超声波喷丸表面强化技术研究与应用进展

鲁世红[1]，吴天睿[1]，高国强[2]，缪　伟[1]，张新华[3]

（1. 南京航空航天大学机电学院，南京 210016；2. 中航工业西安飞机工业（集团）有限责任公司，西安 710089；
3. 中航工业北京航空制造工程研究所，北京 100024）

[摘要] 超声波喷丸强化技术近年来已经在多种类零件的制造工艺中引起高度关注。超声波喷丸强化技术能够对被处理材料实现表面改性，强化其物理、化学特性，其设备结构紧凑，可并入生产线上，方便操作、重复性好、无污染、噪音小，便携式的超声波喷丸设备在表面强化技术领域有巨大优势。综述了超声喷丸表面强化技术目前国内外研究和应用现状，论述了超声波喷丸表面强化技术的强化机理和技术特点，重点介绍了强化件残余应力场研究以及表面纳米化研究，总结了超声波喷丸表面强化的关键技术和难点，超声波喷丸表面强化技术有着广阔的应用前景。

关键词： 超声波喷丸强化；疲劳寿命；残余应力；表面纳米化

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.04.024

鲁世红

教授、博士生导师。从事飞机钣金成形技术、塑性与超塑性成形技术、新型加工工艺与系统方面的教学/科研工作。主持了国家、省部级以及产学研等多个项目，获国家科学技术进步二等奖1项，省部级科技进步一等奖1项、二等奖1项、三等奖3项，在国内外学术期刊和会议上发表40余篇学术论文。

表面强化技术是一种主要用来提高金属件疲劳性能的表面改性技术，已在工业领域得到广阔的应用。它利用冲击力或挤压力等形式的机械作用使金属材料近表面区域产生局部的弹塑性变形，导致在材料表面产生了残余压应力，并使材料显微结构发生改变，增强了其抵抗疲劳裂纹萌生和扩展的能力。

超声波喷丸强化技术（Ultrasonic Shot Peening，USP）是目前最具有前景的金属材料冷加工表面强化处理工艺之一，它不但克服了传统喷丸的不足，且强化效果优于传统喷丸，有更好的工艺可控性[1-2]。这项技术目前在很多工业领域普遍应用，例如航空航天、汽车、铁路和桥梁结构[3-6]，这些领域所需的材料需要有很高的强度、疲劳寿命、磨损和腐蚀抗性。在这项工艺中，超声波能被转化为撞针或者弹丸对金属材料表面的高速冲击，使金属表面产生较大的塑性变形，有害残余拉应力得以有效消除[7]，并在金属表面形成残余压应力层；发生表面形变强化，并导致表面晶粒的细化和微观组织的改善；而且喷丸残余应力的存在使裂纹闭合效应增强，有效抑制了疲劳裂纹的扩展。因此，超声波喷丸强化技术可以增加金属表面显微硬度和强度，提高腐蚀抗性以及疲劳性能。

超声波喷丸强化技术目前已在喷丸强化和金属表面改性领域得到了广泛应用。Sonats 公司较早开展了超声波喷丸设备开发和应用方面研究的工作[8]。Troyes 技术大学和中科院金属研究所率先进行了 USP 金属表面纳米化的研究[9]。波兰电子材料技术研究所使用超声波喷丸技术对氧化锆和氧化铝陶瓷进行了表面处理，结果显示超声波喷丸在其受喷金属表面产生了最高达 2.4GPa 的残余压应力[10-11]，从而提高了受喷材料的抗裂性能。在 Renault 汽车工业集团，Snecma、Volvo 和 Airbus 等国际航空航天工业集团及核电、火电等能源工业领域的零件上，超声波喷丸强化技术已经得到应用。在美国

* 基金项目：国家自然科学基金（51175257）。

空军直升机结构强度和疲劳寿命提升计划上，Sonats 公司的超声波喷丸强化技术也得到了应用[12-13]。目前在世界范围内，由于其各方面的优越性，超声波喷丸强化技术已经具有很大的研究价值且应用前景广阔。

