

电液成形技术研究现状及发展趋势

于海平^{1,2}, 郑秋丽², 安云雷²

(1.金属精密热加工国家级重点实验室, 哈尔滨 150001;
2.哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 电液成形是一种典型的高速率成形技术, 能显著提高材料成形性能, 具有单面模具、工艺柔性高、零件表面质量高等优点, 在薄壁难变形零件的精密成形制造方面将起到越来越大的作用。介绍了电液成形工艺的原理与主要特点, 综述了电液成形技术、两步电液成形方法的研究进展, 分析了电液成形板材的成形性及其影响因素。最后提出了电液成形在成形理论与应用研究方面存在的主要问题, 并展望了该技术的发展趋势。

关键词: 电液成形; 两步法; 成形性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.013

中图分类号: TG391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)03-0065-08

Research Status and Development Tendency of Electrohydraulic Forming (EHF) Technology

YU Hai-ping^{1,2}, ZHENG Qiu-li², AN Yun-lei²

(1.National Key Laboratory of Precision Hot Processing of Metal, Harbin 150001, China;
2.School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: Electrohydraulic forming (EHF) is a typical high speed forming technology that can be used to significantly improve the formability. It has the advantages of single die, high flexibility and high surface quality of parts, etc. Therefore, EHF technology is playing an important role in the field of precision forming of thin wall parts made of high strength sheet metal. In this work, we introduced the principle and main characteristics of EHF technology, summarized the research status of EHF technology and the two-step EHF method, and analyzed the formability sheet metal by EHF process and its influence factors. Finally, the main points in the theory and application research of EHF technology were presented and the development trend was forecast.

KEY WORDS: electrohydraulic forming; two-step method; formability

近年来, 随着航空航天、大型机械、交通运输等先进制造技术领域的快速发展, 对工业产品整体减重提出了越来越高的要求, 如何实现轻量化成为工业生产持续追求的目标和科学技术的研究热点。其中, 结构和材料轻量化是实现产品整体减重的 2 个重要方面, 为此, 轻质合金(镁合金、铝合金)、钛合金、先进高强钢等材料薄壁构件得到了越来越广泛的应

用^[1]。上述材料在室温下变形困难, 准静态条件下成形极限偏低, 制件的形状精度和尺寸精度难以满足技术要求, 目前常用热成形技术进行塑性加工, 但热成形过程能耗高, 制件零件表面氧化, 需要后续表面处理和清洁工序, 导致生产过程工序复杂、高成本和高排放。由于高速率成形技术具有零件成形精度高、表面质量好、能提高材料成形性能等优点, 在难变形材

收稿日期: 2017-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(51675128, 51475122)

作者简介: 于海平(1974—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为高速率成形、变形连接、板材成形新方法。

料的塑性加工制造中得到了越来越多的关注和典型应用。

高速率成形主要包括爆炸成形、电磁成形和电液成形3类^[2],如图1所示。相对而言,爆炸成形过程安全性较差、不可控因素较多,难以精确控制工件的变形量,为提高力能转换效率,电磁成形工件的变形区与线圈要尽量接近,同时电磁成形“挑剔”板材种类,难以加工导电性较差的材料,一般仅适用于铝合金、铜合金等。电液成形对材料电导率无要求,可用于高强度高硬度的金属板材的成形加工。电液成形依

靠液体介质传递冲击压力,电极与金属材料可以保持较大的距离,电极间加金属丝还能对冲击波波形进行控制,可用于复杂形状或多模腔零件成形^[3-4],因此,电液成形在塑性成形领域有独特的优势。文中将介绍电液成形的工艺原理、特点,以及其在工程领域中的应用,着重综述(单步)电液成形技术、两步成形方法、电液成形性能及其影响因素,同时希望基于文中的汇总以及未来学者深入的探索与研究,可以使电液成形应用更加广泛,为难变形板材精确成形提供一条高效、新颖的技术途径。

