

引文格式: 马泳涛, 翟林邦, 朱泽华, 等. 水射流表层改性技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(7): 28-35.

MA Yongtao, ZHAI Linbang, ZHU Zehua, et al. Research review on surface modification with water jet peening technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(7): 28-35.

水射流表层改性技术研究进展*

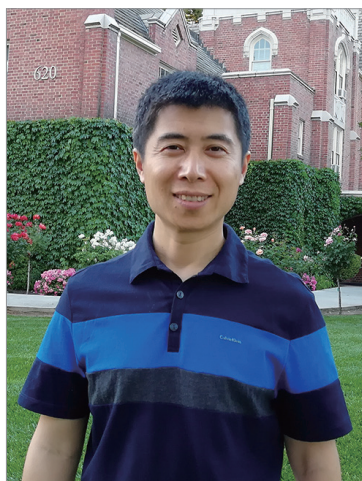
马泳涛, 翟林邦, 朱泽华, 张永宾, 刘兰荣, 马胜钢

(郑州大学机械与动力工程学院, 郑州 450001)

[摘要] 运用水射流技术对高硬度渗碳淬火零件进行局部强化是表层改性研究的一个新兴方向。以表层改性应用为重点, 依次介绍了纯水射流、后混合以及前混合水射流的特点及应用场合。在综合对比各种射流特点的基础上, 提出了前混合射流是表层改性中较为理想的一种射流方式, 并对前混合射流改性中存在的问题进行了探讨, 认为混合射流在射流束形成、参数测量、喷嘴形状与使用寿命上需要深入研究, 改性后变质层的表面完整性、表面质量的提升工序及高应力集中处的有效改性、形成射流的连续性和稳定性等问题有待进一步解决。在上述机理问题解决的基础上, 对射流改性装备进行完善和提升, 可以展开以齿轮、叶片、花键轴等具体零件为对象的工程应用研究。

关键词: 混合射流; 表层改性; 抗疲劳制造; 表面粗糙度; 喷丸

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.07.028



马泳涛

讲师, 硕士生导师、博士, 主要研究方向为抗疲劳制造表层改性工艺及装备, 混合射流改性机理及高效应用等。主持研发了“5轴联动前混合射流多功能实验台”, 实现了大流量范围、大压力范围的前混合射流, 实现了喷头多自由度的运动, 可以对标准圆棒试样、齿轮以及叶片等零件进行改性。

抗疲劳制造是我国发展装备制造业、提升关键件竞争力的重要技术保障, 是制造业转型升级的必由之路。其核心是通过一定的技术手段, 在零件表层构筑具有优良组织结构、残余应力分布场、硬度梯度场以及表面质量的变质层, 用以抵御外界循环应力和损伤累积, 抑制表面及内部疲劳裂纹的萌生。其工艺流程一般排在热处理之后及表面精加工之前。表层改性技术是抗疲劳制造中承上启下的关键工艺环节。

水射流表层改性是近年来新兴的一种零件表层改性技术, 其具有能量密度高、成本低廉、绿色环保等优势, 可以精确控制射流压力、入射角度以及喷射位置, 易于工程应用, 能够通过调整射流参数, 实现传统机加工难以处理的狭小、弯窄等承受交变

载荷的零件部位表层改性, 如齿轮根部、轴肩、叶片根部等。通过一定的组合工艺手段, 不但能够实现残余应力场的有效构筑, 而且在表面质量上也能够达到一定的指标。在某些非接触表面上, 水射流处理过的表面可以直接应用或服役, 不需要进行后续的精加工工序, 节约了制造成本。

水射流表层改性的发展历程

早在 1984 年, 就有学者提出将高压水射流应用到零件的表层改性中, 以达到提高疲劳寿命的目的^[1]。当时认为水射流冲击与传统意义上的喷丸很相近, 只是用高压水射流代替了高速固体喷丸^[4,7]。2002 年美国 Ramulu 等^[7-8]采用纯水射流表层改性铝合金 7075-T6, 指出纯水射流表层改性既可以延迟疲劳裂纹萌生,

* 基金项目: 国家自然科学基金(U1804254); 河南省高等学校重点科研项目(21A460024)。

也可以降低裂纹扩展速度,最终提高高周疲劳寿命。Arola等^[8]发现混合水射流也可以引入大小不等的残余压应力(100~800MPa),随后在大气环境下分别采用纯水射流和混合水射流对工业纯钛和Ti-6Al-4V进行表层改性,发现无论纯水射流还是混合水射流都可以在金属表面引入残余压应力,纯水射流可以引入-180MPa,混合水射流可以引入-400MPa^[9]。由此可知,无论纯水射流还是混合水射流,都可以构筑一定深度的表面变质层,进而提高材料疲劳寿命。目前,国内外针对高压水冲击改性方法并没有明确的分类,但根据水射流的状况可分为:高压脉冲水射流、高压空化水射流、高压纯水射流和高压磨料水射流。

高压脉冲水射流是将能量通过一定的装置储存起来,再将能量间断地传递给水,利用水锤效应对靶体进行冲击。Srivastava等^[10]研究了脉冲水射流对304不锈钢的表面处理效果,运用圆形与扁平两种不同形状的喷嘴,改性件表面的初始拉伸残余应力转为残余压应力,最高可达-513MPa。随后研究了脉冲水射流在不同压力、靶距、喷嘴移动速度下对样件改性的影响,发现表面残余应力与硬度均有增加,硬度由347HV最大可增加到570HV。

