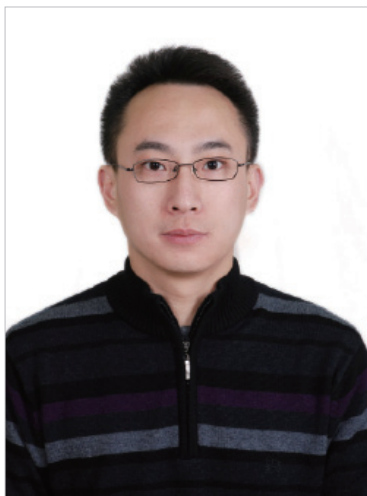


自润滑刀具的研究现状和发展趋势*

Development Status and Perspective Trend of Self-Lubricating Cutting Tools

山东大学机械工程学院 连云崧 邓建新 吴泽元 婷 崔海冰



连云崧

博士,主要从事自润滑刀具的制备及性能研究。

在金属切削加工过程中,刀具的前、后刀面不断与切屑和工件接触,并发生剧烈摩擦,接触区处于高温、高压状态。发生在刀具上的摩擦与磨损会造成刀具钝化失效,使切削无法进行;发生在工件上的剧烈摩擦则会使加工表面质量恶化^[1]。现代切削加工都采用在切削加工过程中

针对干切削加工,一方面要开发新型的刀具材料及刀具涂层技术,并使之相结合,提高刀具耐磨损和耐高温性能;另一方面要设计新型的自润滑刀具实现刀具的自润滑,提高刀具减摩润滑性能的同时保证自润滑刀具基体机械性能,并针对不同的加工条件选择合理的刀具几何结构和刀具材料,这是设计开发干切削刀具的有效途径。

使用切削液来降低加工过程中的摩擦和磨损。切削液的主要作用是润滑和冷却,能够改善切削加工中的摩擦润滑状态和降低切削温度。但切削液的存储、使用以及废弃处理需要专门的物流系统,因而费用很高;切削液处理不当会对人的健康以及环境造成危害;工件经过湿加工后必须进行清洁处理,这都费时费力,同时增加了对系统的要求^[2]。

德国的VDMA和日本精密工程协会的研究表明:切削加工中切削液的费用占生产总费用的15%~17%,而刀具成本只有总成本的2%~4%。据测算,如果20%的切削加工采用干式加工,总的制造成本可降低1.6%。因此,为了消除切削液带来的负面影响,最有效的方法就是取消切削液,进行干式切削加工。采用干式切削的意义在于:形成的

切屑干净、清洁、无污染,易于回收和处理;省去了与切削液有关的传输、过滤、回收等装置及费用,简化了生产系统,节约了生产成本;节省了与切削液及切屑处理有关的费用;不产生环境污染及与切削液有关的安全与质量事故^[3]。因此,可以说干切削技术是一种环境效益和经济效益俱佳的工艺选择。

但是相比于传统的湿切削,干切削也有一些不足:由于缺少切削液的润滑和冷却作用,刀具前刀面-切屑、刀具后刀面-工件之间的摩擦加剧,切削温度急剧升高,刀具的磨损严重,刀具寿命下降,加工表面质量恶化。所以,干切削对刀具提出了更高的要求:刀具应具有优异的耐高温性能;刀具与切屑之间的摩擦系数要尽可能小;必须要优化刀具几何参数与结构。因此,针对干切削加

* 国家自然科学基金资助项目(51075237),泰山学者专项基金项目,山东省杰出青年基金项目(JQ200917),山东省自然科学基金重点项目(ZR20101Z002)资助。

