滚压加工工艺的新概念和新进展

■ 尚亚国际贸易公司 （上海 230106） 章宗城

摘要:本文叙述了滚压加工在金属加工技术中的特点、地位及意义。对其进行了概念上、加工实质要求上和具体加工方法上新的区分。为了适应各种表面加工和各个体要求，现代滚压加工已发展成模块化的工具系统，本文以Ecoroll公司产品为例介绍了模块化系统组成、结构和智能化监控系统等。

机床和切削工具持续发展，切削加工产生大量废弃物—切屑。针对切削加工的不足，人类一直在探索少无切屑的方法。作为无屑加工的滚压工艺，实际上很早就开始应用。由于其只适小余量且工艺严格，导致使用受限，但其实用范围广、加工时间短、效率高且成本低，几乎可以加工所有具有一定塑性材料的各种表面，且加工表面的机械和物理性能优异。滚压工艺还能作为许多高表面质量加工工艺的替代和补充。

1. 滚压工艺的发展

在滚压工艺的概念认识上，德国亚琛工业大学和ECOROLL公司等将着重提高表面质量的滚压工艺和着重一次冷态压制成形各种形状的辊、弯，搓、挤以及轧工艺区分出来。又将笼统的滚压工艺细分为滚光（Roller Burnishing）、深滚压工艺（Deep Rolling）以及切削（刮等）+滚光复合工艺（Skive Burnishing etc）三类。

滚光和深滚压工艺是在一定要求的加工（车、镗、铰及铣等）基础上进行的，因此一般其加工余量很小，仅在其预加工的表面粗糙度范围内，实际加工余量为预加工的表面表面粗糙度和滚压加工表面粗糙度之差（约0.01～0.04μm）。实际加工余量受许多因素影响，最适当的滚压余量应据具体条件多次实验来确定。预加工为冷拔、热轧的工件不适合继续进行滚光与深滚压，但适合切削+滚光复合工艺。一般来说，金属材料塑性指标之一的延伸率＞8%，硬度＜45HRC的，均能被顺利滚压，延伸率＜8%，据具体性能不同，滚压后降低原预加工表面粗糙度比率有

尺寸170mm右侧有5mm加工量，加工完之后半轴孔端面尺寸为ϕ136mm，背吃刀量a_p的范围为13～18mm。在进给量和切削速度保持不变的前提下，通过切削力经验公式可以计算出后桥箱半轴孔端面变更后的最大进给力F_f为9 966.6N，与改前相比进给力降低了45.8%。结构改进后，进行了3批次150件加工试验，加工中划面顺畅，加工状况良好，装配后亦未出现问题。验证后对新结构进行了更改设计，并对加工工艺进行了固化。

3. 结语

本文参照车削加工经验公式，建立了反划面加工模型，计算了反划状态下的切向力，由于划面时产生的巨大作用力影响机床精度，加快刀具的损坏，因此，本文从设计的角度改进了工件划面处的结构，降低了刀具背吃刀量，划面时产生的进给力降低了45.8%，明显改善了加工状况。

参考文献：

[1] 卢秉恒. 机械制造技术基础M]. 北京：机械工业出版社，2007.
[2] 陆剑中，孙家宁. 金属切削原理与刀具[M]. 北京：机械工业出版社，2006.
[3] 孟少农. 机械加工工艺手册[M]. 北京：机械工业出版社，1991.

MW（收稿日期：20170824）

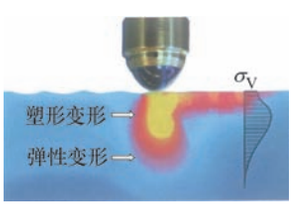
所不同。如材料延伸率＞5%，＜8%，滚压后最小可达到预加工表面粗糙度的20%，即可降低至原表面粗糙度高度的1/5；延伸率＜5%的，最小只能达到预加工表面粗糙度的40%。使用液体静压滚珠滚压工具可滚压硬度＞45HRC甚至到65HRC的工件。滚压不改变零件的公称尺寸、公差范围以及形状，这些要求必须在预加工时达到。

经滚压加工后工件的表面特征为：①可达到很低的表面粗糙度（R_z<1μm/R_a<0.1μm）或需要的表面粗糙度。②被加工表面平滑，零件副间的接触支承率增大，改善了受力状态。③摩擦系数降低。④因冷作硬化提高了表面硬度。⑤零件的耐磨性使用寿命得到提高。

