

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.10.023

高温合金轴向超声振动钻削减摩机理

陈 硕^{1,2}, 邹 平¹, 田英健¹, 毛 亮¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁轨道交通职业学院 机械工程系, 辽宁 沈阳 110023)

摘 要: 针对高温合金钻削困难、钻削过程中摩擦力大等问题,采用超声振动技术加工. 首先,分析了超声振动减摩机理,构建了平均摩擦力与振动参数之间的关系,并得出了平均摩擦力与振幅之间的变化趋势. 建立轴向超声振动钻削系统,利用该系统对高温合金进行钻削加工. 结果表明:振动振幅对孔壁表面质量的影响符合超声振动钻削的减摩特性. 利用优化后的振幅超声振动钻削,与普通钻削相比,切屑形态更加规整,孔壁表面粗糙度值更小,表面质量更好.

关 键 词: 超声振动钻削;减摩;振幅;切屑形态;粗糙度

中图分类号: TG 506.5; TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)10-1485-05

Reducing Friction Mechanism of Superalloy Axial Ultrasonic Vibration Drilling

CHEN Shuo^{1,2}, ZOU Ping¹, TIAN Ying-jian¹, MAO Liang¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Department of Mechanical Engineering, Guidaojiaotong Polytechnic Institute, Shenyang 110023, China.
Corresponding author: ZOU Ping, E-mail: pzou425@163.com)

Abstract: In view of difficulties in drilling high-temperature alloys and large friction during drilling, ultrasonic machining was used. Firstly, the reducing friction mechanism of ultrasonic vibration was analyzed, the relationship between the average friction force and vibration parameters was constructed, and then the correlation between the average friction force and amplitude was obtained. An axial ultrasonic vibration drilling system was established, which was used to drill the superalloy. The results showed that the effect of amplitude on the surface quality of hole wall is consistent with anti-friction characteristics of ultrasonic vibration. Compared with that of the ordinary drilling, the production of optimized amplitude ultrasonic vibration drilling yields more regular chip morphology, smooth hole wall surface roughness, and better surface quality.

Key words: ultrasonic vibration drilling; reducing friction; amplitude; chip morphology; roughness

高温合金 GH4169 是一种难加工材料^[1],属于镍基合金的一种,具有高硬度、高韧性和高耐磨性,能够制造出各种形状复杂的零部件,广泛应用于宇航、核能、石油工业等领域. 目前,GH4169 高温合金孔加工多采用钻削加工,但传统钻削加工由于摩擦力大,极易使钻头出现磨损,切屑不易折断,缠绕在螺旋槽中,导致工件容易划伤,难以保

证加工质量^[2].

为了改善钻削加工,采用超声振动加工技术^[3],在钻削过程中,加入高频、低振幅的振动^[4],可以实现更好的加工效果^[5-6],有效降低刀具与切屑之间的摩擦力,易于断屑排屑^[7],改善孔壁表面质量^[8-9],非常适合难加工材料加工.

1 振动减摩机理

一个滑块放在一个倾斜的斜面上,使滑块与斜面处于临界状态,此时,如果对滑块施加一个振动,滑块就会沿着斜面滑下,说明了超声振动的减摩特性,如图 1 所示。

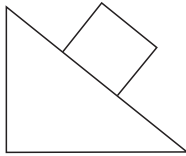


图 1 斜面滑块图
Fig. 1 Slope slider diagram

根据对超声振动减摩机理的分析,建立了 1 个简单的摩擦副模型,如图 2 所示. 物体 1 和物体 2 组成一个简单的摩擦副模型,物体 2 在以速度 v 运动的过程中,在静载荷 W 的作用下作垂直于与物体 1 接触面的振动 z . 在振动 z 的作用下,物体 1 和物体 2 之间的实际载荷会发生变化,不再是固定的载荷,而是动载荷^[10-11]. 振动 z 和物体 1 与物体 2 之间的动态载荷 W_d 的表达式为

$$z = A \cos \omega t, \tag{1}$$

$$W_d = W - CA \cos \omega t. \tag{2}$$

式中: A 为振动振幅; ω 为振动频率; C 为常数。

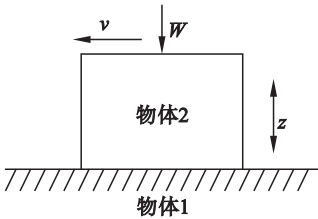


图 2 摩擦副模型
Fig. 2 Model of friction pair

对固体摩擦润滑理论的分析和相关参数的计算,可得在振动 z 的作用下,物体 1 与物体 2 之间的平均摩擦力 F 与振动之间的关系:

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{T} \int_0^T f_i dt = \frac{1}{T} \int_0^T \varphi_i W_d dt = \\ &\frac{1}{T} \left[\frac{c_1 v W (t_1 - t_3)^2}{2} + c_1 v W t_1 (t_1 - t_3) - \right. \\ &\frac{c_1 v C A}{\omega} (t_3 \sin \omega t_3 - t_1 \sin \omega t_1 + \frac{1}{\omega} \cos \omega t_3 - \frac{1}{\omega} \cos \omega t_1) + \\ &\frac{c_1 v t_1 C A}{\omega} (\sin \omega t_3 - \sin \omega t_1) + \mu_k W (t_2 - t_3) - \\ &\left. \frac{C A \mu_k}{\omega} (\sin \omega t_2 - \sin \omega t_3) \right]. \tag{3} \end{aligned}$$

式中: $t_1 = \frac{1}{\omega} \cos^{-1}(\frac{W}{CA})$; $t_2 = \frac{2\pi}{\omega} - \frac{1}{\omega} \cos^{-1}(\frac{W}{CA})$; $t_1 + t_2 = T$; $t_3 = \frac{\mu_k}{C_1 v} + \frac{1}{\omega} \cos^{-1}(\frac{W}{CA})$; T 为振动周期; c_1 为常数; v 为物体 2 的运动速度; μ_k 为临界摩擦系数。

令常数 $c_1 = 1 \mu\text{m}^{-1}$, $W = 100 \text{ N}$, $v = 0.1 \text{ m/s}$, $C = 8 \text{ N}/\mu\text{m}$, $\mu_k = 0.25$, 当 $f = 20 \text{ kHz}$ 时,通过改变振幅值得出平均摩擦力与振幅的关系,如图 3 所示。

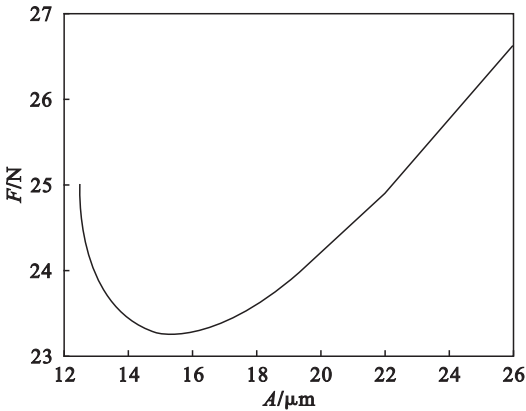


图 3 平均摩擦力与振幅 A 的关系
Fig. 3 Relationship between average friction force and amplitude

由图 3 可知,振动频率固定时,随着振幅的逐渐增大平均摩擦力先逐渐减小,达到某一最小值后再逐渐增大,其中的最小值是随着参数的改变而改变的. 虽然最小值不是统一的,但平均摩擦力随着振幅的增大有先减少后增大的趋势是统一的,因此,振动频率已知时,选择合适的振幅就会使平均摩擦力比没加振动时的低,而且,存在一个最佳的振幅,使得平均摩擦力最小。

2 试验材料和加工方法

试验钻削加工选用 GH4169 高温合金试件,直径 25 mm,长 30 mm. 其泊松比、密度、弹性模量及抗拉强度分别为 0.3, 8 240 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 200 GPa, 965 MPa.

所选的钻头材料为含钴高速钢,在高速钢的基础上加入 5% ~ 8% 钴,钻头的硬度、耐热性能和韧性都显著提升,直径为 6 mm.