高压空化水射流利用空化水射流的基本思想,将气泡破裂产生的能量作用于材料表面达到改性的效果。Han等^[11-12]运用有限元方法和位错密度方法预测了空化水射流喷丸过程中所能引入残余应力值的大小,然后针对纯钛合金进行空化水射流喷丸试验验证,结果表明,空化水射流引入的残余应力值与试样的塑性变形程度正相关。

高压纯水射流强化的工作介质完全是纯水,没有添加剂或磨料,仅利用水的集中动能束喷向靶体,依靠水流的冲击使其表面及附近层面

产生一定的塑性变形,从而影响和改变零件的力学特性。Azhari等^[13]研究了水射流强化次数、进给速率、压力对304不锈钢的影响。水射流往复冲击次数越多,压力越大,则硬度越高,试验范围内,硬度可提高22%~31%,硬化层深度可达150~400 μm ;喷嘴移动速度越慢,硬度越高,试验范围内硬度可提高27%,硬化层深度可达300 μm 。后利用水射流喷丸处理1045碳钢表面,研究了射流道数以及压力对表面粗糙度以及硬度的影响,对冲蚀机理进行了分析,发现增加射流道数和压力会产生更高的表面粗糙度和冲蚀,硬度也有所提高,晶界处会出现严重损伤^[14]。董星等^[15]应用水射流对铝合金和45钢进行喷丸试验,得出结论:水射流喷丸可以提高铝合金和45钢的表面残余压应力,其喷丸表面残余压应力随喷丸压力和靶距的增加而迅速增大,随移动速度的增加而减小。Barriuso等^[16]研究了纯水射流冲击AISI316和Ti-6Al-4V时的表面硬化现象,在冲蚀表面下方,AISI316硬度从210HV提高到300HV,硬化层深度为100 μm ,而Ti-6Al-4V没有明显硬化。高压纯水射流强化技术虽取得了一定进展,然而因其工作介质完全是水,对硬质材料加工能力有限,但为高压磨料水射流的发展奠定了基础。

高压磨料水射流改性是在纯水中添加一定比例的丸粒、提高能量,喷射到材料表面形成一定深度的表面变质层。根据丸粒混合方式的不同分为前混合与后混合磨料水射流两种形式,如图1所示。Arola等^[17]采用后混合水射流表层改性304不锈钢和Ti-6Al-4V,通过调整射流压力和弹丸直径,可在304不锈钢表面引入-165~-460MPa的残余压应力。邹雄等^[18]运用后混合磨料水射流喷丸对GDL-1钢进行表面强化与改性,分析了不同压力水喷后试样

表面粗糙度、组织、硬度和残余应力等的变化规律,并研究了300MPa水喷处理后不同保温温度和保温时间残余应力场的热松弛行为,发现表面粗糙度、残余压应力以及硬度随着压力的增大而增加,表面残余压应力最大可达1155MPa,硬度近700HV。Anasiewicz等^[19]应用混合水射流对耐腐蚀钢的粘接部位进行喷射,同时兼顾表面粗糙度和残余应力,显著提高了金属连接部位的结构强度。董星等^[20-21]运用前混合磨料水射流装置对2A11铝合金以及45钢进行试验,观察不同参数下表面粗糙度的变化,结果表明:表面粗糙度随着喷丸压力的增大而增大,随着移动速度的增大而减小,并发现存在最优靶距;运用前混合水射流喷丸探究了不同喷丸参数对2A11铝合金和45钢圆棒试样显微硬度、表面残余压应力以及疲劳寿命的影响;在不同喷丸参数下残余压应力得到较大提升,显微硬度也有所提高,45钢疲劳寿命为未处理前的18.56倍,2A11铝合金可达25.31倍。可见混合水射流由于水中混合丸粒,其冲击能量比纯水更大,强化效果比纯水射流更显著。后混合由高速水流在混合室内产生的负压作用在一侧卷吸丸粒,因此需要200MPa以上压力才能够使丸粒达到较大的速度,且丸粒易集中分布在吸附区域的一侧,不易进入射流的中心,从而对改性效率产生不利影响。而前混合中水对丸粒预先在磨料罐及高压管路内形成浆体射流,后在混合室内进行二次混合,对丸粒的加速作用较为明显,且丸粒更易进入射流中心,更易获得较高的动能。因此利用前混合磨料水射流对标准试样进行表面改性,在较低压力下丸粒便可达到较高的速度,可见前混合对硬质合金的改性较后混合改性的稳定性和效率有所提高,其结构如图1(b)所示。此外,由于前混合方式的射流形成压力条件低于后混合,因此对于

