨损.

随着对钛合金切削加工过程的研究, 改变工艺

过程和切削条件, 切削力、切屑形貌、切削温度和刀具磨损等方面均呈现出其特有的特征和规律^[5], 这对于钛合金切削加工技术的发展具有重要的现实意义. 目前, 国内外学者针对于钛合金切削刀具、工艺过程、仿真模拟等方面展开了大量的研究工作, 并取得了一定的创新性成果.

简要介绍了钛合金材料的性能, 对钛合金加工的切削刀具、工艺设计、仿真模拟的研究进行了阐述, 并对钛合金切削加工技术的发展进行了展望.

1 钛合金材料的基本性能

相比其他合金, 钛合金具有高比强度、耐腐蚀、轻质、耐热性和耐低温性等特性(表 1), 并且具有超导、贮氢和形状记忆的特殊属性^[6].

根据钛合金相的相对含量可以把钛合金分为 α 型、 β 型和 $\alpha + \beta$ 型, 其相应的国内牌号为 TA, TB 和 TC. α 相钛合金属于密排六方结构, 具有较高的强度、韧性和可焊性, 并且在高温环境下对氧污染具有

表 1 钛合金材料与其他金属材料性能对比

Table 1 Performance comparison of titanium alloy materials and other metal materials

材料	密度/(g·cm ⁻³)	导热率/(W·(m·K) ⁻¹)	弹性模量/GPa	比强度	抗拉强度/MPa
钛合金	4.5	7.5	113	29	686~1176
不锈钢	—	—	16	199.9	608
铝合金	2.7	21	121	71.5	470
镁合金	1.74	16	159	44.8	—

明显的抵抗性、耐磨性高于纯钛、具有较好的切削加工性,但成型能力较差,典型合金有 TA7^[6-7]. β 相钛合金属于体心立方结构,在室温下具有较高的强度、较好的冷成型性,但其热稳定性较差、在成型过程中易受污染而损坏、切削加工性相对较差,使用较少,典型合金有 TB1 和 TB2^[6-7]. $\alpha+\beta$ 相钛合金具有良好的室温强度和成型性能,材料组织稳定,切削加工性能介于 α 型和 β 型钛合金之间,适用范围广用量较大,典型合金有 TC4^[6-7].

钛合金根据应用领域的不同,其研究的侧重点也会有所差异.在航天航空领域中多以材料的比强度、耐热性、疲劳寿命和韧性等作为研究重点,以发展综合力学性能优异的钛合金材料为目的;在非航空领域中多以材料的可加工性、耐腐蚀性等性能作为研究重点,以发展成分简单或低合金化的合金材料为目的^[6].

2 钛合金切削刀具研究现状

无论钛合金材料应用于哪些领域,其优异的性能使其具备其他材料不可替代的特殊用途,但随之而来的钛合金加工问题也成为各国学者所注意的问题,其中切削加工技术也是各国学者所研究的重点之一.

2.1 刀具类型的应用现状

对于钛合金这类典型的难加工材料,其切削加工性决定了对其切削加工的高要求,而刀具选择直接决定能否加工钛合金材料及加工零件的精度质量.例如,切削钛合金过程中在切削刃口附近容易发生热量集中,所选刀具需耐高温.由于钛合金的亲合力较大,切削过程中应最大程度减少钛合金材料与刀具材料发生扩散等.

2.1.1 高速钢刀具

一般高速钢刀具由于耐热性差而很难胜任钛合

金加工环境,切削刃口局部高温会加剧刀具磨损,虽然含钴高速钢能够明显改善刀具磨损问题但对于钛合金零件的加工精度难以保证,只能对钛合金进行粗加工^[8-9].

2.1.2 硬质合金刀具

硬质合金刀具具有良好的耐热性、较高的硬度、抗冲击性和抗破坏性,是钛合金切削较为理想的刀具类型.但 YT 类硬质合金在高温环境下易与钛合金发生元素扩散和化学反应,会发生刀具-工件粘结现象,加速刀具磨损;而 YG 类硬质合金刀具与钛合金亲和力较小,更加适用于钛合金切削.其中超细晶硬质合金具有更高的硬度和耐热性,也逐渐应用于钛合金切削加工中;涂层硬质合金刀具在涂层的保护下能够保证较长的刀具寿命,也是目前钛合金切削应用最广泛的一类刀具^[8,10].