本试验中,轴向超声振动钻削加工系统基于 CA6140 型普通车床进行创建,换能器、变幅杆装入套筒并夹紧,之后将套筒固定在中心架上,套筒尾部伸入机床尾座固定夹紧. 安装过程中使换能器、变幅杆、钻头的中心线保持一致,车床的尾座

中心线与主轴回转中心线要保证统一,确保钻头准确钻削试件,防止钻头偏摆,换能器通过导线连接发生器,通电之后进行轴向超声振动钻削加工试验,加工过程不使用冷却液. 超声振动钻削实物图见图 4.

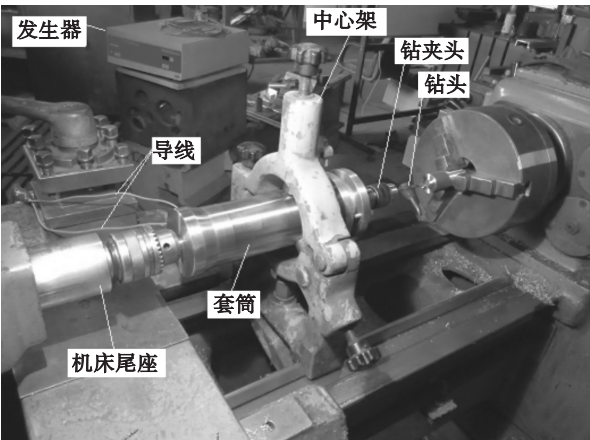


图 4 轴向超声振动钻削装置实物图

Fig. 4 Schematic diagram of axial ultrasonic vibration drilling device

3 结果与讨论

3.1 振幅对孔表面粗糙度的影响及分析

在钻削试验中,先采用普通钻削,之后分别以振幅 12, 15, 18, 21, 24 μm 进行超声振动钻削,通过三维表面轮廓仪测量,考察振幅有无及振幅大小对孔壁表面粗糙度 S_a 的影响. 在主轴转速为 320 r/min 时,分别加工试件,得出 S_a 随振幅的变化关系图如图 5 所示. 普通钻削时, S_a 值为 2.16 μm . 辅助超声振动技术钻削,粗糙度值均低于普通钻削. 可以看出,超声振动钻削改善了孔的

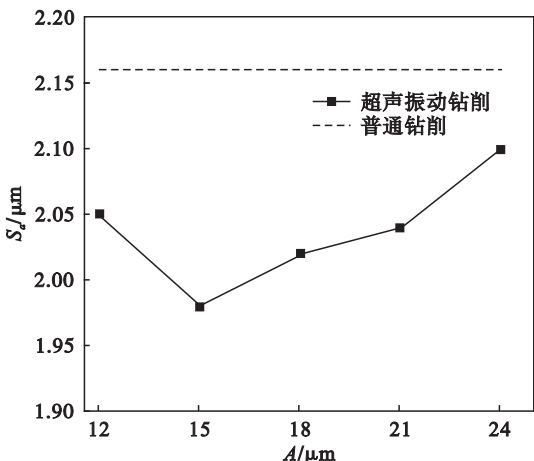


图 5 表面粗糙度随超声振幅变化的关系曲线

Fig. 5 Relationship between surface roughness and ultrasonic amplitude

加工质量. 超声振动钻削振幅从 12 μm 到 15 μm , 孔的表面粗糙度降低,表面质量较好,振幅 15 μm 时表面质量最好. 之后随着振幅的升高,孔壁的粗糙度值升高,表面质量较差,可以看出,表面粗糙度随振幅的变化关系趋向于前述推导出的平均摩擦力随振幅的变化趋势.

这是因为在钻削加工中,摩擦力对加工质量起至关重要的作用. 在初始阶段,振幅较小时,钻头与孔之间摩擦力较大,孔表面粗糙度值高. 随着振幅的逐渐增大,平均摩擦力相对普通钻削时的摩擦力有所降低,减小了刀具与孔的摩擦,使加工孔的表面粗糙度降低. 当振幅达到 15 μm 时,平均摩擦力最小,即刀具与孔的摩擦最弱,加工孔的表面粗糙度值最低. 但当振幅超过 15 μm 之后,随着振幅进一步增大,振动过程会产生比较大的冲击力,大的冲击力会增大刀具与孔的摩擦,加工孔的表面粗糙度值增大.