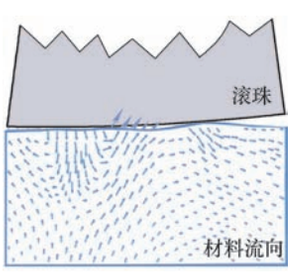
2. 滚光与深滚压工艺区别

滚光和深滚压工艺二者是不完全相同的，特别是工艺目的不同，下面分述之。

（1）滚光工艺是使用一个或多个滚柱或滚珠，滚轮的滚压头滚压工件表面，使之产生塑性变形，工件表面的波峰被压下，使材料自下而上地流动填充表面波谷（见图1），从而形成光滑表面的工艺。其为材料表层整体的流动，而不仅是表层波峰的被压弯压平。



（a）表层弹塑性变形及残余应力分布



（b）表层流动变形残余应力形成

图 1

滚压工艺包括滚光和深滚压，均可在普通机床和数控机床上使用，一次安装更换不同工具即可完成预加工和滚压加工，具有加工周期短、噪音小、能耗低且润滑要求低的特点，也可采用最少润滑油量MQL技术，工具寿命长，不因工具磨损而导致加工尺寸变化。

滚光工艺一次达不到要求可重复加工。实践证明，其在表面粗糙度R_z<10μm的加工中，具有很大的技术和经济优势，且在一定条件下可代替精细车、精细镗、磨削、铰削、珩磨、超精加工、研磨、抛光以及刮削等，据统计替代后可节省超过50%以上的生产费用。图2所示为其与其他工艺的对比图。图中横坐标标注的表面质量是指表面粗糙度。

（2）深滚压工艺。如表面粗糙度和表面综合质量间的区别，前者主要指表面粗糙度状况；后者指表面综合品质状况，除要求低表面粗糙度外，还要求零件间接触有较高的支承率，达到的一定的硬度、形成压缩残余应力，并具有一定大小和合理分布，以提高被加工零件动态的抗疲劳性能和抗应力腐蚀性能一样，滚光和深滚压也要分别达到这两种不同的目的。

尽管滚光工艺也提高了硬度，生成了残余应力，但未作具体要求。实现两种目的使用的工具有时可以通用，但深滚压较多采用能产生较大压强的滚珠和窄滚轮，滚光与深滚压具体工作参数不同，质量控制方式也不同。滚光只需通过目测调节压力和简单的物理测试，判断是否达到要求。深滚压则需要通过调节压力改变滚动速度和进给速度，且经寿命测试测定残余应力分布等，才能判断是否达到要求，这意味着试件将受到破坏。因此对于深滚压工艺，必须保证按预定合理的工艺参数加工，做到准确无误，才能确保加工质量。

对与安全相关的工件，应在过程监测中，实时记录并调整工艺参数，及时归档，供检查和以后参考使用。同一工件一次预加工若达不到要求，则难以重复深滚压。按合理工艺参数进行深滚压达到要求的案例如图3所示，图中a、b、c分别为深滚压后相应压缩残余应力、冷作硬化以及表面粗糙度和支承率的变化及改善情况。

由图3可知深滚压的优点：①压缩应力：减小裂纹扩张，提高疲劳强度和使用寿命。②冷作硬化：提高位错密度和表层硬度，提高强度，并在温度改变时保持稳定，延迟裂纹形成。③表面粗糙度：提高滑动性能，减小凹凸效应。

承受动态交变应力的零件，其表层反复作用着最大拉伸应力和压缩

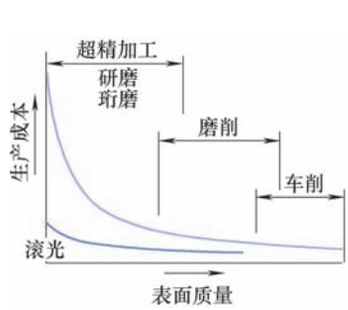


图2 滚光与其他精加工成本质量比较

应力，拉伸应力超过材料强度极限会产生裂纹，裂纹不断扩大将造成疲劳破坏。零件表面加工后若残留压缩应力，将抵消零件循环工作时产生的拉伸应力，可能使其不超过极限值，从而减少裂纹生成扩张，提高其疲劳强度和使用寿命。

深滚压导致表层产生的塑性变形，造成作为晶体缺陷的位错（晶格原子离开原位置晶面发生错动）密度增加，使晶格歪扭晶界畸变，需要更大的外力才能使其变形、破坏，而被加工工件表层硬度（冷作硬化）和强度的提高，也使其工作性能更加稳定。

