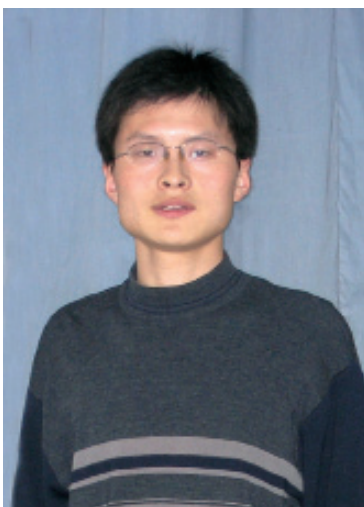


硬态切削技术

Hard Cutting Technology

哈尔滨理工大学机械动力工程学院 岳彩旭 刘献礼 姬生园 贾东开 王 宇



岳彩旭

哈尔滨理工大学机械动力工程学院硕士研究生,主要研究方向为硬态切削过程加工机理和切削过程的有限元仿真。

硬态切削是指采用超硬刀具对大于HRC50的淬硬钢进行精密切削的加工工艺,该工艺能精确地将毛坯直接加工成工件。与磨削相比,硬态切削具有很好的工艺柔性、经济性和环保性能。因此,用硬态切削来代替磨削在当今的机械加工中得到了越来越广泛的应用,并且在一定的条件下,硬态切削可以成为代替磨削的首选工艺。所以在汽车制造行业和其他领域中,如淬硬钢、高硬度铸铁、高温合金等高硬材料的加工中,耗时和高成本的磨削和抛光的加工工艺越来越多地被硬态切削取代。但是

本文通讨论硬态切削应用现状、加工机理和硬态切削加工的表面特性,以期促进硬态切削技术在生产实际中有更广泛的应用。

硬态切削工艺以及该工艺中的一些不稳定因素还没有被完全理解和掌握。本文通讨论硬态切削应用现状、加工机理和硬态切削加工的表面特性,以期促进硬态切削技术在生产实际中有更广泛的应用。

硬态切削技术发展及应用现状

由于硬态切削工艺具有广阔的发展前景,各国都投入大量人力物力来研究。

美国就硬态切削工艺的研究投入了1000万美元来扩大该工艺的应用。国外硬态切削技术的研究较国内达到了相对成熟的阶段。在结合试验、计算机模拟和有限元仿真的基础上,使得硬态切削技术取得了长足的发展。使其广泛应用于汽车制造、轴承工业以及各种难加工材料的加工等领域,并创造了巨大的经济效益。例如荷兰的Hembrug公司在Mikrotorn CNC系列的超精车床上采用PCBN刀具精车淬硬后的EN21轴承钢(HRC62)、美国国家标准工艺研究院Y. Kevin Chou和Chris J. Evans采用SumitomoBN

系列的PCBN刀具加工AISIM50钢都实现了PCBN刀具加工淬硬钢的纳米切削^[1]。Chmalkalden公司在普通CNC机床上可获得加工表面的粗糙度为 $R_a=3\mu\text{m}$,稳定地达到了磨削加工的表面质量水平^[2]。

国内也致力于硬态切削技术的研究与应用。在研究方面,国内学者对刀具磨损机理、刀具寿命、金属软化效应、已加工表面完整性等方面做了大量的研究工作,如哈尔滨理工大学、南京航空航天大学 and 哈尔滨工业大学等。不少企业也逐渐采用硬态切削工艺,这样不仅可以节省成本,而且还可以减少加工时间。如浙江万向集团采用PCBN刀具对差速器十字轴进行高转速断续硬态车削进而取代磨削工艺。中国第一重型集团对支撑辊淬硬钢的切削加工中,采用PCBN刀具进行高速切削,提高了加工效率,同时又降低了刀具消耗率。图1为硬态切削加工实例。

