

文章编号: 1001-3806(2002)05-0379-03

## 发动机气缸孔表面的激光珩磨技术研究<sup>\*</sup>

符永宏 叶云霞 张永康 蔡 兰  
(江苏大学,镇江,212013)

**摘要:** 对气缸孔表面进行激光珩磨,形成与其表面润滑减磨性能优化匹配的、连续均匀的,并具有一定密度、深度、角度、形状的油路和凹腔。不仅可以显著提高气缸孔耐磨性,延长其寿命,而且还大幅度降低内燃机的颗粒排放量、机油耗、燃油耗、催化器污染和活塞环组成本。

**关键词:** 气缸孔;激光珩磨;润滑;磨损

**中图分类号:** TH16 **文献标识码:** A

### Study on the technology of laser honing applied in machining the cylinder bore of engine

*Fu Yonghong, Ye Yunxia, Zhang Yongkang, Cai Lan*  
(Jiangsu University, Zhengjiang, 212013)

**Abstract:** The surface of cylinder bore is treated by the laser honing to form linearly extending lubricant channels and grooves with the predetermined width, depth, angle, shape and gap, which can be well matched to the needs of lubrication. It results in not only remarkably improved property of wear-resistance of cylinder and its life span, but also largely decreased HC ejection from the internal combustion engine, the consumption of fuel oil and lubricant, the pollution of catalytic apparatus and the cost of piston.

**Key words:** cylinder bore; laser honing; lubrication; abrasion

## 引 言

气缸孔和活塞环是内燃机中最关键的摩擦副之一,它直接影响内燃机的使用寿命和性能。一般来讲,气缸孔表面的抗磨性能与以下 4 个因素有关,即气缸孔表面粗糙度、气缸孔与活塞环的配伍性、气缸孔表面材料硬度以及表面的润滑状况。现行的气缸孔表面最后加工工序为:精镗-粗珩-精珩。在一些要求高的情况下,最终还要加上平台珩磨工序。经过这些工序之后,气缸孔表面粗糙度可达到 Ra0.8 以上,尺寸精度可达 5 级或 6 级以上,基本能满足其表面粗糙度的要求和气缸孔/活塞环的配合精度要求。从热处理方面看,由于激光淬火硬化技术和其它传统热处理技术的应用,气缸孔表面硬度也得到保证<sup>[1]</sup>。如何改善其表面润滑以达到减磨目的呢?虽然传统的机械珩磨加工方法,在工件表面留下的

珩磨痕迹具有一定的贮存和输送润滑油,进而起到一定的改善润滑性能的作用。但是由于珩磨痕迹紊乱无序,因而作用十分有限。到 90 年代后期,德国格林(Gehring)公司率先将激光珩磨技术应用到气缸孔表面处理,以改善其表面磨损润滑状态。虽然这一技术目前尚处于研究试验阶段,但由于其独特的优点和润滑机理,必将展现广阔的应用前景。

## 1 激光珩磨技术

很久以来,人们在摩擦学方面一直向往在整个气缸工作表面的长度上,能按照内燃机性能需要和润滑要求,有目的地优化气缸孔表面的微观结构形貌。为此目的,人们尝试过许多方法。例如,采用高能量密度的介质束-流体束在工件表面进行微观造型<sup>[2]</sup>,经反复试验证明,激光因其优良的聚焦性能、易于自动控制、无污染、低能耗以及独特的与材料作用机理,被认为是一种特别适用的有效手段。

所谓激光珩磨技术,就是利用具有一定能量密度的激光束,在工件工作表面上,形成与润滑性能要求优化匹配的、连续均匀的、并具有一定密度、宽度、深度、角度、形状的贮存和输送润滑油的油路和凹

<sup>\*</sup> 江苏省科技攻关资助项目。

作者简介:符永宏,男,1965 年出生。副教授,在职博士研究生。主要从事激光应用技术的研究工作。

收稿日期:2001-08-24;收到修改稿日期:2001-12-10

腔。其加工示意图如图1所示。图中,试验过程中,工件绕轴向作旋转运动,激光输出头沿轴向作往复运动。通过分别调节各自线速度  $v$  和角速度  $\omega$ , 可以合成各种类型的激光扫描轨迹。