深滚压后表面粗糙度大为改善，谷底凹口减少，减少了裂纹的生成源，提高了耐疲劳性能，使零件间支承比率提高，接触应力、摩擦系数减少，滑动性能改善。

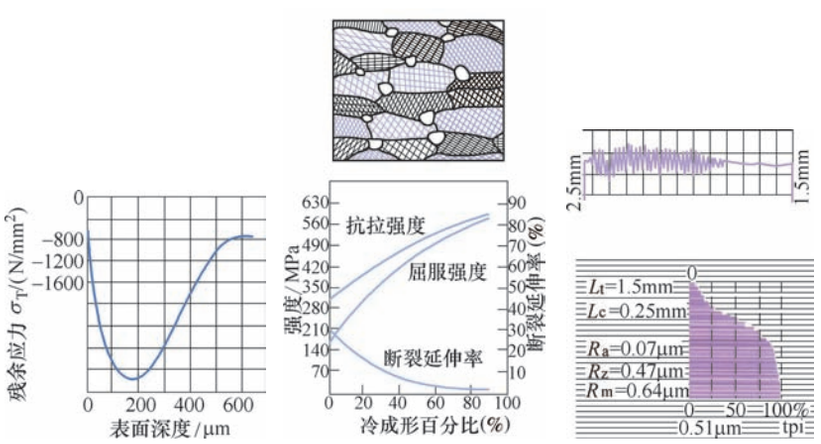
深滚压达到预定表面综合质量后，可将疲劳强度提高5倍多，显著提高承受动态应力零件的寿命。深滚压工艺的性价比高，几乎可处理所有金属材料，且可代替提高疲劳强度的其他复杂的、需用专用设备的加工工艺，如喷丸强化、激光硬化及渗氮处理等。

3. 滚光和深滚压的加工方式

滚光和深滚压的加工方式主要有三种：①下压式（见图4a）。即使滚珠、滚轮直接压向需加工的表面，滚压力在最初几转中逐渐加大，然后保持不变，加工期最后几转内逐渐减小。滚压力的加大减小过程很重要，如果不正确会影响工件的使用质量。下压式主要用于深滚压加工，如零件台阶间圆弧转角的加工。②进给式（见图4b）。即在滚压工具压下后，加上进给运动，从而使滚光和深滚压工艺可以顺利快速地加工内外圆柱面、圆锥面等。③3D自由式（见图4c），多采用流体静压加载的滚珠工具，用跟踪系统引导滚珠，可在特定范围内补偿使压力恒定，用这种方式可加工出质量一致的复杂几何型面。

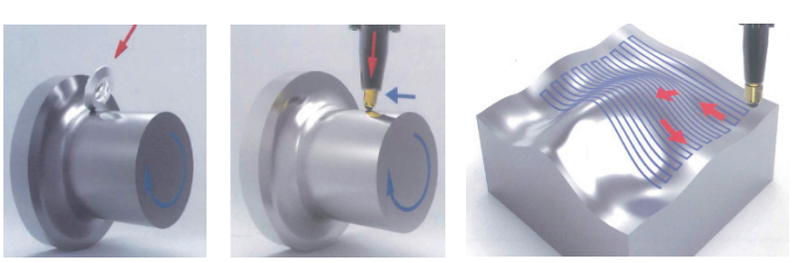
4. 切削滚压复合工艺

切削滚压复合工艺是指切削中的刮削、钻削、扩削及铰削工具和滚光工具复合安装在一根刀杆上，工件或刀具旋转，切削滚光工具直线送进，一次完成的加工。其中还包括二合一（刮-滚光）、三合一（扩-刮-滚光）和四合一（钻-扩-刮-滚光）等多种组合方式。刮削还可据需要分别安装粗刮和精刮两工步用刮刀。这种复合工艺可高效高质量地加工出缸、管和套类零件的孔。以提高其圆度、圆柱度以及表面粗糙度。加工时，直径调节方便，磨损件更换容易。圆度误差0.5mm的孔，刮后可提高到0.01mm，纵向波纹减少。再经滚压后，直径公差可达IT8或IT9。表面粗糙度值R_a=0.05～0.4μm （R_z=0.5～2μm）。其可加工的直径范围为28～800mm。ECOROLL公司切削-滚光复合工具如图5所示。