硬态切削机理

金属软化效应是硬态切削的一个显著特点。硬态干式切削机理就是被切削金属层的软化作用机理。

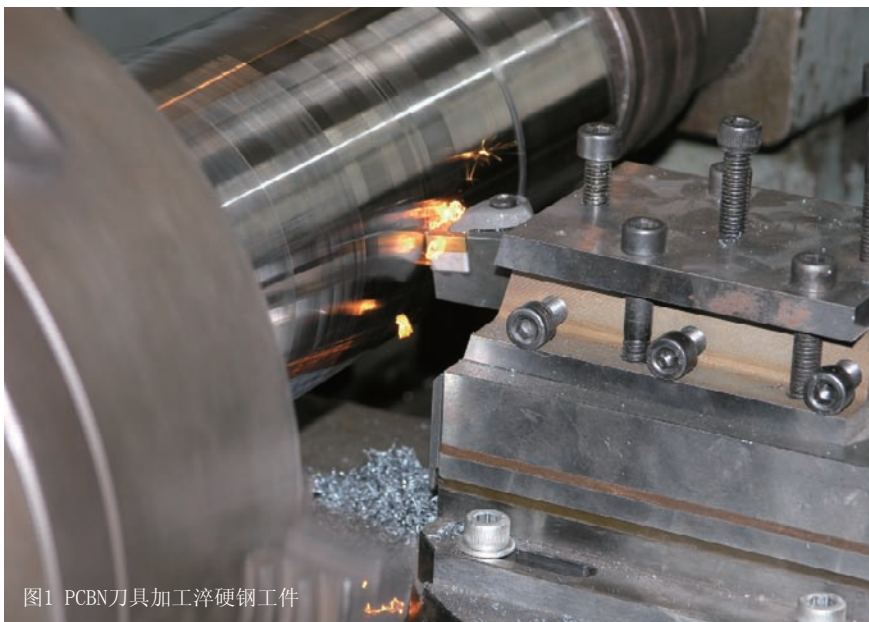


图1 PCBN刀具加工淬硬钢工件

金属软化效应即工件硬度随切削温度的升高而降低,并进一步影响已加工表面的形成。可见在硬态切削过程中,刀尖附近产生的大量的热量对金属软化效应起着决定性作用,如图2所示。

硬态切削过程中,较常规切削一个重要的区别就是在已加工表面上产生白层。目前,学术界对白层的本质和形成机制尚不清楚,国内对于表面变质层的研究还停留在理论探索和试验阶段,国外对白层产生的原因和机制也是一直存在争议。S. Akcan和S. Shah研究了硬态切削淬硬钢AISI52100(HRC62)时产生的白层,认为白层的形成与否是切削速度决定的,并且在一定范围内随着切削速度的升高而增大。白层和刀具后

刀面磨损关系也很密切,刀具磨损之后,刀具切削参数的改变导致了白层的出现,并且白层厚度随着刀具磨损的加剧而增大,如图3所示^[3]。有的学者认为白层是由摩擦热和严重的塑性变形共同作用的结果,也有的学者认为在切削过程中材料被快速加热和骤然冷却而形成的晶粒细小的细晶马氏体,而白层恰恰是由这些亚晶粒和再结晶晶粒组成的高致密组织。由于白层具有高脆性和对裂纹的高敏感性,易引起早期剥落失效,所以在一般情况下被认为是零件的有害成份。但是它们又具有独特的磨损特性,一是硬度高,其次是耐腐蚀性好,能在一定程度上提高工件的性能。为了得到更好的工艺结果,需要对白层产生的机理及其对表面区域的影响进行进一步研究,并综合各方面因素实现对已加工表面上白层的系统分析,进而指导实际生产。

锯齿状切屑的形成是硬态切削中的一个显著特征。关于锯齿状切屑形成的机理,存在两大流派:周期脆性断裂理论与热塑性失稳理论。随

着刀具的切入,首先在工件材料右端面产生裂纹实现切屑分离,从而形成已加工表面。同时由于承受很高的压应力和高温作用,切削刃前方的金属会发生塑性变形。随着刀具切削行程的增大以及塑性变形的加剧和能量的累积,在距切削刃一段距离的切屑某一位置,当达到某一临界载荷时,此时能量也累积到了最大值,导致突变性的局部剪切,进而网格发生很大的扭曲,从而形成了一个锯齿。第二个锯齿形成后伴随着能量的释放又使刀具与切削层之间重新处于一个瞬时的平衡状态,随后由于塑性变形导致的应力、应变的急剧增大再次使平衡破坏,如此往复循环形成锯齿状切屑。

