

超声波技术在塑性成形方面的应用

Application of Ultrasonic Technology in Plastic Forming Processes

中航工业北京航空制造工程研究所
塑性成形技术航空科技重点实验室
数字化塑性成形技术及装备北京市重点实验室

侯红亮
韩玉杰 牛涛 曲海涛



侯红亮

工学博士, 研究员, 博士生导师, 基础院金属基复合材料技术首席专家, 哈尔滨工程大学兼职教授, 中国机械工程学会塑性工程分会理事, 《塑性工程学报》《模具技术》《精密成形工程》编委。

近年来, 随着塑性加工技术的不断发展, 多学科的交叉融合成为一种必然趋势, 研究表明, 电、磁、超声等特种能场对于金属材料的加工性能有显著的改善作用, 对金属材料施加

超声波对提高产品质量、降低生产成本、提高生产效率等具有很大的潜在能力, 在航空航天、汽车工业、武器装备等领域有广泛的应用。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.048

瞬时高能场将会改变本身的微观物理本质以及宏观变形特征。将电、磁、超声等特种能场引入到塑性成形过程为解决传统塑性成形技术关键问题提供了新思路, 这种复合加工工艺得到国内外学者的广泛关注。

由于超声振动不但能降低材料变形力, 提高材料内部的原子活性, 还能大幅度提高产品的质量和材料成形极限, 可以显著改善材料的加工性能, 因此超声波振动不但有利于普通金属材料的塑性加工, 还有利于一些难加工材料的成形, 这可能成为一些特殊新材料的最有效加工途径^[1]。超声波对提高产品质量、降低生产成本、提高生产效率等具有很大的潜在

能力^[2-6], 在航空航天、汽车工业、武器装备等领域有广泛的应用前景。

超声波振动系统

超声波振动系统主要包括超声波电源、换能器、变幅杆以及加工头等部分组成, 是超声设备的核心部分。随着超声技术基础研究以及不同加工形式的需求, 通过对振动系统中振动形式、工作方式的设计优化, 振动形式不断开发, 主要包括: 纵向振动、弯曲振动、“纵一弯”振动、扭转振动以及椭圆振动。

首先, 超声波电源将普通交流电信号转换成频率不小于 20 kHz 的高频电振信号, 通过换能器将电信号转

换成频率相同的机械振动,根据其原理不同,可以分为压电式和磁致伸缩式两种。功率超声中换能器主要采用转换效率更高的压电陶瓷。通过控制不同电信号的相位得到相应的机械波形。换能器中产生的超声振动通过变幅杆方法振幅,获得所需的超声振动,通过不同形式的加工头与待加工接触实现成形。超声振动系统由轴承支撑,并提供加工过程中需要的静压力。

超声固结技术

超声固结技术是在超声焊接技术的基础上发展起来的,是一种先进的材料与结构制造方法,该技术主要基于金属超声波振动塑性加工原理,以金属箔材为原材料,利用超声波的高频振动,使层与层之间的接触界面在静压力和弹性振动能量的共同作用下,通过摩擦、温升等作用促进界面之间金属原子无限接近、产生结合与扩散,实现层与层之间的固态冶金结合^[7-8]。该项技术突破了传统超声焊接面积针对点、线的限制,实现了金属材料面与面之间的固结。同时该技术具有高度的可设计性,一方面结合计算机数控铣削技术,实现三维金属零件的制造与加工,另一方面通过不同材料的匹配,能够制备出单一材料无法实现的高性能结构。经