工的特点,一种新型的自润滑刀具应运而生。

所谓自润滑刀具是指刀具材料本身具有减摩、抗磨和润滑功能,可在无外加润滑液或润滑剂的条件下实现自润滑切削加工,可显著改善干切削过程的摩擦润滑状态^[4]。由于自润滑刀具的应用可减小摩擦与磨损,省去冷却润滑系统,减少设备投资,避免切削液造成的环境污染,实现清洁化生产,降低生产成本。因此,自润滑刀具是一种高效、洁净的干切削刀具。实现刀具本身自润滑的方法有多种,可将其归纳为5种基本类型,如图1所示:(1)添加固体润滑剂的自润滑刀具;(2)原位反应自润滑刀具;(3)软涂层自润滑刀具;(4)微结构自润滑刀具;(5)软涂层微结构自润滑刀具。

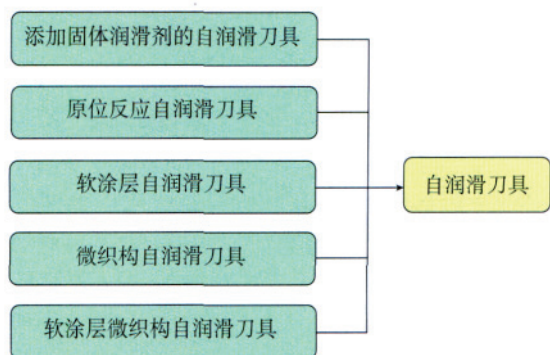


图1 自润滑刀具的类型

添加固体润滑剂的自润滑刀具

添加固体润滑剂的自润滑刀具是将固体润滑剂直接添加到刀具材料中,制备成含有固体润滑剂的复合刀具。常用的固体润滑剂有 MoS_2 、 h-BN 、 H_3BO_3 、 TaS_2 、 WS_2 及软金属(Ni 、 W 、 Al 、 Ti 和 Co)等,其同金属组成摩擦副的摩擦系数可低至0.1~0.2,是普通刀具材料的1/4~1/2。干切削时,刀具前刀面的固体润滑剂由于受到高温、摩擦和切削力的作用,被“挤压”出刀具表面,在切削温度作用下,固体润滑剂处于塑性状态并被拖敷于刀具表面,形成固体润滑

膜,从而赋予刀具的自润滑特性。图2为添加 CaF_2 固体润滑剂的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{CaF}_2$ 自润滑陶瓷刀具在切削过程中的减摩模型。

固体润滑膜的存在可阻止刀-屑间的粘着,显著降低前刀面与切屑间的平均摩擦系数。固体润滑剂对刀具材料的性能影响表现在两个方面:其一,固体润滑剂在刀具材料中弥散分布有可能使得材料的机械性能变差;其二,固体润滑剂可以在摩擦表面形成润滑膜从而改善摩擦界面接触状态,进而改善其摩擦磨损性能^[5]。因此,在实际应用中必须兼顾固体润滑作用和刀具材料的物理机械性能之间的平衡。切削时由于刀具前刀面各部位的受力和摩擦条件不同,因此,整个刀具前刀面上很难同时生成一层完整的固体润滑膜,随着切削的进行,可能会在某些区域的自润滑膜正在生成,而其他部位的自润滑膜正在损坏。当自润滑膜产生破坏并脱落后,刀具前刀面便形成了一个未覆盖润滑膜的新鲜表面,切屑与这一新鲜表面重新接触,使自润滑刀具又重新进入自润滑膜的生成

过程。由此,形成了自润滑膜的生成、破损、脱落和再生的循环过程。

对于刀具前刀面的某一固定区域,始终会按照自润滑膜的生成、破坏、脱落和再生这一演变规律进行往复循环,在切削过程中自润滑膜覆盖于刀具前刀面的总面积处于一种动态平衡状态。因而添加固体润滑剂的自润滑刀具在其整个生命周期内始终具有自润滑效果^[6]。