超声波喷丸强化技术

1 基本原理

超声波喷丸强化技术原理如图 1 所示，超声波喷丸技术是以超声波振动为动力源，通过换能器将超声波振荡信号（频率在 20kHz）转换成机械振动信号，再通过变幅杆将纵波机械振动的微小振幅放大至 20~80 μm，带动安装在振动工具头上的撞针或者喷丸室中的弹丸对靶材表面进行高速撞击，导致靶材表面产生塑性变形（形成弹坑）。材料表面层的微观组织由于这种剧烈的塑性变形而得到极大的碎化（可达纳米级别），产生密集、均匀且稳定的位错增殖。与此同时，材料内部诱导产生了高幅的残余压应力分布。

2 技术特点

超声波喷丸强化技术的优点主要体现在以下几个方面：

（1）残余压应力的值较高。喷丸强化效果主要由残余压应力的值和残余压应力层深度两个主要因素决定，相比较而言，超声波喷丸试件的残余压应力值要比传统喷丸产生的残余压应力值高很多，残余压应力层的深度也要高很多。

（2）表面粗糙度较小。传统喷丸强化工艺中，所使用的弹丸尺寸一般比较小，丸粒流的喷射速度较高，而且由于撞击过程中会伴随着弹丸的破碎，所以受喷工件表面的粗糙度会比较大，较大的表面粗糙度又相对容易导致零件产生疲劳失效和应力腐蚀，其结果就是大大降低了传统喷丸的强化效果。而超声波喷丸使用的喷丸介质不仅有与传统喷丸相似的丸粒，还有尖端曲率半径较小的撞针。同样在使用弹丸作为喷丸介质的情况下，所使用的弹丸与传统喷丸相比，通常选用硬度更高的轴承钢或钨碳钢等材料，弹丸的直径要大出不少，而且表面光洁度和圆度也高出不少。在超声波喷丸的喷丸室内弹丸的速度方向是完全随机的，使得弹丸对受喷金属表面的撞击总体更为均匀。以上这些导致超声波喷丸处理后的工件表面粗糙度值比传统喷丸小很多[14]。而使用撞针作为喷丸介质时，由于其可控性更好，喷打更为均匀，表面粗糙度则更小。2024 铝合金在 1.2mm 撞针直径以及 50% 覆盖率条件下进行超声波喷丸强化，在显微镜下观察到的表面形貌如图 2 所示。

（3）设备功耗更低，便携性好。超声波喷丸克服了传统气动喷丸附属设备庞大的缺点，由于采用超声波能做动力源，其设备结构简单、紧凑，有效降低了功耗。图 3 是便携式超声喷丸设备的总体外观，由于其体积小，便携性好，适合在现场进行维修维护等工作。

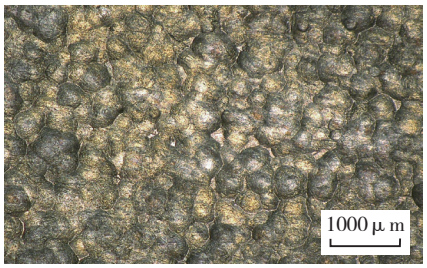

图2 超声波喷丸强化件表面形貌

Fig.2 Surface morphology of USP hardened part

（4）工作环境绿色无污染。当使用丸粒作为超声波喷丸的喷丸介质时，其喷丸室在工作时始终处于封闭状态，而且其丸粒用量较少，丸粒破损率也极低，非常有效地避免了传统干式喷丸法由于丸粒破碎引起的现场粉尘污染问题，而且撞针式超声波喷丸则完全不用考虑粉尘问题，从而实现了绿色喷丸强化，改善喷丸工作现场环境。

