

纵-扭复合振动超声深滚加工表面强化研究

罗傲梅, 郭伟

(河南工业和信息化职业学院 机械工程系, 河南 焦作 454003)

摘要: **目的** 基于纵-扭复合振动超声加工和超声深滚加工提出了纵-扭复合振动超声深滚加工工艺, 研究各深滚工艺参数对工件表面强度的影响, 以验证二维超声振动加工技术在表面强化技术领域的应用效果。 **方法** 采用单因素试验法对 6061-T651 铝合金轴件分别进行纵-扭复合振动超声深滚与常规深滚加工试验, 然后用 MH-5 数显硬度计测试每组参数下的表面显微硬度, 研究静压力、工件转速和进给量对工件表面显微硬度的影响, 并将两种试验结果进行对比。 **结果** 在设定工艺参数内, 纵-扭复合振动超声深滚工艺所获得的表面显微硬度均高于同等加工条件下常规深滚工艺。纵-扭复合振动超声深滚加工时, 表面显微硬度随静压力和工件转速的增大先增大后减小, 随进给量的增大先减小后增大再减小; 常规深滚加工时, 表面显微硬度与静压力近似呈线性关系, 且随工件转速的增大先增大后减小, 随进给量的增大一直减小。 **结论** 纵-扭复合振动超声深滚加工工艺能更有效地实现 6061-T651 铝合金的表面强化处理。

关键词: 超声深滚; 纵-扭复合振动; 表面强化; 显微硬度

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)05-0106-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.05.020

Research on Surface Strengthening by Ultrasonic Deep Rolling with Longitudinal-Torsional Vibration

LUO Ao-mei, GUO Wei

(Department of Mechanical Engineering, Henan College of Industry & Information Technology, Jiaozuo 454003, China)

ABSTRACT: **Objective** To propose ultrasonic deep rolling with longitudinal-torsional vibration (UDR-LTV) based on ultrasonic machining with longitudinal-torsional vibration and ultrasonic deep rolling, and to study the effects of processing parameters on surface strengthening, so as to verify the application effect of the two-dimensional ultrasonic vibration machining technology in the field of surface strengthening technology. **Methods** Conventional deep rolling (CDR) and UDR-LTV were applied using the single factor experiment to process aluminum alloy 6061-T651 respectively, then the surface micro-hardness was tested by each set of parameters with the MH-5 digital hardness tester to investigate the influence of static pressure, rotate-speed and feed amount on the surface micro-hardness. The results of the two processing ways in the experiment were compared. **Results** Within the set parameters, the surface micro-hardness obtained by UDR-LTV was larger than that of CDR under the same processing conditions. The surface micro-hardness increased at first then decreased with the increase of static pressure and rotate-speed, and decreased at first then increased

收稿日期: 2015-01-08; 修订日期: 2015-01-18

Received: 2015-01-08; **Revised:** 2015-01-18

作者简介: 罗傲梅(1986—), 女, 湖北人, 硕士, 主要从事机械工程、精密超精密加工及其表面技术等方面的教学与研究。

Biography: LUO Ao-mei(1986—), Female, from Hubei, Master, Research focus: mechanical engineering, precision and ultra-precision machining and surface technology.

and decreased at last with the increase of feed amount by UDR-LTV. The surface micro-hardness and static pressure showed an approximate linear relationship, and the surface micro-hardness increased at first then decreased with the increase of rotate-speed, and reduced all along with the increase of feed amount by CDR. **Conclusion** It is proved that aluminum alloy 6061-T651 may be more effectively strengthened when treated by UDR-LTV.

KEY WORDS: ultrasonic deep rolling; longitudinal-torsional vibration; surface strengthening; micro-hardness

机械零件的破坏,一般总是从表面层开始的。产品的性能,尤其是它的可靠性和耐久性,在很大程度上取决于零件的表面质量。因此,提高零件的表面质量一直是机械制造行业的重要研究课题。目前,生产中常采用喷丸、滚压、挤压等常规的金属表面机械强化方法来强化工件表面^[1-3],但常规的表面机械强化方法常存在增大表面粗糙度、在工件次表面产生剪切应力、挤压作用力大等缺陷^[4-6]。

