磨粒流工艺技术及其应用

山西平阳机械厂精密机械制造分厂 （侯马 043002） 任红军

磨粒流工艺的发明，可以说创立了内外表面边角处理的新概念，使得金属表面处理更具特色。其更大优势在于，随着现代制造技术微型化、密集化，越来越多的零件结构呈现出封闭的、无规则的同时又要求高质量表面的各种型腔、通道等，磨粒流工艺在这些部位的微量加工和抛光方面可谓独树一帜。不但如此，磨粒流工艺还可以成功地对各种材料进行微量研磨加工，包括较软的有色金属直至坚韧的镍合金、陶瓷、硬质合金等制作的零件，非常适应现代制造材料和制造技术的发展。

1. 磨粒流加工机理

磨粒流（简称 AFM）加工是利用磨粒流中的磨砂充作无数的切削刀具（自锐性），以其坚硬的锋利的棱角对工件表面进行反复切削，从而达到一定的加工目的。在工艺实施中，通常采用两个相对的磨粒缸使磨粒在零件和夹具所形成的通道中来回挤动（见图 1）。磨削作用就产生在流体受到限制的部位，即挤压部位。当磨粒均匀而渐进地对通道表面或边角进行工作时，产生去毛刺、抛光、倒角的作用。

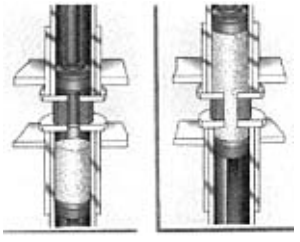

图 1 磨粒流加工原理图

磨粒流加工工艺中有三个重要环节：

（1）挤压研磨机床 固定工件和夹具，在一定的压力作用下，使磨粒通过被加工表面，达到研磨、去毛刺、倒角、抛光的目的（见图 2、3）。由机床控制挤出压力，压力范围从 0.7～22.4MPa。

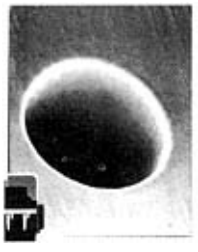

图 2 磨粒流去毛刺

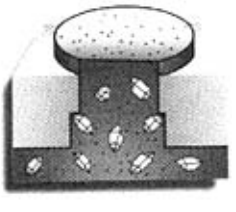

图 3 粗粒度磨粒流倒角

（2）磨粒 由柔性的半固态载体和一定量磨砂拌制而成，有不同粘度、流变、磨砂粒度和密度。最常用的磨砂是碳化硅。根据被加工材料，还可选择立方氮化硼、氧化铝，砂粒尺寸在 0.005～1.5mm 之间。

高粘度磨粒可用来对零件的壁面和大通道进行均匀研磨（见图 4）。低粘度磨粒可用来对零件边角倒圆和小通道的研磨（见图 5）。

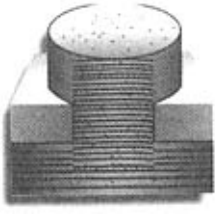

图 4 高粘度磨粒流

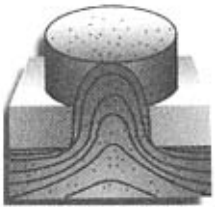

图 5 低粘度磨粒流

磨粒的粘度、挤压压力和通道的大小决定了磨粒的流速，影响到研磨量、磨削均匀性、边角倒圆大小。

（3）夹具 使零件定位。并引导磨粒通达被加工部位。堵住不需要加工的部位（见图 6）。有些零件的磨粒流加工不需要夹具辅助，如模具等，有些加工仅需简单夹具。大批量零件生产所用的夹具，要设计得易于装、卸、清洗，通常须安装在分度台上。这样的夹具，一次可加工许多零件。

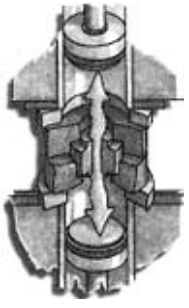

图 6 堵住不需要加工部位

2. 磨粒流应用技术

当今材料、计算机、精密零件的不断发展，将带动制造技术整体推进。特别以航天、航空工业为标志的高精技术密集行业，出现了许多应用新材料、新技术设计的各种零件精度更高，重量更轻，结构更复杂。而制造这些零件的高端工艺也给我们带来了挑战，使我们的光整工艺不断完善。尤其在航天领域，几乎所有大型飞机制造公司的发动机厂和维修厂都使用磨粒流工艺加工各种各样的零件。

