

钛合金的高速粗加工 ——大进给铣削技术

High Speed Rough Machining—High Feed Milling of Titanium Alloys

南京航空航天大学机电学院国防科技工业“难加工材料加工”技术研究应用中心 李 亮



李 亮

博士,教授,主要从事航空航天难加工材料的切削技术研究,发表学术论文 170 篇,获多项省部级科技奖励。

自旋转圆刀片和圆弧底刃铣刀是目前解决钛合金高速粗加工铣削的两种大进给铣削方式。自旋转圆刀片在刀具寿命和轴向铣削厚度上具有较好的适应性;圆弧底刃大进给铣刀可以适应更高的每齿进给量和铣削速度。随着航空制造业对钛合金零件需求量的增加,大进给铣削钛合金有望获得进一步的发展和应

提高各种钛合金的铣削加工效率一直是航空制造业和相关机床工具企业孜孜不倦追求的目标。尤其是在钛合金大型零件的粗加工阶段,如何有效提高金属去除率和控制加工精度,是航空制造业迫在眉睫需要解决的工艺问题。

在钛合金的粗加工中,常采用铣削线速度 40~60m/min,每齿进给

量 0.04~0.08mm/z,通过较大的轴向铣削深度和径向铣削宽度提高钛合金粗铣的效率是目前国内外较为常用的方法。在加工余量较大的场合,大切深加工可以有效减少走刀次数,从而显著提高材料切除率,如应用直径 76mm 的玉米铣刀,可以获得 300~1200cm³/min 的材料切除率。对于大切深而言,铣刀的切削载荷大,

如果刀刃出现很小的破损,极易导致整个刀具切削刃的快速损坏,从而导致严重的生产质量事故。这种高材料去除率的钛合金粗铣削方式通常需求较高的主轴功率和主轴扭矩,如直径 32mm 的铣刀在 32mm 的轴向铣削深度和径向铣削宽度下,铣削扭矩超过 $300\text{N}\cdot\text{m}$,在应用时还要注意机床、夹具等工艺系统的其他部分能否满足其功率和载荷需求。

提高切削速度是提高切削效率的一个非常有效的途径。提高切削速度,单位时间内材料去除率增加,切削加工的时间减少,大幅度提高了加工效率。由于钛合金的铣削速度和径向铣削宽度对切削温度的影响很大,受刀具快速磨损的制约,现有钛合金的高速铣削($V_c > 100\text{m}/\text{min}$)通常把径向铣削宽度限制在刀具直径的 1/20 左右,难以适应高材料去除率的钛合金粗加工需求。

目前钛合金加工的显著问题之一便是加工效率低。高材料去除率往往是通过增加切削用量来实现的,高速切削和大切深切削都可在一定程度上提高材料去除率,但受到机床和刀具的限制,这两种加工方式的提升空间也受到了约束,而大进给切削是实现高材料去除率的另一个行之有效的途径。

粗加工的目标是用最短的加工时间尽可能切除更多的工件材料。虽然材料去除率大小主要取决于加工机床的有效功率,但是通过采用径向减薄切屑厚度(Radial Chip Thinning)的方法,即便是在一台小功率的机床上,仍然可以在保证加工要求的切削条件下实现生产率的最大化。随着径向切深的减小,瞬时切削厚度也将随之变小,会使刀具与工件表面发生刮擦而无法切入工件,因此当径向切深减小时,需要增大每齿进给量。大进给铣削正是根据这种理论,目标为在最短时间内去除尽可能多的工件材料的一种