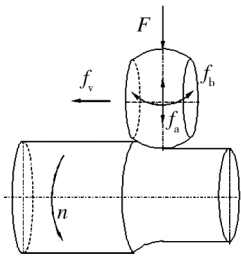
近年来,研究者们尝试将超声频振动引入到常规表面强化工艺中,即实现超声表面强化,这已成为表面强化技术发展的新方向^[7]。如超声喷丸、超声挤压、超声深滚等强化工艺已在工程领域获得应用,并被证明其强化效果优于常规表面强化工艺^[8-12]。二维复合振动超声加工已经在车削、磨削、铣削等加工中获得广泛应用。实验证明,辅助二维超声振动后,其加工表面质量和加工精度均优于单一振动下的加工效果^[13-18]。迄今为止,在表面强化技术领域,尚未引入二维超声振动模式。

该研究将纵-扭复合超声振动引入到常规深滚中,创建纵-扭复合振动超声深滚加工 (Ultrasonic Deep Rolling with Longitudinal-Torsional Vibration/UDR-LTV) 工艺,并对供应态 6061-T651 铝合金棒料进行纵-扭复合振动超声深滚与常规深滚 (Conventional Deep Rolling/CDR) 强化处理,研究工艺参数对表面强化效果的影响。

1 加工原理

如图 1 所示,研究提出的纵-扭复合振动超声深滚加工是基于纵-扭复合振动超声加工和超声深滚加工的表面强化工艺^[19]。该工艺是在常规深滚过程中,对工具头施以纵向超声振动,使其高速冲击工件表面产生残余压应力,同时还对工具头施以扭转超声振动,使其反复碾压已加工表面,以期实现工件表面的强化与光整加工。显然,纵-扭复合振动超声深滚加工是二维复合振动超声加工与深滚加工相耦合的复合加工工艺,是一种冲击式动态滚压光整加工方

法,也属于超声表面形变强化工艺。



F —静压力; n —工件转速; f_v —进给量;
 f_a —纵向超声振动; f_b —扭转超声振动

图 1 纵-扭复合振动超声深滚加工原理
Fig. 1 Principle of UDR-LTV

2 试验

试验所选用的材料为供应态 6061-T651 铝合金轴件,轴径为 $\phi 50$ mm。经粗车后,轴件直径为 $\phi 48$ mm,显微硬度(维氏硬度)为 70.1HV。

该加工试验在 CA6140B/A 普通车床上进行。将加工装置安装在车床刀架上,采用乳化液作为切削液。声学系统纵-扭复合振动频率为 19 806 Hz,变幅杆输出端纵向振幅为 6.3 μm ,扭转切向振动位移为 9 μm ,对应扭转角度为 $-0.06^\circ \sim 0.06^\circ$ 。采用 MH-5 数显硬度计沿工件周向取 5 处位置进行测量,测试滚压后工件轴向显微硬度(HV),取其平均值作为测试结果。

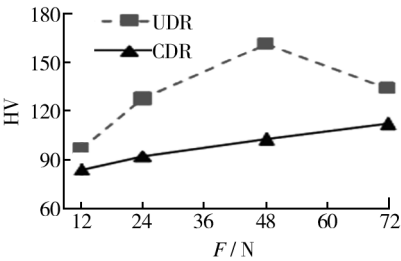
试验选取可控的 3 个工艺参数(静压力 F 、进给量 f_v 、工件转速 n)作为工艺参数指标,采用单因素试验法,研究这些工艺参数对工件表面硬度的影响。第一组试验参数: $f_v=0.12$ mm/r, $n=160$ r/min, F 取 12, 24, 48, 72 N;第二组试验参数: $f_v=0.12$ mm/r, $F=48$ N, n 取 80, 160, 200, 250 r/min;第三组试验参数: $F=48$ N, $n=160$ r/min, f_v 取 0.064, 0.09, 0.12, 0.15 mm/r。

在每一组滚压工艺参数下,分别对工件表面进行超声深滚和常规深滚试验。当打开超声波发生器时为纵-扭复合振动超声深滚加工,关闭超声波发生器时为常规深滚加工。

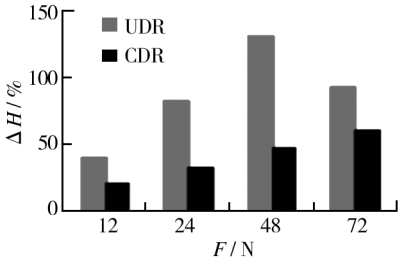
3 结果与分析

3.1 静压力

静压力对表面显微硬度和表面硬化率的影响如图 2 所示。



a 静压力与表面显微硬度的关系



b 静压力与表面硬化率的关系

图 2 静压力对表面显微硬度的影响

Fig. 2 Influence of static pressure on surface micro-hardness: a) the relationship between static pressure and surface micro-hardness; b) the relationship between static pressure and surface hardening rate

