DOI: 10.3901/JME.2019.09.120

空化水喷丸中空泡云动态演变及靶距优化研究*

李富柱 谭中锐 陈立宇 李瑞涛 许桢英 王 匀
(江苏大学机械工程学院 镇江 212013)

摘要: 空化水喷丸是利用空化水射流中空泡云溃灭的能量冲击金属零件表面,使其表面产生强化效果的一种新工艺,但目前靶距选择缺少依据。利用高速相机开展了空化水射流试验,采用帧间差分法(Frame-difference method, FDM)分析了空泡云动态演变规律,得出空泡集中溃灭范围。同时,以 2A12 铝合金为例,基于不同直径 d 的喷嘴,进行空化水喷丸验证试验,研究了不同靶距对材料表面性能的作用规律。结果表明,空泡云具有明显的初生-发展-脱落-溃灭的周期性,空泡集中溃灭范围为 $60d \sim 75d$;空化水喷丸的最佳靶距为 $60d \sim 67.5d$,但当 $d=1.8$ mm、靶距为 120 mm 时产生过喷现象;提出了根据靶距空化水射流可分为液滴作用区、混合作用区和空化作用区。

关键词: 空化水喷丸;空泡云;动态变化;FDM;靶距;喷嘴直径

中图分类号: TG178

Study on Dynamic Evolution of Cavitation Clouds and Optimization of Standoff Distance in Water Cavitation Peening

LI Fuzhu TAN Zhongrui CHEN Liyu LI Ruitao XU Zhenying WANG Yun
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract: Water cavitation peening is a new surface strengthening method with the energy released from cavitation clouds collapse, which are generated in cavitation water jet to impact the surface of metal parts. However, there is currently no basis for the standoff distance selection. The cavitation water jet experiment is performed with the high-speed camera for photographing to analyze the dynamic evolution law of cavitation cloud by FDM (frame-difference method). The concentrated collapse range of cavitation is obtained. The water cavitation peening test for 2A12 aluminum alloy is carried out to study the effect of different standoff distances on the surface properties of the materials with different nozzles diameters d . The results show that the cavitation cloud has obvious periodicity including incubation, developing, shedding and collapse phases in one cycle. The concentrated collapse range of cavitation bubbles is $60d \sim 75d$. The optimal standoff distance for water cavitation peening should be $60d \sim 67.5d$, but over peening occurs at a standoff distance of 120 mm while $d=1.8$ mm. The cavitation water jet can be divided into the droplet action, the mixed action, and the cavitation action zones according to the standoff distance.

Key words: water cavitation peening; cavitation cloud; dynamic change; FDM; standoff distance; nozzle diameter

0 前言

空化水射流形成的空泡云大量微小空泡群在固壁面附近溃灭时,会产生数 GPa 的冲击压力和高速微射流,可用来强化金属材料表面^[1],这种工艺称之为空化水喷丸。与传统机械喷丸相比,空化水喷丸表面质量更佳,更能提高复杂或微型零部件的疲劳强度^[2]。目前,国内外学者对该工艺的空泡云动态演变及不同靶距下空化水射流的冲击规律展开了

大量研究。SATO 等^[3]利用高速摄像研究了空泡云脱落的规律,认为空泡云周期性脱落的原因在于空泡云溃灭诱导产生的回射流。FUJISAWA 等^[4]利用激光纹影法拍摄空化水射流,观察到了其中的空泡云溃灭行为和冲击波形成。李根生等^[5]研究了变量类型和变量取值位置对确定空泡云脱落频率的影响,发现灰度均值是计算空泡云脱落频率的最佳变量。韩冰等^[6]利用 FUJIFILM 压敏试纸测试空化水射流冲击能力,发现射流在距喷嘴出口 60~120 mm 范围内的冲击压力较高,达到 250~300 MPa。PENG 等^[7]在不同靶距的冲击试样上观察到圆形和环形两种冲击分布模式,并根据空蚀坑的分布区域及其概