硬态车削

硬态车削也称“精车代磨”,是指把淬硬钢的车削作为最终精加工工序的工艺方法。硬态车削的显著特点就是径向切削力要大于主切削力,这是与常规切削显著不同的一点。而且硬态车削工艺还有切削温度高、刀具使用寿命短的特点,这就要求硬态车削的刀具耐热性和耐磨性应更好,机床工艺系统也要有足够的刚度。在硬态切削中,常用刀具具有PCBN刀具、陶瓷刀具。而刀片形式一般采用负倒棱或者较大的负前角保护刃口,这样可以提高刀具寿命,但是增大了切削抗力。这就对机床提出了更高的要求,如高刚度、大功率以及较好的热稳定性。同时对于各种材料的刀片来说,均应选择强度高、散热条件好的刀片形状和尽可能大的刀尖圆弧半径。在高速切削状态下,一般的金属切削理论已不完全适合硬质材料的切削过程分析,因此必须根据材料和所用刀具的特点来研究其切削加工过程。由于PCBN刀具、陶瓷刀具材料的耐热性和耐磨性好,所以硬态切削可选用较高的切削速度和较小的进给量,从而达到较

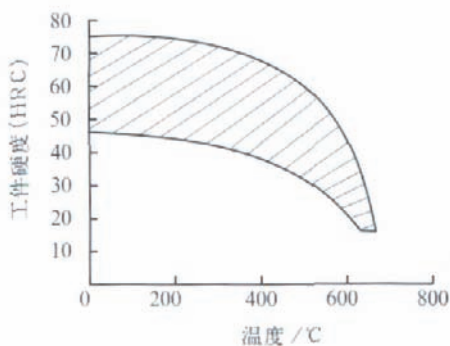
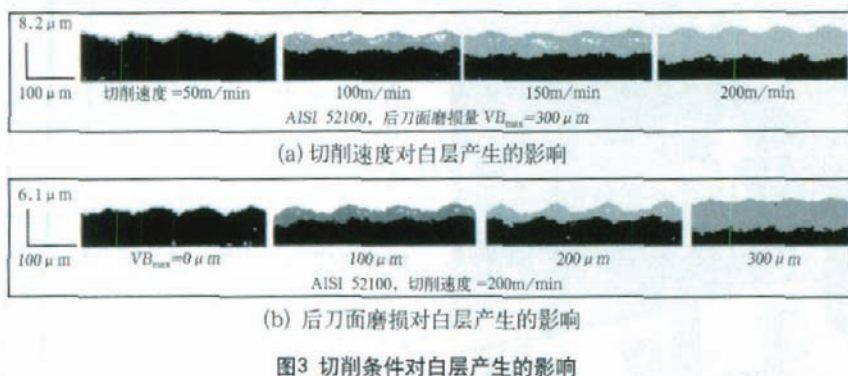


图2 硬态切削的金属软化效应



好的表面质量。

硬态铣削

硬态铣削是近年来在模具制造业中广泛应用的技术。此工艺基于高速铣削,以小切深、高切削速度为特征,它广泛应用于淬硬钢模具的加工。硬态铣削技术有很多优点,如减小切削力,获得更好的尺寸精度,已加工表面为残余压应力且金相组织变化小等。在主轴高速旋转下进行硬态铣削可获得无铣痕的表面,尺寸精度为 $4 \sim 10 \mu\text{m}$,且表面粗糙度为 $R_a 0.3 \mu\text{m}$,从而有效地减少了淬硬钢的精磨工序。

铣削加工模具时,直接将淬硬工具钢一次安装加工成形,有效地避免了零件多次安装造成的装夹误差,提高了零件的几何位置精度。在特定加工条件下,采用普通铣削难以保证模具廓形交界处的加工精度,而采用高速硬态铣削可切削出形状锐利的轮廓尖角,进而实现精密模具的高精度、高效率加工。由此可见“以铣代磨”是加工超高强度钢复杂零件的主要发展方向,并且在很大程度上取代了电火花加工。但是硬态铣削也有自己的缺点,主要就是刀具寿命短。所以要提高硬态铣削的应用范围,亟待解决的问题主要是寻求能够抑制刀具磨损的铣削条件。

下面介绍超耐热涂层立铣刀的加工实例。用WX特型球刀立铣刀(WXS-EBD)加工SKD11工件,其硬度为62HRC,加工条件如表1,刀

具磨损结果如图4所示。由图可知,与普通刀具相比,WXS-EBD的磨损较慢,可长时间维持球头立铣刀的R形状^[4]。可见高速铣削在模具制造等精密、超精密加工中具有很好的应用前景。