图3 便携式超声波喷丸设备

Fig.3 Portable USP device

（5）工艺可控性更为良好。由于弹丸的用量要少很多，与传统喷丸

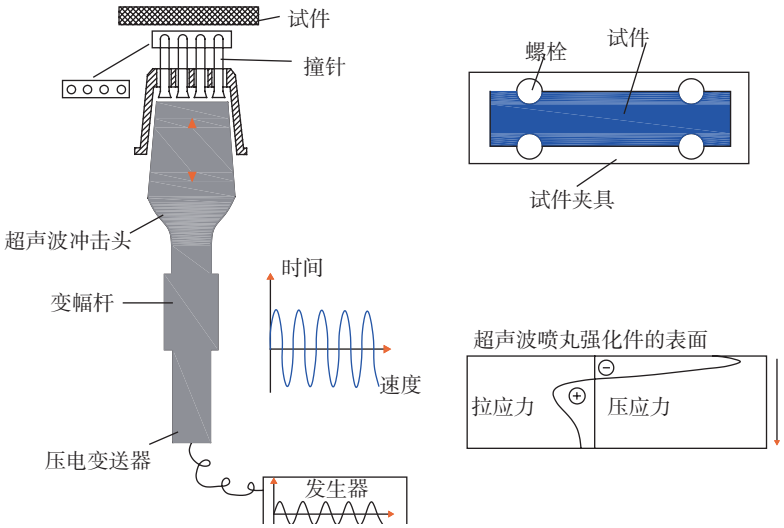

图1 超声波喷丸原理图

Fig.1 Principle diagram of ultrasonic shot peening

相比，超声波喷丸弹丸循环利用的周期更长，更换弹丸更为简便快速，也无需加设丸粒分离装置。超声喷丸强化过程受控工艺参数更少，也更容易实现精确控制。这些参数包括：喷丸时间、丸粒量、丸粒直径（撞针直径）、冲击振幅、工件的进给速度。

受喷表面残余应力场研究

目前，国内外对喷丸残余应力场的研究主要是采用 XRD 技术研究超声波喷丸参数对残余应力场分布的影响。国外 Rodopoulos 等 [15] 采用 XRD 技术定量研究了摩擦搅拌焊铝合金壁板的残余应力分布。

南京航空航天大学郭超亚、鲁世红 [16] 采用 XRD 技术研究了采用不同喷丸工艺参数对 7055-T7751 铝合金进行超声波喷丸处理，其表面残余应力的分布情况，定量研究了喷丸工艺参数对残余应力场分布的影响规律。结果表明，在一定范围内超声波喷丸残余应力场的深度和最大残余压应力值会随着冲击振幅和撞针直径的增加而增大。所获得的最佳工艺参数使得最大残余压应力分布深度相比初始状态提高了 1.31 倍以上，最大残余压应力值达到了初始状态的 6.8 倍和 8.14 倍。

表面纳米化研究

超声波喷丸表面纳米化，是由于超声波喷丸能够导致金属材料表面发生剧烈的塑性变形，在材料表面生成了纳米晶粒或者超细晶粒结构，从而大大提高了材料的表面性能。但是超声波喷丸强化处理是否一定能够导致材料表面纳米化，主要是由金属材料本身与其工艺参数决定的。国外一些学者的研究已经表明，使用超声波喷丸强化技术可以在金属表面产生厚度大约 30~50μm 的超细晶粒层 [17-18]。国内外在 USP 强化技术的研究和应用方面侧重点有所不同，在日本和一些欧美国家，主要侧重于表面强化技术的研究和应用。国内学者则更偏向于超声波喷丸材料表面纳米化以及表面改性。

目前，国内外在超声喷丸表面纳米化技术对于受喷材料疲劳性能作用方面的认识尚未统一。研究表明，一方面 USP 表面纳米化可以抑制塑形变形并保持稳定的纳米结构层，阻碍位错的运动，抑制疲劳裂纹的萌生与扩展；另一方面由于增加了表面粗糙度，生成了表面微裂纹，晶界处原子活性很高，钝化膜不稳定等原因，USP 表面纳米化后材料的耐蚀性能有所降低。而且超声波喷丸强化对材料疲劳性能的作用还要受其他诸多因素的共同影响。 Shaw、Tian 等研究了超声波喷丸处理对镍基高温合金 C-2000 疲劳极限的影响，研究表面超声波喷丸处理对 C-2000 疲劳极限的改善程度比传统喷丸处理高出很多，这是由残余压应力、表面纳米化和加工硬化共同作用所导致的 [19]， Nalla 和 Nikitin 等学者的相关研究也得出了类似的结论。