2.1.3 陶瓷刀具

陶瓷刀具具有很高的硬度和化学稳定性,但是其耐磨性及抗冲击性不如硬质合金.切削过程中会产生大量的切削热,一般不用于钛合金精车工序,以免切削热影响零件精度;粗车工序的合理利用可大大缩短零件的加工时间,同时切削过程中应保持机床主轴转动平稳,进给均匀,杜绝切削过程中的振动现象^[8,11].

2.1.4 超硬刀具

超硬刀具在钛合金切削中具有良好的应用前景,其高硬度、高耐磨性和化学稳定性决定了在切削钛合金时能够实现高速切削的同时保证较好的工件表面质量,是最理想的钛合金加工刀具,可用于精加工工序及航空航天领域的高精度零件加工.但是超硬刀具的造价一般较高,目前很难大面积普及^[8,10].

2.2 刀具结构的研究现状

2.2.1 刀具几何参数研究

刀具几何参数对钛合金表面质量起决定性作用,切削力、排屑效果、刃口强度和加工变形等都与

刀具几何参数有直接关系,刀具刃口一般选取圆形或方形的硬性几何形状,以增大切削力度;减小刀刃粗糙度,以保证排屑流畅,避免崩刃;采用较小的刀具前角,以增大切屑与前刀面的接触长度,提高刀具耐用度;后角略大,以减小后刀面与工件表面的摩擦。齐彪^[2]在对硬质合金刀具参数化建模和结构优化研究时发现,四刃平头铣刀切削钛合金过程中前角和后角的改变,切屑形貌、各向切削力和切削温度均呈现相应的规律变化,最终确定四刃平头铣刀的前角为 10° 左右,后角为 $8 \sim 10^\circ$ 。张建飞等人^[12]以刀具的前角、后角和钝圆半径作为刀具几何参数变量,设计了 $L25(5^3)$ 正交试验表,研究发现:主切削力和切深抗力与几何参数之间呈线性关系,刀具几何参数对主切削力及切深抗力影响作用大小分别为前角 $>$ 钝圆半径 $>$ 后角,钝圆半径 $>$ 前角 $>$ 后角。

2.2.2 微织构刀具研究

刀具表面织构是利用电火花、化学蚀刻或激光等方法在刀具表面加工微米级至纳米级不同形状的微织构,该种类型的刀具是通过改善表面摩擦学特性来实现环境友好的加工。其主要机理在于微织构刀具可减小刀-屑界面接触长度,进而降低摩擦和切削温度,微织构的存在可减少犁沟和粘结现象,并且可增加润滑液的滞留时间和可达性^[13-14]。微织构刀具作为一种新型刀具,在近些年得到各国学者的广泛关注,从微织构对切削力、切削温度、接触面摩擦力和刀具磨损等方面均呈现较为积极的创新性成果。S. K. Mishra 等人^[15]研究了微织构密度、深度和形状对切削力的影响发现,在干切削中微织构的深度和形状对切削力的影响较小,织构密度对切削力的影响较大,并且在仿真结果中观察到严重影响刀具磨损和加工质量的二次切削现象。M. S. Sawant 等人^[16]对比了凸点织构刀具、凹点织构刀具和传统刀具在车削 Ti-6Al-4V 过程中的切削温度,其中凸点织构刀具相比与其他两个刀具表现出较低的切削温度。S. Niketh 等人^[17]分别对比了刀具的光滑表面、微坑表面和微槽表面的摩擦因数,相比与光滑表面,微槽和微坑表面的摩擦因素分别降低了 14.29% 和 16.33%。LIU 等人^[18]在对 WC-10Ni-3Al 和 WC-8Co 两种微织构刀具切削钛合金的研究中指出,WC-10Ni-3Al 微织构刀具具有较小的磨损,前刀面的微织构在较高的切削速度下能够明显降低切削力、切削温度和刀面粘结现象。