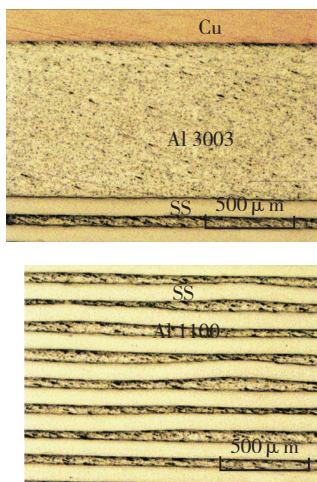


图1 超声固结界面微观形貌

过10多年的发展,超声波固结制造技术理论体系逐渐完善,工艺相对成熟,作为一种高性能复合材料制备的新方法,在制备金属层状复合材料结构、功能梯度材料结构、纤维增强金属基复合材料结构、智能金属复合材料结构等方面潜力巨大^[9-15]。

金属层状材料的叠层堆积制造是金属超声波固结技术的重要应用之一,各国研究者对此展开了广泛而深入的研究,其中美国犹他州立大学、英国拉夫堡大学研究成果较为系统,通过不锈钢箔材、黄铜箔材、铝合金箔材以及镍合金箔材的超声固结工艺试验研究固结参数对界面质量的影响^[16-17]。研究显示,通过适当的温度和工艺参数可获得接近100%的线性焊接密度。不同材料超声波固结的连接界面如图1所示。针对钛铝层状复合材料的特殊性能,研究不同热处理对界面的影响规律,美国陆军研究实验室 Sano 等^[18]在基体3003铝合金上通过超声波固结获得了 Cp-Ti/Al 层状材料,并通过热处理在界面处形成了 TiAl₃ 反应层,如图2所示。此外,Obielodan^[19]等的研究成果也证实了合理的热处理工艺可以改善界面结合质量,在此基础上,作者还开展了超声波固结加工制造双金属轻质结构的探索性研究。以上研究成果充分证明了超声波固结加工制造双金属结构或复合材料结构具有广泛的应用前景。

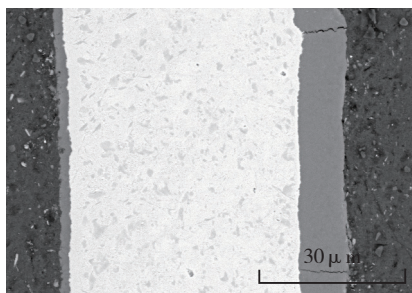


图2 Ti/Al层状材料热处理界面

在纤维增强复合材料制备方面, Li 和 Soar 研究了采用超声波固结工艺向铝合金基体材料中嵌入 SiC 纤

维^[20]。研究发现,在纤维的周围发生了程度较大的塑性变形并且基本没有孔洞产生,界面连接质量较高。同时,在靠近纤维的位置基体材料的加工硬化程度要远高于距纤维较远的位置。Yang、Janaki Ram 及 Stucker 研究了超声固结工艺向多种不同基体材料嵌入纤维的界面形貌^[21],如图3所示。研究发现超声波固结过程中,界面处氧化膜的清除以及新鲜金属之间的紧密连接是超声波固结过程中实现界面结合的关键。在利用超声波固结技术成功制备纤维增强金属复合材料的基础上,通过优化改善工艺参数已经成功的利用该技术向金属基体中埋入光感材料、记忆合金和功能元器件等,制备金属基智能材料。欧美发达国家均已经成功制备出了具有特定功能的智能材料,美国 Solidica 公司成功的将光感纤维埋入铝合金中制备出性能优良的光感纤维复合材料。美国犹他州立大学以及英国拉夫堡大学利用超声波固结手段将记忆合金埋入基体材料中,并对其结合机理与微观组织进行了研究。