通过上述分析可以看出,超声振动钻削加工振幅影响孔壁的表面质量,并趋向于平均摩擦力随振幅的变化趋势.

3.2 钻削切屑形态分析

切屑形态是反映钻孔加工中一个重要的因素,切屑的形状和排屑是否顺畅会导致加工表面质量和加工精度的不同. 图 6 是在相同加工参数下得到的切屑形态. 图 6a 为普通钻削的切屑形态,不易断屑,而且切屑较长,易缠绕钻头,显然增加了钻头-切屑-孔壁之间的摩擦力,加工过程不稳定,降低孔壁表面质量. 图 6b 为超声振动钻削后的切屑形态,振动钻削最大的优点就是可以顺利实现断屑,钻削过程并不是发生在整个振动周期内,而是在振动周期内极短的一段时间内完成了切削过程,其他时间钻头与工件分离不进行切削过程,只有很小一部分的时间处在钻削状态,因此,振动钻削过程中,钻头和工件会周期性的接触和分离,平均摩擦力会小于普通钻削过程中的平均摩擦力,切屑的厚度也在周期性的改变,从而在切屑的薄弱环节(即切屑厚度为零或很小时)处使切屑折断.

图 6c 和图 6d 是将切屑放大 20 倍后普通钻削与超声振动钻削得到的切屑形态. 从图 6c 可以看出,高温合金普通钻削的切屑具有锯齿化的特点,切屑表面呈鱼鳞状,相对粗糙,这是因为钻削加工中摩擦力大,促使钻削过程不稳定,切屑变形严重,形成边缘不规则的切屑,影响孔壁加工质量. 从图 6d 可以看出,超声振动钻削的切屑变化明显,外形规整,切屑边缘比较光滑,表面具有清

晰的纹理. 另外,从切屑的变形程度上看,超声振动钻削的切屑明显优于普通钻削,证明超声振动钻削的摩擦阻力更小,促进了切屑的断裂,防止切屑缠绕,加工过程更加平稳,加工效果也更加理想.

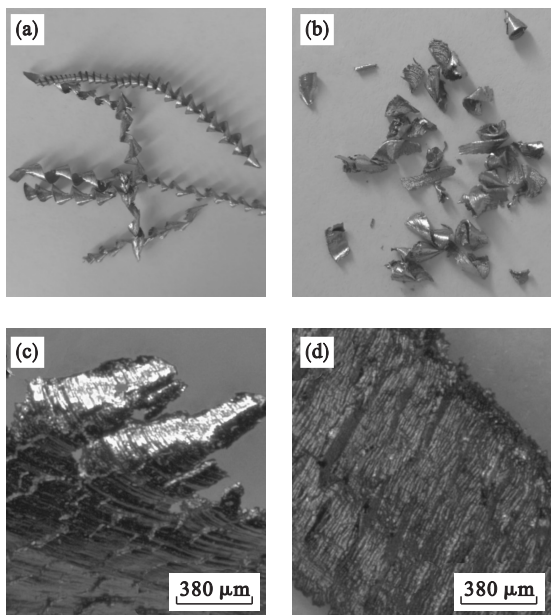


图 6 切屑形态
Fig. 6 Chip formation

(a)—普通钻削; (b)—超声振动钻削;
(c)—20 倍后普通钻削; (d)—20 倍超声振动钻削.