2.2.3 涂层刀具研究

刀具涂层的应用也是钛合金切削刀具的研究重

点之一,涂层刀具的出现能够明显降低刀具的磨损度、提高刀具寿命,同时也能够获得较高的切削速度和进给速度,进而得到更高的加工效率。目前国内在钛合金切削领域中,涂层刀具的研究和使用还处于初期阶段,使用率不到国外的一半,但是在不断对刀具涂层性能的探索和完善中也获得了一定的创新性成果^[19]。对于钛合金切削用刀具涂层的研究可以集中在多元涂层、复合涂层和新型超硬涂层等方面,在不断的改进中改进涂层性能,提高涂层使用寿命。

一般用于钛合金切削的多元涂层有 Ti 基多元涂层和 Cr 基多元涂层。TiN 涂层在低速切削时具有较高的寿命,但在高速切削环境下膜基结合力较差,容易出现涂层脱落现象。相比与 Ti 基多元涂层,CrN 涂层具有良好的耐磨性、耐腐蚀性,分解温度也高于 TiN,但其切削效果仍不如预期。应用于钛合金切削环境的刀具涂层,一般都是在此基础上添加其他元素后改进的多元涂层。为改善 TiN 涂层性能,引入 C 元素形成 TiCN 涂层,其耐磨性明显提升,但是力学性能在高于 500°C 后迅速衰减且容易氧化,从而加速了涂层的破损^[20]。TiSiN 涂层具有良好的抗氧化性和高硬度,在 900°C 时表现出极佳的抗氧化性和红硬性,具有同样优异性能的还有 TiAlN 涂层,其抗氧化温度可达 950°C ^[21-22]。同样,对于 CrN 涂层的改进中,Si 元素的加入提高了 CrSiN 涂层的抗氧化性和硬度,CrAlN 涂层中由于 Al 元素的加入提高了涂层的热稳定性,并且在切削钛合金实验中 CrAlN 涂层刀具粘着现象相比于 CrN 涂层刀具明显改善^[23]。

复合涂层是在基体表面采用两种或两种以上的涂层技术,利用不同涂层之间的元素优势,形成综合性能优异的涂层。CrCN/CrN 及 CrAlN/CrN 复合涂层的综合性能明显优于 CrN 涂层,并且该涂层刀具寿命相比与单一涂层刀具明显提升^[19]。AlCrN/TiAlN 是目前应用较为广泛的一种复合涂层,在加工钛合金时表现出优越的加工性能^[23]。

超硬涂层刀具,更加适用于难加工材料的极端切削条件。现阶段超硬涂层材料主要有金刚石涂层、立方氮化硼涂层和类金刚石涂层等。金刚石涂层具有较高的导热性,是加工钛合金比较适合的一类涂层材料,但是在较高切削温度环境下,金刚石具有较活跃的的化学性质,可能会导致涂层分层。刘凯等人^[24]研究发现,利用金刚石涂层刀具高速干铣削 TC4 时,从切削力、温度和形成毛刺等方面看,刀具所表现的切削性能并不理想,主要是在高速切削过

程中产生的温度使金刚石涂层石墨化和氧化,加速了刀具磨损.在铣削 TC18 的过程中,无涂层硬质合金刀具崩刃失效,金刚石涂层刀具表现出较长的刀具的使用寿命^[25].立方氮化硼涂层具有高硬度和耐磨性,在切削钛合金方面的优势也逐渐受到关注.姜增辉等人^[26]对比了 PCBN 刀具与硬质合金刀具在切削速度为 135 m/min 的条件下干式车削 TC4 的刀具磨损情况发现,PCBN 刀具表现出更好的刀具耐用度.李甜甜^[27]在对 Ti6Al4V 进行高速切削的过程中发现,PCBN 刀具在高速、低进给、小切深的切削条件下表现出比非涂层硬质合金刀具更高的稳定性和更长的刀具寿命.