硬态切削刀具

由于硬态干式切削条件下的进给速度、切削深度和切削速度都有别于普通切削,所以硬态切削所使用的刀具也有自己的特点。适合于硬态切削的刀具主要有PCBN刀具、陶瓷刀具、超细硬质合金刀具等。由于PCBN刀具耐磨损,保持加工精度的能力强,特别是加工硬度高于HRC55的材料,普遍采用的是PCBN刀具。PCBN刀具的硬度仅次于金刚石,比硬质合金和陶瓷刀具材料硬度高 $2 \sim 3$ 倍,具有较好的耐磨性、化学稳定性($1200 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 与铁系金属不发生反应)、较低的摩擦系数、较好的导热性和耐热性($800 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$)等优点。因此,PCBN刀具与硬质合金、陶瓷材料相比,在硬态干式切

削条件下具有更明显的优势。如今,PCBN刀具已成功应用于淬硬钢、铸铁、超级合金以及高硬表面层等材料的车削、铣削和钻削。加工不同的工件材料时,PCBN的含量与粘结剂的种类对于PCBN刀具的寿命有很大的影响。

先进涂层技术的发展进一步改善了刀具材料的性能,新型涂层材料和涂层工艺的开发,为涂层刀具在高速切削领域提供了更加广阔的应用前景。对硬态铣削加工刀具必须设计合适的前、后角和楔角。采用硬态铣削工艺加工模具时,加工所用的铣刀为DS型球面、环面和微型,2个主切削刃也必须光滑而无过渡段。在切削条件方面为了获得更高的精度和表面质量,可选用较高的切削速度和较小的进给量;而精铣淬硬度钢时,背吃刀量应该很小,主要是考虑每齿进给量的影响。这样可以大大减少了抛光的工作量,显著缩短模具

表1 球头铣刀的切削条件

使用刀具	WXS-EBD R1×4
工件材料	SKD11(62HRC)
转速/(r·min ⁻¹)	32000
进给速度/(mm·min ⁻¹)	2800(0.038mm/齿)
切削方法	加工型腔
切削深度/mm	$\alpha_a=0.04, P_f=0.05$
冷却方式	风冷
加工机床	立式加工中心(HSK-E32)

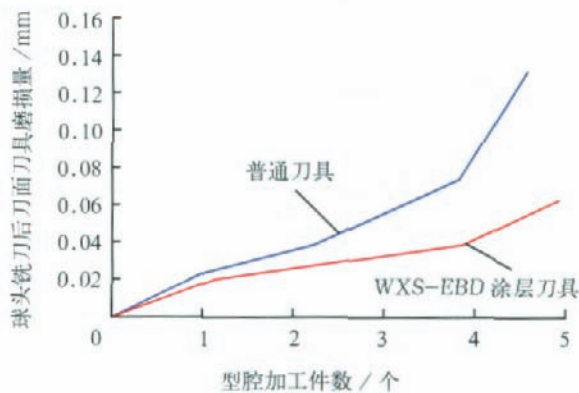


图4 WXS-EBD涂层刀具与普通刀具的磨损对比

的开发周期。

硬态切削的表面完整性

表面完整性是由美国金属切削研究协会在1964年召开的一次技术座谈会上首先引用的。它是评价工业产品表面质量的重要指标,也是实际表面上某些典型偏差的综合。工业生产的根本任务就是在特定的条件下将工件转化成能完成特定功能的零件,零件的表面质量是影响其使用性能的最重要因素。所以在行业中采用一些特征量来衡量已加工零件的表面性能,主要包括表面粗糙度、硬化层深度和表面残余应力。

表面微观结构形貌决定了零件的机械功能和疲劳强度,而表面粗糙度也对工件的疲劳强度、抗磨损性能、表面摩擦系数和抗腐蚀性能产生重大影响。在实际的加工中,有很多因素影响两者:刀具参数,切削参数和切削条件等。英国的M. A. Fleming等人将DeltaTurn40型机床改装,使用DBN45材质的PCBN刀具加工出了表面粗糙度为 $R_a 22\text{nm}$ 的纳米级表面粗糙度,此数值已超出了一般的超精加工的表面粗糙度指标。若在型号为CA6140的车床上进行车削实验,则在切削速度 $v=217\text{m}/\text{min}$,进给量 $f=0.05\text{mm}/\text{r}$,刀尖圆弧半径 $R=1.2\text{mm}$ 的切削条件下的加工表面微观型貌如图5所示。从图中我们可以发现,已加工表面有较好的表

