

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.01.029

化学辅助软性磨粒流抛光技术

马宝丽^{1,2}, 计时鸣¹, 谭大鹏¹

(1. 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014;
2. 杭州师范大学 钱江学院, 浙江 杭州 310012)

摘 要:针对当前模具结构化表面抛光难度大的问题,提出了一种新型的光整加工技术——化学辅助软性磨粒流抛光。阐述了化学抛光、软性磨粒流抛光的工作原理以及相互协调作用机理,对化学抛光液中各组分的抛光作用进行分析,探讨了软性磨粒流中流体的速度、磨粒的粒径与体积含量3个主要工艺参数对材料去除率的影响规律,提出固液两相流场的数值模拟、环保型化学液的配置以及理论模型的建立是3个关键技术,最后对化学辅助软性磨粒流抛光应用前景进行展望。

关 键 词:软性磨粒流抛光;化学抛光;抛光机理;结构化表面

中图分类号: TG7

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2014)01-0115-04

Research of Softness Abrasive Flow Machining Assisted by Chemical Polishing

MA Baoli^{1,2}, JI Shiming¹, TAN Dapeng¹

(1. Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China;
2. Qianjiang College, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: As far as the problem that it was difficult to polish the structured surface of mould Soft Abrasive Flow Machining (SAFM) assisted by chemical polishing was put forward as the new finishing technique. The working principle of chemical polishing and SAFM accompanied with their coordination mechanism was explained firstly. Then the polishing effect of different components in chemical polishing solution was analyzed. The influence law how the main three process parameters, such as fluid velocity, particle size and volume ration, affected the material removal rate was discussed. In the following three kinds of key technology consisted of numerical simulation of solid-liquid two-phase flow, configuration of environmentally friendly chemical solution and the establishment of theoretical model was developed. At last, the prospect of SAFM assisted by chemical polishing was discussed.

Key words: Softness Abrasive Flow Machining (SAFM); chemical polishing; polishing mechanism; structural surface

随着模具工业的快速发展,人们对产品表面的质量要求越来越高,常要求塑料模具的表面达到镜面程度。塑料模具制造的工艺过程仅仅依靠普通铣削、电火花、线切割、电铸等方法,还远远达不到精密化程度。为消除刀具和电火花加工痕迹,光整加工(主要是抛光)成为必不可少的重要工艺^[1]。模具中往往存在着大量的沟、槽、孔等细小的结构化表面,由于其尺寸小或几何形状复杂难以使用工具进行接触式光整加工,目前国内大多数生产厂家仍以手工研磨抛光为主,不

仅效率低,且工人劳动强度大,质量不稳定,严重制约了我国模具加工向更高层次发展^[2-3]。针对这一现实情况,提出了化学辅助软性磨粒流抛光方法。

1 化学辅助软性磨粒流抛光技术

化学辅助软性磨粒流抛光分为化学抛光和软性磨粒流抛光2个工艺过程。

1.1 化学抛光原理与特点

化学抛光是金属表面通过选择性自溶解而使金属表面达到整平和光亮的加工方法。所谓选择性自溶

收稿日期:2013-05-31;修回日期:2013-08-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 50875242);国家自然科学基金面上项目(No. 50905163);浙江省自然科学基金重点项目(No. Z107517)

作者简介:马宝丽(1977),女,山东聊城人,讲师,博士,主要研究方向为精密超精密加工。E-mail: mabaoli_77@163.com

解,是指被抛光金属的金相组织的不均匀性而引起不均匀地溶解,凸起部位的溶解速度优于凹陷部位地溶解速度。

与机械抛光技术相比,可以加工带有盲孔、深槽等形状复杂的零件和细管、弯头及大型设备的内腔,具有不受零件形状及尺寸的限制,生产效率高,设备简单及操作方便等优点。

1.2 软性磨粒流抛光原理与特点

软性磨粒流抛光的原理是采用无黏性或弱黏性流体为载体,将具有刮削作用的磨粒悬浮在其中,在由工件、约束模块和夹具等组成的密闭流道内,形成湍流状态下具有一定体积含量的固液两相流,依靠固液两相流循环往复的流动实现对工件表面的光整精加工^[4-5]。