3 钛合金切削工艺研究现状

3.1 钛合金切削参数优化研究

切削参数对材料的表面质量和刀具使用寿命以及生产加工效率具有重要影响,通过优化切削参数,提高钛合金的加工质量.国内外学者对此提出了多种研究方法和评价模型,目的就是为了确定材料的最佳的切削条件.张臣等人^[28]提出基于仿真数据的数控铣削加工多目标参数优化方法,将连续问题转化为离散问题、变参数优化问题转化为多参数优化问题,并建立了相应的数学模型,以钛合金切削为优化实例,给出了参数优化后的时间和成本分别减少了 25.7% 和 21.4%,生产效率明显提升.R. Savaranan 等人^[29]通过搜索边界等方法实现了对切削参数变化对刀具和加工质量的影响的研究,切削参数的优化降低了加工误差,同时也提高了材料的加工精度和质量.黄蓓^[30]对 Ti6Al4V 材料分别研究了切削速度、进给量和切削深度对切削力、表面粗糙度、切削温度等的影响,通过线性回归的方法建立了表面粗糙度、切削温度的数学模型,并提出了改善钛合金切削加工性的方法.刘进彬^[31]利用正交车铣的方法对 TC4 进行切削加工,研究了正交车铣参数对切削力、刀具寿命和工件表面粗糙度的影响,研究表明:对在切削过程中对刀具寿命影响最大的使切削速度,切削深度次之,进给量最小;对工件表面粗糙度的影响大小主次顺序为铣刀转速>工件转速>轴向进给量.

3.2 钛合金切削过程中的冷却工艺研究

由于钛合金的变形系数小、导热性差等原因,在切削过程中会产生大量的切削热,当热量集中达到

一定临界温度后会加速刀具的磨损,降低产品的表面质量.对钛合金切削过程中进行冷却是非常必要的工艺步骤,但冷却的形式和方式也是影响切削效果的关键.一般金属切削会通过乳化液来降低刀具和加工工件的温度,以此来降低刀具的磨损,提高刀具寿命.但是对于钛合金切削来说传统冷却工艺很难明显改善刀具的磨损严重及工件表面质量低等问题,且随着绿色加工的概念提出低温切削、微量润滑技术成为研究热点.

低温切削技术是通过冷却介质使加工区域温度有效降低的一种技术.低温切削技术不仅可以有效降低切削温度,同时在冷却过程中能使材料局部冷脆及增强断屑频率,有效提升刀具寿命.目前,主要的低温切削技术有低温冷风切削技术、低温微量润滑切削技术和超低温切削技术.易湘斌等人^[32]建立了干式和冷风条件下硬质合金刀具切削 TB6 材料的多元回归模型,发现冷却方式的变化会导致切削参数对切削力的影响有所不同,低温冷风条件下刀具磨损有所降低,且切削速度对切削力的影响有所减小.苏永生等人^[33]研究微织构硬质合金刀具在干切削和低温微量润滑条件下切削 Ti6Al4V 材料的切削性能的变化,结果表明,微织构(沟槽)刀具在低温微量软化条件下能够改善刀具的摩擦性能,切削性能最好.许清等人^[34]以液氮作为超低温冷却介质,在超低温条件下对 TC4 进行大进给切削,研究表明:在相比与干切削环境下,液氮冷却下的钛合金切削可减缓热裂纹的产生,显著提升刀具耐用度.

结合目前对于低温冷却技术的研究发现,低温微量润滑冷却和超低温冷却环境下的切削效果要优于低温冷风切削^[35].相比与低温微量润滑切削技术,超低温冷却切削技术目前还处于研究初期,虽然减少了切削液的使用,无污染,但是超低温环境会使得材料的性能有所改变,可能会导致材料表面加工质量降低,如何控制超低温介质的用量、温度等参数对切削效果的影响也将成为之后的研究方向之一.

4 钛合金切削仿真技术研究现状

有限元仿真技术在切削加工领域已经得到了广泛的应用,随着计算机技术的发展,仿真结果的精确性也在逐渐提高,对实际切削研究具有明显的指导意义.相比与理论分析和试验法研究切削加工,其能够明显降低试验成本,缩短研发周期,并且计算结果可实时重复观察.

一般利用有限元技术进行钛合金切削研究,主要是对切削形貌、切削力、应力应变和磨损度等参数的预测,提高具体实验中的可操作性. Tej Pratap 等人^[36]对铣削 Ti6Al4V 材料进行有限元仿真模拟,并对铣削过程中的应力分布、温度分布和切削力进行预测,并通过实验验证了仿真数据的有效性. 陈国三等人^[37]模拟了钛合金铣削过程中切屑的形成过程发现,其最大应力值出现在第一变形区,切削温度最大值出现在第二变形区,对切削力的影响最大的使轴向切深. 唐柏清^[38]基于 ABAQUS 建立了切削钛合金硬质合金刀具磨损仿真模型并发现,当切削速度越高刀具磨损越快,刀具越容易失效,同样也验证了刀具前刀面的磨损仿真值与实验值的变化趋势基本一致,并且切削时间越长,吻合度越高. 朱留宪等人^[39]基于 SPH 法建立了钛合金切削仿真模型,解决了有限元计算中由于网格畸变造成切屑形成困难的问题,也说明了 SPH 法切削钛合金仿真的可行性.

