

面向绿色制造的微量润滑技术在现代汽车工业中的应用

□ 上海大众动力总成有限公司/朱正德

微量润滑作为当今绿色制造技术的典型代表，获得了国内外汽车业界越来越多的关注和重视，且已在一些动力总成生产企业和发动机、变速器零部件专业工厂中得到了成功的应用。本文借助曲轴斜油孔加工这一具体案例，并在与传统制造工艺进行对比分析后，较全面地阐述了微量润滑技术的实际使用效果。

随着对生态保护、降低能耗、节约资源要求的日趋严苛，已有越来越多的国家开始落实节能减排、保护环境的计划，这就决定了绿色制造技术的开发与实施势在必行。

绿色制造技术以绿色理念为指导，涉及产品设计、制造、包装、运输，直至产品报废处理的各个环节，对环境、资源造成的负面影响最小，能实现资源利用率的最大化，以实现同时兼顾企业经济效益与社会效益稳步提升两方面的综合性目标。从国内企业的实际情况出发，目前在一些工厂的生产中已经获得了一定应用的，主要还是绿色的机加工制造技术。如在发动机曲轴、凸轮轴、连杆、缸体和缸盖等主要零部件的加工过程中，微量润滑技术因为具有降低制造成本、改善工厂环境等优势，已经逐步取代传统的切削液湿式加工方式。

微量润滑技术概述

1. 概况

MQL技术，即气液混合微量润滑技术，也称最小量润滑，来源于英文Minimal Quantity Lubrication，是一种新型的金属切削加工的冷却润滑方式。这种工作方式是通过将压缩空气与极其微量的润滑油混合汽化后，形成微米级的液滴，然后喷射到加工区域，从而进行有效的冷却、润滑和清理切屑。

这项技术目前已经在国内部分主流汽车动力总成（主要为发动机厂和变速器厂）企业得到了成功的应用：一是在那些有德国大众汽车背景的合资或独资企业里，这项技术主要是在曲轴加工领域获得了全面应用，后又成功地用于连杆线的粗加工工位，并正在为将它推广应用到缸体、缸盖加工中做准备。

二是在以福特汽车为代表的一些美资企业（如长安福特）和部分自主品牌车企（如长城汽车），这项技术主要用于铝合金壳体类零部件加工，如变速器壳体、发动机缸体及缸盖。

2. 优势

MQL技术作为一种绿色的准干式加工技术，具有如下优势：

（1）加工中无需更换MQL油，只需定期在压缩气体中混入（即添加）微量的无公害润滑油。而在整个运行过程中，无废液排出。所产生油雾在经过设备净化处理后，可以直接排放，从而有效避免了工业生产对环境的污染。

（2）改善刀具切削条件，抑制及降低了加工过程中产生的切削热，提高了刀具寿命。切削液以高速雾粒供给，增加了润滑剂的渗透

性，提高了冷却润滑效果，改善了工件的表面加工质量。

(3) 由于实施MQL技术时，对润滑介质的消耗量极低，一般情况下每小时消耗量仅为0.05~0.1L。相比之下，传统湿式加工每小时乳化液的消耗量大约为1 000L，MQL技术实际的切削液用量仅为传统加工的万分之一，从而大大降低了切削液成本。此外，还能使切削区域外的刀具、工件和切屑保持干燥，既避免了处理废液的难题，又有效地降低了辅料消耗和切削液的后处理成本。

微量润滑系统及其工作原理

简单地说，微量润滑系统就是一套精确控制油量的喷油装置，系统结构主要由油雾供给系统、喷嘴和润滑油三部分构成。该系统简单，整个装置占地面积小，易于安装在各种类型的机床旁。