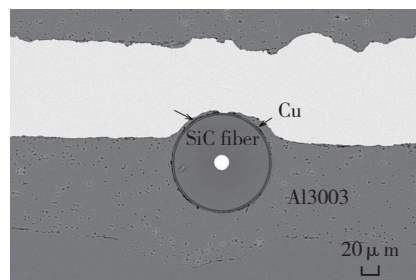
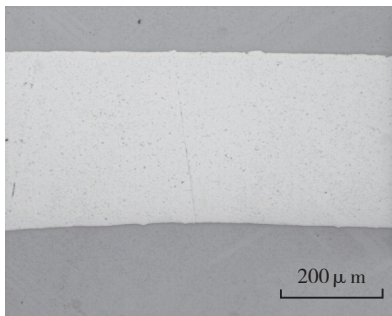
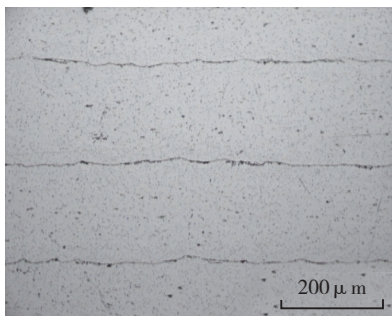


图3 纤维增强材料微观组织

目前,由于超声波固结材料、技术和设备的特殊作用及其在军工领域的应用背景,国外对该项技术进行了技术封锁,我国在超声波固结制造方面的研究工作刚刚起步。仅在超声波焊接方面开展了一定的研究工作,对钛合金、铝合金、铜合金的超声焊接工艺积累了大量的经验。随着国内超声焊接技术的不断发展,在压电陶瓷制备、大功率换能器制造以及



(a) Al/Al 层状界面



(b) Ti/Al 层状界面

图4 超声波固结材料微观形貌

超声振动系统设计等关键技术方面取得了长足的进步,并且已经率先研发出来超声波固结原型样机,北京航空制造工程研究所在相关项目的支持下已经开展了超声波固结原子扩散、界面结合机理的研究工作,已经通过不同种金属箔材对其工艺适应性进行了初步的评价,并获得了不同工艺参数下的微观形貌,如图4所示,为后续工作的开展奠定了基础。

超声表面强化技术

表面强化技术是指通过冲击或以一定的压力接触在材料或零件的表面,使表面层发生弹塑性变形并产生残余压应力、加工硬化和组织亚结构细化等有利作用的表面改性技术。新型表面强化技术是基于超声能场辅助作用下的表面改性技术,包括超声冲击强化、超声喷丸强化等。超声冲击强化^[22-26]是利用20~30kHz频率下的多针头振动,作用于试样表面。从1998年开始,超声冲击处理技术被冠以Esonix UIT商标,并在美国获得了很好的商业发展。如今超声冲击处理技术已应用于航天、采

矿、海洋工程、汽车等众多工业领域,针对结构的疲劳、抗腐蚀性能。超声喷丸强化是利用超声波使弹丸产生机械振动,从而驱动弹丸对工件进行喷丸处理的工艺。超声喷丸技术^[27-30]在美国和欧洲等国家的航空部门早已经有了广泛的应用及报道,如法国SONATS公司于1996年开始超声喷丸技术的研究,目前已开发出一套超声喷丸技术(STRESSONICc)及其相应的超声波喷丸设备,并大量应用于航空航天、造船及汽车行业等。

大量实验证实,通过超声冲击处理可以使焊接接头的疲劳寿命延长5~10倍,疲劳极限提高40%~200%。Kudryavtsev的试验结果表面,对于低碳钢焊接接头超声冲击处理可将 $N=2 \times 10^6$ 循环次数下的疲劳极限提高50%。Gunther等人研究了超声冲击处理对在役焊接接头的修复,发现超声冲击处理对在役焊接结构的性能也有很大的提高,如图5所示。Tao等^[31]对纯铁退火处理后进行超声喷丸,发现纯铁表面纳米层最小晶粒细至10nm,并对晶粒细化的机制