可选方法。

大进给铣削的概念

大进给铣削主要是为提高金属切除率,以提高生产率和缩短加工时间而开发的一种粗加工方法。大进给铣削的原理是:采用较小的轴向切削深度,通常不超过 2mm,产生较薄的切屑,这些切屑能从切削刃上带走大量切削热。大进给铣削的每齿进给量通常可高达常规铣削的 5 倍以上。这种铣削方式可减少产生的切削热,从而延长刀具寿命,并提供更高的金属切除率,比传统铣削方式快约 1~3 倍。能取得这个效果的关键在于把浅的轴向切削深度和高的每齿进给量成对使用,在降低切削温度延缓刀具磨损的同时,还获得了更高的金属加工去除率。而在实际操作中,是一种有望在大径向铣削宽度的情况下,在较高材料去除率的同时,并跨越 $100\text{m}/\text{min}$ 的钛合金高速铣削速度门槛的钛合金铣削方式。

目前,大进给铣削主要应用于端面铣削,在仿形铣削、螺旋插补铣削和插铣中也有很好的表现。主要在

轻合金、钢等材料的铣削加工中具有较为广泛的应用,在钛合金加工中也有优异的表现。

大进给铣刀的切削刃多为圆弧形式,其主偏角为渐变式,随着轴向铣削深度的增加而增大,而较小主偏角是实现大进给切屑减薄最重要的因素(图 1)。其中圆弧刃形的最大切削厚度可表示为:

$$\sqrt{R^2 - 2\sqrt{(2R - a_p)a_p f_z} + f_z^2}$$

由上式可以看出在增加切削深度时,必须增加圆弧刃的半径才能维持住较薄的切削厚度。

大进给铣削的主要方式

1 大刀尖圆弧形铣刀

此类刀具多以圆刀片铣刀的形式为主,是生产中最常用的一种每齿进给量较大的铣削方式。由于受到刀片安装方式的影响,圆刀片的直径多在 8~12mm 的范围内,由于刀片直径有限,圆刀片铣刀的每齿进给量多在 0.2~0.5mm/z,同时径向铣削深度应控制在刀片直径的 1/3 以下。

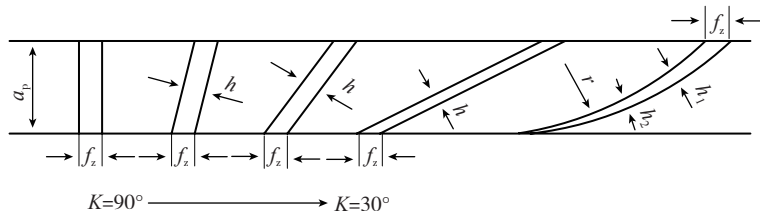


图1 主偏角(90°~30°)对切削面积的影响



图2 自旋转铣刀

圆形刀片的铣刀在切削时,运用较小的轴向切深也能产生很薄的切屑,从而提高每齿进给量的水平。但在生产过程中发现,圆刀片因为其刀

刃圆弧半径有限,因而每齿进给量并不能提升 too 高的水平,而且圆刀片在使用过程中每个刀片大约可转 3 个位置进行切削加工,降低了圆刀片的整体利用率,未使用到的切削刃部分产生了较大的成本浪费。如果在切削过程中圆刀片可以自旋转,通过刀片的旋转增加刀刃接触区域,不仅提高刀片的利用效率和刀刃磨损的均匀程度,同时极大地改善了刃口的传热、散热条件,对钛合金铣削速度的提高具有一定的优势。传统的自旋转铣刀刀具结构中安装

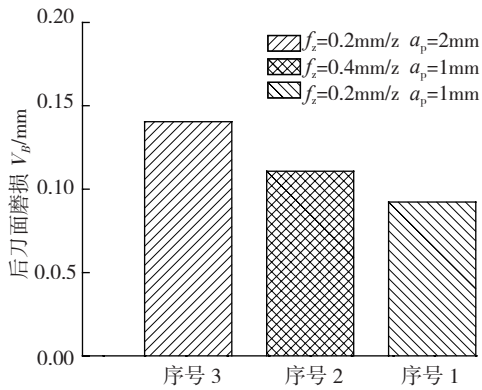


图3 自旋转铣刀铣削TC4钛合金的的磨损对比 ($V_c=80m/min$)