1. 微量润滑系统的分类

MQL系统可分为单通道式和双通道式两大类。两者的区别是空气和润滑油混合形成气溶胶的位置不同，即根据对微量切削液的传输、雾化的差别而被分成两种形式。其中单通道式的特点为：空气和润滑油在发生设备内已经混合成气溶胶，随后气溶胶通过刀具内部的轨道被输送到加工区域。而双通道式则有以下特点：空气和润滑油在不同的轨道内被输送到加工轴头附近的混合腔内，形成气溶胶，随后被输送到加工区域。与双通道系统相比，单通道系统虽然更便于制造，但在输送冷却润滑油雾时，特别是

在具有强烈离心作用下的旋转主轴中时油雾易被分散，这常常导致加工区油雾分布不均匀，从而影响加工质量。而双通道式的微量润滑系统，因为在气溶胶形成后，被输送到加工区域的距离比较近，其润滑油滴相比单通道式更加细小，润滑效果将更好，所以应用范围更加广泛。

2. 产品化的微量润滑装置

MQL有内冷和外冷系统之分，前者的气雾通过机床主轴，经刀具的内孔并由端部喷出，或通过原切削液管路由原喷嘴位置喷出，以达到最佳使用效果；而后者的气雾则由机床外部引入，并由刀具外部供给。

另外，由前面的介绍可知，MQL装置还被分为单通道和双通道两类，其中的单通道微量润滑系统主要由主体（即紧凑型油雾单元）、球阀、供油单元以及相应的切削加工单元组成，而双通道系统则主要由主体（即包含供气和产生油雾（供油）的复合单元）、球阀以及旋转接头等组成。

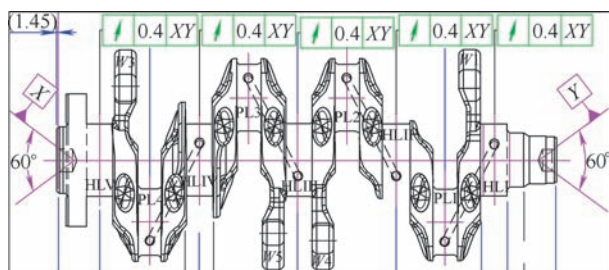
一般情况下，外冷系统适用于使用外冷刀具的机床，如刨床、车床、铣床和中心锯床等，适用的材质有铜、铝、镁、易切削钢和中等难切削钢等材料。而内冷系统则主要适用于数控车床、加工中心、孔加工机床等，更适于与内冷钻头、内冷铣刀、内冷丝锥等内冷刀具加工的配合，当然也适用于外冷刀具的使用场合。适用材质包括铝合金、铜合金、镁合金、各类铸铁以及易切削钢和中高难切削钢等材质。

微量润滑技术在发动机曲轴斜油孔加工中的应用

在当今国内外汽车发动机行业，小排量汽油发动机曲轴的材质都以铸铁尤其是球墨铸铁为主，至于中、大排量（1.6L以上）汽油发动机、尤其是带涡轮增压功能的发动机，所配曲轴的材质大部分为锻钢。曲轴作为发动机的关键零部件，不但结构复杂，而且有很高的技术要求，因此为了能加工出合格的工件，各个企业都会在已相对比较成熟的传统工艺的基础上，继续不断地完善、改进生产工艺。随着汽车轻量化和对绿色制造技术的日益重视，类似MQL这样的新颖制造技术也在一些主流发动机厂的实际生产中获得了应用。

下面介绍一个在曲轴粗加工阶段的典型案例。对深孔如斜油孔（见图1，从图1a清晰可见斜油孔的状况，而图1b是位于轴颈表面的深孔端口的加工，至21世纪初，多数国内主流汽车发动机企业采取的依然是“枪钻”这种已沿用多年的传统工艺。这种制造技术最先为应用于加工枪管而得名，鉴于只需要通过一次进给就能生产出具有较高精度的孔（譬如枪管），多年来该工艺已普遍应用于深孔加工中。

在运行过程中，使用了导向条对刀具进行支撑，自钻头位置的进油孔将切削液输送至切削区域，可同时实现润滑和冷却，还有利于排屑，之后让切屑和切削液顺着沟槽被送入油箱做统一处理。但近年来，该制造工艺，因为其投入和使用成本偏高，在加工过程中切削（润滑）液的消耗量很大等种种不