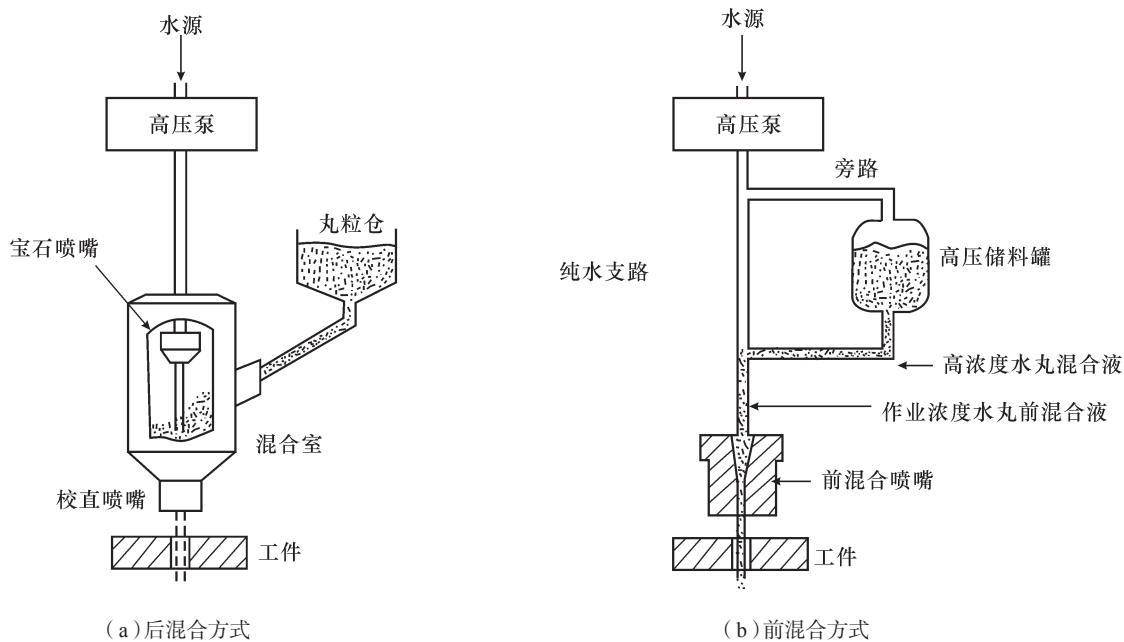


图1 后混合与前混合的结构对比
Fig.1 Comparison of injection water jet and suspension water jet

设备的承压能力要求降低,对于承受零部件的设计及运转的安全性较为有利。

水射流射流束可在已有的零件表层施加作用力或能量,引发零件表层生成一定深度的塑性变形,形成具有一定幅值和深度的残余应力场,并伴随微观组织和硬度的变化,构筑初始变质层,集中且高效地达到改性的目的。此外,水射流的喷头可以较为灵活地安装在各类平台上,如三移动+两摆动的五轴联动平台,以及多自由度机械手平台等。国外的OMAX公司以及国内的狮迈、大地水刀等多家公司均推出了机械手臂及五轴联动平台的水切割机,并在一些专用特殊场合成功实现了应用。图2是某国外公司研制的五轴切割设备。

常用表层改性方法与 水射流改性的对比

从加工的方式来看,表层改性主要分为接触式和非接触式两种。接触式的代表工艺为滚压,其特点是变质层生成效率高,表面质量好。Liu

等^[22]分析了滚压次数对40Cr表面残余应力的影响,结果表明残余压应力值随滚压次数的增加而增大,表层残余应力最大可达 -970MPa ,与初始相比提高了近2倍。Zhu等^[23]通过疲劳试验来探究超声滚压表面强化技术对Ti-6Al-4V疲劳特性的影响,超声滚压处理后试样的疲劳强度达到了 612MPa ,相比基体试样提高了65%。但对于高硬度表面,需要特殊压头以及高吨位装备,设备成本较高。此外,对于狭窄、沟槽以及自由复杂曲面,如齿轮的根部、轴上的键槽底部等,处理起来难度较大。因此,该方法常用于表面几何特征简单、硬度不高的零件,在工程应用上受到一定的限制。

非接触式是近些年来新兴发展的表层改性方式,其代表工艺有激光、超声、气动喷丸、水射流喷丸等。超声、激光两种非接触式改性方式,其应用于大功率高频发生器一直存在着瓶颈,装备成本较高,因此在应用上受到限制,现在主要针对特殊材料的零件进行小范围的应用。气动



图2 五轴水切割机
Fig.2 Five-axis water jet cutting machine

喷丸是由压缩空气带动丸粒冲击表面。高玉魁^[24-25]对比了喷丸强化和表面机械两种冲击强化工艺对304奥氏体不锈钢的影响,发现冲击强化导致奥氏体转变为马氏体,而且表层晶粒明显细化,从而提高了屈服强度和抗拉强度等拉伸性能;随后又对比了激光冲击强化和喷丸强化对GH742残余应力场的影响,发现激光冲击喷丸能引入更优残余压应

力深度、冷作程度、塑性变形及更高温下更稳定的残余压应力,并且发现两种工艺处理后试样的残余应力存在一个超过屈服强度的饱和最大值。赵艳丽等^[26]研究了不同喷丸工艺对A-100高强度钢残余应力场的影响,发现进行二次喷丸可提高试样的表面残余压应力,最大可达-910MPa,强化深度15 μm ;但由于存在气动压力的限制,其丸粒动量有一定的上限,丸粒速度一般在100m/s左右,而抛丸的速度更低,一般在50~60m/s,对于硬态零件表面难以实施有效改性。

水射流表层改性可以避免常规改性方法的不足。如前所述,采用纯水射流可以对铝合金等硬度较软的材料进行有效的表层改性,在引入足够的残余应力条件下又不破坏原有表面形貌。对于硬度较高的零件表面,可以采用射流中添加丸粒的混合射流方法进行改性。该方法最早的设备是由商用切割水刀演变而来,不同的是水刀切割添加的固体颗粒是尺寸较小的石榴砂;表层改性则是将石榴砂更换成一定尺寸的金属丸粒,采用水带丸粒的方式进行表层改性,在引入残余应力场的同时,表面形貌也会受到一影响。随着改性研究深入发展,为了提高射流效率,前混合方式逐渐得到发展和应用。