* 国家自然科学基金(51575245, 51679112)和江苏省重点研发计划(BE2016161)资助项目。20180831 收到初稿,20181015 收到修改稿

率反演出不同靶距下空化水射流的冲击能力。但以上研究结果并不具有普适性,而且空泡云演变和不同靶距下空化水射流的冲击规律研究缺乏关联性,靶距选择缺乏依据,常采用试错法确定靶距,靶距从 20 mm 到 120 mm 不等^[6,8],导致结果差异较大,难以获得最佳的强化效果。

实际上,空泡云动态演变和空化水射流冲蚀过程密切相关^[9],本文通过分析空泡云动态演变过程来确定空化水射流的空泡集中溃灭范围,以 2A12 铝合金空化水喷丸验证性试验来确定最佳靶距,分析空泡云动态演变及不同靶距下空化水射流喷丸效果的内在联系。本研究有助于揭示不同靶距下空化水射流的冲击行为和机理,为靶距等空化水喷丸工艺参数优化建立基础。

1 试验装置及方法

采用课题组自行研制的空化水喷丸设备,如图 1 所示,进行空化水射流高速摄影以及 2A12 铝合金空化水喷丸试验。高压泵站采用意大利 COMET 公司的 TW-5570 型超高压柱塞泵,试验条件如下:泵

图1 空化水喷丸设备图

压 30 MPa、排量 6 L/min。千眼狼高速摄像机正对射流拍摄,侧面布置 LED 灯照明,并在其对面设置反光镜,因空泡云反光性较强,故可形成白色照片。以喷嘴出口截面中心为坐标原点,为保证空化水射流在拍摄范围内,拍摄区域大小为 128 像素×600 像素、拍摄频率为 5 000 帧/s。

高速摄影试验中采用的空化喷嘴为标准圆柱喷嘴,如图 2 所示,其最佳尺寸比例为 $d:E:L=1:8:8$ ^[10]。 d 分别为 1.2 mm、1.4 mm、1.6 mm、1.8 mm。喷丸试验增加了 $d=1.5$ mm 的喷嘴,用以验证预测得到的空泡集中溃灭范围,喷丸试验的压力同样为 30 MPa,喷丸时间为 4 min^[11],试样为 60 mm×60 mm×4 mm 的 2A12 铝合金。利用 X-350A 型 X 射线应力衍射仪(Crk α 靶,衍射晶面 311,管电压 22 kV,管电流 6 mA)、XHD-1000TM 型数字显微硬度仪(测量载荷 50 g,保荷时间 10 s)和 DSX500 型光学数码显微镜对空化水喷丸的铝合金材料表面性能进行分析,表面性能参数均在空化水喷丸强化区域内随机取 5 个点进行测试后求平均值,而不是在冲蚀区域选取。获得不同直径喷嘴、不同靶距下空化水喷丸对材料表面质量的作用规律。

图2 喷嘴几何结构图

2 空泡云动态演变分析

图 3 展示了 $d=1.2$ mm 喷嘴的空化水射流空泡云在两个典型周期内的动态变化过程,从左至右的绿色、黄色、蓝色、粉色线段分别将第零周期、第一周期、第二周期、第三周期的空泡云包含在内。根据伯努利原理,喷嘴喉管内由于过流面积骤然缩小,局部压力会降至水的饱和蒸气压以下,因此,空化会最先在喉管处产生^[12]。喉管过流面积因空泡云的产生而进一步减小,使喷嘴上游一定区域在短

时间内产生憋压,喉管内水流速度进一步增加,因而,高速射流会携带空泡迅速喷出喷嘴。其中,0 ms 时第一周期的空泡云分布在喷嘴出口约 45 mm 内,处于初生和发展阶段;上一周期脱落下来的空泡云在射流下游逐渐减小,至 0.6 ms 时几乎完全消失;0.2~0.6 ms 时第一周期的空泡云处于发展阶段,空泡云在射流剪切层中涡结构中心的低压区中膨胀、发展^[13],向下游移动的同时强度(长度、宽度、面积)不断增加,最大宽度达 13 mm。空泡云在 0.4 ms 以前形状较为对称,0.6 ms 后由射流两侧涡结构发育程度相差变大引起的流场压力不稳定^[13],其不对称

