

# 6016 铝合金的电磁驱动机械锤击平整加工

林晓辉, 杨帆, 陈博伦, 刘建春, M. Saleh

(厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024)

**摘要:** **目的** 探究机械锤击平整加工对提高铝合金表面完整性和硬度的作用效果, 研究锤击参数对平整表面质量的影响规律。**方法** 采用电磁驱动机械锤击技术对 6016 铝合金进行平整加工, 研究基于光栅路径的电磁驱动机械锤击加工机理, 并提出主要锤击参数, 进而分析主要锤击参数对平整表面质量的影响规律。利用泰勒霍普生轮廓仪、光学显微镜和维氏硬度计分别获得机械锤击后铝合金的表面粗糙度、表面形貌以及硬度。**结果** 电磁驱动机械锤击后, 铝合金表面粗糙度达到  $0.05\ \mu\text{m}$ , 获得了类似镜面的锤击表面。相对于铣削后的表面, 机械锤击可消除铣削痕迹, 没有明显的表面缺陷和划痕, 具有良好的表面平顺能力, 同时硬度可提升大约 25%~32%。小节距和进给速度、高锤击频率有助于减小表面粗糙度和提高硬度。此外, 节距是最重要的锤击参数, 极大地影响表面粗糙度和加工效率。**结论** 电磁驱动机械锤击对 6016 铝合金具有很好的表面强化和平整能力, 可大幅减小表面粗糙度, 并适当提高表面硬度, 是一种新颖、有效、绿色的平整方式。

**关键词:** 6016 铝合金; 机械锤击; 锤击参数; 表面粗糙度; 表面形貌; 硬度

**中图分类号:** TG167 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)03-0334-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.042

## 6016 Aluminum Alloy Planarization Process by Electromagnetic Machine Hammer Peening

LIN Xiao-hui, YANG Fan, CHEN Bo-lun, LIU Jian-chun, M. Saleh

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the effects of machine hammer peening on improving surface integrity and hardness of aluminum alloy and research on influences of peening parameters on the peening surface quality. The electromagnetic machine hammer peening technology was adopted for 6016 aluminum alloy planarization process. The mechanism of electromagnetic machine hammer peening based on grate path planning was studied and main peening parameters were proposed. Furthermore, the influences of main peening parameters on peening surface quality were analyzed. Taylor Hobson PGI Dimension Profiler, optical microscope and vickers hardness tester were used to obtain surface roughness, topography and hardness of aluminum alloy after machine hammer peening. Results showed that the surface roughness of aluminum alloy could

收稿日期: 2019-05-13; 修订日期: 2019-07-18

Received: 2019-05-13; Revised: 2019-07-18

基金项目: 福建省自然科学基金 (2018J05095); 福建省中青年教师教育科研项目 (JAT170429); 厦门理工学院科研攀登计划 (XPDKQ18002)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Fujian (2018J05095); Education Research Project of Fujian (JAT170429) and Climbing Project of Xiamen University of Technology (XPDKQ18002)

作者简介: 林晓辉 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为超精密加工与检测。邮箱: xhxmut@163.com

Biography: LIN Xiao-hui (1985—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: precision machining and measurement. E-mail: xhxmut@163.com

引文格式: 林晓辉, 杨帆, 陈博伦, 等. 6016 铝合金的电磁驱动机械锤击平整加工[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 334-339.

LIN Xiao-hui, YANG Fan, CHEN Bo-lun, et al. 6016 aluminum alloy planarization process by electromagnetic machine hammer peening[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 334-339.

be reduced to  $0.05\text{ }\mu\text{m}$  after electromagnetic machine hammer peening and smoothening effect up to mirror-like surface can be attained. Compared to the milled surface, the machine hammer peening could eliminate the milling tracks and there were barely any surface cracks and scratches, showing a good surface smoothing ability. Meanwhile, the hardness could be improved by about 25% to 32%. Small line pitch and feed rate, and high peening frequency were of benefit to decreasing surface roughness and improving hardness. In addition, the line pitch was the most important peening parameter due to its great effect on surface roughness and machine efficiency. Above all, the electromagnetic machine hammer peening is good to 6016 aluminum alloy surface strengthening and planarization that can decrease surface roughness sharply and improve surface hardness. It is a novel, effective and green planarization process technology.

