DOI: 10.3901/JME.2014.15.187

V 形磁铁在 SUS304 管内表面抛光中的应用*

陈 燕 张耀明 邓 超 韩 冰

(辽宁科技大学机械工程和自动化学院 鞍山 114051)

摘要: 用传统的抛光方法很难对细长管内表面进行抛光; 利用磁场控制的磁粒刷就可以较容易实现复杂管件内表面的研磨抛光。这种抛光方法是把磁性磨料和油性研磨液的混合物裹附在 V 形磁铁的两极, 在外围磁铁的吸引下将磨料混合物压附在工件的内表面, 增大磨料对内壁的研磨力, 提高抛光效率。磁极端部开槽的 V 形磁铁在其开槽处较利于磨料的自发搅拌, 使磁性磨料不断更替的对工件内表面进行抛光。通过有限元分析验证 V 形磁铁端部开槽对研磨压力的影响; 从理论上阐述 V 形磁铁端部开槽后有利于实现磨料的更替, 并得到较好的表面质量; 最后通过对 SUS304 管内表面的抛光试验验证理论的正确性。

关键词: V 形磁铁; 磨料自发搅拌现象; 表面粗糙度; 精密抛光

中图分类号: TG356

Application of V-shaped Magnet in Polishing the Inner Surface of the SUS304 Tubing

CHEN Yan ZHANG Yaoming DENG Chao HAN Bing

(School of Mechanical Engineering and Automation,

University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051)

Abstract: It is difficult to polish the inner surface of the slender tube with traditional polishing method; using the magnetic brush controlled by magnetic fields can realize polishing the inner surface of complex tube easily. This polishing method is mixture of the magnetic abrasives and oily slurries wrapped to the magnetic pole of the V-shaped magnet, pressing the mixture onto the inner surface of the workpiece under the external magnet's attraction, increasing the polishing force, and improving the polishing efficiency. The magnetic abrasive attached to the V-shaped magnet slotted on the end is more spontaneous mixing, and constantly turning over to polish the workpiece surface. Through finite element analysis of the V-shaped magnet slotted on the end, verified the effect on the polishing force to workpiece surface, and theoretically explained the slotted magnet can easily realize the magnetic abrasive's replacement to get better surface quality. Finally, the theory's correctness is verified by the polishing experiment to SUS304 tube.

Key words: V-shaped magnet; abrasive spontaneously-mixing phenomenon; surface roughness; precision polishing

0 前言

航空发动机油路管道中流动着高压流体, 管内壁的细小裂纹在高压流体的疲劳破坏下, 逐渐扩大, 导致部分管件表层材料脱落, 甚至造成管件破裂, 严重影响航空发动机的工作稳定性和可靠性^[1-2]。由于航空发动机管路大多属于形状细长且弯曲, 很难用传统的研磨技术进行抛光, 而磁研磨法除了可以突破现有非导磁圆管内表面精密抛光的加工瓶颈, 更没有化学抛光所引起的污染物的排放、处理等问

题^[3-6]。试验所用的 SUS304 管(尺寸: $\phi 20 \text{ mm} \times \phi 16 \text{ mm}$, 材料: 0Cr18Ni9)具有弱导磁性, 可以屏蔽部分磁场, 削弱外围磁铁对管内磁性磨料的吸引力。若单纯地使用磁性磨料对该管内壁进行抛光, 不仅研磨压力小, 而且会有部分的磁性磨料黏附在管的内壁或者堆积在管的两端, 致使抛光效率较低^[7-9]。基于此种原因, 在管件内部增加辅助抛光工具 V 形磁铁。在外围磁铁的作用下, 辅助抛光工具 V 形磁铁两极的磁性磨料压附在 SUS304 管的内表面, 增大磁性磨料对管内表面的研磨压力^[10-12]。虽然研磨效率提高, 但抛光后管内表面的加工纹理较深, 抛光效果不理想。为了避免使用辅助抛光工具 V 形磁铁造成管内表面较深的加工纹理, 提出在 V 形磁铁端部开槽的方法较好地解决上述问题。

* 国家自然科学基金(51105187)和辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2011025)资助项目。20130805 收到初稿, 20140512 收到修改稿

