

# 超声波喷丸技术的研究进展

刘峰<sup>1,2</sup>, 鲁世红<sup>1</sup>, 张炜<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学机电工程学院, 南京 210016;

2. 常州工学院机械与车辆工程学院, 常州 213002;

3. 中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

**[摘要]** 对近年来获得高度关注的超声波喷丸技术进行了介绍, 超声波喷丸技术能实现材料表面纳米化、强化金属材料性能, 并能实现板料的成形或校形, 该技术因方便操作、重复性好、无污染、噪音小, 在许多领域得到广泛应用。综述了超声波喷丸技术目前国内外研究和应用现状, 对表面强化机理、表面纳米化及喷丸成形的研究做了重点介绍, 在归纳总结的基础上, 对超声波喷丸技术的发展及研究方向进行了展望。

**关键词:** 超声波喷丸; 喷丸强化; 喷丸成形与校形; 表面改性

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.14.024



刘峰

常州工学院讲师, 南京航空航天大学博士研究生。主要从事超声喷丸技术、数字化设计与制造等方面的教学、科研工作, 编撰教材两部, 发表论文 10 余篇。

表层材料发生剧烈塑性变形, 使其微观组织得到极大细化(可至纳米级), 同时在材料内部产生高幅的残余压应力分布, 从而实现工件表面强化或弯曲变形的一种先进喷丸工艺<sup>[1-2]</sup>。

由于超声振动能够提高材料内部原子活性, 降低其变形抗力, 从而达到提高产品质量和材料成形极限的目的<sup>[3]</sup>, 近年来随着大功率超声波冲击设备制造技术的日益成熟, 超声波喷丸技术得到了国内外学者越来越多的关注。该技术因其设备成本低、适用性广、工艺环保性及节能等优点, 在航空航天、船舶、汽车及武器装备等制造领域有着广泛的应用前景, 目前在欧美一些国家的航空航天部门已得到广泛应用<sup>[4-6]</sup>。

## 超声波喷丸强化技术

超声波喷丸强化技术主要是利用弹丸或撞针对金属表面进行重复撞击, 在金属表层引发剧烈的弹塑性变形, 从而产生残余压应力、加工硬化和组织结构细化等, 进而达到提高金属零件强度、疲劳寿命等目的, 包

括超声波喷丸强化和超声波冲击强化。该技术已比较成熟, 在国内外均有广泛的研究报道及应用, 当前超声波喷丸强化技术的研究主要集中在两个方面: 一是焊接接头抗疲劳强化, 二是材料表面改性, 特别是材料表面纳米化及成形机理等方面的研究。

### 1 焊接接头抗疲劳强化

在焊接过程中, 存在集中加热、快速冷却及添加不同焊材, 这些因素均使焊接接头成为构件的薄弱环节, 因此如何改善焊接接头疲劳性能就成为许多学者的研究重点。而超声波喷丸强化技术能够大幅提高焊接接头的疲劳强度, 增加疲劳寿命, 在国内外焊接领域受到普遍重视。2003 年的国际 IIW 焊接结构疲劳委员会年度会议中, 超声波喷丸强化技术就已成为研讨热点。国内天津大学、上海交通大学、华东船舶工业学院、装甲兵工程学院和北京钢铁研究总院等多家高校及科研院所, 分别就超声波喷丸强化技术在焊接接头强化方面展开了应用研究。

超声波喷丸技术是以高频(一般在 20kHz 以上)、功率高达数千瓦的超声波为能量源, 利用换能器转换为同频的机械振动纵波, 经变幅杆放大, 驱使弹丸或撞针将高能量密度的机械能冲击波作用于工件表面, 促使