原位反应自润滑刀具

原位反应自润滑刀具是指利用切削高温作用下的摩擦化学反应,在刀具表面原位生成具有润滑作用的反应膜,从而实现刀具的自润滑。切削摩擦条件下的化学反应是高度非线性、不可逆的远离平衡态的热力学过程,处于摩擦学和化学的交叉领域。此种化学反应的存在,经常引起摩擦副表面材料发生本质的变化,使整个摩擦系统具有某种独特的结构特性。如果能加以合理利用,将会产生很好的效果^[7]。刀具表面在切削过程中处于高温状态,有利于引发和促进摩擦化学反应。通过对刀具材料进行合理的组分匹配设计和摩擦学设计,利用切削过程中的摩擦化学反应有可能在刀具表面原位生成具有润滑作用的反应膜,从而实现刀具

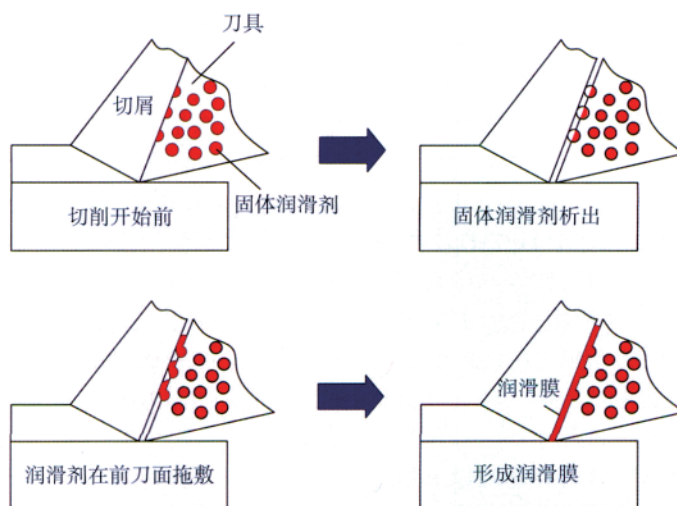


图2 添加 CaF_2 固体润滑剂的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{CaF}_2$ 自润滑陶瓷刀具在切削过程中的减摩模型

的自润滑。生成的固体润滑剂可以在摩擦表面形成完整的表面膜,也可以是不完整的表面膜,甚至磨屑也可起同样的作用。这种自润滑刀具材料在较高温度下具有良好的自润滑能力,尤其适合于高速干切削^[8-9]。原位反应自润滑材料一般可以分为金属基原位反应自润滑材料、非金属基原位反应自润滑材料。其制备方法通常为粉末冶金法。此外,等离子喷涂、表面技术和铸造法也被应用于自润滑复合材料的制备中。

由于硼化物在摩擦过程中很容易生成溶解有其他元素的硼的氧化物润滑膜,该润滑膜具有较低的剪切强度,可以改善刀具材料的摩擦润滑状态。因此,选择以 Al_2O_3 为基体,添加 TiB_2 或 ZrB_2 ,采用热压烧结工艺研制开发出含硼化物的(Al_2O_3/TiB_2 和 $Al_2O_3/ZrO_2/ZrB_2$)原位反应自润滑陶瓷刀具^[10]。用该原位反应自润滑刀具进行干切削,利用切削过程中高温作用下的摩擦化学反应,在刀具表面原位生成具有润滑作用的反应膜,可实现刀具本身的自润滑。当切削速度较低,切削温度较小时,刀具的磨损机制主要表现为磨料磨损;当切削速度较高,刀具表面的硼化物在切削高温作用下产生氧化,氧化物 B_2O_3 在切屑与前刀面之间起到固体润滑的作用,此时,基体承受载荷,而摩擦则在氧化膜上进行。由于硼的氧化物具有低的剪切强度,进而可减小刀-屑间的摩擦系数(如图3所示)。图4为 $Al_2O_3/ZrO_2/ZrB_2$ 原位反应自润滑刀具干切削时前刀面磨损区 XRD 衍射谱图。 $Al_2O_3/ZrO_2/ZrB_2$ 原位反应自润滑刀具在空气中切削时,可见前刀面的磨损较为均匀,通过观察刀具前刀面的 EDX 能谱图,发现前刀面有 B_2O_3 的生成,其在高温下具有一定的润滑性^[11]。原位反应自润滑刀具具有较好的减摩和抗磨的作用,适合于高速干切削。