混合水射流表层改性 重点研究方向

1 射流束的形成及控制

后混合方式是高压水首先形成高速的射流水柱,在混合室内,高速水柱与丸粒进行混合,然后通过混砂管射出。张滕飞等^[27]利用Fluent软件对后混合喷嘴磨料颗粒运动进行仿真,探究了磨料运动轨迹对磨粒加速运动的影响。在混合过程中,丸粒的运动由静止到启动加速,在混砂管中校直后,直到形成混合射流,因此丸粒的运动状态相当复杂,丸粒之

间、丸粒与水之间的相互作用、丸粒与壁面之间的摩擦等均会影响射流束的形成。当采用前混合方式时,丸粒与水的混合效果更加明显,且避免了混合过程中空气的混入对射流结构造成的影响,因此在一定程度上提高了射流的集束性,但是在喷嘴外自由射流区域仍存在雾化以及扩散现象。在前混合射流形成研究理论方面,章文峰等^[28]以固液两相流理论为基础,建立了前混合射流磨料在高压管路、喷嘴内的速度模型,并基于等分法和迭代算法的数值求解方法,求解了磨料速度模型。混合射流的集束性直接影响射流改性能力,如何有效对其控制需要进一步深入研究。

2 射流束参数的测量

高速流束的结构及测量一直是相关学者高度关注的问题。射流束参数主要包括射流束中液固质点的速度分布及丸粒的空间分布。目前主要通过粒子图像测速(Particle image velocimetry, PIV)技术来实现射流束的流场可视化及速度检测,如图3所示。PIV技术是一种全新的无扰、瞬时、全场速度测量技术,该技术的主要优点为非接触式测量,在不需要破坏流场的基础上实现三维速度可视化。PIV测速的基本原理是在极短脉冲时间内拍摄一对射流图像,然后根据粒子的位移与脉冲间隔计算出速度。目前国内外对于该技术在小尺度流场中的适用性均有一定的研究。章文峰等^[29]结合PIV技术和图像处理与滤波分析技术,测量出了前混合射流束中磨料沿轴向和径向的速度分布规律及磨料在射流中的位置信息。Zeleňák等^[30]结合PIV技术中的PTV算法和激光诱导荧光(Laser induced fluorescence, LIF)技术,测量了一定靶距范围内所有颗粒的平均速度随压力和磨料质量浓度的变化,并得到了不同速度区间内丸粒的数量分布。Thongkaew等^[31]结合PIV技术及LIF技术测量

了轴向平面内颗粒的速度分布规律并将试验数据与此前建立的粒子速度模型进行对比,证实了该技术的可靠性。

受限于试验条件,目前PIV技术只能测量射流束的二维速度分布。为了充分了解射流束的结构,有必要测量射流束的三维速度分布。鲍苏洋等^[32]采用体三维速度测量(Volumetric three-component velocimetry measurements, V3V)技术测量了涡轮桨附近区域的三维流场,得到了尾涡涡对的三维结构;分析了桨叶附近流体的3个方向速度分量 u 、 v 、 w 沿径向分布情况。这一技术似乎可以应用到小尺度流场的三维速度可视化,比如射流束中,因此有必要对该技术进行充分研究。在实际应用中,由于3DPIV对测量环境有一定的要求,激光器以及相机对水汽较为敏感,因此在实际使用中由于射流反射的水雾影响,不易安装到实际平台当中,必须采用台下方式形成小规模射流,且射流需要无干扰落入下方容器中,以防溅起水汽的影响。图3是本课题组搭建的台下射流3DPIV测试试验台。

3 喷嘴形状及寿命

喷嘴是混合射流最终形成的关键,喷嘴的形状及寿命直接影响到混合射流的改性效果以及应用成本。丁祥青^[33]设计出不同结构的喷嘴,对各喷嘴的流场进行仿真分析,得到最佳喷嘴结构。黄飞等^[34]设计了5种不同形状的喷嘴进行冲击测试试验,发现在相同的工况下,圆形喷嘴水射流的集束性最好且中心压力最大,椭圆形喷嘴的水射流形态最为发散,其中心冲击压力最小。