饶德林<sup>[7]</sup>等以 Q345 钢结构箱型柱为对象,研究了超声波喷丸工艺对焊接接头残余应力的影响,残余应力测量结果表明,在焊缝表面一定深度下产生压应力,最高可至 -134MPa,在焊趾表面产生压应力也会导致焊缝残余应力的降低。张新华<sup>[8]</sup>等分别以 7075-T651 铝合金母材及搅拌摩擦焊焊接接头为对象,采用超声波喷丸工艺进行焊后处理,试验结果表明,7075-T651 铝合金母材及搅拌摩擦焊焊接接头试件的疲劳性能得到显著改善,疲劳寿命最高可延长 3~7 倍。

为研究焊接接头超声波喷丸强化后疲劳寿命的计算方法,Shimanuki<sup>[9]</sup>等研究了 UIT 在不同应力比下经超声波喷丸处理的焊接接头疲劳寿命。Yildirim<sup>[10]</sup>等在文献分析统计基础上,对不同形式焊接接头进行处理,发现在特定条件下,屈服强度每增加 200MPa,超声波喷丸强化处理后的疲劳强度提高 12.5%。国内尹丹青<sup>[11]</sup>等对 Q235、Q345 焊接接头的超长寿命进行研究,发现经超声冲击处理后  $S-N$  曲线的斜率  $m$  由焊态的 3 (循环次数低于  $10^7$ ) 增至 10 (整个寿命范围)。

综合以上研究可知,超声波喷丸处理后的焊接接头主要优点有:(1)能够改变焊趾几何形状,消除焊趾表面微裂纹等缺陷,从而抑制疲劳裂纹萌生;(2)能够降低焊接残余应力,产生有益的残余压应力,从而改变焊缝附近应力场,提高焊接接头处的疲劳强度。但在以下两个方面的研究较少:一是超声喷丸强化后疲劳寿命的计算模型和方法研究;二是超声喷丸强化对焊缝微观组织的作用机理研究。

## 2 材料表面改性

金属材料的主要失效原因是疲劳、腐蚀和磨损,均始于材料表面,超声波喷丸强化技术可以细化组织结构,在金属表面产生更大、更深的残余

压应力层,从而抑制金属表面裂纹的萌生并减缓裂纹扩展,能显著提高金属表层疲劳极限与防腐能力,在材料表面改性领域得到了国内外高度关注,特别是在利用超声波喷丸强化技术实现材料表面纳米化、晶粒细化机理及纳米化对材料性能的影响等方面,开展了大量的研究工作<sup>[12-16]</sup>。目前已在铁、低碳钢、不锈钢及纯钛等金属表面实现纳米尺寸晶体的制备。

Mordyuk<sup>[17-18]</sup>等采用超声波喷丸强化 AISI321 不锈钢,对喷丸后表层金属的微观组织、金相、硬度等进行了研究,结果表明,表层金属的纳米组织应变为 0.42 时为  $\epsilon$  马氏体,高应变时为奥氏体和  $\alpha$  马氏体组织的组合;距表层 30 $\mu\text{m}$  深处发现大小约 60nm 的奥氏体和马氏体的混合组织;超声喷丸强化能大幅提高其硬度和硬化层深度。Tao<sup>[19]</sup>等对退火处理后的纯铁进行超声波喷丸处理,在纯铁表面纳米层获得了 10nm 的最小晶粒。Dai<sup>[20]</sup>等发现纯钛经高能喷丸处理后,其极限拉伸强度和屈服强度分别提高了 27% 和 40%,而延展性降低了 64%。冯淦<sup>[21]</sup>等在普通 20 钢表面成功制备出厚度约 10 $\mu\text{m}$  的纳米结构层和 10nm 的最小晶粒。曹小建<sup>[22]</sup>等在 A6061-T6 铝合金超声纳米化处理后,发现表面粗糙度、表面硬度及表面残余压应力均有显著提高,并获得了等轴状取向随机分布