3.3 已加工孔表面形貌分析

图 7 是在主轴转速为 320 r/min 条件下,普通钻削和以振幅为 15 μm 超声振动钻削孔,并分别将孔壁放大 20 倍得到的对比表面形貌. 从图 7a 中可以看出,孔表面具有明显的切痕,凹坑和裂纹较多,表面质量不好. 这是由于高温合金钻削时摩擦力大,切屑不易断屑排出,导热性低,导致孔内部温度升高,刀具、切屑容易和孔壁表面粘连,钻削时划伤孔壁. 同时,高温合金钻削过程也会产生硬化现象,易在加工表面形成裂纹,进而影响加工质量. 与普通钻削相比,从图 7b 可以看出,超声振动钻削孔壁整体光滑均匀,基本上没有明显的划痕,表面质量改善明显. 这是由于振动钻削中钻头和工件表面直接周期性的分离和接触,降低钻头与孔内部之间的平均摩擦系数,减小平均摩擦力,切屑易排出,有效降低了钻削温度,加工硬化效果不明显,从而改善加工质量.

进一步通过三维表面轮廓仪扫描孔壁上 0.1 mm×0.1 mm 的区域,对该区域的微观表面形貌进行分析,如图 8 所示. 从图 8a 可以看出,普通钻削加工所形成的表面出现耕犁现象,通过轮

廓仪得到的区域 S_a 值为 2.16 μm. 图 8b 为振幅 15 μm 超声振动钻削后孔的表面形貌,加上超声振动后孔的波峰和波谷的变化规则平缓,超声振动钻削得到的孔壁表面 S_a 值为 1.98 μm,可以看出,超声振动钻削的孔壁表面质量要好于普通钻削.

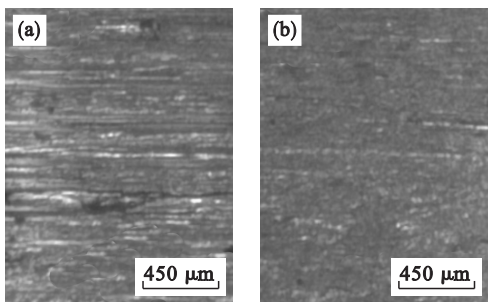


图 7 孔壁形貌
Fig. 7 Chip formation
(a)—普通钻削; (b)—超声振动钻削.

摩擦力对于加工质量都起着至关重要的作用,由于超声振动的附加作用,钻头和工件之间的接触形式发生改变,以一定的频率和振幅间接触,钻头和切屑周期性的分离改善了钻头与切屑的摩擦边界条件,减小钻头与孔壁的摩擦力,降低了切屑划伤孔壁的可能性,从而达到降低表面粗糙度的效果,最终形成良好的表面形貌.

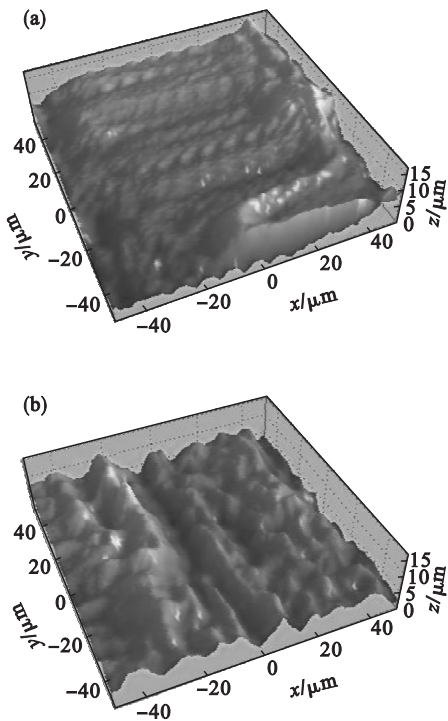


图 8 孔表面微观形貌
Fig. 8 Microscopic morphology of hole surface
(a)—普通钻削; (b)—超声振动钻削.

4 结 论

- 1) 根据超声振动钻削的减摩机理,推导出平均摩擦力与振幅之间的关系,并得到一个最佳振幅 15 μm ,使得平均摩擦力最小. 在该振幅下,孔壁表面粗糙度值最小,表面质量最好.
- 2) 普通钻削切屑不易折断,切屑易缠绕,锯齿化严重,容易划伤孔壁. 超声振动钻削易于断屑排屑,形状规整,钻削过程也更加平稳.
- 3) 普通钻削孔壁粗糙,切痕严重. 超声振动钻削孔壁均匀,无明显切痕. 普通钻削微观形貌区域粗糙度 S_a 值为 2.16 μm ,超声振动钻削 S_a 值降低到 1.98 μm ,降低了约 8.3%,超声振动钻削有效地改善孔壁的表面形貌.