由于切削过程中的高温氧化反

应无法控制,且很有可能降低刀具基体机械强度,加剧刀具磨损,因此原位反应自润滑刀具的应用仍有待进一步研究。

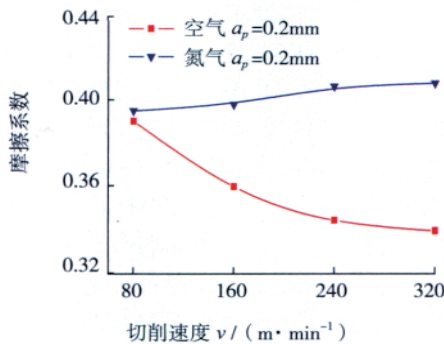


图3 $Al_2O_3/ZrO_2/ZrB_2$ 原位反应自润滑刀具干切削时刀-屑间平均摩擦系数随切削速度的变化

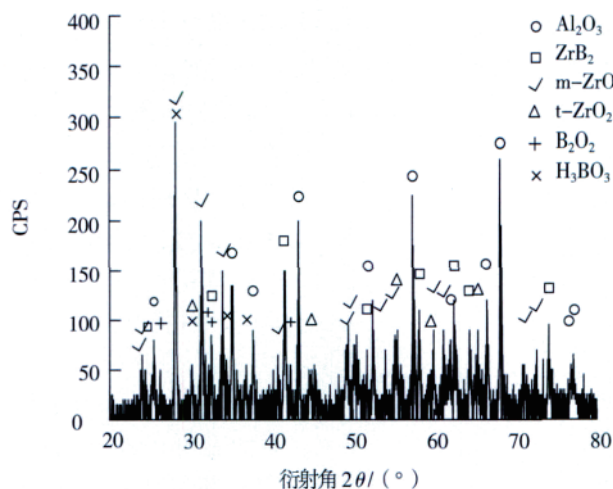


图4 $Al_2O_3/ZrO_2/ZrB_2$ 原位反应自润滑刀具干切削淬硬钢时刀具前刀面磨损区XRD衍射谱图

软涂层自润滑刀具

软涂层自润滑刀具是指将固体润滑剂通过涂层的办法直接涂覆于刀具表面,从而实现刀具的自润滑功能,这类涂层刀具也称为自润滑涂层刀具^[4]。软涂层的主要成分为具有低摩擦因数的固体润滑剂,如 MoS_2 、 WS_2 等,这些具有层状结构的固体润滑剂剪切强度较低且易附着于摩擦表面,从而可在切削过程中起到减摩作用。

此外,切削过程中,存在于刀具表面的固体润滑膜会转移到工件材料表面,形成转移膜,使切削过程中

摩擦发生在转移膜和润滑膜之间,使摩擦发生在固体润滑膜内部,从而达到减小摩擦、阻止黏结、降低切削力和切削温度、减小刀具磨损的目的。

与普通的 TiN 等硬涂层刀具不同,软涂层自润滑刀具是通过在刀具表面沉积具有润滑性能的涂层,能够在切削过程中起到良好的减摩润滑作用。在切削温度较低时($< 400^\circ C$),选用具有六方晶层状结构的硫化物,如 MoS_2 、 WS_2 、 MoS_2/Ti (Mo 、 Cr 、 Zr 等)及 WS_2/W 等,其优点是与工件材料组成的摩擦副的摩擦系数很低,大约只有 0.1;而当切削温度较高时($1000^\circ C$ 左右),软金属 Ni 、 W 、 Al 、 Ti 等则具有更好的减摩效果^[12-13]。

赵金龙等^[14]