混合射流由于磨料的加入,磨料在喷嘴内部会进行一定的无规律的运动,与喷嘴壁面发生碰撞等接触,使喷嘴产生材料损失。前混合系统中磨料的加速时间较长,能量较高,

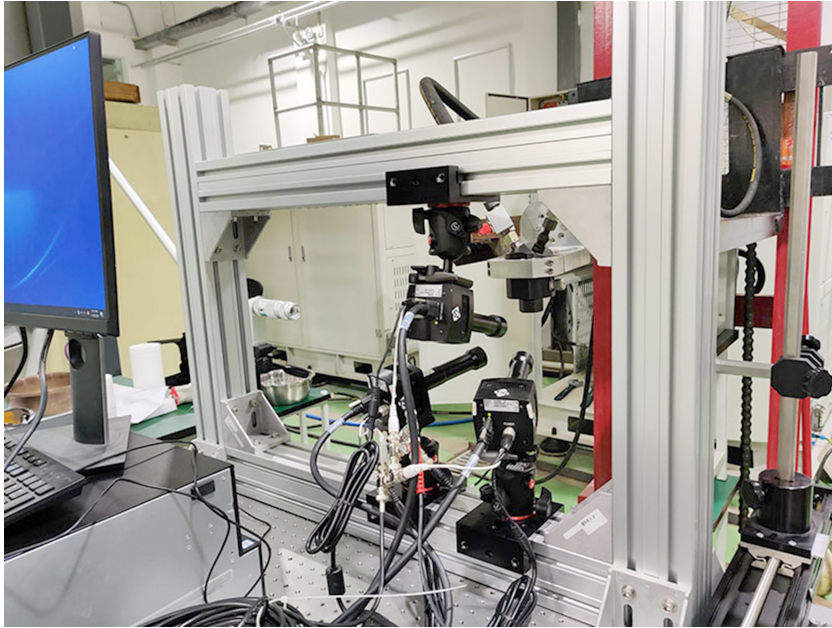


图3 3DPIV测试试验台
Fig 3 3DPIV test platform

对喷嘴的磨损加剧,从而对改性效果产生影响。管金发等^[35]建立了前混合磨料水射流喷嘴物理模型,分析了射流参数、磨料参数对磨料水射流喷嘴内表面磨损特性的影响规律,发现随着流量和磨料体积分数的增加、磨料颗粒粒径的减小,喷嘴内表面磨损程度增加。于其明^[36]对磨料射流喷嘴内部流场进行了数值模拟,发现喷嘴磨损程度受射流时间、射流速度、磨料尺寸、磨料浓度等影响较为严重。混合射流改性过程中要合理确定喷嘴结构及材料,在满足改性要求的同时提高喷嘴的寿命。

4 改性后变质层的表面完整性及后续加工方法

当采用射流改性后,表面完整性参数与变质层主要参数(残余应力、硬度梯度、微观组织)的变化,直接影响到零件的抗疲劳性能。从现有研究情况来看,射流改性后的表面完整性与变质层的变化规律情况需要深入研究。目前射流工作的主要任务是形成有效的变质层,使产生的残余应力幅值达到材料表层梯度的屈服强度。混合水射流喷嘴会造成表

面完整性的下降,具体表现为表面会产生冲击坑以及表面微裂纹^[37]。冲击坑是喷丸的固有现象,可以通过后续的精加工工艺解决。但是如果产生微裂纹,后续的精加工由于考虑残余应力深度的影响,其磨削余量受到限制而无法完全去除裂纹,甚至会形成新的潜在裂纹,对零件质量的影响较为突出。这说明,在采用混合水射引入残余应力形成新的变质层同时,表面完整性的变化规律也需要关注。混合射流喷丸的重要任务是在满足表面变质层的量化指标条件下也符合表面完整性的相关要求,即在无表面裂纹损伤的条件下引入最大的残余应力及其梯度。

改性后残余应力与后续精加工的矛盾也需要重点关注。由于残余应力对温度较为敏感,甚至在一定温度下残余应力会被“清零”,因此表层改性必须在热处理之后进行。但由于改性后表面出现新的应力集中点(冲击坑),对于接触表面必须进行精加工工序以提高表面质量。一般较为通用的方法是磨削。在磨削过程中,磨削热的生成与控制将是影响

残余应力的关键因素。如何有效提高表面质量而不影响已有的残余应力场,是表层改性或抗疲劳制造面临的一个难题。国内外学者曾尝试用特殊的CBN砂轮,或者CBN刀具高速切削以及磁力研磨方法进行表层改性的后处理,希望能够解决以上难题。本课题组以水射流表层改性后的渗碳淬火18CrNiMo7-6为对象,采用CBN铣刀小切深高速硬切的方法,将改性后的表面粗糙度 R_a 由 $1.204\mu\text{m}$ 减小到 $0.02\mu\text{m}$,并且原先残余应力场中的最大值保持基本不变^[38]。其过程如图4所示。

5 细微特征处的改性

混合水射流对沟槽、曲面等复杂型面均展现出一定的改性能力,但对于细微特征处的改性仍存在问题待解决。对于带V形槽的标准试样,当应力集中系数 $K_t=5$ 时其槽底圆角半径很小约为 0.05mm ,采用混合射流加工时磨料半径需小于槽底圆角半径才有改性的可能性。混合射流丸粒直径一般在 0.2mm 以上,需采用直径 0.1mm 以下的微小丸粒对细微处进行改性。在改性过程中由于射流束的扩散以及部分丸粒沿流束径向扩散,对细微V形槽的结构会产生一定的破坏,因此需要在改性前对V形槽其他区域进行一定的保护措施。混合射流改性过程中会有丸粒的反弹,当对V型槽进行改性时,丸粒进入槽内无法及时弹出,将影响后续射流的改性,对改性产生不利影响。以上这些问题需要深入研究。

6 前混合连续喷射

前混合水射流一部分高压水进入储料罐,与储料罐内的磨料初步混合,使丸粒处于流化态,后进入高压管路在喷头装配体内与水进行二次混合。在此过程中丸粒与水在通过管路阻尼时可能会发生堵塞,试验研究表明,高浓度的水丸混合流对管路内的流道尺寸变化比较敏感,任何微小的丸粒流动的波动都可能会造成