参考文献:

[1] 徐英帅,邹平,王伟,等. 超声振动辅助车削高温合金和铝镁合金研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(1):95-100.
(Xu Ying-shuai,Zou Ping,Wang Wei,et al. Investigation on ultrasonic vibration assisted turning of Ni-based superalloy and Al-Mg alloy[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2017,38(1):95-100.)

[2] 陈硕,邹平,吴高勇,等. 45 钢超声振动钻削加工机理及其试验研究[J]. 电加工与模具,2017,330(1):48-51.
(Chen Shuo,Zou Ping,Wu Gao-yong,et al. Drilling mechanism and experimental study on ultrasonic vibration

machining of 45 steel[J]. *Electromachining & Mould*,2017,330(1):48-51.)

[3] Jin T,Cai G. Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*,2001,12(2):185-190.

[4] Pujana J,Rivero A,Celaya A,et al. Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V[J]. *Tools Manufacture*,2009,49(3):500-508.

[5] Patil S,Joshi S,Tewari A,et al. Modeling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V[J]. *Ultrasonics*,2014,54(2):694-705.

[6] Muhammad R,Hussain M S,Maurotto A,et al. Analysis of a free machining $\alpha + \beta$ titanium alloy using conventional and ultrasonically assisted turning[J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2014,214(4):906-915.

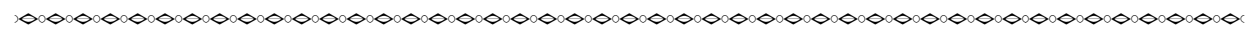
[7] 肖子英. 超声振动钻削系统设计及其试验研究[D]. 福州: 福建农林大学,2010.
(Xiao Zi-ying. Ultrasonic vibration drilling system design and experimental research[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2010.)

[8] Babitsky V I,Kalashnikov A N,Meadows A,et al. Ultrasonically assisted turning of aviation materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2003,132(1):157-167.

[9] Koshimizu S. Ultrasonic vibration-assisted cutting of titanium alloy[J]. *Key Engineering Materials*,2009,389(1):277-282.

[10] Adachi K,Kato K,Sasatani Y. The micro-mechanism of friction drive with ultrasonic wave[J]. *Wear*,1996,194(2):137-142.

[11] Zhang B,Yang F L,Wang J X. Fundamental aspects in vibration-assisted tapping[J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2003,132(3):345-352.



(上接第 1484 页)

[5] 贺李平,顾亮,辛国国,等. 减振器环形阀片大挠曲变形的高精度解析式[J]. 北京理工大学学报,2009,29(6):510-514.
(He Li-Ping,Gu Liang,Xin Guo-Guo,et al. High-precision analytical formulas of large deflection problem for annular throttle-slice in shock absorber[J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*,2009,29(6):510-514.)

[6] Lang H H. A study of the characteristics of automotive hydraulic dampers at high stroking frequencies[D]. Michigan:University of Michigan,1977.

[7] Duym S,Reybrouck K. Physical characterization of nonlinear shock absorber dynamics[J]. *European Journal of Mechanical & Environmental Engineering*,1998,43:181-188.

[8] Ferdek U,Łuczko J. Modeling and analysis of a twin-tube hydraulic shock absorber[J]. *Journal of Theoretical & Applied Mechanics*,2012,50(2):627-638.

[9] Calvo J A,López-Boada B,Román J L S,et al. Influence of a shock absorber model on vehicle dynamic simulation[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D:Journal of Automobile Engineering*,2009,223(2):189-203.

[10] Lee C T. Study of the simulation model of a displacement-sensitive shock absorber[J]. *Journal of Automobile Engineering*,2005,219(8):965-975.

[11] Lee C T,Moon B Y. Study on the damping performance characteristics analysis of shock absorber of vehicle by considering fluid force[J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*,2005,19(2):520-528.