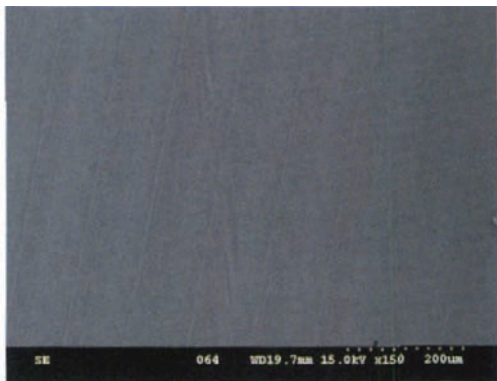


图5 硬态切削加工淬硬钢得到的表面形貌

面质量。

表面残余应力和表面硬化现象同样是衡量表面质量的重要指标。用哈尔滨理工大学自行研制的Wiper刀尖结构的PCBN刀具切削GCr15,加工出了 $R_a 0.19\mu\text{m}$ 的表面粗糙度。有研究表明:在硬态切削中,加工表面的完整性与刀具后刀面的磨损程度关系密切,且加工后的表面有残余压应力,但是在刀具选择不当时,也会产生残余拉应力^[5]。图6

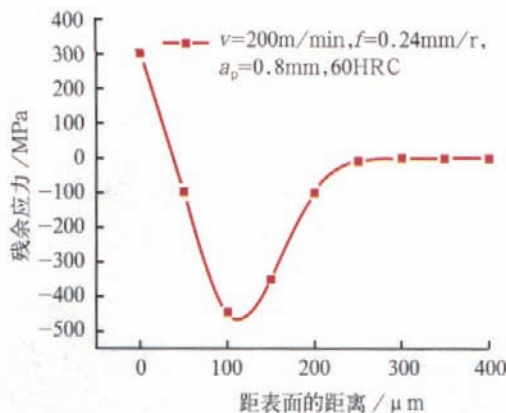


图6 硬态切削的表面残余应力

所示为硬态切削淬硬钢得到的残余应力曲线。从图中可以发现:已加工表面的表层存在拉应力层并非全部是压应力的残余应力状态,并且由拉应力向压应力的变化很快,而工件内部的压应力变化趋于平缓。但是残余压应力有助于提高工件表面的抗疲劳性能,从而提高零件的整体寿命。通过对试件的基体组织和表层组织的扫描电镜分析,硬态切削过程虽然使表层的硬度有所提高,且对表层组织没有破坏作用。如果选用良好的精密机床,采用PCBN刀具加工后,零件的表面结构整体性能要优于磨削加工。

结束语

在当今工业应用中,从经济的角度来说,工艺更新的根本目的是减少加工步骤来降低加工成本。由于硬态切削工艺

可以将工件的毛坯直接加工为成型工件,所以具有高效加工的特点。此工艺又不需要冷却液,因此具有很好的环保性能。在精加工工艺中,与之相竞争的是磨削工艺,但是磨削加工消耗大量的能量,所以硬态切削又具有节能的特点。同时硬态切削工艺又可以应用在自动化程度较高的生产线上,所以特别适合中小企业的采用,进而避免必须采用磨削工艺的麻烦,可见硬态切削工艺具有很好的发展前景。

但是作为一种正在发展的工艺,它不仅要求刀具和机床有很高的性能,同时也要求工件有较高的可加工性。因此,诸如工艺控制、加工机床、刀具、冷却液等因素需要进行必要的改进,从而适应该工艺的采用对加工环境带来的变化。随着人们对硬态切削工艺认识的不断加深,对硬态加工工艺表面加工质量控制的不断加强,这种高效、绿色的加工工艺会更广泛地应用于实际生产。

参考文献

- [1] 文东辉,郑力,刘献礼,等.精密硬态切削过程金属软化效应与表面塑性侧流的研究.金刚石与磨料磨具工程,2003(4):9-12.
- [2] Knuefermann MMW, Read RFJ and Nunn R. Ultra-precision turning of hardened steel with AMBORITE DBN45 on the DeltaTurn 40 lathe. INDUSTRIAL DIAMOND REVIEW, 2000(2): 107-114.
- [3] Akcan S, Shah S. Formation of white layers in Steels by machining and their characteristics. Metallurgical And Materials Transaction Avolume, 2002(4).
- [4] 黄宁秋. 淬硬钢($\geq 60\text{HRC}$)的高速加工. 工具展望, 2008(3):14.
- [5] Poulachon G, Albert A, Schluraff M, et al. An experimental investigation of work material microstructure effects on white layer formation in PCBN hard turning. Int J Mach Tools Manuf 45:211-218.

(责编 依然)