性增强。0.6 ms 后第一周期空泡云面积不断减小并发生脱落, 1.2 ms 时几乎完全消失, 最大长度达 110

mm。而喉管内第二周期的空泡在 0.6 ms 时又被射流携带喷出, 由此形成了空泡云的周期性变化。

图 3 两个典型周期内空泡云的灰度图

空泡云动态演变时间短, 为了更直观地显示短时间间隔内空泡云的动态变化, 采用 FDM 法对空泡云灰度图进行处理, FDM 法的基本原理是用某一时刻的图像与其前一时刻的图像做差, 并通过 MATLAB 中的 `imagesc` 函数实现云图显示。其中, 图 4 为图 3 的空泡云灰度图对应 FDM 图。空泡云在 0~50 mm 内处于发展阶段并不断向下移动, 产生和消失集中在两侧剪切层中, 而空泡云在射流下游发生脱落和溃灭, 且空泡云的产生和消失都集中在中间区域。空泡云的消失, 一方面是由空泡云溃灭造成的, 另一方面是由空泡云向下游运动造成的(如图 4 中的 0.4 ms、0.6 ms、1.2 ms、1.4 ms 时的射流中间段区域)。当射流下游空泡云消失面积明显大于产生面积时(图 4 中的 0 ms、0.8 ms、

1.6 ms 时射流下游), 即可判断该时刻空泡云进入溃灭阶段^[5], 随后的时间段内空泡云集中消失的区域在 Y 轴上的投影为空泡集中溃灭范围(本文中即为图 4 中 0.2 ms 和 0.4 ms、1.0 ms 和 1.2 ms、1.8 ms 和 2.0 ms 时椭圆圈出的蓝色区域), 因而根据 FDM 取 5 个周期的平均值即可判断出空泡集中溃灭范围为 72~90 mm。第一周期空泡云在 0.6 ms 脱落, 并在 0.8 ms 进入溃灭阶段, 溃灭过程和 0 ms、0.2 ms、0.4 ms 类似。第二周期内空泡云运动方式和溃灭过程与第一周期基本相同, 即 1.6 ms、1.8 ms、2.0 ms 分别对应第一周期的 0.8 ms、1.0 ms、1.2 ms。采用相同的方法研究其他直径喷嘴的空化水射流空泡云动态演变的规律, 其基本参数如表 1 所示。

图 4 FDM 图

表 1 不同直径喷嘴的空化水射流基本参数表

喷嘴直径 d/mm	空泡集中溃灭范围 R/mm	量纲一靶距 R/d	周期 T/ms	最大长度 $L_{\max}/\text{mm}$	最大宽度 $W_{\max}/\text{mm}$
1.2	72~90	60~75	1.2	110	13
1.4	84~105	60~75	1.3	120	14
1.6	98~122	61.25~76.25	1.4~1.5	135~140	15.5
1.8	106~136	58.89~75.6	1.5~1.6	145~150	18

SOYAMA 给出的淹没空化水射流空化数的定义为喷嘴的下游压力与上游压力之比^[10]，由于试验中入射压力保持不变，因此不同直径的喷嘴下的空化数相同，但是随着 d 的增加，流量增加，高速淹没射流与静态水的剪切规模增大，这导致了空泡云的强度(最大长度、最大宽度)、周期、集中溃灭范围增加。将空泡集中溃灭范围转化成量纲一靶距(R/d)时，其值在 60~75 内，因此可以预测，当 $d=1.5$ mm 时空泡集中溃灭范围应为 90~112.5 mm。