的纳米晶组织。

关于表面纳米化对材料疲劳性能、抗腐蚀能力等的影响是当前一个研究热点。Toshifumi<sup>[23]</sup>等研究了在高周期循环疲劳下超声波喷丸对 304 不锈钢的影响,结果表明,温度为 537K 时,初始裂纹的萌生主要源于表面硬化和温度升高造成的材料软化。Závodská<sup>[24]</sup>等研究了喷丸处理后 40NiCrMo7 合金钢的疲劳强度,试验表明,喷丸处理提高了该合金钢在高频疲劳情况下的疲劳强度。Gibson<sup>[25]</sup>等研究了喷丸处理对镍基超耐热不锈钢 720 高温腐蚀和疲劳腐蚀的影响。张聪慧<sup>[26]</sup>等对表面纳米化 TC4 的疲劳性能做了研究,结果表明,超声波喷丸处理试样疲劳极限有所提高,疲劳极限最大提高了 10.64%;试样表面易萌生裂纹源,且发现疲劳断口由未处理的河流状变为处理后的波浪状。陆晓峰<sup>[27]</sup>等研究了表面纳米化对 Cr5Mo 钢流动加速腐蚀性能的影响,试验表明,表面纳米化能够明显提高试样表层显微硬度,并随处理时间,显微硬度越大,变形层厚度越大,抗流动加速腐蚀性能也增强。缪伟<sup>[28]</sup>采用超声波喷丸对 2024 铝合金表面进行强化,结果表明超声波喷丸显著提高材料抗腐蚀能力,腐蚀后材料硬度下降,粗糙度增大,如图 1 所示。相对较短的腐蚀时间对试样疲劳寿命影响不大;

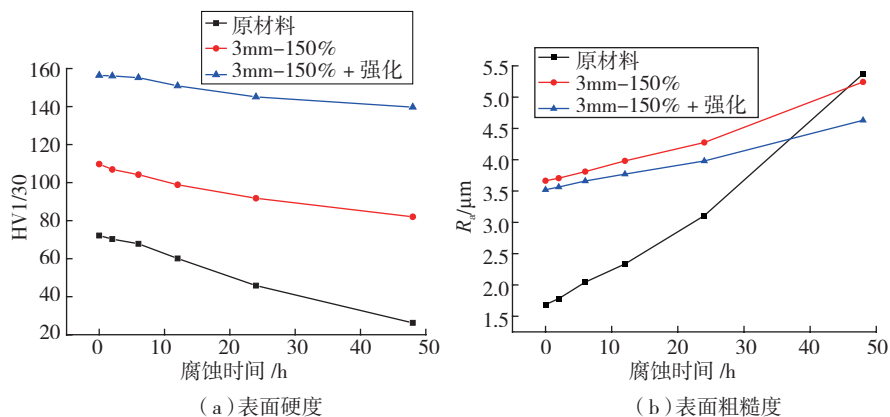


图1 试样不同腐蚀时间下的表面硬度和表面粗糙度

Fig.1 Surface hardness and roughness of samples under different corrosion time

腐蚀时间较长时,残余应力无法抑制裂纹的极速扩展,试样迅速断裂。

以上研究工作表明,超声波喷丸强化对材料抗疲劳性能强化受多重因素的影响,这些因素又与材料本身、超声波喷丸强化工艺及使用环境等有关,应具体问题具体分析。另外,针对腐蚀和低频疲劳及高频疲劳等方面国内研究较少,同时还应开展超声波喷丸实现材料纳米化后,对材料性能影响的进一步研究<sup>[29-30]</sup>。

### 超声波喷丸成形与校形技术

在大功率超声波设备制造技术日益完善的今天,超声波喷丸成形与校形技术应运而生,它是利用高能超声波冲击撞针或弹丸,冲击金属材料表面,使材料表面发生剧烈的塑性变形,同时在其内部产生高幅残余应力分布,为平衡材料内部残余应力,从而实现板料弯曲变形。相比于超声波喷丸强化技术,超声波喷丸成形与校形技术相关研究较少。