（a）压缩残余应力　（b）冷作硬化　（c）表面粗糙度及支承率

图 3



（a）下压式　（b）进给式　（c）3D自由式

图 4

图5　ECOROLL公司切削-滚光复合工具

ECOROLL滚压工具建立了模块化滚压工具系统。由于滚压能加工的表面较多，根据滚压工具是滚柱、滚珠或滚轮；单个或多个，加压方式是机械式还是液压式，他们有多种模块化系统。图6所示为EG5型模块化通用工具，为机械式中的一种，可加工直线或对称旋转曲面回转体，及轮廓和侧壁间的过渡圆弧面等。模块主要由滚压头、刀体和刀柄构成。

滚压头包括滚柱、滚珠或滚轮以及安装它们的保持架和支承体（带滚针轴承）。加工表面（如内外圆柱、圆锥、圆弧转角、螺纹根部、端面、平面、成形面以及自由曲面等）不同，滚压头支承体结构尺寸也不同。

刀体一端联接滚压头组件，另一端连接刀柄。加载机构多装在刀体，机械式加载机构常为弹簧加载，刀体装有弹簧力指示表、特殊电缆或以无线，在外部的显示设备中显示受力。刀柄有不同结构形式，决定整个工具装在机床方刀架上还是主轴上。装在刀架上的刀柄形状为不同尺寸的正方形，装在车、铣床的VDI固定刀座上的可做出相应齿排结构，这类刀柄主要带动滚压工具作直线或型线的进给运动；装在机床上HSK型、三棱锥面的Capto型或其他特殊型主轴上相应结构的刀柄，则带动滚压工具作旋转运动。

另有一种滚压头是单个滚压轮的EG14和EG45型模块化通用工具，除能加工上述各表面及过渡圆弧面外，还可用窄的滚轮深滚压螺纹的牙根圆弧。

5. HG系列滚压工具

图7所示为HGx-y系列流体静压式模块化工具，其可以滚光和深滚压内外表面、非常复杂的轮廓和自由曲面。这些滚压工具可以在普通机床和CNC机床上使用。工件保持静止或旋转，可加工硬度高达65HRC的各种金属材料。外置液压装置或工具系统内高压泵将流体（润滑液、油）加压并传输到滚珠，滚珠以规定的滚压力压向工件。图7左侧HG后的x，表示滚珠的直径（ϕ2～25mm），y代表不同的版本及其功能，为完成不同功能，刀体结构形状各式各样。HG系列共十多个功能，图7中只列出7个实例。－2用于加工大于70mm孔径，－7用于加工端面和自由曲面，－9用于加工对称外型面，（E为特殊型号），－5用于一次加工外型面和端面等，－10用于球体加工，－19和HGx-9类似，但刀柄则可据客户需求特殊定制。

图8所示为多种功能版本的HG系列滚压工具，图中HGx-1、HGx-2、HGx-2p以及HGx-4主要用于加工不同直径不同长度的内孔；HGx-5用于加工外型面和端面；HGx-6用于加工球体；HGx-7用于加工端面和

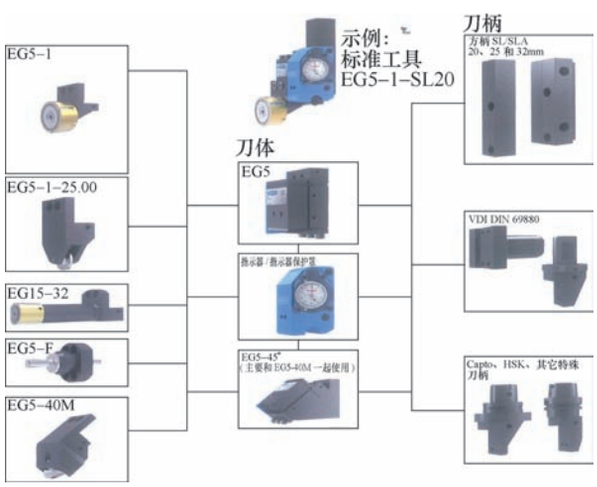


图6　EG5型机械式模块化通用滚压工具

图7　HG系列液体静压式模块化滚压工具

自由曲面；HGx-9用于加工旋转对称的外形面（圆柱面、圆锥面、端面、圆弧转角和球面）；HGx-11是加工直径大于6mm的内孔，对细长工件使用两个滚珠滚压；HGx-20是3点式工具（3个滚珠），用于加工细长轴（直径≥0.5mm）；HGx-29是2点式工具（2个滚珠），用于一次性加工厚度＞0.8毫米的盘状和薄壁工件的两面（例如涡轮叶片）。其余详见样本。