1 工作原理

如图 1 所示,端部开槽的 V 形磁铁的 N、S 极分别与外围磁铁的 S、N 极形成闭合的磁回路,增大吸附在 V 形磁铁端部的磁性磨料对管件内表面的研磨压力。当管件以一定的速度旋转时,外围磁铁沿着管件轴线往返运动。在磁力、离心力和摩擦力的共同作用下,V 形磁铁端部的磁性磨料自发搅拌,磨料浆(磁性磨料与研磨液的混合物)存储在磁极端部的凹槽内,有利于实现磨料的更替,提高管件内表面的抛光质量和效率。

图 1 V 形磁铁抛光工件内表面工作原理图

图 2 表示 V 形磁铁端部开槽和未开槽的模型图。研究发现磁极表面所开凹槽为矩形槽,槽深与槽宽的比值为 1:1 时,磁力研磨加工效率最高^[13-15]。

图 2 V 形磁铁模型图

(a) 磁极端部开槽的磁感应强度云图 (T)

(b) 磁极端部开槽的管内表面磁感应强度曲线

(c) 磁极端部未开槽的磁感应强度云图 (T)

(d) 磁极端部未开槽的管内表面磁感应强度曲线

图 3 磁感应强度的有限元分析

2 磁场强度理论分析

为了解析实际参与磨削的磁性磨料的受力情况,通过对磁极端部开槽和未开槽两种 V 形磁铁模型进行有限元分析(图 3),并在靠近 V 形磁铁的管件内侧添加弧形的辅助曲线,得出该辅助线上磁感应强度 B 的变化情况如图 3b, 图 3d 所示。

从图 3 可以看出磁极端部开槽后,管内表面磁感应强度的峰值减小。由磁场理论得知,磁力束 B 垂直穿过两种物质的接触面,两者的磁导率分别为 μ_1 、 μ_2 ,作用在单位接触面上的研磨压力^[15]

$$p = \frac{B^2}{2} \left(\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2} \right) \quad (1)$$

式中 B ——磁感应强度;

μ_1 ——管的磁导率;

μ_2 ——磨料的磁导率。

由式(1)可知,当磁性磨料的粒径、配料恒定时,研磨压力与磁感应强度 B 的平方成正比。因此,磁场磁感应强度越大,磨料对管内壁的研磨压力就越大。由图 3 中管内表面磁感应强度 B 的变化曲线可知,磁极端部开槽后磨料对管壁的研磨压力得到适当减小;同时,磁场强度曲线由单峰变成双峰,增

大了磨料与管壁的接触面积。

3 试验过程及理论分析

如图 4 所示, 抛光过程中, 当加工间隙和磁性磨料的粒径一定时, 与未开槽的磁极端部相比开槽 V 形磁铁的磁极端部磨料浆与管壁有较大的接触面积。磨料浆是磨料与活性研磨液的混合物。活性研磨液在工件表面发生化学作用, 形成一层极薄的氧化膜, 这层氧化膜容易被摩擦掉而不损伤工件基体。氧化膜反复、快速的形成和去除, 从而加快研磨过程, 使工件表面粗糙度值逐渐降低。此外研磨液的存在也降低了管壁因温度过高而烧伤的风险。

图 4 辅助抛光工具 V 形磁铁抛光管内表面原理图

如图 4 所示, 在磁力、摩擦力和挤压力的共同作用下, 磁性磨料沿着 V 形磁铁端部旋转并不断更替地参与对管内表面的研磨抛光, 提高了磁性磨料的利用率及使用寿命。磁极端部开槽的 V 形磁铁, 其凹槽棱边处的磁力较大, 研磨压力也较大。在研磨压力的作用下, 磁性磨料沿着管件旋转的方向被挤进凹槽; 由于凹槽内的磁力小于凹槽棱边处的磁力, 磁性磨料又被吸到了凹槽棱边(磨料浆的运动方向如图 4a 所示), 进一步促进了磁性磨料在磁极端部的搅拌更替, 有利于得到较好的管件表面质量。使用磁极端部未开槽的 V 形磁铁, 管壁磁性磨料所受的磁感应强度的值较大, 因此, 磨粒对管壁的研磨压力较大。在抛光过程中, V 形磁铁和管件内壁之间的磨料大部分被挤掉。当 V 形磁铁达到动平衡