由图 2a 可知,在相同滚压工艺参数下,相对常规深滚而言,纵-扭复合振动超声深滚加工获得的表面显微硬度有较大幅度的提高。在常规深滚时,静压力与表面显微硬度近似呈线性关系;纵-扭复合振动超声深滚加工后表面的显微硬度先随静压力的增大而增大,后又呈降低趋势。由图 2a 还可以看出,已加工表面要达到相同的显微硬度值时,纵-扭复合振动超声深滚加工所需的静压力远小于常规深滚加工。

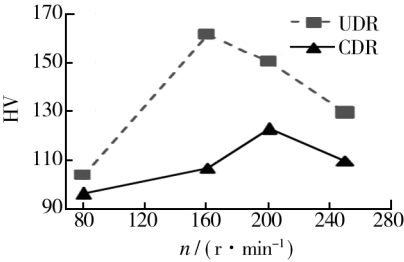
由图 2b 可知,在相同静压力情况下,纵-扭复合振动超声深滚加工获得的硬化率高于常规深滚加工。当进给量 $f_v = 0.12 \text{ mm/r}$ 、转速 $n = 160 \text{ r/min}$ 、静压力 $F = 48 \text{ N}$ 时,纵-扭复合振动超声深滚下的硬度为 161.8HV,常规深滚下为 106.1HV,前者硬化率约为后者的 3 倍。

对纵-扭复合振动超声深滚加工而言,滚轮对工

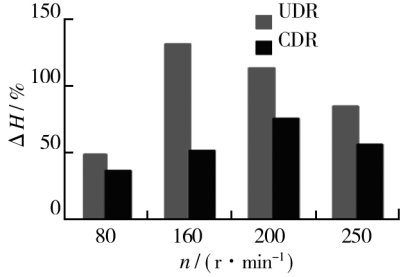
件表面的冲击为“接触-冲击-脱离-接触”的循环冲击过程。随着静压力的增加,其显微硬度也随之增大。当静压力过大时,滚轮被压在工件表面,超声振动作用受到明显的抑制,对工件表面的高频冲击滚压作用降低,因此表面显微硬度值有所减小。同时,由图 2 还可以看出,在设定工艺参数范围内,纵-扭复合振动超声深滚加工中要获得较高表面显微硬度值,存在一个合适的静压力值;对常规深滚加工而言,静压力越大,工件表面显微硬度越高。

3.2 工件转速

工件转速对表面显微硬度和表面硬化率的影响如图 3 所示。



a 工件转速与表面显微硬度的关系



b 工件转速与表面硬化率的关系

图 3 工件转速对表面显微硬度的影响

Fig. 3 Influence of rotating speed on surface micro-hardness: a) The relationship between rotating speed and surface micro-hardness; b) The relationship between rotating speed and surface hardening rate

由图 3 可知,工件转速对纵-扭复合振动超声深滚加工和常规深滚加工后表面显微硬度的影响规律较一致,均随工件转速的增大先增大后减小。相对常规深滚加工,纵-扭复合振动超声深滚加工在较低的工件转速条件下就可以获得较高的表面硬化率,且其获得的表面显微硬度均高于相同加工参数条件下的常规深滚加工。

深滚加工过程中,被滚压的金属层产生塑性流动。当工件转速过低时,因滚压而隆起的金属层有足

够的时间堆积起来,引起后续滚压深度的增加,导致表面硬度的降低。随着转速的增大,工件相同部位多次被滚压,有利于提高显微硬度。当转速过高时,工件周向可能存在局部被多次滚压和局部未被滚压共存的跳跃性现象,以及因过度滚压造成表面破碎问题,不利于提高表面硬度。

3.3 进给量

进给量对表面显微硬度和表面硬化率的影响如图4所示。

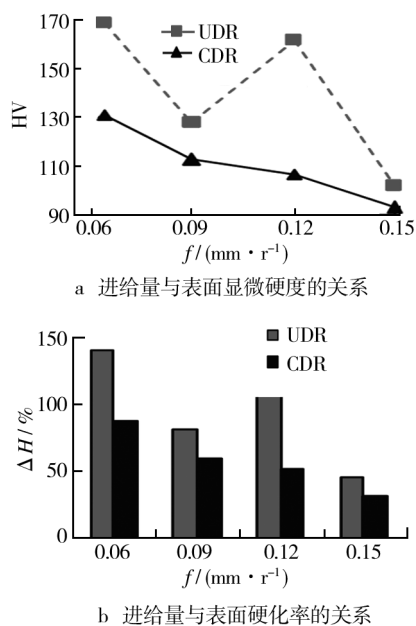


图4 进给量对表面显微硬度的影响

Fig.4 Influence of feed amount on surface micro-hardness: a) The relationship between feed amount and surface micro-hardness; b) The relationship between feed amount and surface hardening rate