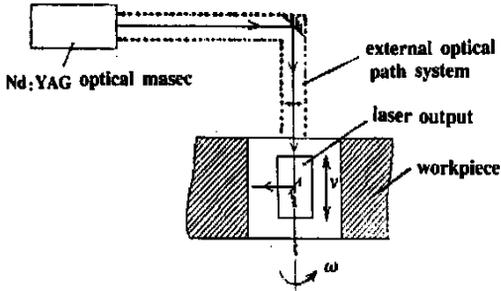


Fig. 1 Sketch of laser honing processing

激光珩磨与机械珩磨既有区别,又相互关联。机械珩磨是以提高表面光洁度和形成工件最终加工尺寸为目的的,而激光珩磨用以形成与性能相匹配的表面微观结构形貌,它们都在工件表面留下珩磨痕迹。激光珩磨是在机械珩磨基础上进行,工件表面有较高的光洁度从而保证工件表面微观结构主要由激光珩磨决定。

### 2 试验

采用 YAG 激光器,并配有 SIMENS840D 数控系统和旋转工作台的激光造型机床,对 G427 型发动机硼铸铁缸套内壁进行激光珩磨处理。根据缸套表面工作

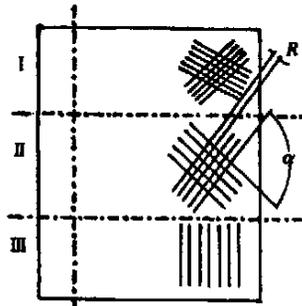


Fig. 2 Sketch of the distribution of the oil sumps on the surface of the inner cylinder wall along its working length

长度上的润滑磨损状况,将缸套内壁分为3个不同的区域。根据摩擦学理论,在这3个不同的区域上,相应的激光珩磨造型也有区别,其情况如图2所示。

由图2可以看出,在 I 区域上,油槽为交叉网格状的,在 II 区域,油槽为相互平行的。为了更清楚地说明油槽的形状、结构及相关参数,用工件表面俯视放大图表示<sup>[3]</sup>,如图3所示,其中1为油路,2为分布于油路上的凹腔,3为机械珩磨痕迹,  $a, b$ , 为油路间距离和夹角。激光珩磨的有关技术参数有:(1)油路之间的夹角  $\alpha$ , 区域上  $\alpha_1$  小于 区域上  $\alpha_2$ ; (2)油路宽度、深度; (3)油路之间的间隔  $a, b$ ; (4)沿油路每间隔一定距离  $d$ , 设置一凹腔; (5)凹腔具有一定的直径  $\phi$  及深度。

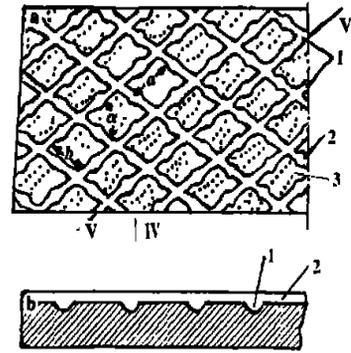


Fig. 3 Magnified sketch of the inner surface of the cylinder liner after treated by laser honing  
a - magnified sketch of the inner wall of the cylinder  
b - view along

### 3 试验结果及分析

将激光珩磨处理过的缸套与大批量生产的未处理缸套装机进行台架对比试验,以观察它们的耐磨性、机油耗及颗粒排放情况。试验结果如图4、图5所示。

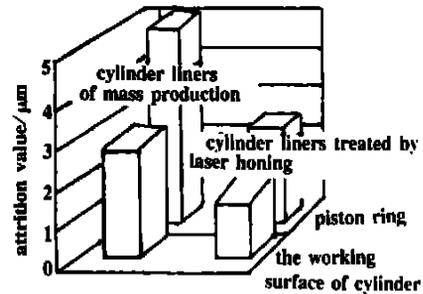


Fig. 4 Results of abrasion test (running time 330h)

从图4磨损试验得知,经激光珩磨处理过的缸套及与之配合的活塞环,其磨损量得到大幅度降低,活塞环的磨损量从  $5\mu\text{m}$  降低到  $2.5\mu\text{m}$ ,缸套的磨损量从  $3\mu\text{m}$  降低到  $1.5\mu\text{m}$ 。在长时间运行的情况下,机油耗从  $40\text{g/h}$  降低到大约  $15\text{g/h}$ ,如图5所示。此外,还测得机油的颗粒排放量降低了  $25\% \sim 30\%$ <sup>[4]</sup>。