除了作为一种抛光手段，磨粒流工艺还可以对那些形状公差、质量要求极其严格的零件进行微量磨削加工。主要应用场合分布在以下几个领域：

① 调整叶片、叶轮、油嘴、化油器和定子的气流阻力，增大涡流数值。

② 去除激光和电火花加工所产生的重铸层。

③ 改善压缩机和涡轮零件翼形表面状态。

④ 去除毛刺，对零件的内外边角进行倒圆。

⑤ 齿轮去毛刺和超精抛光。

⑥ 对旧零件进行修整，去除积炭。

⑦ 改善表面的整体完整性。

具体应用介绍如下：

（1）调整喷油嘴小孔流量　图7、8是喷油嘴图片，图7为电火花加工后小孔状况，图8为同一小孔经微孔磨粒流加工后的状况。可以看出光滑的孔边缘和均匀的表面。

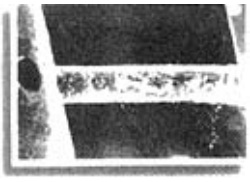

图7　粗加工后的喷油嘴小孔

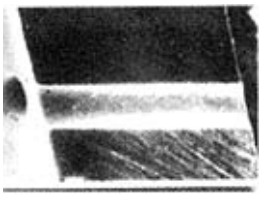

图8　磨粒流加工后的喷油嘴小孔

喷油嘴经微孔磨粒流加工，减小了流量散差，使流量更为精确。孔的出口保持锐利，而在内径处产生均匀的圆角，并使表面光滑，轮廓完整。进口处的光洁和圆角，使小孔流量增大，寿命提高，这些经微孔磨粒流处理过的油嘴，其流量散差可控制在1%以内。

（2）改善疲劳强度　微孔磨粒流均匀倒圆了油道与油腔的交叉处，改善了疲劳强度。见图9。

喷油器体、高压泵壳体、增压器、阀和针阀体等柴油机零件经过磨粒流加工后，在高压孔交叉处产生大的圆角（R 为0.1～0.5mm以上），改善了高脉冲产生的疲劳强度。

柴油机中的高压油管，要不断经受很高压力的冲击，达100MPa（1000bar）以上。因此在一些应力集中的地方会产生疲劳损坏。磨粒流方法光整表面，去除疵点，倒圆锐角，大大增加了零件的可靠性，延长了使用寿命。

（3）提高性能　汽车进气管，手工抛光其内表面时，只能先切割开，抛光好以后再焊接起来。而用磨粒流加工方法，不需要切割打开，就可以使磨粒挤压通过所有的管道如图10所示。磨粒流除了使进气管道的壁面得到抛光外，还使管道内部空间增大，气流量增高。经空气推力测试，抛光后推力增加17%～23%。研磨量的多少，很大程度上取决于零件浇铸表面的粗糙度。

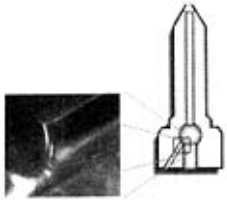

图9　油道与油腔交叉处的倒圆

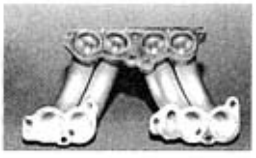

图10　抛光后的汽车进气管

磨粒流工艺已广泛用于汽车零件的精加工：进排气管、进气门、增压腔、喷油器、泵、二行程、四行程气缸头、涡轮壳体、涡轮叶片、花键、油头和齿轮等等。如图11，12就是一个涡轮发动机中涡轮抛光的例子。

图11　未抛光的涡轮

图12　经磨粒流抛光的涡轮

各种机械结构中的传动齿轮，包括蜗轮、蜗杆、锥齿轮都可以用磨粒流加工。可以提高齿轮使用寿命，减少传动噪声。如图13所示。

图13　抛光前后的齿轮

铸件可直接在专门的生产性磨粒流系统上抛光，这个磨粒流系统每小时抛光30个气缸头，计算机控制所有加工参数，旋转台面上有两个工位。当一个部件在加工时，另一个工位作装卸、准备工作。经过抛光的气缸头，表面粗糙度从 $R_a4\mu m$ 或 $R_a5\mu m$ 达到 $R_a0.4\mu m$，而废气排放量减少7%，发动机功率增加6%，行程增加5%。

（4）用于模具抛光　模具需要光洁的表面，以便于成形、脱模，确保产品的表面质量。这种要求很高的工序，传统上是由熟练的技术工人进行手工

研磨，其不稳定性是不可避免的。磨粒流的出现使通道、型腔的高精度成为现实；使模具表面粗糙度值降低而更为可靠并降低劳动成本。

由电火花加工而成的三通道铝挤出模，在磨粒流机床上经过约 6min 的加工，其表面粗糙度从 $R_a0.4\mu m$ 提高到 $R_a0.1\mu m$，如图 14。这类模具使用细磨粒磨削，不会改变工作带形状，每个齿廓都经抛光、能保持均衡的挤出速度。