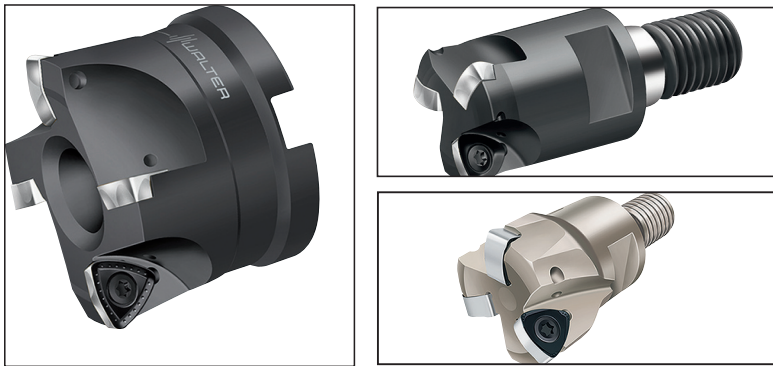
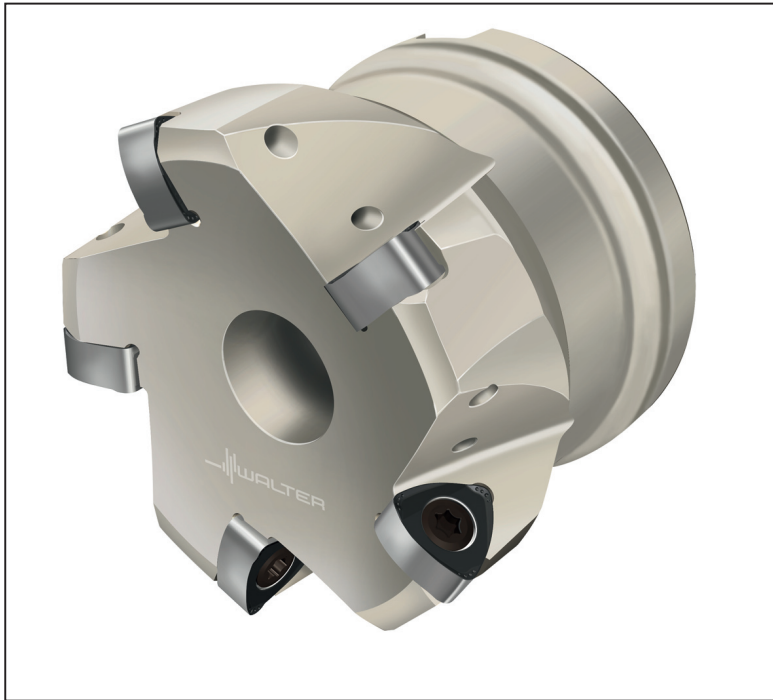
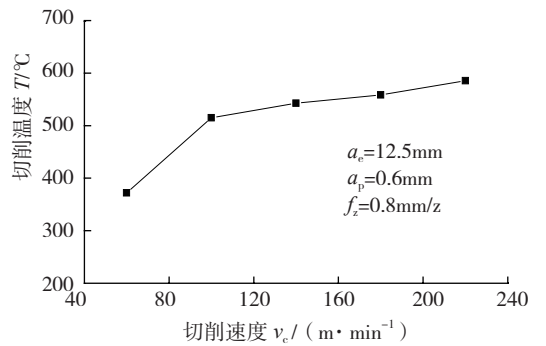
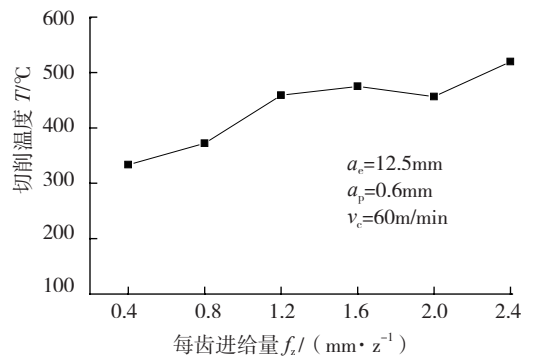