**KEY WORDS:** 6016 aluminum alloy; machine hammer peening; peening parameters; surface roughness; surface topography; hardness

铝合金密度只有钢的 1/3 左右,被认为是轻量化的重要材料,特别在汽车和航空工业制造中尤为明显。此外,由于铝合金拥有从紫外线到红外线的极宽频谱反射率,被视为下一代大型反射镜的重要材料<sup>[1]</sup>。相对钢来说,普通铝合金的硬度偏软,提高铝合金硬度和抗疲劳性最常见的方式是喷丸和阳极氧化。然而喷丸和阳极氧化后,表面粗糙度会升高,且无法控制零件的面形精度,不适合高精度铝合金零件<sup>[2-5]</sup>。另一方面,磨抛加工虽能控制表面的面形精度,但却无法继续提高表面的力学性能。另外,铝合金由于其材料特性,极易使磨屑粘贴磨具,导致砂轮磨刃钝化,故磨削不易,且加工效率低下<sup>[6-7]</sup>。机械锤击是一种机械式的表面平整方法,最初由德国 KWL 公司提出,用于提高平整效率和表面完整性<sup>[8]</sup>。机械锤击原理是利用球形碳化钨工具头进行一定频率的往复运动,通过不去除材料的方法降低表面粗糙度和提高表面硬度,甚至可以形成压应力层以提高耐磨性。F. Bleicher<sup>[9-10]</sup>研究了机械锤击的加工机理,展示了机械锤击具有良好的表面平整能力。J. Berglund<sup>[11]</sup>研究大尺寸球墨铸铁的机械锤击,认为机械锤击完全可以替代人工平整。C. Lechner<sup>[12]</sup>分析了锤击参数对表面纹理的影响,并优化了锤击参数,用于 45#钢的锤击加工。V. Schulze<sup>[13]</sup>、T. Chen<sup>[14]</sup>和 D. Trauth<sup>[15]</sup>分析了机械锤击后压模的残余应力和润滑性能,同时发现机械锤击后其耐磨性和抗疲劳强度得到一定的提升。R. R. MANEL<sup>[16]</sup>通过机械锤击技术将碳化钨颗粒附着于零件表面,使零件镀上一层碳化钨涂层,大大提高了耐磨性。不同于喷丸路径的随机性,机械锤头可安装于任何机床或者机器人手臂上,实现确定的锤击路径,因此可用于自由曲面的零件平整。S. Krall<sup>[17]</sup>利用 6 轴工业机器人实现了钢的机械锤击,并评价了机器人机械锤击路径的确定性和稳定性。为了实现机械锤击的自动化加工, KUKA 与 Sematek GmbH 两家公司合作开发了机器人锤击系统,将锤击后的表面粗糙度控制在  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  左右。综上所述,机械锤击是一项新兴的平整技术,国外在这方面展开了一定的研究,国内则相对较少。从现有的文献记录来看,机械锤击在提

高表面完整性和力学性能方面表现良好。不过,目前大多数机械锤击的应用对象材料基本上为钢,少有涉及铝合金,有必要开展铝合金的机械锤击平整研究。

本文采用电磁驱动机械锤击技术,研究了机械锤击对 6016 铝合金表面完整性和硬度的影响。设计了由音圈电机和碳化钨锤头组成的机械锤击装置,将其安装于数控铣床上进行锤击实验,揭示机械锤击的表面纹理形成机理,并进行了仿真。获取机械锤击后 6016 铝合金的表面粗糙度、表面形貌以及硬度,讨论主要锤击参数的选取对表面纹理形成的影响,并分析锤击参数对实验结果的影响规律。