软性磨粒流加工作为一种新型的表面光整加工技术,与近代发展的磨粒流加工有所不同。磨料流加工是采用半固态的有机高分子材料为载体,将具有刮削作用的磨粒悬浮在其中形成黏弹性磨料,在压力作用下流动的磨粒流介质挤擦流过工件表面,从而实现工件表面的去毛刺、抛光、倒圆角等的光整加工^[6],因此在国内也称为挤压珩磨。相比磨粒流加工,软性磨粒流加工具有以下的特点:①载体的易流动性。弱黏性的流体具有很好的流动性,与被加工表面间可形成很好的仿形效果,因此更适合于深沟、窄槽、小孔等异型表面的加工。②磨粒运动的复杂性。湍流流型的无序或逆序结构,使得磨粒的运动更加复杂,从而减小被加工表面波纹度,表面纹理方向不明显,从而实现加工表面的镜面加工。③流场的可控性。在密闭的流道内,添加设计好的约束模块,从而实现有利于工件表面加工的流场形态。

图1为软性磨粒流加工原理示意图,图中被加工工件配合约束模块(根据需要设计约束模块外形或舍弃),形成密闭的流道,通过调节泵的出口阀门实现对出口压力的控制,调节流量控制阀实现对流量的控制,从而形成湍流流动结构。湍流流型呈现无序或拟序状态,使得受流体所支配的磨粒运动也呈现微观的无序或拟序状态,磨粒的微观运动特性有利于减小加工纹理,提高工件表面质量。该系统的流道内放置了磁环,可以有效地降低流道内铁屑,起到净化流体的作用避免铁屑刮伤工件表面。

1.3 化学抛光与软性磨粒流抛光协调作用

化学抛光工艺简单,操作方便,不受零件形状尺寸的限制,同时化学抛光可除去零件表面的机械损伤层和应力层;化学抛光后的零件表面因为发生了化学反

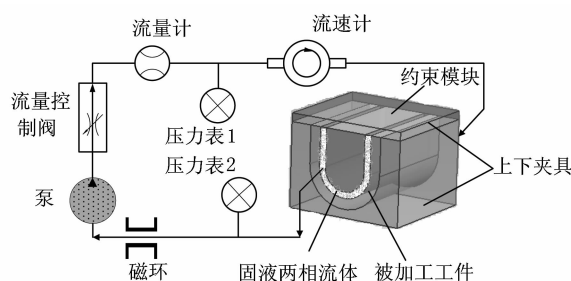


图1 软性磨粒流加工系统原理图

Figure 1 Mechanism of SAFM

应降低了表面原子的键合能力,提高了软性磨粒流抛光的效率。同时,软性磨粒流抛光也是化学抛光的一种补充,协助除去表面未溶解的金属氧化物,同时清洗残留的化学液。因此,化学辅助软性磨粒抛光的综合作用效果并不仅仅是化学抛光与软性磨粒流抛光的简单叠加。

2 影响化学辅助软性磨粒流抛光的主要因素分析

2.1 化学抛光液组成与成分分析

化学抛光液的成分以及比例对化学抛光效果的影响是不言而喻的。化学抛光液的配方种类繁多,要做到与被抛工件的材质完美匹配,从理论上难以做出预测,还需通过大量的实验对比,才能知道抛光效果的好坏。

尽管金属材料的化学抛光液的具体配方不同,但其组成部分往往都是包括氧化剂、腐蚀剂、组合添加剂和水。氧化剂是金属发生化学反应的最重要的组分。对于钢铁件而言,抛光用的氧化剂,常用的有硝酸(HNO_3)和过氧化氢(H_2O_2)。氧化剂的作用是使金属在化学反应中失去价电子,在金属表面形成易溶解的氧化物。腐蚀剂是化学抛光液的另一主要成分,腐蚀剂的作用是溶解氧化后的金属氧化物,如若金属氧化物不能被溶解,抛光便不能进行。添加剂有抑制腐蚀和增亮作用,尽管添加剂的用量不多,但所起的作用是不容忽视的。