3 空化水喷丸试验结果与分析

3.1 表面形貌与表面粗糙度分析

图 5 为 $d=1.2$ mm 时不同靶距(S)下空化水喷丸后 2A12 铝合金试样的宏观形貌图。当 $S=30$ mm 时，试样中心位置产生了直径约 5 mm 的液滴冲蚀孔，而外围的空化强化区域很不明显，随着靶距的增大，中间的冲蚀孔逐渐减小减淡，在 $S=80$ mm 处完全消失，但空化强化区域则逐渐增大增强。

图 5 $d=1.2$ mm 时不同靶距下试样的宏观形貌图

图 6 为 $d=1.2$ mm 时不同靶距下 2A12 铝合金试样喷丸冲击影响区的表面微观形貌及其粗糙度值。原始试样表面粗糙度值 $Ra=0.31$ μm ，在 $S=30\sim60$ mm 内粗糙度值缓慢增加，表面产生了一定程度的塑性变形，随着靶距增大，塑性变形进一步加强。在 $S=70\sim90$ mm 时，强化区域凹坑深度及其密度的增加导致试样表面起伏度增加，粗糙度值迅速上升，在 $S=80$ mm 时达到最大值 1.12 μm ，其表面塑性变形最剧烈，空泡溃灭冲击试样表面上的凹坑密度最

高，因为此靶距下，单个空泡能发育到最大尺寸后溃灭，所产生的冲击能量最大^[14]，凹坑的深度也显著增大。并且由于受到连续冲击，部分凹坑已完全相互联通，这与传统机械喷丸明显不同的原因是因为空泡溃灭冲击属于柔性锤击，因而形成的凹凸形貌过渡区具有显著的连贯平滑特性，解决了传统机械喷丸中常见的微裂纹、尖锐棱边等有害形变问题^[15]。当 $S>90$ mm 时粗糙度值迅速下降，其中在 $S=100$ mm 时，试样表面凹坑分布密度相对于

图6 $d=1.2$ mm 时不同靶距下试样表面粗糙度值及微观形貌图

$S=80$ mm 时明显下降,粗糙度值降至 $0.63\text{ }\mu\text{m}$,但塑性变形程度要高于 $S=30$ mm 和 $S=45$ mm 时的塑性变形程度,且中间没有冲蚀坑;当 $S=110$ mm 时,试样表面仅零星分布着很浅的凹坑,粗糙度值略高于原始试样,这也正好与图3中分析得到的空泡云最大长度相符合。

图7是不同直径喷嘴下表面粗糙度随靶距变化,由图可见,各喷嘴对应的试样表面粗糙度值变化趋势是一致的,即在空泡集中溃灭范围内达到了峰值。其中,随着直径的增大,空泡云强度增大,因而峰值粗糙度值也逐渐增加,特别是当 $d=1.8$ mm

图7 不同直径喷嘴下表面粗糙度随靶距变化图

时激增至 $2.03\text{ }\mu\text{m}$,较原始状态增加了 555%,较 $d=1.6$ mm 时的峰值粗糙度 $1.44\text{ }\mu\text{m}$ 也提高了 60%。当 $d=1.5$ mm 时,试样的表面粗糙度在 $S=90\sim 110$ mm 时取得较大值,并在 $S=100$ mm 时达到最大值 $1.31\text{ }\mu\text{m}$,这表明此时空泡在 $S=90\sim 110$ mm 的溃灭较为剧烈,可见之前预测得到的 $d=1.5$ mm 时空泡集中溃灭范围为 $90\sim 112.5$ mm 是合理的。