## 1 机械锤击机理

机械锤击是一种类似喷丸但可控制路径的表面处理方法,是在不去除材料的前提下对表面进行平整,提高其力学性能。主要的锤击参数包括锤击频率、锤头尺寸、进给速度以及节距。工件的表面纹理形貌由这些参数组合经锤击形成,如图 1 所示。在碳化钨锤头尺寸固定的情况下,误差的峰谷值(Peak and Valley, PV)由节距和相邻锤击距离决定。相邻锤击距离可以表示为:

$$s' = v_s / f \quad (1)$$

根据机械锤击原理,误差 PV 是表面粗糙度的主要成分,因此可近似地利用 PV 值来代替表面粗糙度值,从理论上探讨锤击参数对表面粗糙度的影响。根据图 1 所示的几何关系,可得到 PV 值大小为:

$$\text{PV} = D/2 - \sqrt{D^2 - s^2}/2 \quad (2)$$

式中的  $s$  可为节距,也可为相邻锤击距离  $s'$ 。

如图 1 所示,锤击路径采用直线光栅式,机床进给方向为  $X$  轴,节距方向为  $Y$  轴。根据式(2)可知,节距和相邻锤击距离对表面形貌影响最大,两者不同形式的组合形成不同的表面形貌,主要表现锤击残留痕迹,可为三种类型,如图 2 所示。当  $X$  轴相邻锤击距离远小于节距时,误差在垂直于锤击方向上较大,形成的锤击残留痕迹与  $X$  轴方向平行。当  $X$  轴相邻锤击距离远大于节距时,则锤击残留痕迹与  $Y$  轴方向

平行。当相邻锤击距离与节距大小相当,则锤击残留痕迹在  $X$ 、 $Y$  两个方向都存在,形成栅格状分布。锤击频率和进给速度对表面形貌的影响在  $X$  轴方向上,而节距则体现在  $Y$  轴方向上。同时根据式(2)可得出结论:增加节距和进给速度或降低锤击频率会导致 PV 值增大,相应的粗糙度增加。

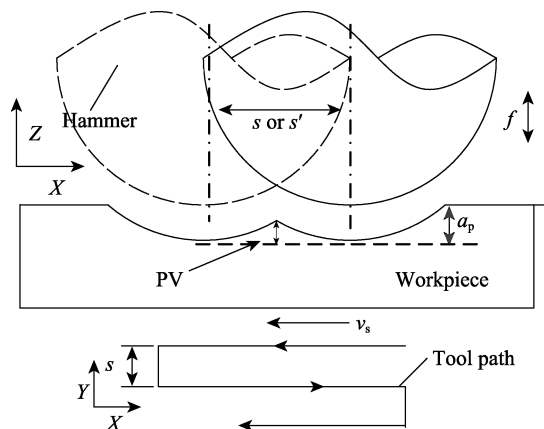


图1 机械锤击原理

Fig.1 Mechanism of machine hammer peening

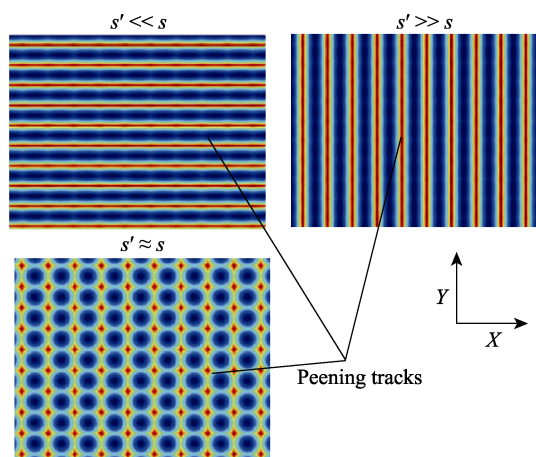


图2 机械锤击表面纹理仿真

Fig.2 Surface texture simulation of machine hammer peening

## 2 试验

机械锤击的样品来自铣削后的 6016 铝合金,尺寸为  $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 。在机械锤击前,对样品的表面粗糙度、硬度以及表面形貌分别测量和观测,以便后期进行对比。

电磁驱动机械锤击的驱动源来自音圈电机系统,音圈电机系统包括音圈电机主体、驱动器以及控制软件。音圈电机由北京星微自动化科技有限公司设计,型号为 XVLC180-005-00N,行程为  $5\text{ mm}$ ,峰值推力为  $180\text{ N}$ ,电机常数为  $15.1\text{ N/W1/2}$ 。锤头材料采用碳化钨,锤头与音圈电机及其附属连接件组成锤击装置,安装于数控铣床主轴上,如图 3 所示。节距和进

给速度由数控铣床通过 NC 编程设定,而锤击频率和深度由音圈电机系统控制。机械锤击轨迹为典型的直线光栅式,同样由数控铣床设定。采用单因素实验,以得出各个单因素锤击参数对实验结果的影响。实验中碳化钨锤头直径采用  $10\text{ mm}$ ,进给深度为  $1.5\text{ mm}$ ,其余的锤击参数见表 1。