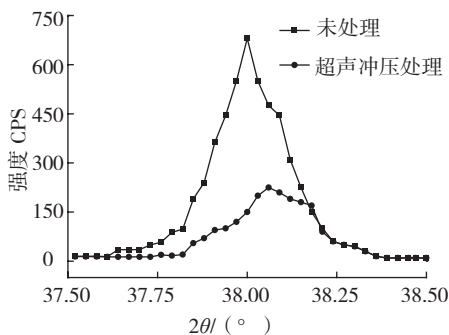


图5 超声冲击强化对比

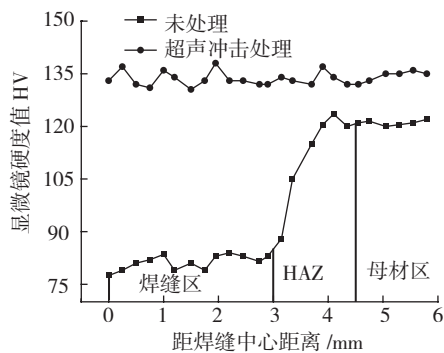


图6 超声冲击强化

进行了探究。Franchim等人通过研究提出了金属材料在超声喷丸作用下,其表面残余应力计算的理论模型。Guagliano等人对超声喷丸对工件微裂纹扩展的阻碍作用进行了三维数值模拟。Hassani^[32]应用赫兹弹性理论和弹塑性模型,采用一维解析法对由超声喷丸产生的残余应力进行了初步的预测。

国内尹丹青^[33]等使用超声疲劳试验机,对Q235、Q345焊接接头的超长寿命进行研究,发现循环次数超过 10^7 甚至 10^9 仍未发现疲劳极限,经超声冲击处理后S-N曲线的斜率m由焊态的3(循环次数低于 10^7)、5(循环次数高于 10^7)增至10(整个寿命范围),如图6所示。北京航空制造工程研究所针对超声喷丸技术开展了大量研究工作,其采用超声喷丸对焊接机身整体壁板进行喷丸校形。

超声辅助旋压技术

旋压成形是近代金属压力加工中新兴的一种特殊的成形技术,该技术综合了锻造、拉伸、挤压、弯曲、环轧、横轧和滚压等工艺特点,是一种实现材料近净成形的少无切削加工的先进塑性成形方法。旋压成形是一种典型的连续局部塑性成形技术,具有变形条件好、制品性能高、尺寸精度高、材料利用率高、结构完整性好、制品范围广、可实现大长径比回转体零件成形等优点。大量的研究均表明,在塑性加工中引入超声振动,能够降低成形力、提高成形极限、减小模具与工件之间的摩擦力。关于其作用机理,目前公认的观点是体积效应、表面效应和旋锻效应等。超声振动辅助旋压成形技术与常规旋压相比,具有旋压力小、设备能力要求低、成形工件表面质量好等优点。

Rasoli等人^[34]基于对普通车床的改造,沿主轴方向在芯模与主轴连接之间安装了超声波振动系统,在旋

压过程中使芯模带动工件产生轴向超声振动。基于该装置开展了 7050 铝合金和 304 不锈钢的超声旋压试验研究,结果表明超声振动不仅可降低旋压力,而且具有抑制起皱、改善润滑条件,提高管件表面质量、强化表面硬度等作用。在施加了 0.11mm/rev 和 0.2mm/rev 的超声波振动后,在不同减薄率下轴向力分别降低 10%~25% 和 10%~15%。同时旋后工件表面粗糙度 R_a 分别比无超声振动的减低 0.2 和 0.1,表面硬度分别比无超声振动的提高 10HB 和 5HB 以上。作者并对超声振动辅助旋压成形机理进行了分析,认为这是由于超声振动引起的热效应和超声振动对润滑与摩擦的改变引起的。

中南大学李新和、何霞辉、杨飞、王哲等人^[35-38]通过数值模拟和理论计算的方法对换能器、变幅杆等超声振动系统进行了设计和计算,并基于对普通车床的改造,将超声振动系统安装在旋轮上,在旋压过程中使旋轮产生轴向超声振动。基于此装置开展了 LY12 铝合金的超声振动旋压试验研究,结果表明,超声振动旋压的表面质量优于普通旋压,最终旋得的筒体长度大于普通旋压。超声振动旋压比普通旋压的旋压力降低 30% 以上,如图 7 所示。