6. 滚压工艺过程监测和记录归档

ToolScope系统可对深滚压过程中的关键工艺参数进行持续观察、监测和记录。①使用机械式深滚压时，系统测量和监控实际深滚压的作用力。②使用流体静压深滚压时，系统监测记录与工艺相关的参数，即操作压力和流量都应在上下规定许可范围内，如工艺参数出现偏差，即发出警示信息，查出并清除偏差后，才能继续加工，从而显著地减少了不合格率、返工率和相关损失。系统可将工艺参数长期记录归档，以检查生产过程是否遵循合理正确的工艺参数。由于使用了高精度的传感器，自主式过程监控，数月前使用的正确加工工艺可以重现，故能确保加工合格，且使用触摸屏操作简单方便。

如图9所示，左下角为系统的触摸屏，由于加工过程的可视化，除控制显示压力和流量外，还可直接显示加工结果（即最后尺寸是否在公差许可范围内），系统对生产过程加工的实际尺寸也进行了及时监测，如图10所示，当加工尺寸超出公差带即发出加工错误信号，信号传给控制系统，再通过液压装置调节压力、速度等，纠正偏差后再使机床和滚压头继续加工。

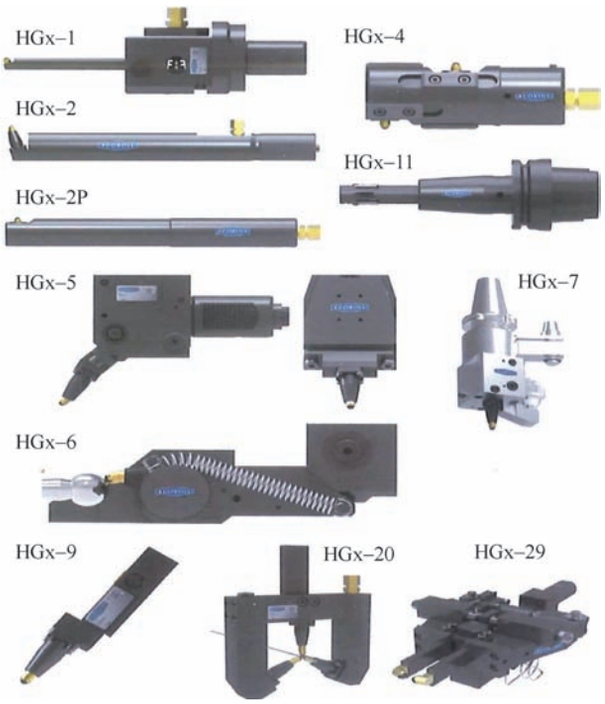


图8　多种功能版本的HG系列滚压工具

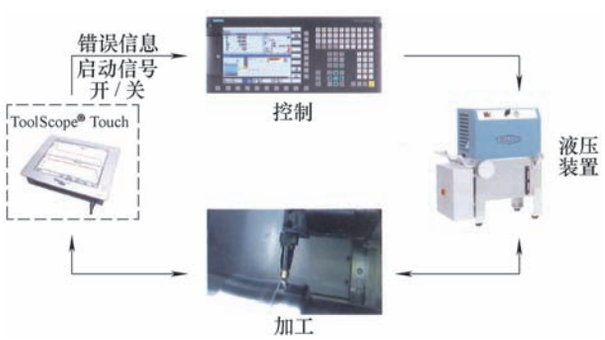


图9　液体静压滚压过程监测及控制

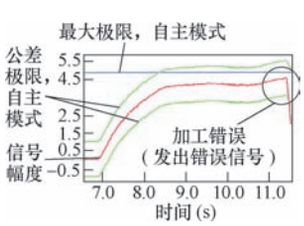


图10　可视化参数极限违例

滚压工艺结合新的智能控制监测系统，使承受动态交变弯曲、扭转应力的零件，尤其是经深滚压加工后的零件性能大幅度提高，被航空航天、汽车铁道以及医药等行业广泛采用。各滚压工具生产公司由于处理零件的材质、性能及要求不同，因此使用的方法、工具、工艺参数及经验数据有所不同。

参考文献：

[1] 邓生明，罗魁元. 内孔通用滚压头设计[J]. 工具技术，2004（5）：39-40.

[2] 温卫民. 齿廓挤棱刃设计[J]. 工具技术，2004（5）：37-38.

MW（收稿日期：20170810）