后, 只剩下很少的磁性磨料参与对管件内表面的抛光。由于磨料少, 磨料与管壁的接触面积小, 磨粒对管壁的压强增大, 切削力增大, 表面质量下降。

为了验证 V 形磁铁端部开槽与否对 SUS304 管件内表面抛光效果的影响, 在其他试验条件相同的情况下, 分别对未使用辅助抛光工具和使用磁极端部开槽及未开槽的 V 形磁铁作为辅助抛光工具三种情况进行试验分析研究。

抛光前先用薄膜压力传感器 FSR402 测得静态下磨料对管壁的研磨压力。测得压力值如下: 未使用辅助抛光工具时, 磨料对管壁的研磨压力为 0.15 Pa; 使用磁极端部开槽的 V 形磁铁时, 磨料对管壁的研磨压力为 3.2 Pa; 使用磁极端部未开槽的 V 形磁铁时, 磨料对管壁的研磨压力为 3.8 Pa。

抛光 12.5 min 后绘出这 3 组试验中管内表面粗糙度值、材料去除量随研磨时间的变化关系图, 如图 5 所示。

图 5 表面粗糙度和材料去除量与研磨时间之间的关系

1#. 未使用辅助抛光工具 2#. 使用磁极端部开槽的 V 形磁铁
3#. 使用磁极端部未开槽的 V 形磁铁

以 2# 为例, 将线切割剖开的 SUS304 管放入超声波清洗机清洗干净; 吹风机吹干后, 用电子分析天平称得管件初始质量为 112.480 g, 再用超景深显微镜记录管件的原始形貌, 然后用 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪测得内表面原始表面粗糙度 R_a 值为 $1.8367 \mu\text{m}$ 。接着把剖开的管件用黏结剂恢复原状, 将磁极端部吸附有磁性磨料(磁性磨料的平均粒径为 $250 \mu\text{m}$, 5 g)与研磨液(劳力恩 SR-9911 研磨液, 1 mL)混合物的 V 形磁铁放入 SUS304 管内。在管件转速为 600 r/min , 外围磁铁(尺寸: $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 牌号: N42)进给速度为 1 mm/s , 加工间隙为 1 mm 的条件下, 对 SUS304 管内表面进行磁力抛光 12.5 min 。

图 5 中对比 1#、2#、3# 试验结果可以看出, 未使用辅助抛光工具时, SUS304 管材料去除量比使用辅助抛光工具的小, 且表面粗糙度 R_a 值降到 $0.9 \mu\text{m}$ 后, 几乎不再随时间的增加而降低。抛光前后管内表面三维形貌见图 6。

图6 SUS304 管抛光前后的三维形貌($\times 500$)

使用辅助抛光工具后,在相同的时间内管件原始表面的沟槽均被去除;另外,使用磁极端部开槽的 V 形磁铁相比未开槽的 V 形磁铁的材料去除量少,却获得较低的表面粗糙度值,抛光后管内表面三维形貌见图 6c、图 6d 所示。相比图 6c,图 6d 抛光后管件表面形貌较为平整,加工纹理不明显。可见, V 形磁铁端部开槽后,促进了磁性磨料的更新,可以降低磨粒对工件表面的耕犁作用,提高工件的表面质量。

4 结论

(1) 用传统抛光方法很难对细长管内壁进行抛光,而使用磁研磨抛光的方法可以有效解决这个加工难题。

(2) 对于弱导磁性材料制成的厚壁管件(如 SUS304 管),单纯使用磁性磨料对其内表面进行磁研磨抛光,研磨效率低。使用辅助抛光工具 V 形磁铁增大了磨料对管件内表面的研磨压力,可提高抛光效率。