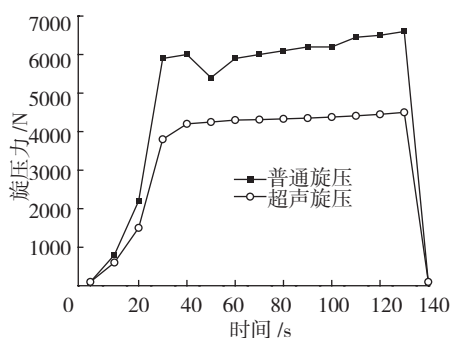


图7 超声振动旋压力

中航工业北京航空制造工程研究所自 20 世纪 60 年代率先在国内开展旋压工艺与设备研究,在旋压变形理论、成形工艺和专用设备研制等方面积累了丰富的经验,研发能力和水

平一直处于国内领先地位。开发了 SY 系列强力旋压机、PX 系列普通旋压机、PD 系列皮带轮专用旋压机、旗杆灯杆专用旋压机 40 余台,这些旋压设备广泛应用于航空航天、兵器、化工等领域。旋压成形的铝合金、高温合金零件在导弹、火箭、发动机上得到了成功的应用^[39]。

展望

超声波振动在塑性成形技术中是一种非常有效的辅助手段,具有独特地特点,能够降低材料的塑性变形力、提高其变形极限、改善产品质量并降低加工能耗。目前,国外的相关基础研究与应用已经取得了初步的进展,国内也已开展相关工艺与机理研究工作。但是,该项技术在实际应用方面还存在着一些问题,制约了其进一步的推广应用,随着超声理论体系的不断完善、压电陶瓷性能逐步提高、新材料以及现代测控技术研究的不断深入,以超声固结、超声表面强化以及超声旋压为代表的新型塑性成形技术将在汽车工业、航空航天、船舶工业以及武器装备等领域发挥重要的作用。

参考文献

- [1] 张士宏. 金属材料的超声塑性加工. 金属成形工艺, 1994 (3): 7-11.
- [2] 曹凤国, 张勤俭. 超声加工技术. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] Komarov S V, Kuwabar A M, Abramov O V. High power ultrasonics in pyrometallurgy: current status and recent development. ISIJ International, 2005, 45(12): 1765-1782.
- [4] Eskin G I. Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (Cavitation) melt treatment of light alloys. Ultrasonics Sonochemistry, 2001(8): 319-325.
- [5] 赵君文, 戴光泽, 韩靖, 等. 功率超声在金属焊接中应用的研究进展. 金属铸锻焊技术, 2012, 41(9): 144-150.
- [6] 陈思忠. 我国功率超声技术近况与应用进展. 声学技术, 2002, 21(1-2): 46-49.
- [7] 朱政强, 吴宗辉, 范静辉. 超声波金属焊接的研究现状与展望. 焊接技术, 2010, 39(12): 1-6.
- [8] HE Xiaohua, SHI Huiji, ZHANG Yuduo, et al. In-situ scanning electron microscopy studies of small fatigue crack growth in ultrasonic consolidation bonded aluminum 2024 laminated structure. Materials Letters, 2013(112): 47-50.
- [9] Friel R J, Harris R A. Ultrasonic additive manufacturing—a hybrid production process for novel functional products// The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining(ISEM), Procedia CIRP, 2013: 35-40.
- [10] Christopher D, Hopkins B S. Development and characterization of optimum process parameters for metallic composites made by ultrasonic consolidation[D]. Logan, Utah: Dissertation of Utah State University, 2010: 4-100.
- [11] Sriraman M R, Matt Gonser, Hiromichi T Fujii, et al. Thermal transients during processing of materials by very high power ultrasonic additive manufacturing. Journal of Materials Processing Technology, 2011(211): 1650-1657.
- [12] Foster D R, Dapino M J, Babu S S. Elastic constants of ultrasonic additive manufactured Al 3003-H18. Ultrasonics, 2013 (53): 211-218.
- [13] Mariani E, Ghassemieh E. Microstructure evolution of 6061 O al alloy during ultrasonic consolidation: An insight from electron backscatter diffraction. Acta Materialia, 2010(58): 2492-2503.
- [14] Ryan Hahnen, Marcelo J Dapino. NiTi - Al interface strength in ultrasonic additive manufacturing composites. Composites: Part B, 2014 (59): 101-108.
- [15] Kong C Y, Soar R C, Dickens P M. Ultrasonic consolidation for embedding SMA fibres within aluminium matrices. Composite Structures, 2004 (66): 421-427.
- [16] Obielodana J O, Stucker B E, et al. Optimization of the shear strengths of ultrasonically consolidated Ti/Al 3003 dual-material structures. Journal of Materials Processing Technology, 2011(211): 988-995.
- [17] YANG Y, Janaki Ram G D, Stucker B. Bond formation and fiber embedment during ultrasonic consolidation. Journal of Materials Processing Technology, 2009(209): 4915-4924.
- [18] Sano Tomoko, Catalano James, Casem Daniel, et al. Microstructural and mechanical behavior characterization of ultrasonically