对 MoS_2 软涂层自润滑刀具进行了研究。在研究中设计了 4 种软涂层自润滑刀具,分别是纯 MoS_2 涂层自润滑刀具, MoS_2/Ti 涂层自润

滑刀具, MoS_2/Zr 涂层自润滑刀具和 MoS_2/Cr 涂层自润滑刀具(如图5所示)。当基体材料为 $YT15$ 时,通过残余热应力分析可知,涂层与基体间热膨胀系数与沉积温度的差异是影响涂层系统残余热应力大小的主要因素,过渡层的添加有助于降低残余热应力、减小界面的应力梯度。 MoS_2/Zr 涂层自润滑刀具的残余热应力值较纯 MoS_2 涂层以及其他含金属过渡层的 MoS_2 涂层都要低得多。通过摩擦试验发现, MoS_2/Zr 涂层的摩擦系数和磨损量较纯 MoS_2 涂层均显著降低。对摩擦球表面磨损形貌和成分的分析表明, MoS_2/Zr “软”涂层

NEW

大规格 大功率 大扭矩

精密角度头加工 帕莱克 是您的明智之选!

从重切削场合到精密加工场合，
帕莱克提供全范围的高精度角度头，
满足极限的加工要求!



- 内部装配超精密预载轴承，精度达ABEC7以上，并通过脂润滑，使用寿命长
- 螺旋伞齿轮采用强度超过300KG/mm²的特殊材料，被F1赛车、航空航天、军工领域广泛采用
- 壳体采用特殊的热处理工艺和铸造技术，具有高刚性
- 主传动芯轴与驱动柄一体化，经过高硬度处理和精密打磨，确保传动的平衡性和高刚性

广告索引号 11-100

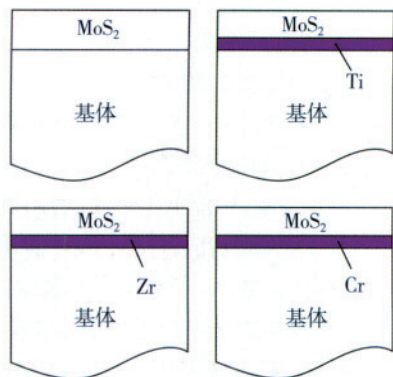


图5 4种软涂层自润滑刀具结构示意图

材料与对磨材料表面之间所形成的转移润滑膜是影响材料摩擦磨损性能的关键因素之一。由于摩擦副转移膜的存在，涂层和对磨材料的摩擦转变为涂层和转移膜之间的“内”摩擦，从而降低了摩擦过程的摩擦系数，提高了材料的

耐磨性能。图6为 MoS₂/Zr 软涂层刀具与普通刀具切削淬火钢时后刀面磨损量对比。对 MoS₂/Zr 软涂层刀具前刀面磨损形貌 SEM 照片和能谱分析。可见，刀具前刀面上的涂层轻微磨损，能谱分析表明，此时刀具前刀面含有大量的 Mo、S、Zr 元素。此外，通过切削试验发现，无论是在润滑膜完整的状态抑或边界润滑状态下，由于表面“软”涂层的存在，涂层刀具的摩擦力和摩擦系数均降低；MoS₂/Zr “软”涂层在刀具和切屑之间起到润滑剂的作用，从而降低了刀具的磨损^[15]。