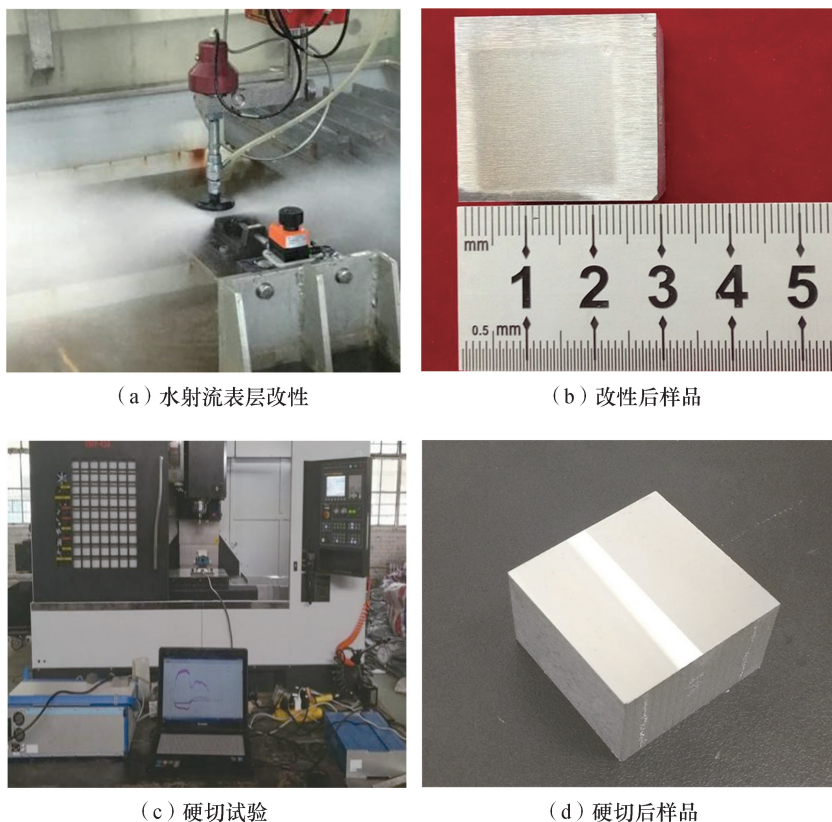


图4 硬切试验过程

Fig.4 Experiment process of hard milling

连锁效应,从而形成喷嘴或阻尼孔处的堵塞,影响改性效率以及安全性。因此,应研究前混合射流的压差流量特性,使用一定大小的丸粒与阻尼,射流流出以及混合比均保持稳定,以保证射流不发生堵塞,连续稳定。实际应用中,丸粒处于储料罐的密闭环境中,可利用传感器检测罐内丸粒的储量,及时添加丸粒,避免在改性过程中丸粒供给突然中断,造成不必要的停机和工件浪费。

混合射流改性发展方向及应用前景

混合射流改性进一步发展的研究方向主要在以下4个方面。

(1)前混合代替后混合。当前表层改性主要设备是基于后混合方式,其装备基于水射流切割机,经简单改造升级后进行表层改性研究。前混合在加工效率及加工稳定性上

均优于后混合,且参数可控性较大。提高加工效率、减少磨料的消耗以及降低能耗是混合射流发展的方向,前混合射流在今后有更广阔的应用前景。

(2)改性表层初始硬度不断提高。工件表面硬度高,其冲击韧性、疲劳强度以及耐磨性均有所提高,对高硬表面进行强化(HRC60~65)更有利于发挥材料的潜力,提高零件的使用寿命。对于某些关键零件如轴承等,由于抗疲劳制造要求,其热处理后的硬度要达到HRC65~67甚至更高。对于这种高硬材料的表面进行处理,混合射流具有其独特的优势,合理优化射流改性工艺参数,丸粒产生的冲击能够对硬质表面产生较大影响,进一步提高硬质表面的性能。

(3)工程化应用。在机械装备中,螺栓根部、齿轮表面以及根部、航

空发动机叶片根部等关键零件的应力集中部位需要引入合理的残余应力场以提高零件的疲劳性能。混合射流改性的自身优势比较适合对以上零件表面的局部或整体进行改性。对于上述零件进行表层改性,需要在机理研究的基础上再展开工程应用。如对于齿轮,应先采取样件改性、样件疲劳试验、齿轮形面工艺试验、齿轮接触疲劳以及弯曲疲劳台架试验、装配后啮合试验等全过程,需要材料、装备设计、疲劳、工艺编程等多个研究方向的共同组合才能实现,并由科研院所、高校以及应用企业共同参与研发。其最终成果是改性零件的量产化以及改性专机的研发。

(4)混合射流表层改性专用装备研发。混合射流对形状复杂以及精度要求较高的零件进行改性,五轴或多自由度机械手水射流改性装备是其应用的前提。对材料进行改性时,丸粒不可避免四处飞溅,对操作人员的安全、机床的精度以及环境产生不利影响,因此需要对混射射流改性装备进行全面防护。防护包括两个方面:一是运动部件的全封闭防护,机床导轨、丝杠、伺服电机以及线缆等要与丸粒和水进行物理隔离,以确保机械部件的正常运动接合面不受丸粒和水的影响;二是进行喷头运动范围的局部防护,减少丸粒溅出量,将反弹出的丸粒控制在较小空间范围内。在安全措施上,人机交互处需要安装有一定耐冲击级别的钢化玻璃;设备的压力、流量等参数要实时检测,做到参数可调可控;装备需要有自动丸粒回收以及装填装置,以做到丸粒循环回收,脱水干燥以及自动烘干等,从而节省加工时间,提高工作效率。

参考文献

[1] SALKO D. Peening by water[C]// Proceedings of 2nd International Conference

on Shot Peening, ICSP-2. FUCHS H O, ed., American Shot Peening Society. Chicago, 1984.