(a)



(b)

图1 曲轴粗加工阶段的斜油孔加工

足，所以，一些技术理念比较领先的企业，在做新的生产线或新的生产能力的工艺规划时，就以“高速深孔钻”来替代传统的枪钻工艺，这为微量润滑技术的应用创造了条件。

采用枪钻工艺加工深孔，一方面，仍然利用传统的润滑方式，单单一套体积庞大的润滑冷却系统就十分昂贵，且后续的使用成本也相当高；另一方面，还必须有大流量、高压力和高过滤精度的润滑切削液，否则就会影响油膜的建立并造成排屑的困难。这主要是与经过“枪钻”加工后的孔壁会呈现一定程度的螺旋状密切相关，此种表面形状对排屑造成不利影响，在曲轴斜油孔这样的径长比很大的孔加工中显得就更突出了。此外，鉴于枪钻是偏心的，还必须配有钻套。

而当曲轴斜油孔的加工采用微量润滑技术后，一方面配以Bielomatik（必诺）公司提供的双通道微润滑系统，该系统为内冷式

结构，双通道是指气管跟油管分别处理，最后才在刀具内混合后喷出。另一方面，当深孔加工由枪钻改为双刃高速钢麻花钻后，就不再需要钻套。进而，由于微量润滑的油雾本身质量就很小，且因加工中受力对称，形成的孔壁就较光滑。除以上两大优势，相应的工艺试验则表明，应用微量润滑还明显地改善了工件清洁度，这是因为此时切屑更容易在加工中排出，有利于切屑回收，而且在清洗过程中也更不易残留。另外，这种切削可以认为是准干式的，相比传统方式不但使用成本更低，且雾化的润滑油也更利于油膜的建立。

微量润滑技术在铝合金缸体/缸盖加工过程中的应用

1.概述

对于发动机缸体、缸盖和变速器中的壳体等铝合金箱体类零部件

的加工，多数还是采取传统的湿式（切削液）润滑，该方式的切削液使用和后续环保处理成本很高，生产环境也差。因此，一些变速器、发动机生产企业开始考虑以微量润滑技术替代长期以来使用的湿式润滑加工的可能性。2013年，位于重庆的长安福特发动机工厂建成了采用MQL技术的铝合金缸体/缸盖生产线，在达到批量生产能力的同时，也取得了高效、安全、环保的效果：减少了80%的碳氢化合物、50%水用量以及25%的能源消耗，既改变了后续环保处理成本高昂的局面，又明显地改善了生产环境。此外，还提高了刀具寿命、提升了工件加工质量。

2.实施MQL试验时的切削条件

切削试验在发动机车间现场的缸盖生产线所配的GROB G320双主轴加工中心上进行。为了验证MQL运行的效果、零件的加工质量及可靠性，在做试验的加工中心内配置了LUBRIX V7单通道微量润滑系统。如前所述，单通道MQL系统是压缩空气和润滑油通过混合装置生成一定浓度且颗粒尺寸为 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 的油雾，然后在机床外部通过球阀与主轴相联，油雾在穿过主轴及刀具的内冷孔后，被输送至切削区域。该系统采用了毛细管虹吸原理，在油箱内通过空气的压差（ $>0.06\text{MPa}$ ），即可实现油雾浓度的调整（出油流量由油雾喷嘴的数量和压差决定）。一般来说，单通道微量润滑系统适用于转速不高于 $16\,000\text{r/min}$ 的主轴，响应时间为 $0.8 \sim 2\text{s}$ 。通过对铝合金缸盖上的加

工部位运行在MQL条件下的钻削及铣削加工，再与同等条件下采取湿式加工时的刀具磨损情况及工件表面质量进行对比。在整个试验过程中，主要的调试参数为喷油压力、喷油量、响应时间、加工参数、PLC程序和内冷指令等，见表1。