3.2 表面残余应力与显微硬度分析

图8、9分别为不同直径喷嘴下表面残余应力和显微硬度随靶距变化图,图8中的负值代表残余压应力。从图8、9中可看出,当 $d=1.2\sim 1.6$ mm 时,试样的表面残余压应力和显微硬度随靶距的变化趋势基本一致,即随靶距的增加逐渐增加,空化水喷丸效果越来越明显,但在峰值粗糙度处达到最大值后,迅速降低,而且,在靶距接近或等于空泡云最大长度时,表面残余压应力和显微硬度只略高于试样原始值。另一方面,随着喷嘴直径的增加,峰值残余压应力和表面硬度逐渐增加, $d=1.6$ mm 时表面残余压应力和显微硬度在 $S=105$ mm 达到了最大值 348 MPa 和 $145\text{ HV}_{0.05}$,较原始状态分别提高 400% 和 61%。但是 $d=1.8$ mm 时变化趋势有所不同,在粗糙度最大的 $S=110$ mm 处,表面残余压应力和显微硬度分别仅为 236 MPa 和 $110\text{ HV}_{0.05}$,较其相邻

靶距的值分别下降约 32% 和 25%, 通过分析可知, 此时靶距虽为空泡溃灭最强烈区域, 但喷丸强化效果并不理想, 即试样从空蚀孕育期进入空蚀加速阶段^[16]的过喷现象, 若继续增加喷丸时间, 材料会出现空蚀破坏, 表面性能将急剧下降, 表面残余压应力和显微硬度甚至会低于材料的原始值。因此在充分利用空泡溃灭能量的同时, 也要注意控制喷丸时间。

图 8 不同直径喷嘴下表面残余应力随靶距变化图

图 9 不同直径喷嘴下表面显微硬度随靶距变化图

3.3 空化水喷丸靶距分析

从喷丸后的 2A12 铝合金试样表面性能分析表明, 当靶距选择不当时, 射流中的空泡云将处于初生、发展阶段, 或者已超出其集中溃灭范围, 不能充分利用空泡溃灭的能量, 会导致强化效果较差现象出现。从图 7、8、9 中可以看出, 不同直径喷嘴空化水喷丸的最佳靶距分别为 80 mm、90 mm、100 mm、105 mm 和 110 mm, 分析表明, 由于实际喷丸时射流在试样壁面处产生滞止压力使空泡云周围液体压力增加, 导致空泡提前溃灭^[17], 因此, 最佳靶距均是空泡云集中溃灭范围的前半区间。此外, 当 $S=30\sim 50$ mm 时, 大直径喷嘴在相同靶距的强化效果反而要差一点, 可见大直径喷嘴在较小靶距时空泡发育程度略小, 但这并不影响其在最佳靶距时的空泡溃灭强度。

结合空泡云动态演变和空化水喷丸的试验与分析结果, 可大致将空化水射流分为如图 10 所示的三个作用区域: 液滴冲蚀区($0\sim 30$ mm)、混合作用区(30 mm ~ 60 d)、空化作用区($60d\sim L_{\max}$)。其中空化水喷丸工艺中空化作用区的高效利用范围在空泡集中溃灭范围的前半个区间($60\sim 67.5d$)内。

图 10 30 MPa 下标准圆柱喷嘴空化水射流作用区域示意图

4 结论

(1) FDM 图是观察空泡云动态演变规律的有效方法, 能够更直观地确定空泡云进入溃灭阶段的时刻和空泡集中溃灭范围。在 30 MPa 的入射压力下, 标准圆柱喷嘴产生的空化水射流的空泡集中溃灭范围为 $60d\sim 75d$ 。通过预测得到的 $d=1.5$ mm 时空泡集中溃灭区域为 $90\sim 112.5$ mm, 与喷丸试验中的最佳靶距 $S=100$ mm 相对应。

(2) 空化水射流分为液滴冲蚀区、混合作用区、空化作用区三个区域。空化水喷丸试验中的最佳靶距在空泡集中溃灭范围的前半个区间($60d\sim 67.5d$)内, 说明对空泡云动态演变分析结果可以指导空化水喷丸靶距的选择。

(3) 空泡云的动态行为不仅和喷嘴直径有关, 还和喷嘴类型、上下游压力等因素^[17]有关。后期还将展开不同压力、不同类型喷嘴下空泡云动态演变和空化水喷丸最佳靶距的研究, 获得不同条件下空化水射流作用区域分布规律和空化水喷丸最佳靶距。