法国 SONATS 公司自开始超声波喷丸技术研究,在超声波喷丸自动化方面做了大量研究,并将之应用于自动化超声波喷丸校形,对机翼蒙皮局部变形进行了矫形处理,如图 2 所示,空客公司采用超声波喷丸对焊接机身整体壁板进行喷丸校形<sup>[31]</sup>。Polytechnique<sup>[32]</sup>等采用超声波喷丸校形技术对涡轮发动机空心轴进行校形研究,结果表明,采用超声波喷丸校形技术能够实现空心轴校形,但同时也会使其表面粗糙度和圆度增大;超声波喷丸校形技术能显著降低空心轴的径向跳动,使其从

0.007mm 降低到 0.001mm。

目前国内机械校形技术仍然是校形方面的首选,超声波喷丸成形与校形方面的研究则相对较少。北京航空制造工程研究所针对超声波喷丸校形开展了相关研究,利用超声波喷丸实现了焊接机身整体壁板的校形。南京航空航天大学超声波喷丸技术课题组近年来开展了超声波喷丸成形与校形技术的研究工作。鲁世红<sup>[33]</sup>等利用有限元方法分析了飞机带孔壁板超声波喷丸成形时产生的孔区异性及应力集中等问题。史学刚<sup>[34-35]</sup>等研究了超声波喷丸成形工艺,分析了喷丸成形轨迹、成形轨迹间距、电流强度、撞针直径以及进给速度等工艺参数对铝合金板料成形曲率半径的影响,并对超声波喷丸成形的铝合金制件表面完整性做了分析研究。刘存<sup>[36]</sup>等研究了喷丸处理对加筋壁板的压损强度和局部屈曲载荷的影响,并提出了一种定量评估喷丸处理影响的方法。以上都是针对铝合金板材而言,超声喷丸工艺参数对其他金属的影响方面尚需进一步研究。陈星<sup>[37]</sup>等研究了利用有限元法分析超声波喷丸工艺参数对冲击坑形状和尺寸的影响,与 Nobuyuki 等人用 ANSYS 软件所模拟出的结果比较吻合。但超声喷丸的物理过程有着高度非线性,在高频状态下精确建立有限元模型非常困难,为提高有限元的模拟精度,还需进一步研究。

自 1999 年 SONATS 开发出第一套超声波喷丸设备及其相应的超声波喷丸工艺以来,该技术已被推广应

用于航空航天、造船及汽车等制造领域。SONATS 公司与 Integrity Testing Laboratory 公司同时提出为数控超声波喷丸成形的技术引入机械手臂,率先推进了超声波喷丸成形和校形设备的数控化。南京航空航天大学也自主研发了超声波喷丸成形与校形数控设备,如图 3 所示<sup>[38-39]</sup>。



图3 超声波数控成形与校形装置  
Fig.3 Ultrasonic CNC forming and straightening device

### 结束语

同国外发达国家相比,我国在超声波喷丸技术领域的起步比较晚,总结起来主要有以下几个方面需要进一步研究:

(1) 继续深入研究不同金属材料的纳米化微观成形机理、纳米晶粒的高温稳定性及超声波表面处理对材料抗应力腐蚀、电化学腐蚀等性能的影响。

(2) 考虑材料表面完整性和残余应力等多因素的情况下,深入研究不同条件下表面纳米层疲劳裂纹萌生和延长寿命的计算模型和方法。

(3) 继续深入研究超声波喷丸工艺参数如喷丸成形轨迹、成形轨迹间距、电流强度等参数,对不同金属的影响,为早日建立超声波喷丸技术工艺规划方法和准则做准备。

(4) 在弹丸或撞针和材料高应变率下的材料属性、接触和摩擦条件等因素的情况下,继续研究有限元模型如何精确建立超声波喷丸的有限

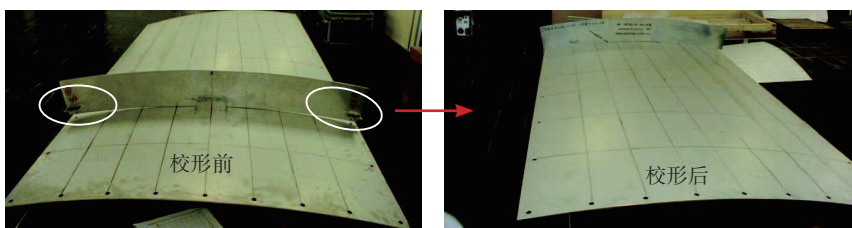


图2 SONATS公司超声波喷丸校形零件前后对照

Fig.2 Comparison of part before and after ultrasonic shot peening straightening by SONATS