(3) 使用磁极端部开槽的 V 形磁铁较未开槽的 V 形磁铁抛光管内表面,加工纹理较浅,表面质量较好,并通过试验得到验证。

(4) 对于复杂弯曲管件内表面抛光, V 形磁铁在管内运动较困难时,可使用球形磁铁辅助抛光工具来提高抛光效率。

参 考 文 献

- [1] 王艳,胡德金. 不锈钢物流管道内表面磁力研磨的回转磁场设计[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 102-106.
WANG Yan, HU Dejin. Design of rotating magnetic field about internal finishing of stainless steel tube[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 102-106.
- [2] CHEN Yan, YAN Feng, ZHU Changqi. Study on the polishing characteristics of the slender pipe[J]. Key Engineering Materials, 2008, 373-374: 824-827.
- [3] 郭佳龙. 磁气研磨抛光之研究[D]. 中国台湾: 云林科技大学, 2001.
GUO Jialong. Study of magnetic abrasive polishing[D]. Taiwan, China: Yunlin University of Science & Technology, 2001.
- [4] 陈燕,巨东英. 应用磁研磨法对细长管内表面的抛光处理[J]. 模具制造, 2004(10): 48-50.
CHEN Yan, JU Dongying. Application of magnetic abrasive finishing method for polishing the surface of the slender tube[J]. Mold Manufacturing, 2004(10): 48-50.
- [5] YAMAGUCHI H, SHINMURA T. Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process[J]. Precision Engineering, 2004, 28(2): 135-142.
- [6] ZOU Y, SHINMURA T. Study on magnetic field assisted machining process using magnetic machining jig-Application to internal finishing of thick stainless steel tubing[J]. Japan Society for Abrasive Technology, 2004,

- 48(8): 444.
- [7] SHINMURA T, SHINBO Y, IZUKA T. A new internal finishing process of non-ferromagnetic tubing by applying a rotating magnetic field[J]. Japan Society for Precision Engineering, 1993, 59(6): 945-951.
- [8] KANG J, YAMAGUCHI H. Internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing using a multiple pole- tip system[J]. Precision Engineering, 2012, 36(3): 510-516.
- [9] IK-TAE I, SANG D, SEONG M. Micro machining of an STS 304 bar by magnetic abrasive finishing[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(7): 1982-1988.
- [10] TAEWAN K, KANG D, JAESEOB K. Application of magnetic abrasive polishing to composite materials[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2010, 24(5): 1029-1034.
- [11] ZOU Y, AKUTSU S, SHINMURA T. Development of a new ultra-precision magnetic abrasive finishing process[J]. Japan Society for Abrasive Technology, 2010, 54(2): 97-100.
- [12] 尹绍辉. 磁场辅助超精密光整加工技术[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2009.
- YIN Shaohui. Magnetic field assisted super precision polishing technology [M]. Changsha: Hunan University Press, 2009.
- [13] 肖作义, 赵玉刚, 吴文权. 磁极形状对磁粒光整加工的影响[J]. 机械制造, 2005, 41(468): 8-9.
- XIAO Zuoyi, ZHAO Yugang, WU Wenquan. Study of the different shaped magnetic poles for the magnetic abrasive finishing[J]. Machinery Manufacturing, 2005, 41(468): 8-9.
- [14] 尹韶辉, 陈越, 王宇, 等. 磁流变抛光头形状对加工表面粗糙度的影响[J]. 湖南大学学报, 2010, 37(1): 45-48.
- YIN Shaohui, CHEN Yue, WANG Yu, et al. Influence of the shape of polishing tools on the surface roughness in magnet-rheological finishing[J]. Journal of Hunan University, 2010, 37(1): 45-48.
- [15] 肖作义, 赵玉刚, 吴文权. 磁极形状对磁粒研磨工艺的影响的数值分析[J]. 现代制造工程, 2003(10): 10-12.
- XIAO Zuoyi, ZHAO Yugang, WU Wenquan. The numerical analyzing for the effect of magnetic pole shape to the process of magnetic abrasive finishing[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2003(10): 10-12.
-
- 作者简介: 陈燕(通信作者), 女, 1963 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为精密加工、特种加工技术。
E-mail: laochen412@gmail.com
- 张耀明, 男, 1986 年出生, 助理工程师。主要研究方向为先进磨削技术。
E-mail: yaomingzhang@163.com