2.2 软性磨粒流抛光的影响因素

在软性磨粒流抛光中固液两相流中载体的黏度,磨粒的粒径,磨粒的体积含量,流体的速度等工艺参数直接影响着加工质量与加工效率。

1) 磨粒体积含量影响

研究认为^[7-8],流体中的磨粒对材料的磨损(文中理解为切削)有促进和“抑制”作用。固体磨粒体积含量在一定范围内,磨粒体积含量的增加会增大冲击材料表面的碰撞几率,从而加剧材料的流失速率;同时,

固体磨粒含量过高时,又会降低对材料的冲蚀效率,在两种相反作用之间的转变点,称为“临界体积含量”。产生“临界体积含量”的原因是磨粒的存在使得流体的黏滞系数显著增加、阻力增加和流速降低,同时随着磨粒体积分含量的增大,虽然与材料的作用频次增加,但粒子与粒子间的交互碰撞几率也增大,使得“抑制”作用占主导,此时再增大磨粒体积分含量对材料的磨损率不是很明显。在流速和磨粒粒度一定的情况下,磨损失重率与磨粒体积分含量之间满足关系式^[9]:

$$I = k_c C_p^n \quad (1)$$

式中, I —为磨损失重率;

k_c —磨粒体积分含量系数;

C_p —磨粒体积分含量;

n —磨粒体积分含量指数,体积分含量指数与流速有密切联系。

依据以上理论,在选择磨粒体积分含量时不要超过临界体积分含量,当然不同材料临界体积分含量值不尽相同。

2) 磨粒粒径对加工效果的影响

近年来研究表明,磨粒粒径对材料的磨损的影响规律与其粒径范围有关。粒径对磨损的影响存在2个临界值 d_1 和 d_2 。临界值 d_1 大约在 $0.002 \sim 0.005 \text{ mm}$ 。当粒径小于 d_1 时,磨粒对材料的破坏作用很小,过小粒径的磨粒对材料表面引起的冲击可以忽略不计。这主要理解为其冲击动能太小,由于液体膜的黏滞阻挡效应,磨粒在到达材料表面时,大部分或全部动能被耗散掉了。另外,当磨粒尺寸增大到临界粒径 d_2 时,其值大概在 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$,材料的冲蚀磨损率将不再随粒径的增加而增大。这主要是因为随着粒径的增大,材料承受冲击的面积也增大,单位面积的冲击力变化不大,从而导致冲蚀磨损率并无大的变化。在固定的流速下,当磨粒粒径介于 d_1 和 d_2 之间时,磨损失重率与粒径之间满足关系式:

$$I = k_d d^n \quad (2)$$

式中, k_d —粒径影响系数;

d —磨粒粒径;

n —粒径作用指数,不同的介质条件和不同的试验材料得出的 n 值差异很大。

从以上理论得出,有利于提高加工效率的磨粒粒径的大概范围在 $0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ 。粒径越大,切削量也越大。在磨粒体积分含量一定的情况下,磨粒的粒径越小,磨粒的数量越大,有利于提高加工表面的质量。

3) 冲击速度的影响

理论上单个磨粒对材料的磨损量与速度成平方关

系,然而在实际的工况中,两相流中的磨粒数很多,当两相流流速增加时,磨粒速度增加的同时,因流速的增加还会使单位时间内,冲击材料表面的磨粒数增加,因此材料的磨损量与速度的系数要增大。研究发现,一般情况下材料的冲蚀磨损率与流速成指数关系^[10]:

$$I = k_v v^n \quad (3)$$

式中, k_v —速度影响系数;

v —磨粒速度;

n —速度作用指数,不同介质条件下得出的 n 值差异很大。

4) 载体的影响

有研究表明,在湍流流型作用前提下,载体的黏性对材料的去除影响不大。

3 化学辅助软性磨粒流技术加工机理

3.1 磨粒的机械抛光机理

软性磨粒流加工如同流体机械的磨损一样,磨粒的机械作用机理可以用切削理论和变形理论两种理论来解释,当冲角较小时,切削作用比例大,冲角较大时,变形作用的比例更大。以下两种理论可较好地解释磨粒的机械抛光作用。