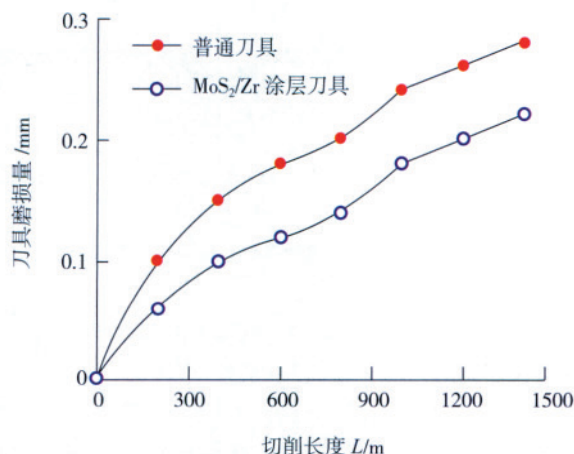


图6 MoS₂/Zr软涂层刀具后刀面磨损量随L的变化

微结构自润滑刀具

微结构自润滑刀具是指在刀具的刀-屑(刀-工)接触区加工出微结构，在微结构中添加固体润滑剂，切削时由于高温的作用使微结构中的固体润滑剂软化而拖敷于刀具表面，在刀-屑(刀-工)接触区形成连续的固态润滑膜，产生所谓的润滑效应，从而实现刀具本身的自润滑，以达到减小摩擦、降低磨损和提高刀具寿命的目的^[4]。宋文龙等^[16]进行了微结构自润滑刀具的结构设计，确定了不同切削状态下的微孔分布位置，结合微孔结构参数对微结构自润滑刀具应力分布状态的影响及作用规律，得出了最佳的微孔形

PARLEC
Measurably Better

帕莱克机械(南京)有限公司 南京·上海·广州·天津·成都·西安·沈阳·无锡
地址: 南京市江宁经济技术开发区双龙路16号 电话: 025-87113188 传真: 025-87113189
www.parlec.com.cn E-mail: sales@parlec.com.cn

状及结构尺寸:孔形为圆孔,孔数 N 为 4,孔径为 ϕ (0.15 ± 0.02)mm,孔中心距主、副切削刃的距离 L_1 、 L_2 以及孔间距 L_3 都约为 0.3mm,孔深 H 为 0.30mm,孔偏心距 L_4 取为 0.05mm。通过 DZW-10 微细电火花加工实验机,在硬质合金 YG8、YT5 等难加工材料的刀片上加工出最佳的微孔结构,然后在微孔内装填 MoS_2 固体润滑剂,再进行干切削对比试验,结果表明:微池自润滑刀具的切削力比普通刀具可降低 25%~35%,切削温度可降低 15%~20%,刀具磨损显著减小。

通过扫面电子显微镜(SEM)和能谱分析(EDX)对微池刀具前刀面观察研究,分析了刀具自润滑机理,一是由于切削过程中微结构自润滑刀具微孔中的固体润滑剂受热膨胀以及切屑的摩擦挤压作用,被拖覆在刀具表面,形成固体润滑膜,从而降低前刀面的摩擦系数;另一方面是由于前刀面刀-屑接触长度减小,减小了刀-屑摩擦距离。

图 7 为微结构自润滑刀具切削过程中的减摩模型。润滑膜层在切削加工中是一个润滑膜形成、磨损、再形成的循环过程,微结构自润滑刀具在微孔完全磨损的整个生命周期内始终具有自润滑效果^[17]。同时,宋文龙用微结构自润滑刀具进行了摩擦试验,结果表明:由于固体润滑剂 MoS_2 具有较低的硬度、剪切强度以及良好的附着性能,能够有效减缓摩擦副之间的摩擦,降低摩擦系数,由于 MoS_2 具有良好的附着性能,固体润滑剂在表面大量粘着、拖覆,并形成一层稳定的润滑膜层,使摩擦发生在润滑膜内部,从而改善摩擦副的摩擦磨损性能。整个摩擦过程中,摩擦系数保持稳定,说明摩擦过程中能够形成比较稳定的固体润滑层。随着摩擦的进行,粘着、拖覆在摩擦副表面的固体润滑层自然要发生磨损和脱落,但表面微孔作为存储器为接触面源源不断提供润滑剂,同时微孔