元模型,以提高有限元模拟准确性。

超声波喷丸技术已得到国内外的普遍关注,取得了令人瞩目的研究成果,随着超声波喷丸技术的理论和应用研究的不断深入,在航空、航天、船舶等领域必将得到广泛应用。

### 参考文献

- [1] 高琳. 高能超声波喷丸板料成形技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- GAO Lin. Research of high-energy ultrasonic shot peening technology in sheet metal forming[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [2] 陈星. 超声波喷丸校形中的应用研究[D]. 南京航空航天大学, 2013.
- CHEN Xing. Research of ultrasonic shot peening technology in straightening[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [3] 张士宏. 金属材料的超声塑性加工[J]. 精密成形工程, 1994(3):102-106.
- ZHANG Shihong. The ultrasonic metal plastic working[J]. Netshape Forming Engineering, 1994(3):102-106.
- [4] 闫林林. 超声喷丸技术及其应用[J]. 制造技术与机床, 2010(6):29-31.
- YAN Linlin. The technology and application of ultrasonic shot peening[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2010(6):29-31.
- [5] 滕诚信, 左松, 赵琨, 等. 焊接接头表面改性的研究进展[J]. 表面技术, 2014(4):149-157.
- TENG Chengxin, ZUO Song, ZHAO Kun, et al. Progress in surface modification of welded joints[J]. Surface Technology, 2014(4):149-157.
- [6] 侯红亮, 韩玉杰, 牛涛, 等. 超声波技术在塑性成形方面的应用[J]. 航空制造技术, 2015(17):48-51.
- HOU Hongliang, HAN Yujie, NIU Tao, et al. Application of ultrasonic technology in plastic forming processes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(17):48-51.
- [7] 饶德林, 陈立功, 倪纯珍, 等. 超声冲击对焊接结构残余应力的影响[J]. 焊接学报, 2005,26(4):48-50.
- RAO Delin, CHEN Ligong, NI Chunzhen, et al. Effect of ultrasonic impact treatment on residual stress of welded structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005,26(4):48-50.
- [8] 张新华, 曾元松, 王东坡. 超声喷丸强化搅拌摩擦焊接接头性能[J]. 航空制造技术, 2010(1):87-90.
- ZHANG Xinhua, ZENG Yuansong, WANG Dongpo. Properties of friction stir welding joint by ultrasonic shot peening[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(1):87-90.
- [9] SHIMANUKI H, OKAWA H. Effect of stress ratio on the enhancement of fatigue strength in high performance steel welded joints by ultrasonic impact treatment[J]. Int. J. of Steel Structures, 2013,13(1):155-161.
- [10] YILDIRIM H C, MARQUIS G B. Fatigue strength improvement factors for high strength steel welded joints treated by high frequency mechanical impact[J]. International Journal of Fatigue, 2012,44(2):168-176.
- [11] 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[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2009,42(6):513-517.
- YIN Danqing, WANG Dongpo, LIU Zhe. Ultra-long life fatigue behavior and fatigue life design of joint between Q235 and steel 16Mn[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2009,42(6):513-517.
- [12] SHAW L L, TIAN J W, ORTIZ A L, et al. A direct comparison in the fatigue resistance enhanced by surface severe plastic deformation and shot peening in a C-2000 superalloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2010,527(4/5):986-994.