1) 切削理论(动量角度分析)

Finnie^[11]提出了刚性粒子冲击塑性材料的微切削理论,即材料在冲击磨粒的水平方向的动量作用下产生微切削把材料除去。这是研究低冲角下解释材料去除较为成功的理论。在磨粒冲击材料表面造成冲蚀的过程中,冲角是个十分重要的参数。当冲角小于某一临界角时,材料冲蚀率或冲蚀体积随冲角的增加而明显增加;相反,材料冲蚀率或冲蚀体积随冲角的增加而逐渐减少。他认为固体磨粒就如同一把微切削刀具,它在冲击速度的作用下从材料表面上划过而把材料切除。

2) 变形理论(动能角度分析)

J. G. A. Bitter^[12]从能量平衡的角度出发,提出了冲蚀的变形理论。可总结为:

$$W_d = \frac{1}{2} M (V \sin \theta - K)^2 / \varepsilon \quad (4)$$

其中, W_d —变形磨损量; V —冲击速度; M —冲击磨粒的质量; θ —冲角; K —临界速度,即弹性极限内的最大碰撞速度; ε —变形磨损因子,即在变形磨损中造成单位体积材料流失的能量。

由变形磨损理论可知,只有法向速度大于临界速度时,才发生材料流失现象。同时存在的变形磨损是以冲击坑(刻痕)或犁沟的形式出现,在磨粒作用下形成冲击坑,并在冲击坑的边缘形成挤压唇和表面的加

工硬化,由于连续的磨粒冲击,挤压唇被碾平,磨粒的犁沟变形作用使之形成分层片状结构的堆积,进一步的磨粒冲击造成层状结构的边缘碎化,与此同时,表面因连续的变形作用,使之空穴聚集并扩展,并产生裂纹,引起材料的被除去。

3.2 化学抛光机理

化学抛光之所以能够改善零件的表面质量,主要是因为金属表面各部分的成分不均匀性,如显微组织铁素体、珠光体、马氏体等的分布,以及合金成分的分布,以及表面粗糙度不同有凸起有凹陷,从而引起金属表面的电位高低不同,正电位区发生还原反应,负电位区发生氧化反应。凸起部分的活性大,它优先被氧化剂氧化,生成了疏松的金属氧化物,金属氧化物又容易被腐蚀剂溶解,导致凸起部分优先氧化溶解,实现了削凸的过程,从而达到光亮的目的。

4 化学辅助软性磨粒流抛光实现的关键技术

尽管软性磨粒流加工技术近几年研究速度很快,需要解决的理论及技术问题还很多,主要有以下几点:

1) 软性磨粒流的固液两相流场数值模拟

正如前面所述,软性磨粒流加工的介质为固液两相流,而固液两相流是一种非常复杂的运动形式,不可能用解析法获得固液两相流场的全部信息,数值模拟几乎是获得两相流场的主要来源。而数值模拟的模型众多,选择合适的数学模型是数值计算成功的重要保证。固液两相流数值模型选择包括两方面,一是流体相模型选择,二是颗粒相模型选择。软性磨粒流的流场处于湍流状态,因此模型的选择要能计算出湍流脉动成分,同时在计算颗粒运动特性时要考虑流体脉动对颗粒影响,这样的计算结果才能符合真实工作环境下的软性磨粒流场。