[2] SOYAMA H. Improvement in fatigue strength of silicon manganese steel SUP₇ by using a cavitating jet[J]. JSME International Journal Series A, 2000, 43(2): 173-178.

[3] COLOSIMO B M, MONNO M, SEMERARO Q. Process parameters control in water jet peening[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2000, 15(1/2): 10-19.

[4] RAMULU M, KUNAPORN S, JENKINS M, et al. Fatigue performance of high-pressure waterjet-peened aluminum alloy[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2002, 124(1): 118-123.

[5] KUNAPORN S, RAMULU M, JENKINS M G, et al. Ultra high pressure waterjet peening, Part I: Surface characteristics[C]// Proceedings of 2001 WJTA American Waterjet Conference. Minneapolis, 2001.

[6] KUNAPORN S, RAMULU M, JENKINS M G, et al. Ultra high pressure waterjet peening, Part II: Fatigue performance[C]// Proceedings of 2001 WJTA American Waterjet Conference. Minneapolis, 2001.

[7] KUNAPORN S, RAMULU M, JENKINS M G, et al. Residual stress induced by waterjet peening: A finite element analysis[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2004, 126(3): 333-340.

[8] AROLA D, RAMULU M. Material removal in abrasive waterjet machining of metals A residual stress analysis[J]. Wear, 1997, 211(2): 302-310.

[9] AROLA D, MCCAIN M L, KUNAPORN S, et al. Waterjet and abrasive waterjet surface treatment of titanium: A comparison of surface texture and residual stress[J]. Wear, 2001, 249(10-11): 943-950.

[10] SRIVASTAVA M, HLOCH S, TRIPATHI R, et al. Ultrasonically generated pulsed water jet peening of austenitic stainless-steel surfaces[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 455-468.

[11] HAN B, JU D Y, YU X G. Combined finite element method and dislocation density method solution to residual stress induced by water cavitation peening[J]. Materials & Design, 2010, 31(7): 3317-3323.

[12] HAN B, JU D Y. Compressive residual stress induced by water cavitation peening: A finite element analysis[J]. Materials & Design, 2009, 30(8): 3325-3332.

[13] AZHARI A, SCHINDLER C, KERSCHER E, et al. Improving surface hardness of austenitic stainless steel using waterjet peening process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(9-12): 1035-1046.

[14] AZHARI A, SCHINDLER C, NKOUMBOU J, et al. Surface erosion of carbon steel 1045 during waterjet peening[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(5): 1870-1880.

[15] 董星, 王瑞红, 段雄. 水射流喷丸强化的试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 568-573.

DONG Xing, WANG Ruihong, DUAN Xiong. Test research of water jet peening strengthening[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 568-573.

[16] BARRIUSO S, LIEBLICH M, MULTIGNER M, et al. Roughening of metallic biomaterials by abrasiveless waterjet peening: Characterization and viability[J]. Wear, 2011, 270(9-10): 634-639.

[17] AROLA D, ALADE A E, WEBER W. Improving fatigue strength of metals using abrasive waterjet peening[J]. Machining Science and Technology, 2006, 10(2): 197-218.

[18] 邹雄, 梁益龙, 吴泽丽, 等. 磨料水射流喷丸对渗碳 GDL-1 钢表面性能及残余应力场热松弛行为研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 43-49.

ZOU Xiong, LIANG Yilong, WU Zeli, et al. Study on surface properties and thermal relaxation behavior of residual stress field of carburizing GDL-1 steel after abrasive water jet peening[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 43-49.

[19] ANASIEWICZ K, KUCZMASZEWSKI J. Effect of abrasive waterjet peening surface treatment of steel plates on the strength of single-lap adhesive joints[J]. Advances in Science and Technology Research Journal, 2017, 11(3): 270-276.

[20] 董星, 王瑞红, 段雄. 前混合水射流喷丸表面粗糙度的试验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1410-1415.

DONG Xing, WANG Ruihong, DUAN Xiong. Test research of premixed water jet shot peening surface roughness[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10): 1410-1415.

[21] 董星, 郭睿智, 段雄. 前混合水射流喷丸强化表面力学特性及疲劳寿命试验[J]. 机械工程学报, 2011, 47(14): 164-170.

DONG Xing, GUO Ruizhi, DUAN Xiong. Surface mechanical characteristics and fatigue life experiments of premixed water jet peening strengthening[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14): 164-170.

[22] LIU Y, ZHAO X H, WANG D P. Determination of the plastic properties of materials treated by ultrasonic surface rolling process through instrumented indentation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 600: 21-31.

[23] ZHU Y L, WANG K, LI L, et al. Evaluation of an ultrasound-aided deep rolling process for anti-fatigue applications[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(8): 1036-1040.

[24] 高玉魁. 冲击强化对 304 奥氏体不锈钢拉伸性能的影响[J]. 材料工程, 2014, 42(8): 36-40.