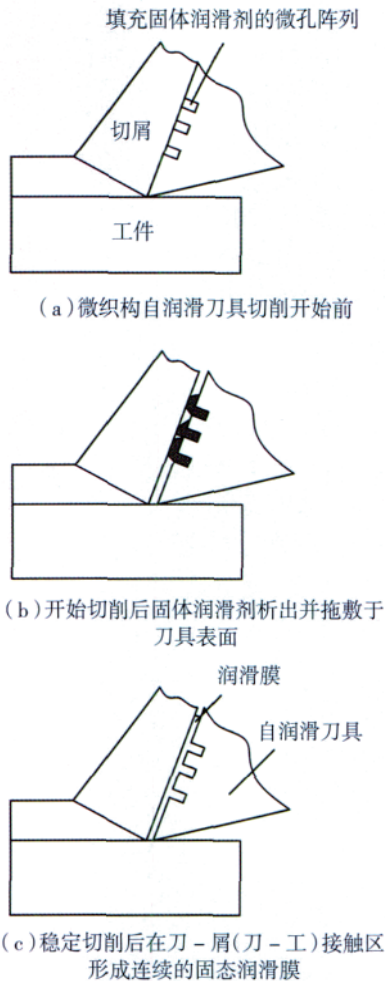


图7 微结构自润滑刀具切削过程中的减摩模型

可以捕捉摩擦过程中产生的磨损微粒,将其转移到微孔中减少犁沟的形成,起到减摩耐磨的效果^[18]。

微结构自润滑刀具是一种新型的干切削加工润滑刀具,有待于深入的研究微结构结构、尺寸及其减摩抗磨作用机理,在保证刀具基体强度的同时尽量延长其作用时间,并确定微结构刀具的适用范围。

软涂层微结构自润滑刀具

软涂层微结构自润滑刀具是指通过飞秒激光^[19]等微细加工技术在刀具的刀-屑(刀-工)接触区加工出微米或纳米级别尺寸的具有一定排列的小孔、凹槽等形貌的点阵,然后通过物理气相沉积法(PVD)在刀具表面涂层 MoS_2 或 WS_2 等软涂层

材料(如图 8 所示)。

由于刀具的刀-屑(刀-工)接触区加工有微结构,所以在切削加工的时候,直接刀屑接触面积就减小了,进而减小了摩擦力;还有刀具表面的微结构还能起到捕捉磨屑的作用^[20-21]。而且由于在刀具表面用 PVD 法做了 MoS_2 或 WS_2 等软涂层,这直接就能起到软涂层自润滑的作用, MoS_2 、 WS_2 这类软涂层材料具有较低的摩擦系数,而且由于是层状结构,该软涂层剪切强度较低且易附着于摩擦表面,从而可在切削过程中起到减摩作用。

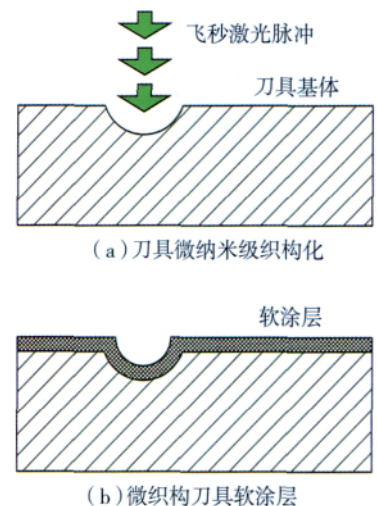


图8 软涂层微结构自润滑刀具的加工工艺

同时,在切削过程中,存在于刀具表面的固体润滑膜会转移到工件材料表面,形成转移膜,使切削过程中摩擦发生在转移膜和润滑膜之间,使摩擦发生在固体润滑膜内部,从而达到减小摩擦、阻止黏结、降低切削力和切削温度、减小刀具磨损的目的。此外,当刀具表面的软涂层用尽时,切削时由于高温的作用使微结构中的软涂层软化从而拖敷于刀具表面,在刀-屑(刀-工)接触区形成连续的固态润滑膜,产生所谓的微池自润滑效应,从而实现刀具本身的自润滑,以达到减小摩擦、降低磨损和提高刀具寿命的目的^[22-24]。

因此,软涂层微结构自润滑刀具

NEW

新镗刀带来 新优势

在切削时不仅能体现软涂层自润滑刀具的软涂层自润滑作用,还能产生微织构自润滑刀具的微织构自润滑效应。软涂层微织构自润滑刀具的双重效用能极大地改善干切削刀具摩擦力大,磨损严重的现状,是未来干切削刀具发展的趋势。