(下转第 57 页)

提高综合性能的要求,为下一代武器装备结构制造提供解决思路。

钣金成形技术在弹体结构中发展应用的趋势

导弹等武器装备性能要求的不断提升,推动着弹体结构材料及其先进制造技术的快速发展。钣金成形技术在导弹弹体结构中的进一步扩大应用需重视并开展如下工作:

(1) 弹体轻量化是材料轻量化与结构轻量化综合作用的结果。合理选材,并在材料基础上开展先进成形技术研究,将工艺结构设计理念向前引入产品总体设计阶段,向后延伸至典型结构性能验证阶段,从结构设计—制造—测试全环闭合,才能真正意义上实现弹体结构重量与效益的最大化;

(2) 重点开展导弹舱段、进气道等复杂薄壁构件整体成形技术研究,通过 SPF/DB、SPF/DB+ 焊接组合工艺技术,突破原材料幅面及成形设备平台尺寸限制,解决大型、超大型整体结构件成形技术难题,充分发挥 SPF/DB 结构刚性大、重量轻、整体性强的技术优势,为大型弹体轻量化结构设计制造提供解决思路;

(3) 深入开展高温合金、高温钛合金、金属间化合物等高强度、高模量、耐高温、耐腐蚀材料及其先进钣金成形技术研究,拓展材料体系,实现工程应用,满足未来高超声速武器装备的发展需要;

(4) 同步开展弹翼、舱段等主承力钣金成形构件质量检测与性能评估技术研究,建立相应的工艺结构设计准则及性能测试、考核评估标准,为钣金成形技术在导弹弹体结构中的工程化应用奠定基础。

参考文献

[1] 黄晓燕,刘波.先进树脂基复合材料在巡航导弹与战机中的应用工艺与材料.飞机导弹,2011(8):87-92.

[2] 余旭东,葛金玉,段德高,等.导弹现代结构设计.北京:国防工业出版社,2007.

[3] 邱惠中,江辉.国外巡航导弹用材料及工艺.宇航材料及工艺,1998(4):9-14.

[4] 葛鹏,赵永庆,周廉.从导弹战斗部用钛合金的研究看材料的开发.材料导报,2003,17(12):26-30.

[5] 曹运红.铸造技术在飞航导弹上的应用.飞航导弹,1996(4):49-56.

[6] 朱文海.导弹弹体结构材料的分析研究.系统工程与电子技术,1992(11):73-79.

[7] 肖军,苏力宏.空射导弹弹体用树脂基复合材料的应用和进展.航空兵器,2001(5):35-38.