2) 环保型化学液的配置

模具钢相比其他钢铁材料更耐腐蚀,适合模具钢的化学抛光液少有报道。大量研究表明^[13],适用于不锈钢的化学抛光液可分为王水型溶液、硫酸型溶液、磷酸型溶液、醋酸型溶液和过氧化氢型溶液5种类型,这几种类型的抛光液中大多含有硝酸,抛光时会产生大量的NO_x等有害气体,从而污染环境和危害人体健康。因此,配置出高效、无毒或者低毒的化学抛光液,是化学辅助软性磨粒流加工技术研究的重要内容。

3) 建立完善的理论模型

软性磨粒流加工的最后一个阶段是实现模具的镜面级加工的关键环节,其加工机理也最复杂,是磨粒的机械冲刷和化学腐蚀的交互作用的结果。为了使模具

的结构化表面达到镜面要求,磨粒的机械冲刷作用要稍大于化学腐蚀作用,实现这一目标的前提是建立化学腐蚀速率的理论模型,以及建立多种主要因素综合影响下的机械作用模型^[14]。

5 未来展望

通过前面的分析,化学辅助软性磨粒流抛光不需要借助于抛光工具,因此对于尺寸狭小、结构复杂的模具结构化表面或其它工件表面的精整加工具有很好的优势,实践证明具有可行性和发展前景。

该项技术的研究还有待进一步优化。影响加工效果的因素非常多,除了磨粒特性和流体特性,还有加工材料特性。磨粒特性包括磨粒体积含量、形状、尺寸、硬度等;流体特性包括流速、冲击角度等;加工材料特性包括模具材料的硬度和耐腐蚀性能以及型腔的形状等。这些因素不是孤立单独起作用的,它们之间相互影响,具有耦合作用。通过理论分析和试验验证,弄清这些因素的相互关系,使之进行最佳配合,从而达到满意的加工效果。

参考文献:

- [1] 包荣华. 精密型腔模具的抛光技术[J]. 模具制造, 2004(6): 44 - 47.
- [2] JI Shiming, XIAO Fengqing, TAN Dapeng. Analytical method for softness abrasive flow field based on discrete phase model[J]. Science China: Technological Sciences, 2010, 53(10): 2867 - 2877.
- [3] 计时鸣, 马宝丽, 谭大鹏. 结构化表面环境下软磨粒流的流场数值分析[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2092 - 2099.
- [4] 计时鸣, 章定. 软性磨粒流精密加工的仿真及实验[J]. 机电工程, 2012, 29(3): 245 - 248.
- [5] 计时鸣, 池永为. 软性磨粒流加工中约束模块的设计方法研究[J]. 轻工机械, 2012, 30(5): 9 - 12.
- [6] 张凌云, 吴凤林. 磨料流加工技术现状及展望[J]. 机械工程与自动化, 2006, 17(5): 166 - 168.
- [7] 骆素珍, 郑玉贵, 李劲, 等. 浆体含砂量和砂粒度对环氧粉末涂层冲蚀规律的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(2): 63 - 66.
- [8] 李平. 酸性液固两相流中不锈钢冲刷腐蚀行为的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [9] 李文君. 离心式渣浆泵磨损机理与有限元仿真分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2007.
- [10] 骆素珍, 郑玉贵, 李劲, 等. 环氧粉末涂层的抗冲蚀性能[J]. 材料研究学报, 2000, 14(5): 517 - 523.
- [11] FINNIE I. Erosion of Surfaces by Solid Particles[J]. Wear, 1960, 3(2): 87 - 103.
- [12] BITTER J P A. A study of erosion phenomena part I. Wear, 1963, 6(1): 5 - 21.
- [13] 丁建刚, 李宝龙, 石祖飞. 高碳钢制件化学去毛刺工艺[J]. 电镀与环保, 2006, 26(5): 31 - 32.
- [14] 管迎春, 唐国翌, 叶强. 高级镜面塑料模具表面抛光孔洞原因分析[J]. 机械工程材料, 2007, 31(5): 55 - 58.