GAO Yukui. Influence of impact enhancements on tensile property of 304 austenite steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2014, 42(8): 36-40.

[25] 高玉魁. GH742 高温合金激光冲击强化和喷丸强化残余应力[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2347-2351.

GAO Yukui. Residual stresses of GH742 superalloy induced by laser peening and shot peening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(9): 2347-2351.

[26] 赵艳丽, 王强, 杨庆祥, 等. 喷丸工艺参数对 A-100 高强度钢残余应力场的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(8): 10-14.

ZHAO Yanli, WANG Qiang, YANG Qingxiang, et al. Effect of shot peening parameters on residual stress fields of A-100 high strength steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(8): 10-14.

[27] 张腾飞, 邓松圣, 陈晓晨, 等. 后混磨料射流颗粒运动仿真和实验分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(2): 57-60, 97.

ZHANG Tengfei, DENG Songsheng,

CHEN Xiaochen, et al. Simulation and analysis of post-mixed abrasive water jet particle trajectory[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(2): 57-60, 97.

[28] 章文峰, 卢义玉, 汤积仁, 等. 基于等分法和迭代算法的磨料射流速度模型[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(1): 180-186.

ZHANG Wenfeng, LU Yiyu, TANG Jiren, et al. Velocity model of abrasive water jet based on the bisection method and iterative algorithm[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(1): 180-186.

[29] 章文峰, 卢义玉, 汤积仁, 等. 基于 PIV 技术的磨料水射流中固体磨料粒子速度分布实验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 159-165, 186.

ZHANG Wenfeng, LU Yiyu, TANG Jiren, et al. Experimental study of velocity distribution of solid abrasive particles in abrasive water jets based on PIV technology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 159-165, 186.

[30] ZELEŇÁK M, FOLDYNA J, LINDE M, et al. Measurement and analysis of abrasive particles velocities in AWSJ[J]. Procedia Engineering, 2016, 149: 77-86.

[31] THONGKAEW K, WANG J. An experimental study of the particle velocities in abrasive waterjets[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2017, 8(2): 147.

[32] 鲍苏洋, 周勇军, 王璐璐, 等. 涡轮桨搅拌槽内流场特性的 V3V 实验[J]. 化工学报, 2016, 67(11): 4580-4586.

BAO Suyang, ZHOU Yongjun, WANG Lulu, et al. V3V study on flow field characteristics in a stirred vessel with Rushton turbine impeller[J]. CIESC Journal, 2016, 67(11): 4580-4586.

[33] 丁祥青. 磨料水射流喷嘴结构优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(11): 115-118.

DING Xiangqing. Abrasive waterjet nozzle structural design and optimization[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(11): 115-118.

[34] 黄飞, 胡斌, 左伟芹, 等. 不同形状喷嘴的高压水射流冲击力特性实验[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(9): 124-133.

HUANG Fei, HU Bin, ZUO Weiqin, et al. Experiments on the impact pressure of high-pressure water jet under different nozzle shapes[J]. Journal of Chongqing University,

2019, 42(9): 124-133.

[35] 管金发, 邓松圣, 伍建林, 等. 前混合磨料水射流喷嘴磨损规律的数值模拟[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2016, 30(12): 48-54.

GUAN Jinfa, DENG Songsheng, WU Jianlin, et al. Numerical simulation of the wear law of pre-mixed abrasive water jet nozzle[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2016, 30(12): 48-54.

[36] 于其明. 磨料射流喷嘴磨损规律的研究[J]. 石油管材与仪器, 2018, 4(5): 40-42, 46.

YU Qiming. Nozzle wear rule research of abrasive water jet[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2018, 4(5): 40-42, 46.

[37] LIU L R, LIU J C, ZHANG L D, et al. Injection water jet peening of carburised 18CrNiMo7-6 steel surfaces[J]. International Journal of Surface Science and Engineering, 2020, 14(1): 48-67.

[38] MA Y T, ZHANG Y B, LIU J C, et al. Hard milling of carburized and waterjet peened 18CrNiMo7-6 steel[J]. Machining Science and Technology, 2020(1): 1-19.

通讯作者: 马泳涛, E-mail: myt@zzu.edu.cn.

Research Review on Surface Modification With Water Jet Peening Technology

MA Yongtao, ZHAI Linbang, ZHU Zehua, ZHANG Yongbin, LIU Lanrong, MA Shenggang
(College of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

[ABSTRACT] Using water jet peening to strengthen local area of high-hardness carburized and quenched parts is a promising technology for surface modification. This paper focuses on the application of surface layer modification, and introduces the characteristics and applications of pure water jet, injection and suspension water jet in turn. On the basis of comprehensively comparing the characteristics of various jets, it is proposed that the suspension water jet is an ideal jet method in surface modification, and the problems existing in the modification of the suspension water jet peening are discussed. The jet formation, parameter measurement, nozzle shape and service life need to be further studied. Moreover, the surface integrity of modified layer, the fine process after water jet peening, the effective modification of high stress concentration area, the continuity of the formation of jet, and stability and other issues need to be concerned. On the basis of solving the above-mentioned mechanism problems, as well as improving the jet modification equipment, engineering application research on specific parts such as gears, blades, and spline shafts can be carried out.

Keywords: Mixed water jet peening; Surface modification; Anti fatigue manufacturing; Surface roughness; Shot peening
(责编 逸飞)