图4 几种典型的圆弧刃大进给铣刀



(a) 切削速度对切削温度的影响



(b) 每齿进给量对切削温度的影响

图5 大进给切削的切削温度

了支承轴承,导致结构复杂,并使刀片安装的刚度和强度大幅弱化,刀具极易失效,缺乏实用性。目前 Pokolm 公司推出了滑动摩擦的自旋转铣刀(图 2),可以保持刀片安装的刚度和强度,简化了刀具结构,在钛合金和高温合金的铣削中具有较好的前景。

由于自旋转刀具刃口的散热条件改善,切削温度受每齿进给量的影响较小,在较大的每齿进给量下磨损变化不大(图 3),是一种较为可行的高速大进给铣削钛合金的加工方式。

2 圆弧底刃形铣刀

由于圆刀片的直径不能随意加大,为实现更大的每齿进给量,现有大进给铣刀多采用大圆弧半径底刃的结构,把底刃作为主切削刃进行铣削,由于切削刃的圆弧半径可以无限大,有时可用直线刃形,每齿进给量可以比圆刀片大出数倍(图 4)。

从图 5 可以看出,由于大圆弧刃形的切削厚度减薄效应,以及增加的切削刃实际接触长度,使得铣削钛合金的切削温度对铣削速度和每齿进

给量的敏感程度远低于传统的侧刃铣削,由此为钛合金粗加工达到更高的切削速度提供了可能。在现有的冷却液浇注的条件下,在铣削钛合金时,在 100m/min 的切削速度以下,合适的大进给铣刀可以获得满足现场应用的刀具寿命,如果引入低温冷却技术,大进给铣削钛合金的切削速度有望达到更高的切削速度和去除效率。

在大进给铣削 TC4 钛合金时,大进给铣刀表现出良好的切削性能,在 $v_c=80\text{m/min}$, $f_z=0.8\text{mm/z}$ 的参数下刀具寿命能够达到 2h 左右。值得指出的是,在这种加工方式下,主轴扭矩通常不超过 $30\text{N}\cdot\text{m}$,主轴功率不超过 10kW ,由此大大减轻了高材料去除率所需的扭矩和功率,使得普通数控铣床也可以实现钛合金的高材料去除率铣削加工。如采用 $\phi 32\text{mm}$ 、3 齿大进给铣刀,在 800rpm 转速和 2000m/min 进给速度下,可以达到 $20\sim 30\text{cm}^3/\text{min}$ 的材料去除率。

由于大进给铣刀的特点,铣削力沿轴向传入机床主轴,从而降低了振动的风险,使加工更为平稳,尤其是在进行大悬伸铣削时,其加工稳定性要优于侧刃铣削方式,也可以采用更大的切削用量以提高效率。

钛合金大进给铣削现存的问题

大进给铣刀在铣削钛合金时除了逐渐磨损至失效外,还有前刀面贝壳状的片状剥落和刀尖处大块材料的剥落引起的破损失效,以及由微崩刃、微坑等的进一步恶化而导致的失效。

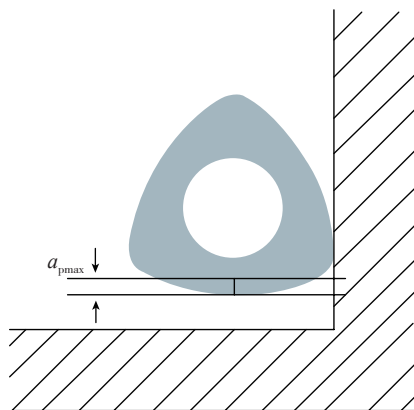
钛合金的弹性模量较低,切削加工时已加工表面加工硬化现象和回弹现象相对严重。大进给铣刀圆弧底刃的主偏角很小,在底刃中心处的切削厚度较小,极易进入高切削比能的刃口尺寸效应区,加剧了已加工表面对底刃中心处的挤压作用,常导致