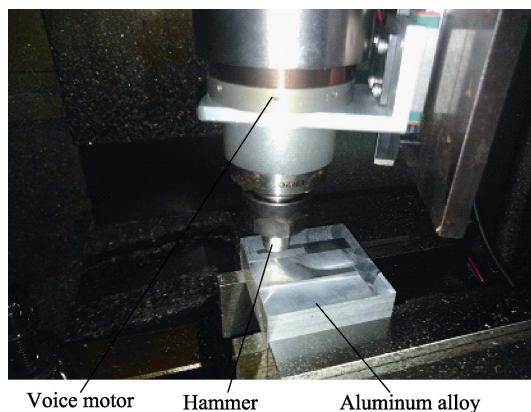


图3 机械锤击试验装置

Fig.3 Experimental device of machine hammer peening

表 1 锤击参数

Tab.1 Peening parameters

Parameters	Values
Line pitch $s/\text{mm}$	0.1, 0.2, 0.3
Feed rate $v_s/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	1.25, 1.66, 2.08
Peening frequency $f/\text{Hz}$	15, 20, 25

锤击后 6016 铝合金样品表面粗糙度通过泰勒霍普生轮廓仪 Dimension 3 测量,探针半径为  $2\text{ }\mu\text{m}$ ,扫描速度为  $0.25\text{ mm/s}$ ,取样间距为  $2\text{ }\mu\text{m}$ ,分辨率为  $0.2\text{ nm}$ 。为尽量避免接触材料的亲和性,不采用红宝石探针,而采用金刚石探针。分别在  $X$  轴和  $Y$  轴两个方向测量数据,取较大数值作为表面粗糙度值。表面粗糙度测量结果用软件 Ultra 5.24 进行分析,并以轮廓算术平均差  $Ra$  表征,最终的表面粗糙度值为 4 次测量结果的平均值。利用基恩士超景深光学显微镜 VHX-2000C 观测表面形貌,观察对象主要包括加工残留轨迹、表面划痕缺陷等。采用 HV-10B 硬度计测量硬度,压头力为  $5\text{ N}$ ,并持续  $15\text{ s}$ ,通过测量压痕对角线尺寸,并进行相关计算获得硬度值,最终的硬度值为 4 次测量结果的平均值。

## 3 结果及分析

机械锤击后的 6016 铝合金如图 4 所示。该样品上有 3 个锤击的矩形区域,可以明显区分锤击区域与铣削区域。铣削区域铣削痕迹明显,表面较为粗糙,不能成像。通过对比,可见锤击区域表面较为平整,部分区域已看不出锤击痕迹,呈现出类似镜面的效果。

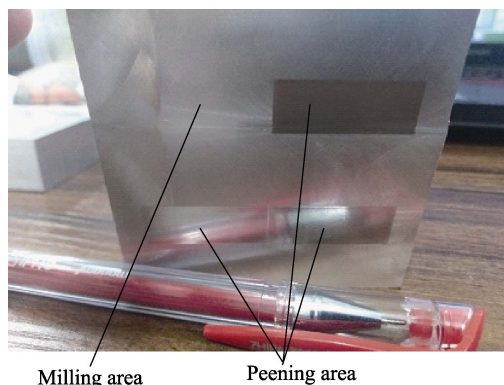


图 4 机械锤击后的 6016 铝合金样品

Fig.4 6016 aluminum alloy sample after machine hammer peening

### 3.1 表面粗糙度

经过铣削后, 6016 铝合金样品的表面粗糙度值  $Ra$  大约在  $0.6 \mu\text{m}$  左右。相对铣削的表面粗糙度, 机械锤击后, 铝合金的表面粗糙度  $Ra$  大幅降低 (如图 5 所示), 可达到约  $0.05 \mu\text{m}$ 。这个粗糙度值是常规磨削难以达到的, 达到了粗抛光的效果。从图 5 中也可看出, 表面粗糙度值随着节距和进给速度的增加而增加, 随着锤击频率增加而减小。表面粗糙度对节距