但是,软涂层微织构自润滑刀具尚处于研究阶段,有待于深入研究微织构的结构、尺寸及其减摩抗磨作用机理,同时软涂层的材料、涂层厚度、涂层工艺、与刀具基体的匹配程度、过渡层的选择等需要再做进一步的研究,以达到最优的干切削加工性能。

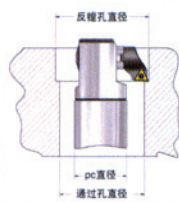
结束语

干切削加工技术是实现绿色制造的关键技术,是一种先进的制造技术,而干切削加工刀具技术则是干切削加工技术中的关键技术。由于缺少切削液的润滑和冷却,干切削刀具在实际加工中的摩擦条件会异常严酷,刀具磨损十分严重。而自润滑刀具则是干切削时最好的选择,其不但实现了刀具自身润滑的功能,而且在自润滑的同时降低了刀-屑和刀-工之间的摩擦力,减轻了刀具磨损,同时降低了刀具的切削温度,达到冷却的功能。

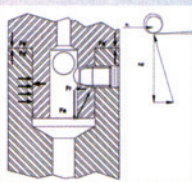
而在5种自润滑刀具中,添加固体润滑剂的自润滑刀具由于是把固体润滑剂添加到基体中去,因而有可能使得刀具基体材料的机械性能变差,从而影响刀具的切削性能;而原位反应自润滑刀具是刀具内部成分发生化学反应,必须达到较高的反应温度;软涂层自润滑刀具的软涂层磨损后难以补充,一旦磨损或脱落涂层作用就将失效;微织构自润滑刀具由于加工的织构较小,所以可填充的润滑剂数量有限,而如果加工的织构较大,就会影响刀具的强度和机械性能;而软涂层微织构自润滑刀具,由于具备软涂层自润滑和微织构自润滑的双重作用,而且采用飞秒激光等微细加工技术可以减轻对刀具的烧蚀以及对刀具机械性能和强度的影响,在进行铣削、钻削等回转加工时也不会因为离心运动而使润滑剂分散,刀具刀-屑(刀-工)接触区的微纳米级别的织构不仅能捕捉磨屑,存储润滑剂供外表软涂层磨尽时用,还能起到减小加工时的刀屑接触面积等作用。因此,软涂层微织构自润滑刀具将是未来干切削刀具发展的趋势。

总之,针对干切削加工,一方面要开发新型的刀具材料及刀具涂层技术,并使之相结合,提高刀具耐磨损和耐高温性能;另一方面要设计新型的自润滑刀具实现刀具的自润滑,提高刀具减摩润滑性能的同时保证自润滑刀具基体机械性能,并针对不同的加工条件选择合理的刀具几何结构和刀具材料,这是设计开发干切削刀具的有效途径。

本文共有参考文献24篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 小城)



■ 轻松实现反镗加工



■ 可与Big镗刀接口完全互换



■ 模块化设计



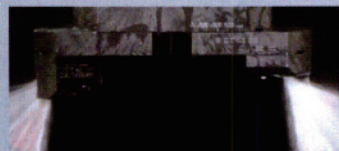
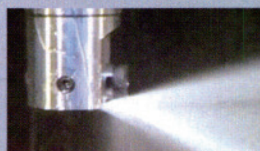
■ 方便调整动平衡
25000转/分时,
动平衡达到G2.5

**帕莱克为精密镗削
工业建立新的标准!**

帕莱克新型镗刀系统提供了全新增强的特性,包括全范围的镗削能力,精密的模块化设计以及 μ 级的重复精度,帮助您降低刀具库存成本,改善镗削加工品质,提升您的生产竞争力!

创新的冷却传递

直接到达切削刃



广告索引号 11-100

帕莱克机械(南京)有限公司

南京·上海·广州·天津·成都·西安·沈阳·无锡

传真: 025-87113180 电话: 025-87113188



Made in U.S.A.

E-mail: sales@parlec.com.cn

www.parlec.com.cn