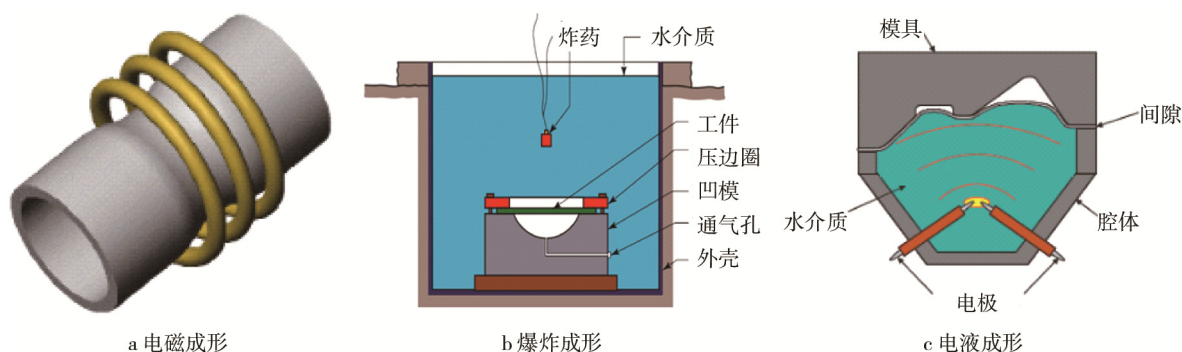


图1 典型高速率成形技术

Fig.1 Schematic diagrams of typical high speed forming technology

1 电液成形工艺原理与特点

1.1 工艺原理

电液成形是一种将存储在电容器中的电能瞬间释放在电极间隙之间,通过液体中等离子体爆炸过程获得强烈的冲击波载荷,液体介质(通常为水)传递载荷推动金属板料或管材发生塑性变形的成形制造工艺。电液成形的工艺原理见图2^[5]。当高压脉冲电容器被充电到预定电能时,放电开关(辅助间隙)闭合,高压瞬时加载到由2个电极构成的主间隙上,并将其击穿,实现放电,形成幅值高达上百kA的冲击大电流,在液体介质中引起冲击波和高速水流动压使金属成形。

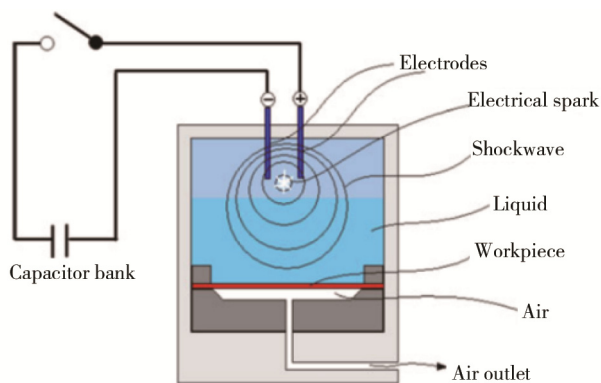


图2 电液成形原理

Fig.2 Schematic diagram of electrohydraulic forming

电液成形中冲击波是板料成形的主要力源,其产生有2种方式,一种是液体介质击穿放电,一种是电极间金属丝类介质爆炸。当对放置于液体中的一对电极施加脉冲高压时,电极间隙被瞬间击穿,产生强烈的电弧火花放电,并伴生一系列显著的物理、化学、机械效应的过程被称为液电现象^[6]。电液成形就是利用液电效应原理,通过被高压击穿液体的气化膨胀产生冲击载荷进行材料成形。电极间液体介质间隙击穿机理主要包括电子发射理论和气泡放电理论^[7]。电子发射理论是指在高压外电场作用下,电极表面与液体介质之间发生空穴或电子的交换,从阴极发射的电子电离液体分子或原子,增强了阴极表面的电场强度,进一步促进了电子的发射,当电子累积到临界值时,形成电子崩,最终导致液体介质被击穿。气泡放电理论是指在外电场中,气泡发展到临界长度或气泡链贯穿间隙导致击穿。气泡的产生机理有多种解释,包括电流热效应、离子间静电斥力、分子振荡和杂质击穿等。击穿的本质仍是电子电离,产生电子崩,只是气泡的形成降低了击穿电压,所以气泡放电理论对应于较低电压发生击穿的情形。水介质被击穿后形成等离子体放电通道,电能被瞬间释放,由于等离子体电阻很小,因此将产生几万至几十万A的放电电流。随着放电过程的进行,电能的释放使电极间场强下降,电弧中等离子体冷却,等离子体通道电阻增大,直至通道断开,此时放电过程结束^[8-11]。