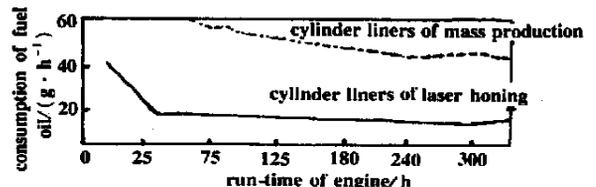


Fig. 5 Test results of the consumption of the fuel oil

激光珩磨之所以显著改善润滑状况,大幅度提高其耐磨性,降低机油耗,提高内燃机的使用性能。定性分析,考虑表面粗糙度影响的二维平均

Reynolds 方程为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( x h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( y h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6 \mu \left[ \frac{\partial \bar{h}_1}{\partial y} + \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} \right] + 12 \mu \frac{\partial \bar{h}_1}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $x, y$  为压力流量因子,  $s$  为剪切流量因子,  $\bar{h}_1$  为表面粗糙度综合均方根值 (m),  $\mu$  为润滑油粘度 (Pa·s),  $p$  为流体压力 (Pa),  $u$  为活塞往复运动速度 (m/s),  $\bar{h}_1$  为实际油膜厚度的数学期望值 (m),  $h$  为名义油膜厚度 (m),  $t$  为时间 (s)。

该理论模型能较好地反映气缸孔/活塞环摩擦副的润滑实际状况,据此进行分析可知,表面粗糙度综合均方根值是一个关键性因素。孔凌嘉等人的实验研究也表明,在上止点  $P$  附近的最小油膜厚度  $h$  随  $\bar{h}_1$  值的增加而有所增加,见图 7。考虑表面微观形貌对形成有一定厚度润滑油膜影响时,应包含激光珩磨所刻划的油槽。由于激光珩磨油槽的深度远远大于机械珩磨所形成的表面微观谷深(相差一个数量级),而且不出现微观凸峰(见图 6),避免了其对油膜的破坏作用。因此,激光珩磨能显著地促进具有一定厚度的稳定的润滑油膜的形成,改善润滑状态,减少了磨损。



Fig. 6 Micro-contour of the workpiece surface after treated by laser honing

定性分析激光珩磨的减磨机理,就在于:(1)利用激光束可控性的特点,在气缸工作表面整个工作长度上,根据磨损状况和润滑性能要求,进行表面微观造型,从而保证在整个工作长度上润滑磨损均衡;(2)在气缸整个工作表面上形成与润滑性能要求优化匹配的、连续均匀的、并具有一定密度、宽度、深度、角度、形状的贮存和输送润滑油的沟槽、凹腔,这些油路通过交叉点相互连通,且都均匀地分布于工件表面,对工件表面能提供迅速有效的润滑,从而保证具有一定最小厚度油膜的形成和保持,大大减少了贫油现象和粘着磨损;(3)由于激光与材料独特的

作用机理,使得要去除的金属被汽化掉,形成的油路光滑清洁,从而保证油路畅通无阻,同时,在油路周围和表面,还因淬火效应而硬度提高;(4)在油路上设置的一系列凹腔,具有蓄油池和聚集微小颗粒双重作用,它一方面为周围附近区域提供润滑油,另一方面又能大大降低磨粒磨损;(5)激光珩磨属非接触式加工,不象机械珩磨会发生挤压、耕犁现象,从而在金属表面不产生所谓的“金属疤皮”;(6)虽然激光珩磨在工件表面留下了纵横交错的网格状油路,但就宏观效果而言,并不影响活塞环的支承面积<sup>[6]</sup>。

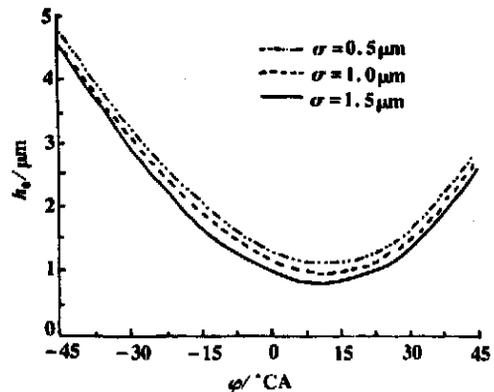


Fig. 7 Effect of the surface roughness on the minimal thickness of the oil film

## 4 结 论

激光珩磨技术特别适用于内燃机气缸孔表面的加工处理,可以显著地改善气缸工作时的润滑状况,提高其耐磨性。

通过内燃机耐磨试验表明,激光珩磨技术能大幅度提高内燃机的使用性能,具有一系列的优点:延长使用寿命、降低机油耗、减少催化剂污染和颗粒排放、减少燃油耗以及活塞环组的成本。

## 参 考 文 献

- [1] 覃瑞民. 广西机械, 1998(4): 25 ~ 28.
- [2] Klink U, Gerhard S. Method and tool for machining the surface of workpiece surface. US4980996, 1991-01-01.
- [3] Hans G, Walter L, Karl-heinz B. Methods of finishing a surface of a workpiece. US5441439, 1995-08-15.
- [4] Klink U. 国外内燃机. 1998(2): 50 ~ 52.
- [5] 孔凌嘉, 谢友柏. 内燃机学报, 1992(3): 42 ~ 46.