3.切削试验的工作流程、数据分析及效果

对运行MQL后的工艺验证包括：完成油雾装置的联接，并对油雾浓度/压力、工件温度、刀具切削参数都调整到位后，通过所采集到的相关数据及求得的设备能力指数 C_{mk} 以及就观察到的切屑堆积状况。又进行一些测试，着重对工件加工效果进行验证和数据分析。具体流程如图2所示。而表2所示为在执行两种不同的工艺方式下，所选的钻/铰工序加工参数和采用的刀具的对比。

顺便指出，MQL电气控制采用了数字I/O接口通信方式，通过更改PLC地址和NC程序（组合成不同的M指令），实现机床对微量润滑装置的自动控制，并完成自动连续切削条件。最后，在同等加工条件下，分别采用传统湿式加工和MQL

表1 试验条件

项目	试验条件
机床	GROB卧式加工中心G320
主轴	内冷双主轴，温度 $\leq 40^{\circ}\text{C}$
喷油压力/MPa	0.5~1
刀具厂家/型号	MAPAL/HSK63 刀柄，MQL专用钻头/铰刀
MQL系统/型号	LUBRIX V7/单通道微量润滑系统
MQL油品	脂肪醇
安装附件	MQL球阀M12-plug、电缆及油气管路
程序调整	关闭切削液通道、控制MQL球阀开关
试切工件	铝合金ADC12、材质缸盖40件
试切部位	钻H201-H210、铰H201/H205/H206

工艺，就刀具磨损情况以及工件表面质量的情况进行对比。为此在切削试验中，特设定15种油雾浓度，逐一与刀具进行匹配。在执行MQL工艺时，所采用刀具的材质并未发生变化，主要的变化体现在排屑

槽、刃角、刀柄和内冷却孔位置、形状、角度的设计。当切削试验完毕后，再对产品直径、位置度和表面粗糙度等尺寸参数进行检测和对比，试验数据的对比验证见表3。

通过对40件铝合金缸盖的试切

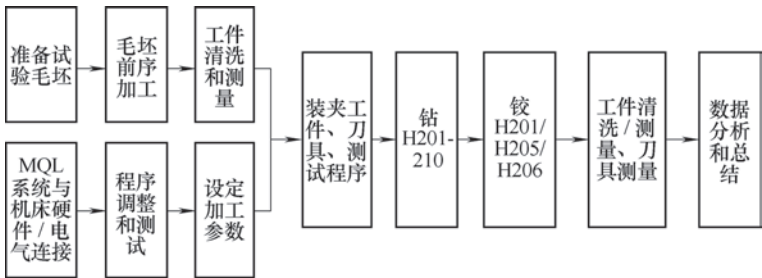


图2 为进行MQL工艺验证而实施的切削试验流程

表2 两种工作状态下，钻/铰工序加工参数及采用刀具的对比

刀具型号	刀具	刀径/mm	齿数	内冷孔		转速 $n/\text{r min}^{-1}$	进给速度 $v/\text{mm min}^{-1}$
	材质			数量	直径 d/mm		
T2002湿式加工钻	硬质合金	10	2	2	1.5	10 000	7 000
T3002湿式加工铰	PCD	11/8	2/2	1	2	8 000	16 000
T2003MQL钻	硬质合金	10	2	2	2.5	10 000	7 000
T3003MQL铰	PCD	11/8	6/6	6	1.5	8 000	16 000

注：T2002/T2003钻H201-H210孔，孔径为10mm，孔深为54mm，T3002/T3003铰H201/H205/H206孔，孔径为 $10^{0.015}\text{mm}$ ，孔深为 $(12.5\pm 0.2)\text{mm}$ 。

表3 试验结果数据的对比 (单位: mm)