在线爆电液成形中,置于两电极间的金属丝使放

电回路发生短路, 在金属导体上瞬间产生很大电流。在大电流的作用下, 金属丝及周围液体迅速汽化并形成高温高压等离子体气团, 在有限空间内体积迅速膨胀并引起爆炸, 由于液体不可压缩或者压缩量很小, 压力在极短时间内达到峰值而形成冲击波。冲击波以冲量或者冲击压力的方式通过液体介质作用于工件, 使材料发生塑性变形。金属导体的电爆炸过程一般分为以下3个阶段^[12-16]: ① 固态加热阶段, 电流在导体上产生的焦耳热使导体温度逐渐升高, 趋于熔化; ② 熔化汽化阶段, 持续的加热使导体开始熔化, 并首先在轴线区域汽化, 此时, 金属丝上的放电通道被截断, 阻抗迅速上升。由于回路中存在电感, 回路电流不会突变, 将会在汽化形成的金属蒸汽两端产生高压, 金属蒸汽随之被击穿, 形成等离子体放电通道, 阻抗迅速下降, 未汽化的金属将被继续加热; ③ 电爆炸阶段, 由于爆炸丝被液体介质包围, 金属导体在有限空间内迅速汽化产生爆炸, 进而形成可用于材料加工的冲击波, 电爆炸蒸发过程见图3^[17]。图3中为经9 kV放电的镁线, 大约放电20 μs 后, 部分缺口处开始汽化蒸发, 并且在50 μs 后开始逐渐的扩展形成高温高压气团, 即电爆炸蒸发过程。

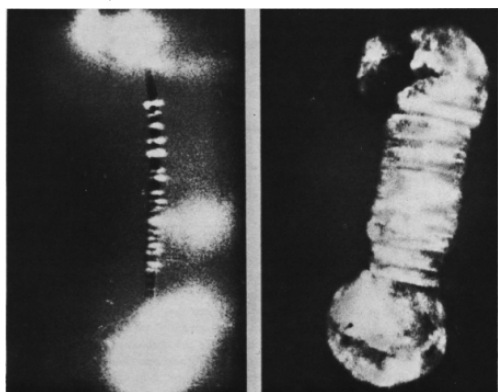


图3 电爆炸蒸发过程

Fig.3 Electric explosive evaporation process

1.2 工艺特点

与电磁成形和爆炸成形相比, 电液成形自有明显优势。电磁成形对线圈与工件之间的距离有严格要求, 同时对被加工板材电磁属性挑剔。电液成形依靠液体介质传递能量, 对被加工金属板材的电磁属性不敏感; 能量利用率相对电磁成形高^[18], 可以实现更大的变形, 同时, 电极与金属板间距离设置有较大柔性。爆炸成形同样利用水下冲击波使工件变形, 但其安全性差, 引爆过程复杂, 不容易控制冲击波的能量。相比于间隙放电方式, 线爆电液成形具有更突出的工艺特点^[19-21]: ① 是一种高速率成形技术, 具有高速率成形的成形精度高、工件回弹小的优点, 能够提高材料成形性; ② 放电过程稳定, 重复性强且安全性高; ③ 无需凸模, 简化了模具结构, 消除了凸、凹模配

合问题, 能够缩短生产周期, 降低成本, 但是要考虑密封及排气问题; ④ 通过调整金属丝的布置路径控制放电弧道, 以得到合理的冲击波形状和压力分布, 利用爆炸丝可以产生球面波、柱面波、条形波及其他复杂形状波, 冲击波的波速远大于声速, 冲击波作用于工件上使成形速度达到几百米每秒, 为传统冲压加工的千倍以上, 带金属丝的电液成形可成形大型工件或细长管件; ⑤ 对材料电导率无要求, 可用于高强度高硬度的金属材料的冲压加工, 如胀形、翻边、冲孔、拉伸等多种工序, 应用范围广。