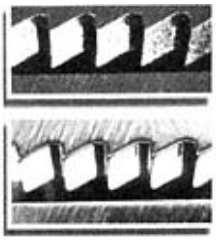

图 14　挤出模

电火花、线切割、铣削及磨削加工的零件表面，经磨粒流加工，其表面粗糙度可降低 10 个数量级，如图 15 所示，该图是模具表面经电火花加工后的金相图，每一张图的状态经过 2min 抛光，其表面粗糙度等级可降低 10 个数量级。

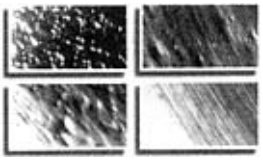

图 15　模具表面抛光过程

磨粒流加工可用于抛光各种模具：挤出模、成形模、拉丝模、锻压模、冷锻模具等。

（5）磨粒流加工技巧　磨粒流加工是一种特殊的表面处理工艺，自然有其与众不同的特点。如果充分注意这些特点并加以利用，将获得最佳效果。比如磨粒流无论粘度如何，在夏天都会变稀，要达到相同的目的必须适当增加挤动次数，当然如果加工参数选择过高，将导致磨粒发热，使其切削性下降。从小孔径流量理论来说，狭窄空间流量快，故在工艺设计时要注意这一因素，例如对大径（$>\phi10mm$）或盲孔的磨粒流加工最好设计专用喷嘴，见图 16，以此来形成狭窄空间。这里需要强调的是去毛刺、抛光及倒圆角用磨粒流不一样，建议不要使用同一种磨粒流完成不同工艺过程。此外，还要倡导绿色制造，加强磨粒收集，进行环保处理。对于完成磨粒流加工的零件内残存的磨粒，只需经过液体浸泡，振动即可清除，然后再清洗、吹干。

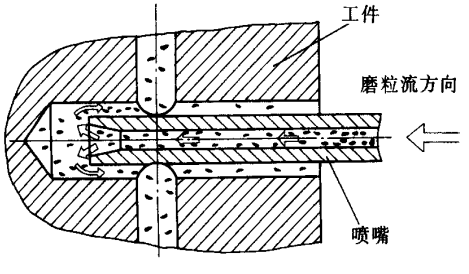

图 16　大径、盲孔加工示意图

3. 磨粒流设备

现在机械加工行业应用磨粒流加工工艺并不多，这里仅介绍我厂使用的美国挤压研磨公司生产的磨料流设备。该公司 Vector 系列挤压研磨机，适用于加工较大的模具和中大批量零件的去毛刺、抛光和倒圆。其磨粒缸直径有：100mm、150mm、200mm、250mm，机床压力：0.6 ~ 20.4MPa。Spectrum 系列挤压研磨机加工范围广泛，机床具有维修方便、独立的液压动力机，控制系统有简单继电器式和复杂数控式。具有自动预设零件加工程序的能力、夹具识别能力、自动加工和维护控制等功能，磨粒缸直径有：150 ~ 600mm 多种，机床压力：1.4 ~ 22.4MPa。microAFM 微孔磨粒流机床为加工小孔设备，尤其适合柴油机喷油嘴喷孔的流量调整，该设备可自动控制流量、并将流量散差控制在 1% 以内。

（收稿日期：20040723）

《机械工人》（热加工）2004 年第 9 期要目

纳米颗粒复合电刷镀技术的最新进展及应用现状
感应热处理工艺的最新进展
等离子浸没离子注入技术的应用与发展趋势
高效能超声速等离子弧喷涂技术研究
Ti 合金表面电火花强化工艺参数的优化
用于循环流态床锅炉耐磨防护的电弧喷涂层
纳米颗粒的化学复合镀
利用传统淬火设备制备高技术抗磨耐蚀涂层
——高速快速感应熔涂技术
机用木工麻花钻形变热处理工艺
操中杆组件真空钎焊热处理技术应用
内燃机活塞环的等离子渗氮
42CrMo 镶片齿轮滚刀体热处理工艺的试验研究
坚持技术进步　提高管理水平
锅筒管接头焊缝焊接氢致延迟裂纹的返修
液压推进弯管机导向杆的焊接制作方法
钢—铝复合管板换热器芯子的焊接
焊接工艺常见错误分析
实体造型技术在铸造中的应用
球墨铸铁的石墨漂浮及其防止
梅花孔炉箅子的研制
等温淬火球墨铸铁（ADI）在磨耗板上的应用
QT600—8 球墨铸铁生产实践
行走式砂轮机的设计
封头的铸造
酯硬化水玻璃砂的生产实践
树脂砂造型用移动式直浇道
汽车后桥从动齿轮锻造工艺研究
天然气锻造加热炉的设计及应用