关键技术分析

超声波喷丸表面强化技术具有相当大的研究价值和发展潜力，跟有些国外发达国家相比，我国在超声波喷丸设备研制和工艺技术研究方面均起步较晚，总结起来有以下关键技术需要克服：

（1）超声波喷丸强化工艺参数的优化。超声波喷丸过程非常复杂，涉及到机械学、声学、振动学、电学等诸多学科，要想取得最佳喷丸效能和最佳强化效果，应综合考虑各个喷丸工艺参数的影响，对喷丸工艺参数进行优化。如撞针式超声波喷丸发生器频率及工作功率、撞针直径及数量、撞针分布密度、撞针振幅、喷丸时间等，如何建立诸多喷丸工艺参数之间的联系，优化超声波喷丸强化总体工艺设计，具有很大的研究意义。

（2）超声波喷丸的力学模型的创建。无论是撞针式或是弹丸式超声波喷丸，撞针或高速冲击作用的力学模型创建和验证一直以来都是技术难点，撞针或丸粒对靶材表面冲击力的理论计算非常重要，这对于将生产工艺控制和仿真计算相联系有着直接的决定意义。

（3）残余压应力、加工硬化、表面纳米化对表面性能影响的联合作用研究。由于表面纳米化对表面性能的影响不是单方面的，而且受残余压应力、加工硬化等因素的影响，通过研究它们之间的联合作用方式和机理，对优化超声波喷丸表面强化工艺具有重要意义。另外，由于受喷工件在腐蚀环境下的应用非常普遍，还需要进一步研究 USP 表面纳米化处理对腐蚀疲劳和应力腐蚀性能的影响。

（4）超声波喷丸过程数值模拟模型的精确建立。喷丸过程是一定数量的撞针或者大量丸粒不断冲击工件表面，对于撞针式喷丸，工件表面受到各个撞针的动载作用，撞针冲击靶材的冲击力大小及其方向可能会不同；而对于弹丸式喷丸而言则更为复杂，弹丸的冲击速度、入射角度、冲击区域都具有随机性，整个超声波喷丸的物理过程非常复杂，建立精确的工件超声波喷丸模型非常难。另外，由于在高应变率下，撞针、丸粒和受喷材料的材料属性很难得到，弹丸或撞针与靶材的接触和摩擦也很难确定，使得有限元模拟的准确性很难得到保证。

结束语

目前，法国 Sonats 公司是现今国际上唯一持有原创性超声波喷丸表面强化技术的企业。我国在超声波喷丸表面强化技术的研究以及应用上起步相对较晚，如果能尽快提升我国这一领域的研究和应用能力，将有助于加强我国金属表面强化这一领域的总体技术水平。在理论上，超声

波喷丸强化的机理有待深入研究，各项喷丸工艺参数对表面强化效果的影响以及它们之间的相关性需要进一步的分析，残余应力场、加工硬化和表面纳米化对表面强化的联合作用效果和机理尚不明确，超声波喷丸强化精确的数值模型有待建立与优化。

参 考 文 献

[1] YOSHIHIRO W, KANESHI H, MITSURU H. Effect of ultrasonic shot peening on fatigue strength of high strength steel[C]// Proceedings of ICSP 8th, Munich, 2002 ;305-310.

[2] KANESHI H. Searching for the most suitable condition and the suggestion of each application in ultrasonic shot peening[C]// Proceedings of ICSP 8th, Munich, 2002:32-36.

[3] Nascimento M P, Souza R C, Pigatin W L, et al. Effects of surface treatments on the fatigue strength of AISI 4340 aeronautical steel[J]. International Journal of Fatigue,2001,23(7): 607-618.