- [13] 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 Jianxin, LUO Aomei, LIU Chuanshao. Development of ultrasonic surface enhancement technique[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(10):32-36.
- [14] 解瑞军, 邱小明, 陈芙蓉, 等. 超声冲击实现 7A52 铝合金焊接接头表面纳米化[J]. 焊接学报, 2014,35(12):35-38.
- XIE Ruijun, QIU Xiaoming, CHEN Furong, et al. Surface nanocrystallization of 7A52 aluminum alloy welded joint using ultrasonic impact treatment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014,35(12):35-38.
- [15] 刘宝胜. 镁合金表面纳米化显微结构和晶粒细化机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- LIU Baosheng. Microstructure and grain refinement mechanism of surface nanostructure magnesium alloys[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.
- [16] MORDYUK B N, PROKOPENKO G I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007,308(3-5):855-866.
- [17] MORDYUK B N, PROKOPENKO G I, VASYLYEV M A, et al. Effect of structure evolution induced by ultrasonic peening on the corrosion behavior of AISI-321 stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2007,458(1/2):253-261.
- [18] MORDYUK B N, MILMAN Y V, IEFIMOV M O, et al. Characterization of ultrasonically peened and laser-shock peened surface layers of AISI 321 stainless steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2008,202(19):4875-4883.
- [19] 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.
- [20] DAI S, ZHU Y, HUANG Z. Microstructure and tensile behaviour of pure titanium produced after high-energy shot peening[J/OL]. Materials Science & Technology. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02670836.2015.1121598?journalCode=ymst20>,2016-02-08.
- [21] 冯淦, 石连捷, 吕坚, 等. 低碳钢超声喷丸表面纳米化的研究[J]. 金属学报, 2000,36(3):300-303.
- FENG Gan, SHI Lianjie, LÜ Jian, et al. Investigation of surface nanocrystallization of a low carbon steel induced by ultrasonic shot peening[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000,36(3):300-303.
- [22] 曹小建, 李璨柱, 苏昌敏, 等. A6061-T6 铝合金经超声表面纳米化后的显微组织和性能[J]. 机械工程材料, 2014,38(10):74-92.
- CAO Xiaojian, LI Canzhu, SU Changmin, et al. Microstructure and properties of A6061-T6 aluminium alloy after ultrasonic nanocrystal surface modification[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014,38(10):74-92.
- [23] TOSHIFUMI K, YOSHIHIKO U, NORIHIKO H, et al. Effect of ultrasonic shot peening on high cycle fatigue behavior in type 304 stainless steel at elevated temperature[J]. Journal of the Society of Materials Science Japan, 2016,65(4):325-330.
- [24] ZÁVODSKÁ D, GUAGLIANO M, BOKŮVKA O, et al. Fatigue resistance of low alloy steel after shot peening[J]. Materials Today Proceedings, 2016,3(4):1220-1225.
- [25] GIBSON G J, PERKINS K M, GRAY S, et al. Influence of shot peening on high-temperature corrosion and corrosion-fatigue of