检测项目	标准值	MQL实测	湿加工实测
H201-H210直径 (钻)	10±0.2	10.12	10.09
H201-H210表面粗糙度 (钻)	无	0.212	0.658
H201/H205/H206直径 (铰)	10 ₀ ^{0.015}	10.005 4、10.005 1、10.005 2	10.006 0、10.005 2、10.005 5
H201/H205/H206位置度 (铰)	0.06	0.025 3、0.043 6、0.045 2	0.061 3、0.027 5、0.058 2
H201/H205/H206表面粗糙度	1.6	0.064 × 10 ⁻³	0.073 × 10 ⁻³

削 (钻400个孔、铰120个孔), 比较在MQL刀具及湿加工刀具下的情况, 如图3所示。从试验数据可以看出, 虽然在外界条件相同并采用同样的切削参数, 分别利用湿式加工刀具和MQL刀具均能达到产品图样所要求尺寸, 但是从图3中可清楚地看出, 在采用湿式加工时, 刀具的积屑瘤严重, 而MQL刀具基本无积屑瘤, 因此, 执行MQL工艺条件下的刀具, 所加工出的产品表面质量将优于湿式加工。这一点在本文详细介绍的两个案例中也都已清楚地有所反映。

在现代制造业中, 充分体现生产质量意识的一项重要指标——设备能力指数 C_{mk} , 在机床设备配置了新颖的MQL润滑装置后, 能否达到应有的水平? 与原来采取的传

统的湿式润滑相比, 是否能确保不低于当时的水平呢? 通过对40件缸盖精加工部位的尺寸进行设备能力指数 C_{mk} 的评定, 确认在考核连续加工的设备能力指数 C_{mk} 时, 通过对设备能力的分析, 都没有超出控制限的点, 设备的受控情况很好。以控制H201、H205和H206的孔径 ($\phi 11H7$) 为例, 求得的 C_{mk} 值分别为2.30/2.25/2.43, 均满足设备能力指数要求 ($C_{mk} > 1.67$)。

结语

本文借助曲轴斜油孔加工和铝合金缸体/缸盖加工的具体案例, 通过与传统制造工艺的对比分析, 较全面地阐述了微量润滑技术的实际使用效果。事实表明, 微量润滑作为一种典型的绿色加工制造技术,

优势是很明显的。在产品的加工质量、生产成本、加工效率、资源消耗以及环境影响等方面, 相比传统的湿式 (切削液) 润滑和干式加工, MQL技术的综合评价更高: 一是降低了生产的运行成本和资源消耗。二是投资低。以新建一条40万产能的铝合金缸体/缸盖线为例, 就一次性的投资额而言, 采用微量润滑时的投资还不到传统的集中冷却的一半。三是能有效地降低切削力。具有提高刀具寿命和工件加工质量的作用。

虽然MQL技术发展到今天, 总体上已经比较成熟, 但是仍然有一些必须认真对待的问题, 不解决好就会影响使用效果。典型例子就是, 当其用于加工铝合金零件时, 难免会出现由切削而产生的铝屑的处理问题。由于缺少了在常规情况下切削液的冲刷作用, 所以铝屑容易在设备内堆积, 这将对上下料的准确性产生消极影响, 还会使设备内的运动部件发生故障。因此, MQL技术应用的同时, 关注机床内部的切屑防护和部件排屑设计也是非常重要的。 **AUTO1950**

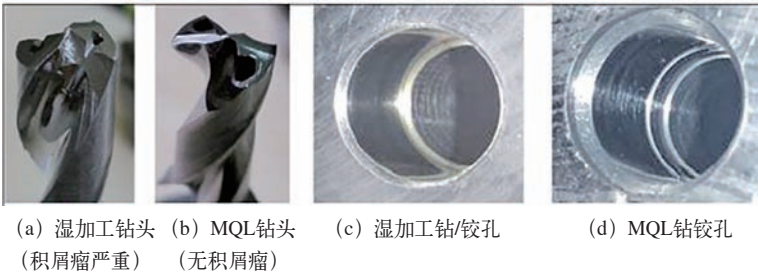


图3 两种加工状态下, 刀具情况的对比