5 结 语

通过对钛合金切削刀具、切削工艺和仿真技术的优化研究,能够提高钛合金的切削性能、产品质量和加工效率. 因此,近些年来国内外研究者对钛合金的切削过程展开了广泛的研究,从刀具类型的选用、刀具宏微观结构的改变、工艺路线的优化等方面揭示钛合金切削机理以及钛合金切削过程中的规律,并取得了创新性成果.

今后对于钛合金切削的研究中依然以提升钛合金切削性能为目标,从刀具、工艺、仿真等方面继续进行更深层此的研究.

(1) 刀具结构方面,提升钛合金的切削性能可能会继续深入研究刀具表面微织构的形貌对切削过程的影响,开发新的微织构形貌和微织构成形技术也可能成为之后的发展方向.

(2) 钛合金切削过程中冷却工艺也是制约产品质量和切削性能的原因,超低温冷却切削技术的进一步发展也将成为必要,

(3) 对于钛合金仿真模拟的研究主要的重点依然以计算的精确性为目标,尽可能的去预测接近真实的切削过程. 优化算法,减小切削变形过程中的网格畸变的可能性可是仿真模拟的发展方向之一.

参考文献:

- [1] 叶勇,王金彦. 钛合金的应用现状及加工技术发展概况[J]. 材料导报,2012,26(S2):360-363.
- [2] 齐彪. 钛合金加工用硬质合金刀具参数化建模及其结构优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [3] 刘欣. 表面微织构 WC-10Ni-3Al 刀具切削 Ti-6Al-4V 的磨损特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- [4] VENUGOPAL K A, PAUL S, CHATTOPADHYAY A B. Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling[J]. *Wear*, 2007, 262: 1071-1078.
- [5] 黄蓓. 基于钛合金的难加工材料切削加工工艺研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [6] 陈鸿运. 表面微织构刀具切削钛合金的切削性能及磨损机理研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2016.
- [7] 杨俊平. 钛合金的加工技术及发展[J]. 军民两用技术与产品,2013(6):54-58.
- [8] 张艳艳,秦永康. 高速切削加工钛合金的刀具材料探讨[J]. 南方农机,2019,50(3):35-37.
- [9] 祝新发. 航空航天系列化刀具的开发与应用[J]. 世界制造技术与装备市场,2020(4):30-33.
- [10] 吴宏强. 钛合金材料切削加工中刀具的应用[J]. 机械工程师,2015(9):201-202.
- [11] 杨金发,卢成玉,兰影锋等. 航空发动机难加工材料切削技术探索[J]. 金属加工:冷加工,2017(7):3-5.
- [12] 张建飞,杜茂华,王神送. 基于 AdvantEdge 仿真的刀具几何参数对钛合金 Ti6Al4V 切削力的影响研究[J]. 工具技术,2017,51(6):61-64.
- [13] 唐联耀,唐玲艳,李鹏南等. 微织构刀具切削钛合金的研究进展[J]. 宇航材料工艺,2020,50(4):8-12.
- [14] XU D, NG M K, FAN R, et al. Enhancement of adhesion strength by micro-rolling-based surface texturing[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2015, 78: 1427-1435.
- [15] MISHRA S K, GHOSH S, ARAVINDAN S. 3D finite element investigations on textured tools with different geometrical shapes for dry machining of titanium alloys [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018,141:424-449
- [16] SAWANT M S, JAIN N K, PALANI I A. Influence of dimple and spot-texturing of HSS cutting tool on machining of Ti-6Al-4V[J]. *J Mater Process Tech*, 2018, 261:1-11.
- [17] NIKETH S, SAMUEL G L. Surface texturing for tribology enhancement and its application on drill tool for the sustainable machining of titanium alloy[J]. *J Clean Prod*, 2017, 167:253-270