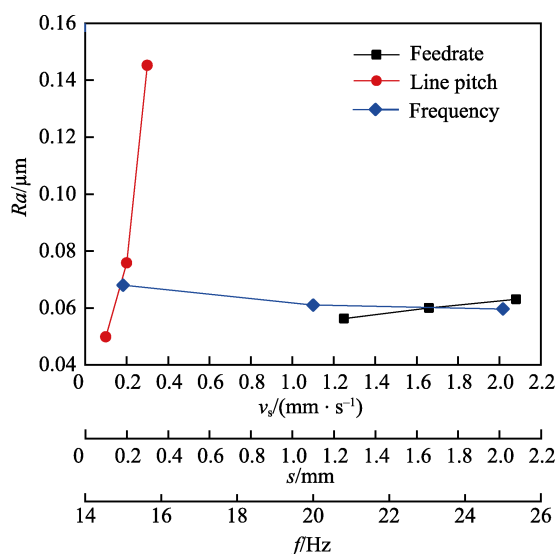


图 5 机械锤击后的表面粗糙度

Fig.5 Surface roughness after machine hammer peening

十分敏感, 节距的小幅增大会极大提高表面粗糙度。当节距从  $0.1 \text{ mm}$  增加到  $0.3 \text{ mm}$ , 表面粗糙度增加了大概 200%。进给速度和锤击频率的变化对表面粗糙度的影响相对较为平缓。高的锤击频率、小的节距和进给速度有利于降低表面粗糙度, 试验结果与理论分析结果相一致。

### 3.2 表面形貌

经过铣削后, 6016 铝合金的表面形貌如图 6 所示, 可以清晰看出铣削的刀痕。对比铣削后的 6016 铝合金表面形貌, 机械锤击后的表面形貌明显平滑, 铣削痕迹已消除, 如图 7 所示。存在锤击残留痕迹, 即颜色较浅偏白的区域。这些痕迹相互平行, 与锤击路径对应。图 7a、b 所选参数计算得到的  $s'$  分别为  $0.08 \text{ mm}$  和  $0.05 \text{ mm}$ , 由于所选参数中节距明显大于相邻锤击距离, 因此呈现出来的锤击残留痕迹沿着  $X$  轴方向, 这与图 2 的仿真结果一致。与图 7a 相比, 图 7b 采用更高的锤击频率, 可以看出, 高频率锤击会使表面形貌更加平滑, 但节距形成的锤击痕迹仍然较为明显。图 7c 采用的节距为  $0.1 \text{ mm}$ , 锤击痕迹进一步减少, 表面形貌进一步平顺, 可见节距对表面形貌有极大的影响作用。除了锤击残留痕迹外, 图 7 中未发现其他明显的表面缺陷及划痕, 说明只要合理选择节距参数, 机械锤击具有良好的表面平顺能力。