由图4可知,纵-扭复合振动超声深滚加工后的表面显微硬度随进给量的增大先减小后增大,然后又急剧减小,常规深滚加工的表面显微硬度随进给量的增大一直呈下降趋势。同等加工条件下,纵-扭复合振动超声深滚加工下的表面显微硬度均高于常规深滚加工。

进给量较小时,超声振动对工件表面的重复冲击和碾压次数多,引起工件表面硬化程度加剧,硬化率较高。随着进给量的增大,工件表面重复加工段减少,同一部位重复冲击次数和碾压次数减少,表面显微硬度降低。当进给量增大到某一值后,随着进给量继续增大,滚轮与工件表面的摩擦系数减小,滚轮与工件表面的粘结程度减轻,表面显微硬度有所提高。

当进给量过大时,工件表面会存在很多未被滚压到的微小区域,引起表面显微硬度的下降。

4 结论

1) 常规深滚和纵-扭复合振动超声深滚加工工艺均会提高 6061-T651 铝合金材料表面显微硬度,但是提高程度不同。

2) 在相同的深滚工艺参数下,纵-扭复合振动超声深滚加工后的表面显微硬度总是高于常规深滚加工。

3) 在设定工艺参数内,纵-扭复合振动超声深滚加工时,表面显微硬度随静压力和工件转速的增大先增大后减小,随进给量的增大先减小后增大再减小;常规深滚加工时,表面显微硬度与静压力近似呈线性关系,且随工件转速的增大先增大后减小,随进给量的增大一直减小。

综上所述,纵-扭复合振动超声深滚加工工艺能更有效地提高 6061-T651 铝合金的表面强化效果。

参考文献

- [1] 朱荆璞. 金属表面强化技术的发展趋势[J]. 中国机械工程, 1987, 8(3): 37—44.
ZHU Jing-pu. The Development Trend of Metal Surface Strengthening Technology[J]. China Mechanical Engineering, 1987, 8(3): 37—44.
- [2] DAI K, SHAWB L. Comparison between Shot Peening and Surface Nanocrystallization and Hardening Processes[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 463: 46—53.
- [3] 赵婧, 夏伟, 李风雷, 等. 滚压表面强化机理的研究现状与进展[J]. 工具技术, 2010, 44(11): 3—7.
ZHAO Jing, XIA Wei, LI Feng-lei, et al. Research Statua and Development of Burnishing Mechanism[J]. Tool Engineering, 2010, 44(11): 3—7.
- [4] 高玉魁, 殷源发, 李向斌, 等. 喷丸强化对 0Cr13Ni8M02Al 钢疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 2001 (12): 46—48.
GAO Yu-kui, YIN Yuan-fa, LI Xiang-bin, et al. Influence of Shot Peening on Fatigue Property for 0Cr13Ni8M02Al Steel[J]. Materials Engineering, 2001 (12): 46—48.
- [5] 吕光义, 朱有利, 李礼, 等. 超声深滚对 TC4 钛合金表面形貌和表面粗糙度的影响[J]. 中国表面工程, 2007, 20(4): 38—41.
LYU Guang-yi, ZHU You-li, LI Li, et al. The Effect of Ultrasonic Deep Rolling(UDR) on Surface Topography and Sur-