(责编 叶枫)

(上接第 51 页)

consolidated titanium-aluminium laminates. TMS Annual Meeting, Vol.1, TMS2008-137th Annual Meeting and Exhibition Supplemental Proceedings: Materials Processing and Properties,vs, 2008: 417-422.

[19] John Obielodan, Brent Stucker. A fabrication methodology for dual-material engineering structures using ultrasonic additive manufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014(70): 277-284.

[20] LI Dezhi, Rupert C Soar. Plastic flow and work hardening of Al alloy matrices during ultrasonic consolidation fibre embedding process. Materials Science and Engineering A, 2008 (498):421-429.

[21] Yang Y ,Janaki Ram G D , Stucker B E. Bond formation and fiber embedment during ultrasonic consolidation. Journal of Materials Processing Technology, 2009(209): 4915 - 4924.

[22] Daavari M,Sadough Vanini S A . Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment. Materials Letters, 2015(139): 462-466.

[23] LI Guodong , LI Zhouxin , LI Hui, et al. Development of an Er-doped Mg-Zn-Al solder by ultrasonic treatment and its joint property. Materials Letters, 2014(136): 59-62.

[24] Sougata Roy, John W Fisher, Ben T Yen. Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment(UIT). International Journal of Fatigue, 2003(25): 1239-1247.

[25] LIU Yang ,WANG Dongpo , DENG Caiyan, et al. Influence of re-ultrasonic impact treatment on fatigue behaviors of S690QL welded joint. International Journal of Fatigue, 2014(66):

155-160.

[26] YANG Xinjun, LING Xiang,ZHOU Jianxin . Optimization of the fatigue resistance of AISi304 stainless steel by ultrasonic impact treatment. International Journal of Fatigue, 2014(61): 28-38.

[27] Marteau J , Bigerelle M, Mazeran P E,et al. Relation between roughness and processing conditions of AISi 316L stainless steel treated by ultrasonic shot peening. Tribology International, 2015, 82: 319-329.

[28] Marteau J , Bigerelle M. Relation between surface hardening and roughness induced by ultrasonic shot peening. Tribology International, 2015, 83: 105-113.

[29] YIN Fei , HUA Lin, WANG Xiaoming,et al. Numerical modeling and experimental approach for surface morphology evaluation during ultrasonic shot peening. Computational Materials Science, 2014(92): 28-35.

[30] Badreddine J, Remy S,Micoulaud Mt,et al. CAD based model of ultrasonic shot peening for complex industrial parts. Advances in Engineering Software, 2014(76): 31-42.

[31] Al-Hassani S T S , Duncan J L, Johnson W. On the parameters of the magnetic forming process. Journal of Mechanical Engineering Science, 1974, 16(1):1-9.

[32] ZHANG T,WANG D P ,WANG Y , et al . Surface alloying method of ultrasonic shot peening on iron surface. Applied Surface Science, 2013 (265): 671-676.

[33] 尹丹青,王东坡,刘哲. Q235 钢和 16Mn 钢接头超长寿命疲劳行为及疲劳寿命设计. 天津大学学报, 2009, 42(6): 513-517.

[34] Rasoli M A, Abdullah A, Farzin M. Influence of ultrasonic vibrations on tube spinning process. Journal of Materials Processing Technology, 2012(212): 1443-1452.

[35] 王哲. 超声旋压材料流变规律及机理研究. 中南大学, 2012.

[36] 何霞辉. 超声旋压装置设计与研究. 中南大学, 2012.

[37] 杨飞. 超声旋压工具头的结构设计及谐振性能研究. 中南大学, 2013.

[38] 卜佳南,张旭,李新和. 超声旋压变幅器的设计与分析. 中国机械工程, 2014, (25)15: 2004-2008.

[39] 侯红亮,余肖放,王耀奇. 国内旋压设备及其相关技术的发展与现状. 锻压设备与制造技术, 2009(12):16-19.

(责编 叶枫)