- nickel based superalloy 720Li[J]. Materials at High Temperatures, 2016,33(3):225-233.
- [26] 张聪慧, 解钢, 宋薇, 等. 表面纳米化 TC4 疲劳性能研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2015,44(4):865-870.
- ZHANG Conghui, XIE Gang, SONG Wei, et al. Fatigue performance of surface nanocrystallized TC4[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015,44(4):865-870.
- [27] 陆晓峰, 廖明刚, 朱晓磊, 等. 表面纳米化处理对 Cr5Mo 钢流动加速腐蚀性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2014,38(5):66-70.
- LU Xiaofeng, LIAO Minggang, ZHU Xiaolei, et al. Effect of surface nanocrystallization on flow-accelerated-corrosion performance of Cr5Mo steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014,38(5):66-70.
- [28] 缪伟. 2024 铝合金超声波喷丸表面性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- MIAO Wei. Research of ultrasonic shot peening on 2024 aluminum alloy surface properties[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [29] 樊志罡, 朱其芳, 马通达. 表面纳米化技术对金属材料性能影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015,26(3):265-268.
- FAN Zhigang, ZHU Qifang, MA Tongda. Metal material performance of surface nanocrystallized technology[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015,26(3):265-268.
- [30] 朱有利, 王燕礼, 边飞龙, 等. 金属材料超声表面强化技术的研究与应用进展 [J]. 机械工程学报, 2014,50(20):35-45.
- ZHU Youli, WANG Yanli, BIAN Feilong, et al. Progresses on research and application of metal ultrasonic surface enhancement technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014,50(20):35-45.
- [31] MIAO H Y, LAROSE S, PERRON C, et al. An analytical approach to relate shot peening parameters to Almen intensity[J]. Surface & Coatings Technology, 2010,205:2055-2066.
- [32] Polytechnique E. Shaft straightness and concentricity in process correction[M]. Ottawa: Library and Archives Canada, 2004:145-148.
- [33] 鲁世红, 成书民, 刘朝训, 等. 基于有限元仿真的带孔板超声波喷丸成型工艺 [J]. 中国表面工程, 2015,28(2):109-113.
- LU Shihong, CHENG Shuming, LIU Chaoxun, et al. Ultrasonic peening forming process in perforated plate based on finite element simulation[J]. China Surface Engineering, 2015,28(2):109-113.
- [34] 史学刚, 鲁世红, 张炜. 铝合金超声波喷丸成形制件表面完整性研究 [J]. 中国机械工程, 2013,24(22):3100-3104.
- SHI Xuegang, LU Shihong, ZHANG Wei. Study of surface integrity on ultrasonic peening aluminium alloy sheet[J]. China Mechanical Engineering, 2013,24(22):3100-3104.
- [35] 史学刚. 曲面零件超声波喷丸成形技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- SHI Xuegang. Research of ultrasonic shot peening forming technology in curved surface parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [36] 刘存, 李健, 赵谋周. 喷丸处理对机翼加筋壁板压缩强度的影响 [J]. 中国表面工程, 2016,29(1):111-117.
- LIU Cun, LI Jian, ZHAO Mouzhou. Influences of shot peening on compressive strength of wing stiffened panel[J]. China Surface Engineering, 2016,29(1):111-117.
- [37] 陈星, 鲁世红, 高国强. 基于有限元仿真的喷丸工艺参数对冲击坑形状和尺寸的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2013,31(2):292-297.
- CHEN Xing, LU Shihong, GAO Guoqiang. Impaction of shot peening process parameters to dent shape and dent size by dynamic finite element analysis[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2013,31(2):292-297.
- [38] 鲁世红, 朱一枫, 刘朝训, 等. 高能超声波喷丸成形与校形技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2013(11):45-47.
- LU Shihong, ZHU Yifeng, LIU Chaoxun, et al. Research progress of high-energy ultrasonic peening forming[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(11):45-47.
- [39] 曾元松, 黄遐, 李志强. 先进喷丸成形技术及其应用与发展 [J]. 塑性工程学报, 2006,13(3):23-29.
- ZENG Yuansong, HUANG Xia, LI Zhiqiang. The application and development of advanced shot peen forming technology[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006,13(3):23-29.

## Research Progress of Ultrasonic Shot Peening Technology

LIU Feng<sup>1,2</sup>, LU Shihong<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>3</sup>

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2.School of Mechanical and Vehicle Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;

3.AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**[ABSTRACT]** The rapid development and application of ultrasonic shot peening in recent years are reviewed. Surface nanocrystallization, improvement of metal material performance and sheet metal forming are finished by the ultrasonic shot peening. This kind of technology has been widely applied in many fields due to its convenient operation, sound repeatability, no pollution and little noise. This paper induces the research status and engineering applications of the ultrasonic shot peening technology at home and abroad, and then the strengthening mechanism, surface nanocrystallization and peening forming are introduced emphatically. Finally, the development and research trend of the ultrasonic shot peening technology are also prospected.

**Keywords:** Ultrasonic shot peening (USP); Peening strengthening; Peening forming & straightening; Surface modification

(责编 李丹)