- face Roughness of TC4 Titanium Alloy[J]. China Surface Engineering, 2007, 20(4): 38—41.
- [6] 王义, 鲍绍箕. 超声振动挤压强化工艺研究-强化方法及其工艺效果[J]. 电加工, 1991, (3): 13—17.
WANG Yi, BAO Shao-ji. Study of Ultrasonic Vibration Extrusion Strengthening- the Reinforcement Method and its effect[J]. electro machining, 1991, (3): 13—17.
- [7] 郑建新, 罗傲梅, 刘传绍. 超声表面强化技术的研究进展[J]. 制造技术与机床, 2012(10): 32—36.
ZHENG Jian-xin, LUO Ao-mei, LIU Chuan-shao. Development of Ultrasonic Surface Enhancement Technique[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2012(10): 32—36.
- [8] TAO N R, SUI M L, LU J, et al. Surface Nanocrystallization of Iron Induced by Ultrasonic Shot Peening[J]. Nanostructured Materials, 1999, 11(4): 433—440.
- [9] DING Jin-fu, E Shi-ju, ZHANG Ke-hua, et al. The Characterization and Experiment Research of Ultrasonic Rolling Machining for Column Surface[J]. Advanced Materials Research, 2010, 102/104: 559—563.
- [10] MEI Guang-yi, ZHANG Ke-hua, DING Jin-fu. Study on the Effect of Ultrasonic Surface Rolling Processing Parameters on the Surface Roughness of Q345 Hydraulic Prop[J]. Advanced Materials Research, 2010, 102/104: 591—594.
- [11] WANG Ting, WANG Dong-po, LIU Gang, et al. Investigations on the Nanocrystallization of 40Cr Using Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 1824—1829.
- [12] BOHDAN N Morduk, GEORGIY I Prokopenko. Ultrasonic Impact Peening for the Surface Properties' Management[J]. Sound and Vibration, 2007, 308(3/4/5): 855—866.
- [13] MA Chun-xiang, SHAMOTO E, MORIWAKI T, et al. Study of Machining Accuracy in Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting[J]. Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(12/13): 1305—1310.
- [14] 梁志强, 王西彬, 吴勇波, 等. 单晶硅二维超声振动辅助磨削技术的实现[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 192—198.
LIANG Zhi-qiang, WANG Xi-bin, WU Yong-bo, et al. Development of a Two-dimensional Ultrasonic Vibration Assisted Grinding Technique of Monocrystal Silicon[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 192—198.
- [15] 皮钧, 徐西鹏. 纵扭共振超声铣削研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1163—1169.
PI Jun, XU Xi-peng. Research on Longitudinal-torsional Resonance Ultrasonic Milling (LTRUM) [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(10): 1163—1169.
- [16] LIANG Zhi-qiang, WU Yong-bo, WANG Xi-bin, et al. A New Two-dimensional Ultrasonic Assisted Grinding (2D-UAG) Method and Its Fundamental Performance in Monocrystal Silicon Machining[J]. Machine Tools and Manufacture, 2010, 50: 728—736.
- [17] DEHOFF R R, BABU S S. Characterization of Interfacial Microstructures in 3003 Aluminum Alloy Blocks Fabricated by Ultrasonic Additive Manufacturing[J]. Acta Materialia, 2010, 58: 4305—4315.
- [18] NIE K B, WANG X J, WU K, et al. Development of SiCp/AZ91 Magnesium Matrix Nanocomposites Using Ultrasonic Vibration[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 540: 123—129.
- [19] LUO Ao-mei, ZHENG Jian-xin, WU Hao-qiong. Kinematics analysis on ultrasonic deep rolling with longitudinal-torsional vibration[J]. Advanced Materials Research, 2013, 630: 148—152.
-
- (上接第30页)
- [66] LIU Y B, WANG Q S, MA Z, et al. Anti-ablation Properties of MoSi₂-W Multi-layer Coating System Deposited by Atmospheric Plasma Spray[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(S2): 1017—1021.
- [67] ZMII V I, PATOKIN A P, KHREBTOW V L, et al. Molybdenum-based Oxidation-resistant MoSi₂-Al₂O₃ and WSi₂-Al₂O₃ Coatings[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2008, 47(11/12): 639—697.
- [68] FEI Xiao-ai, NIU Ya-ran, JI Heng, et al. Oxidation Behavior of Al₂O₃ Reinforced MoSi₂ Composite Coatings Fabricated by Vacuum Plasma Spraying[J]. Ceramics International, 2010, 36(7): 2235—2239.
- [69] 常春, 余大江, 刘少斌, 等. Mo/Al₂O₃ 材料的微观结构和抗腐蚀性[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(8): 1124—1128.
- CHANG Chun, YU Da-jiang, LIU Shao-bin, et al. Microstructures and Corrosion Resistance of Molybdenum-Alumina Materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(8): 1124—1128.
- [70] WU Zhi-hong, ZHOU Wan-cheng, LUO Fa, et al. Effect of MoSi₂ Content on Dielectric and Mechanical Properties of MoSi₂/Al₂O₃ Composite Coatings[J]. Transaction of Non-ferrous Metals Society of China, 2012, 22(1): 111—116.
- [71] 李闻. 钼粉等离子喷涂镍铬合金力学性能研究[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2011.
LI Wen. Plasma Spray of Molybdenum Powder Mechanical Properties of Nickel-Chromium Alloy [D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2011.