[4] KIRKHOPE K, BELL R, CARON L.Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 2: application to ship structures[J], Mar. Struct, 1999,12(7): 477-496.

[5] DEGUCHI T , MOURI M, HARA J. Fatigue strength improvement for ship structures by ultrasonic peening[J]. Mar. Sci. Technol. 2012,17 (3):360-369.

[6] Martinez L L, Barsoum Z, Paradowska A. State-of-the-art: fatigue life extension of offshore installations[C]//ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2012: 9-20.

[7] Kudryavtsev Y, Kleiman J. Application of ultrasonic peening for fatigue life improvement of automotive welded wheels[J]. International Institute of Welding. IIW Document XIII-2075-05. 2005:9.

[8] PILÉ C, FRANÇOIS M, RETRAINT D, et al. Modeling of the ultrasonic shot peening process[J]. Materials Science Forum, 2005,490-491:67-72.

[9] DAI K, SHAW L. Comparison between shot peening and surface nano-crystallization and hardening processes[J]. Mater. Sci. and Eng,2007,463(1/2):46-53.

[10] TOMASZEWSKI H, GODWOD K, DIDUSZKO R, et al. Modification of alumina cermics properities by stressonic shot peening[J]. Materials Science Forum,2005, 490/491:509-514.

[11] TOMASZEWSKI H, DOBRZANSKI F S, OSTACHOWSKI P, et al. Shot peening in structural ceramics[J]. Ceramic Materials, 2010,62(3):266-271.

[12] DUCHAZEAUBENEIX J M. Sonats: past, present and future[J]. The Shot Peener, 2007,20(1):32-40.

[13] WHITE D. Requirements for life cycle management of U.S. Army helicopter strctural integrity[C]//USAF ASIP Conf.,California,2007:4-6.

[14] YOSHIHIRO W, KANESHI H, MITSURU H. Effect of ultrasonic shot peening on fatigue strength of high strength steel[C]// Proceedings of ICSP 8th . Munich, 2002 ;305-310.

[15] RODOPOULOS C A, PANTELAKIS S G, PAPADOPOULOS M P. The effect of ultrasonic impact treatment on the fatigue resistance of friction stir welded panels [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(9): 1248-1257.

[16] 郭超亚，鲁世红．铝合金超声喷丸残余应力场 [J]. 中国表面工程，2014, 27(2): 75-80.

GUO C Y , LU S H. Residual stress of ultrasonic shot peened aluminum alloy[J].China Surface Engineering,2014, 27(2): 75-80.

[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], Mater. Sci. Eng: A, 2007,458 (1/2): 253-261.

[18] DARLING K A , TSCHOPP M A , ROBERTS A J, et al. Enhancing grain re nement in polycrystalline materials using surface mechanical attrition treatment at cryogenic temperatures[J]. Scr. Mater, 2013,68(6): 461-464.

[19] 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.

Research and Application of Ultrasonic Shot Peening Surface Hardening Technology

LU Shihong[1], WU Tianrui[1], GAO Guoqiang[2], MIU Wei[1], ZHANG Xinhua[3]

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016，China; 2. AVIC Xi'an Aircraft Industry(Group) Company LTD., Xi'an 710089, China; 3.Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute， Beijing 100024，China)

[ABSTRACT] Ultrasonic shot peening (USP) has recently had signicantly more attention in several manufacturing processes. USP modifies the surface of a material and enhances the mechanical and/or chemical properties, and has compact device structure,convenient operation, good repeatability, no pollution, little noise. Portable ultrasonic peening equipment has great advantages in the field of surface strengthening technology.The current review paper has been devoted to introduce this technology for its underlying mechanisms and effects.The research and application of ultrasonic shot peening technology is summarized. The strengthening mechanism, technical characteristics, research and analysis of the residual stress field and the key technology of surface nano analysis are emphatically introduced. Key technolopies and diffculties of ultrasonic shot peening surface hardening technology are summarized,and its prospect is wide.

Keywords: Ultrasonic shot peening; Fatigue life; Residual stress; Surface nano crystallization （责编 叶枫）