- [18] LIU X, LIU Y, TIAN Y. Performances of micro-textured WC-10Ni3Al cemented carbides cutting tool in turning of Ti6Al4V[J]. Int J Refract Met H, 2019, 84:104987.
- [19] 唐宇鑫. 钛合金加工用刀具涂层的设计、制备及性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2017.
- [20] SHAN L, WANG Y, LI J, et al. Tribological behaviours of PVD TiN and TiCN coatings inartificial seawater[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 226: 40-50
- [21] CHOI J B, CHO K, LEE M H, et al. Effects of Si content and free Si on oxidation behavior of Ti-Si-N coating layers [J]. Thin Solid Films, 2004, 447: 365-370
- [22] 隋旭东, 李国建, 王强, 等. 钛合金切削用 $Ti_{(1-x)}Al_xN$ 涂层的制备及其切削性能研究[J]. 金属学报, 2016, 52(6):741-746.
- [23] 付英英, 李红轩, 吉利, 等. CrN 和 CrAlN 薄膜的微观结构及在不同介质中的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 34-41
- [24] 刘凯, 李兴斐, 熊文亮. 金刚石涂层刀具干铣削 TC4 切削性能研究[J]. 机械工程与自动化, 2019(5):157-158.
- [25] 王其探, 明伟伟. 铣削高强度钛合金 TC 18 的刀具磨损机理[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(1): 19-24
- [26] 姜增辉, 于海鸥, 王文凯, 等. PCBN 刀具高速车削 TC4 钛合金刀具磨损的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(5):98-101.
- [27] 李甜甜. PCBN 高速切削钛合金实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [28] 张臣, 周来水, 余湛悦, 等. 基于仿真数据的数控铣削加工多目标变参数优化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005(5):1039-1045.
- [29] SAVARANAN R, RAZFAR M R, SALIMI A H, et al. Optimization of machining parameters to minimize tool deflection in the end milling operation using genetic algorithm[J]. World Applied Science Journal, 2009, 6(1):64-69.
- [30] 黄蓓. 基于钛合金的难加工材料切削加工工艺研究[D]. 南京:南京理工大学, 2015.
- [31] 刘进彬. TC4 钛合金正交车铣加工切削参数优化研究[D]. 济南:山东大学, 2020.
- [32] 易湘斌, 芮执元, 李宝栋, 等. 低温冷风高速铣削 TB6 钛合金切削力建模与分析[J]. 制造技术与机床, 2017(9):128-132.
- [33] 苏永生, 李亮, 王刚, 等. 织构化刀具切削性能测试及切削温度仿真分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43(3): 92-97.
- [34] 许清, 任斐, 赵威, 等. 超低温大进给铣削 Ti-6Al-4V 钛合金的刀具磨损试验研究[J]. 工具技术, 2018, 52(5): 30-32.
- [35] 高东强, 曾行军, 何乃如, 等. 低温切削技术在难加工材料加工中的应用[J]. 制造技术与机床, 2020(6): 39-43.
- [36] TEJ PRATAP, KARALI PATRA A A. Dyakonov. Modeling cutting force in micro-milling of Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. Procedia Engineering, 2015, 129: 134-139.
- [37] 陈国三, 黄晓华, 陈龙高, 等. 钛合金 Ti6Al4V 高速铣削三维有限元仿真分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(4):43-46.
- [38] 唐柏清. 钛合金车削加工刀具磨损建模技术研究及预测分析[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
- [39] 朱留宪, 孙勇, 张永盛, 等. 基于 SPH 方法的钛合金切削仿真分析[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(4):1-3.

Research progress of titanium alloy cutting technology

QI Zhixu, CHEN Xingmei

Guangdong Polytechnic College, Department of Industrial Automation, Zhaoqing 526114, China

Abstract: The basic properties of titanium alloy materials and the problems in the cutting of titanium alloy is briefly introduced. Combined with the results of research on titanium alloy cutting in recent years, the research status of improving the cutting performance of titanium alloy is reviewed from the aspects of titanium alloy cutting tools, cutting technology and simulation of titanium alloy cutting. And the development and possibility of tool structure, cooling process and simulation technology for future titanium alloy cutting are also prospected.

Key words: titanium alloy; tool; process; simulation technology