参 考 文 献

- [1] DAN O, SOYAMA H. Cavitation shotless peening for improvement of fatigue strength of carbonized steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(9): 1217-1222.
- [2] TAKAKUWA O, TAKEO F, SATO M, et al. Using cavitation peening to enhance the fatigue strength of duralumin plate containing a hole with rounded edges[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 307: 200-205.
- [3] SATO K, TAGUCHI Y, HAYASHI S. High speed observation of periodic cavity behavior in a convergent-divergent nozzle for cavitating water jet[J]. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 2013, 12(2): 195-201.
- [4] FUJISAWA N, FUJITA Y, YANAGISAWA K, et al. Simultaneous observation of cavitation collapse and shock wave formation in cavitating jet[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2018, 94: 159-167.
- [5] 彭炽, 李根生, 田守嶙. 淹没空化射流空泡云动态变化规律研究[J]. *石油科学通报*, 2017, 2(2): 228-239.
PENG Chi, LI Gensheng, TIAN Shouceng. Dynamics of cavitation cloud in submerged cavitation water jet[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2017, 2(2): 228-239.
- [6] 韩冰, 张海, 于晓光, 等. 空化水喷丸工艺中空化行为的数值模拟与验证[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(15): 193-198.
HAN Bin, ZHANG Hai, YU Xiaoguang, et al. Numerical simulation and verification of cavitation behavior in water-jet cavitation peening processing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(15): 193-198.
- [7] PENG K, TIAN S, LI G, et al. Mapping cavitation impact field in a submerged cavitating jet[J]. *Wear*, 2017, 359: 396-397.
- [8] 康学勤, 杨春敏, 孙智, 等. 空化射流喷丸对 45 钢表面性能的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2011, 37(4): 554-558.
KANG Xueqin, YANG Chunmin, SUN Zhi, et al. Influencing of water jet cavitation on the surface strengthening of 45 steel[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2011, 37(4): 554-558.
- [9] WATANABE R, YANAGISAWA K, YAMAGATA T, et al. Simultaneous shadowgraph imaging and acceleration pulse measurement of cavitating jet[J]. *Wear*, 2016, 358: 72-79.
- [10] SOYAMA H. Effect of nozzle geometry on a standard cavitation erosion test using a cavitating jet[J]. *Wear*, 2013, 297(1-2): 895-902.
- [11] 王建杰. 空化水射流冲击强化 2A12 铝合金的性能分析及机理研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
WANG Jianjie. Research on the performance and mechanism analysis of 2A12 aluminum alloy based on cavitation shotless peening[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [12] YAMAUCHI Y, KAWANO S, SOYAMA H, et al. Formation of process of vortex ring cavitation in high-speed submerged water jet[J]. *JSME Int. J., Ser. B*, 1996, 62(593): 72-78.
- [13] BRENNEN C E. Cavitation and bubble dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [14] ALEHOSSEIN H, QIN Z. Numerical analysis of Rayleigh-Plesset equation for cavitating water jets[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2010, 72(7): 780-807.
- [15] SOYAMA H, TAKEO F. Comparison between cavitation peening and shot peening for extending the fatigue life of a duralumin plate with a hole[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 227: 80-87.
- [16] BAI F, SAALBACH K A, WANG L, et al. Impact of time on ultrasonic cavitation peening via detection of surface plastic deformation.[J]. *Ultrasonics*, 2018, 84: 350-355.
- [17] HUTLI E, NEDELJKOVIC M S, BONYÁR A, et al. Experimental study on the influence of geometrical parameters on the cavitation erosion characteristics of high speed submerged jets[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2017, 80: 281-292.

作者简介: 李富柱, 男, 1971 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为机电液一体化系统及液压系统空化。
E-mail: lifuzhu@ujs.edu.cn
王匀(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为激光微加工、表面工程、非传统加工工艺。
E-mail: wangyun@ujs.edu.cn