大进给刀片的层状剥落甚至断裂;此外大进给铣刀的刀尖在钛合金型腔加工时需要切削侧壁,在切削条件不合适的情况下,极易导致刀尖破损(图 6)。有必要针对大进给铣削的特点,研发钛合金大进给铣刀的刀具材料,以及圆弧刃形的优化。

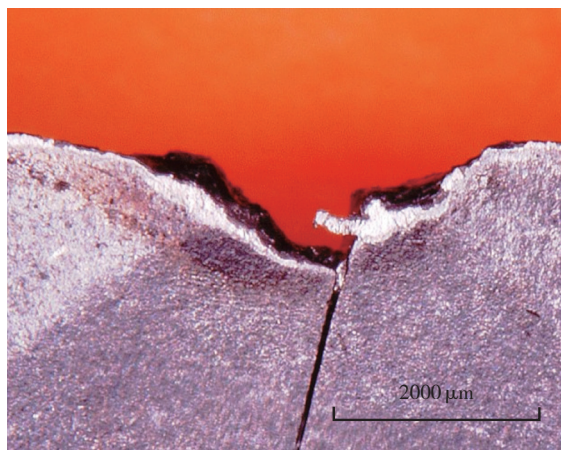
在大进给铣刀进行典型航空结构件的的实际应用中,多采用 1.0mm 的切深进行快速逐层铣削,编程策略和走刀轨迹的选择对大进给铣削钛合金的效率和刀具寿命具有显著的影响。大进给铣削垂直方向的进刀可选择斜线轨迹和螺旋轨迹两种方式下刀,至于水平方向的进刀,为了保护刀具的切削性能,可选用圆弧进刀方式;由于大进给铣削会大大增加程序执行的层数,可以通过定义最小安全平面和直接进入下一层的进刀两种方式实现程序的层间过渡,以减少层间过渡产生的空运行;对于每层执行程序的行间过渡,同样为了减小空运行轨迹,可选用环切轨迹和螺旋轨迹的行间程序过渡,考虑到螺旋轨迹编制周期长,环切轨迹则为优选方案。

结束语

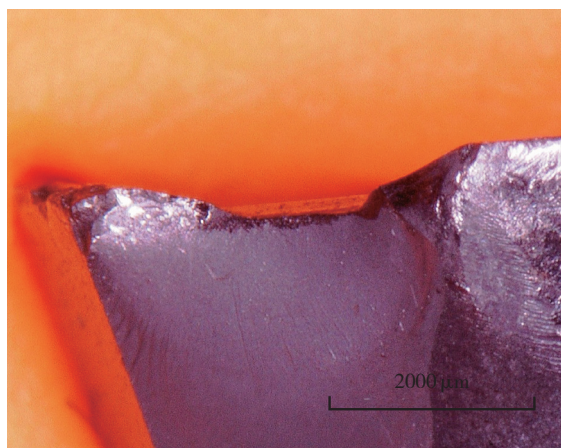
自旋转圆刀片和圆弧底刃铣刀是目前解决钛合金高速粗加工铣削的两种大进给铣削方式。自旋转圆刀片在刀具寿命和轴向铣削厚度上



(a) 圆弧刀刀片的切削示意图



(b) 圆弧刀中心的破损方式



(c) 圆弧刀刀尖破损方式

图6 大进给铣刀的典型易破损区域

具有较好的适应性;圆弧底刃大进给铣刀可以适应更高的每齿进给量和铣削速度。随着航空制造业对钛合金零件需求量的增加,大进给铣削钛合金有望获得进一步的发展和应
(责编 小城)