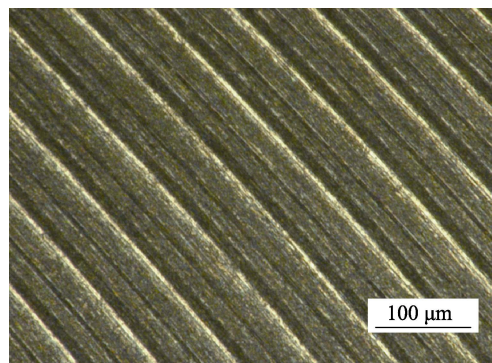


图 6 铣削后 6016 铝合金表面形貌

Fig.6 Surface topography of 6016 aluminum alloy after milling

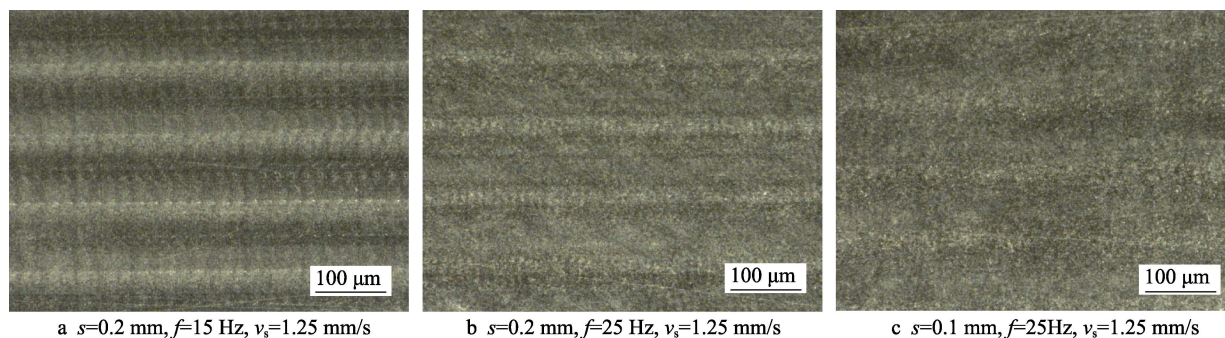
a  $s=0.2 \text{ mm}$ ,  $f=15 \text{ Hz}$ ,  $v_s=1.25 \text{ mm/s}$ b  $s=0.2 \text{ mm}$ ,  $f=25 \text{ Hz}$ ,  $v_s=1.25 \text{ mm/s}$ c  $s=0.1 \text{ mm}$ ,  $f=25 \text{ Hz}$ ,  $v_s=1.25 \text{ mm/s}$ 

图 7 机械锤击后 6016 铝合金表面形貌

Fig.7 Surface topography of 6016 aluminum alloy after machine hammer peening

### 3.3 硬度

如图8所示, 铣削后, 6016 铝合金的硬度约为 68HV。经过机械锤击后, 表面硬度可提高 25%~32%。减小节距和进给速度, 增加锤击频率, 可提高硬度。锤击频率和进给速度对硬度影响较大, 节距对硬度的影响较小。同时硬度随着表面深度的增加而降低, 大约在表面深度 100  $\mu\text{m}$  恢复到 6016 铝合金的硬度值。相对喷丸和超声表面纳米化技术, 电磁驱动的机械锤击对表面硬度提升和硬化深度的影响有限<sup>[18-19]</sup>。这与锤击力和锤击频率有关, 采用的音圈电机峰值推力为 180 N, 而实际上工作时推力保持在 110 N 左右。另外受到音圈电机频率的限制, 本次实验采用的锤击频率最高达到 25 Hz, 因此限制了表面硬度的进一步提高。

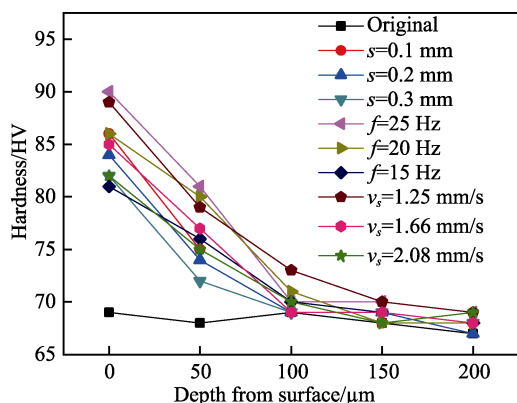


图8 机械锤击后的表面硬度

Fig.8 Surface hardness after machine hammer peening

### 3.4 锤击参数的影响规律

综上分析, 小节距、慢进给速度和高锤击频率有利于提高锤击表面完整性和硬度。节距是影响表面粗糙度和形貌的最重要锤击参数, 而对表面硬度的影响有限。不过实际加工中还应考虑加工效率, 小节距和慢进给速度将导致锤击效率的下降, 应合理安排锤击参数。

根据图1的机械锤击原理, 不恰当的锤击参数不仅得不到好的锤击表面, 甚至导致锤击的失效。基于锤击后表面成形几何关系, 推导有效锤击的条件, 即相邻锤击点距离与其他锤击参数的关系必须符合如下几何关系:

$$s' < 2\sqrt{D \cdot a_p - a_p^2} \quad (3)$$

倘若所选锤击参数不满足上述公式的要求, 工件表面的部分区域将未被锤击而导致锤击的不完整。利用式(3)对有效锤击条件进行仿真, 得到基于锤击频率、进给速度、锤击深度和锤头直径的有效锤击区域, 如图9所示。位于三个曲面之下的区域为各自有效锤击范围, 只有选择的锤击参数位于有效区域内, 才是有效的机械锤击。

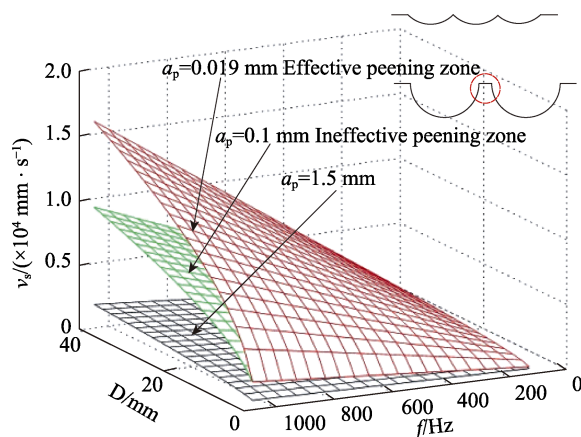


图9 有效的机械锤击参数范围

Fig.9 Ranges of effective peening parameters

## 4 结论

研究电磁驱动机械锤击方式对 6016 铝合金表面质量的提升作用, 并分析主要锤击参数的影响规律。通过试验探究, 表明机械锤击是一种新颖、有效、绿色的表面平整技术。主要结论如下:

1) 电磁驱动的机械锤击具有很好的表面平整效果, 平整后的 6016 铝合金表面粗糙度可达到 0.05  $\mu\text{m}$  左右, 接近粗抛的水平, 且表面呈现一定的镜面效果。

2) 通过观察表面形貌, 发现机械锤击后的表面存在光栅痕迹。不过相对铣削表面明显的加工轨迹, 机械锤击后的表面整体上比较光滑, 未见明显的表面缺陷和划痕。机械锤击后, 6016 铝合金的表面硬度可提升 25%~32%。

3) 锤击参数的选择决定锤击的有效性, 因此应在有效锤击参数范围内选取参数。节距是影响表面粗糙度和形貌的最重要参数, 同时也极大地影响平整效率。小节距、慢进给速度和高锤击频率有利于提高表面完整性和硬度。

### 参考文献:

- [1] 张艺, 尹自强, 尹国举. 铝合金表面的直接光学抛光实验[J]. 应用光学, 2014, 35(4): 676-680.  
ZHANG Yi, YIN Zi-qiang, YIN Guo-ju. Direct optical polishing research on surface of aluminum alloy[J]. Journal of applied optics, 2014, 35(4): 676-680.
- [2] 周圳, 鲁世红, 张涛, 等. 铝合金弹性预应力超声喷丸成形试验[J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 31-39.  
ZHOU Zhen, LU Shi-hong, ZHANG Tao, et al. Experimental study of elastic prestressed ultrasonic peen forming on aluminum alloy[J]. China surface engineering, 2017, 30(3): 31-39.
- [3] 戴一帆, 沈士泰, 卢洁琴, 等. 2024 铝合金混合酸阳极氧化[J]. 表面技术, 2018, 47(1): 198-202.  
DAI Yi-fan, SHEN Shi-tai, LU Jie-qin, et al. 2024 Aluminum

- alloy anodic oxidation in mixed acid[J]. Surface technology, 2018, 47(1): 198-202.
- [4] BENEDETTI M, FONTANARI V, BANDINI M, et al. High and high-cycle plain fatigue resistance of shot peened high-strength aluminum alloys: the role of surface morphology[J]. International journal of fatigue, 2015, 70: 451-462.
- [5] NAM Y S, JEONG Y I, SHIN B C, et al. Enhancing surface layer properties of an aircraft aluminum alloy by shot peening using response surface methodology[J]. Materials & design, 2015, 83: 566-576.
- [6] YIN Z Q, ZHANG Y. Direct polishing of aluminum mirrors with higher quality and accuracy[J]. Applied optics, 2015, 54(26): 7835-7841.
- [7] KI B K, BYUNG C K, SEOK J H, et al. Effect of pre-treatment polishing on fabrication of anodic aluminum oxide using commercial aluminum alloy[J]. Journal of mechanical science and technology, 2017, 37(9): 4387-4393.
- [8] WIED J, SCHEIL J, KLAMSER M, et al. Impact experiments and finite element simulation of surface roughness reduction by machine hammer peening[J]. Materialwiss werkst, 2011, 42(9): 827-832.
- [9] BLEICHER F, LECHNER C, HABERSOHN C, et al. Mechanism of surface modification using machine hammer peening technology[J]. CIRP annal-manufacturing technology, 2012, 6(1): 375-378.
- [10] BLEICHER F, LECHNER C, HABERSOHN C, et al. Improving the tribological characteristics of tool and mould surfaces by machine hammer peening[J]. CIRP annal-manufacturing technology, 2013, 62(1): 239-242.
- [11] BERGLUND J, LILJENGREN M, ROSEN B G. On finishing of pressing die surface using machine hammer peening[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2011, 52(1-4): 115-121.
- [12] LECHNER C, BLEICHER F, HABERSOHN C, et al. The use of machine hammer peening technology for smoothening and structuring of surfaces[C]// Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International DAAAM Symposium. Vídeň: DAAAM International, 2012.
- [13] SCHULZE V, BLEICHER F, GROCHE P. Surface modification by machine hammer peening and burnishing[J]. CIRP Annal- Manufacturing technology, 2016, 65(2): 809-832.
- [14] CHEN T, JOHN H, XU J, et al. Influence of surface modifications on pitting corrosion behavior of nickel-base alloy 718. Part 1: Effect of machine hammer peening[J]. Corrosion science, 2015, 77(1): 230-245.
- [15] TRAUTH D, FEUERHACK A, MATTFELD P, et al. Analysis of the velocity distribution of an elliptic surface structure manufactured by machine hammer peening[J]. Tribology letters, 2015, 60(1): 1-13.
- [16] MANEL R R, FRANZ H, CHRISTOPH L. Enhanced sliding wear resistance of technical alloys by hard particle reinforcement using machine hammer peening[J]. Tribology letters, 2017, 60(3): 479-789.
- [17] KRALL S, CHRISTOPH L, MICHAEL N, et al. Robot based machine hammer peening using an electromagnetic driven hammering device[C]// 26th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. New York: Curran Associates Inc, 2015.
- [18] YE Y, WANG H, TANG G, et al. Effect of electropulsing-assisted ultrasonic nanocrystalline surface modification on the surface mechanical properties and microstructure of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of materials engineering and performance, 2018, 27(5): 2394-2403.
- [19] ZHU K, JIANG C, LI Z, et al. Residual stress and microstructure of the CNT/6061 composite after shot peening[J]. Materials and design, 2016, 107: 333-340.

(上接第 254 页)

- [16] 贾涉, 姚正军, 张莎莎, 等. 硅烷改性纳米 TiO<sub>2</sub>-Zn-Al/水性环氧涂层的防腐性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(9): 109-117.
- JIA She, YAO Zheng-jun, ZHANG Sha-sha, et al. Anticorrosion performance of silane modified nano TiO<sub>2</sub>-Zn-Al/waterborne epoxy coatings[J]. Acta materiae compositae sinica, 2018, 35(9): 109-117.
- [17] 胡传波, 郑燕升, 王发龙, 等. 聚邻甲苯胺/纳米二氧化钛环氧复合涂层的性能[J]. 电镀与涂饰, 2014, 33(14): 592-597.
- HU Chuan-bo, DENG Yan-sheng, WANG Fa-long, et al. Properties of poly-o-toluidine/nano-titania/epoxy composite coatings[J]. Electroplating & finishing, 2014, 33(14): 592-597.
- [18] POUR Z S, GHAEMY M, BORDBAR S, et al. Effects of surface treatment of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the adhesion and anticorrosion properties of the epoxy coating on mild steel using electrochemical technique[J]. Progress in organic coatings, 2018, 119: 99-108.
- [19] 王刚, 王克亮, 逮春晶, 等. 二氧化硅颗粒表面硅烷化对其润湿性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(7): 911-915.
- WANG Gang, WANG Ke-liang, LU Chun-jing, et al. Effect of surface silanization on wettability of silica particles[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(7): 911-915.
- [20] QIAO B, WANG T J, GAO H, et al. High density silanization of nano-silica particles using  $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane (APTES)[J]. Applied surface science, 2015, 351: 646-654.
- [21] SABZI M, MIRABEDINI S M, ZOHURIAAN-MEHR J, et al. Surface modification of TiO<sub>2</sub> nano-particles with silane coupling agent and investigation of its effect on the properties of polyurethane composite coating[J]. Progress in organic coatings, 2009, 65(2): 222-228.