2 电液成形工程应用与研究进展

前苏联科学家 YUTKIN 于 20 世纪 50 年代, 将水中放电产生的冲击波应用于加工领域, 开创了电液成形技术研究^[2]。20 世纪六七十年代, 很多学者致力于电液成形研究, 相关研究论文和专利成果主要涉及放电电极设计、放电触发方法、极间金属线连接等方面。瞬时放电的高压储能设备、电路控制技术、密封方法等方面发展滞后, 影响实验的安全性, 限制了电液成形的工业应用^[22-23]。近年来, 国外科研人员充分利用高速率成形提高难变形材料成形性的优点, 对高强度难变形材料启动了电液成形技术和理论研究, 如先进高强钢和高强度铝合金板材等。下面就单次电液成形(单步法电液成形)、两步法电液成形的具体应用和研究进展, 以及电液成形对材料成形性能的影响等方面来论述和分析电液成形技术的研究和发展情况。

2.1 单步法电液成形

电液成形可以通过调整金属丝的形状控制放电弧道, 以得到合理的冲击波形状和压力分布, 所以可以成形各种复杂形状的工件。电液成形过程控制参数主要包括放电能量大小、金属丝位置、金属丝直径及材料、液体介质、间隙长度等。电液成形在不锈钢管、铝合金管成形方面的加工实例见图4^[17], 一般用来管路转接头成形、管端成形、管胀形以及成形件冲裁等加工, 同时, 改变金属丝位置及调节施加压力会对工件产生不同程度的影响。目前电液成形已经在提高薄壁件成形精度、高强度钣金件冲裁等方面展开研究和实施应用。

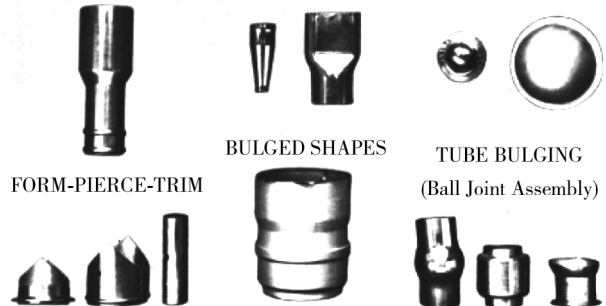
1) 成形与校形。对于带有局部深凹槽或尖锐转角的复杂形状零件来说, 局部变形量非常大, 传统冲压成形时会因超过材料成形极限而破裂。鉴于电液成形能够有效提高材料的成形性能, 可被用于成形带有局部深凹槽的复杂零件, 对简化工艺流程、减少焊缝、提高生产效率都有重要意义^[24]。电液成形在校形方面的应用见图5^[25], 首先通过普通钢模冲压工艺进行变

形比较均匀的大面积成形,再用电液成形实现尺寸急剧变化、圆角半径小的局部特征成形,又称为整形。

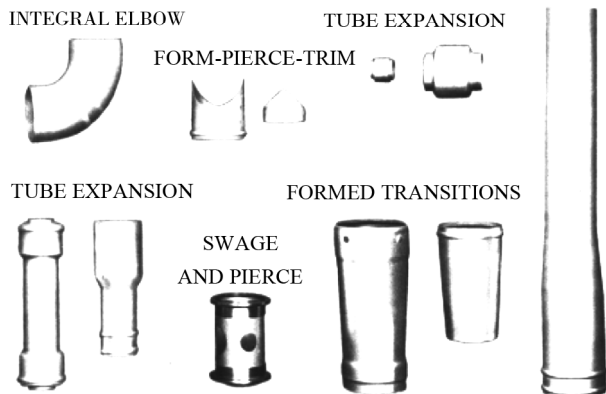
近年来,电液成形技术已经在很多领域得到了应用,尤其是在汽车钣金件制造和特种航空航天材料加工等领域有应用前景。若能通过专业技术人员的努力,充分发挥其技术优势,相信未来在航空航天构件、复杂形状零件成形等方面都将发挥电液成形技术的作用。

2) 冲裁。在普通切边工序中,由于高强钢强度高,模具磨损严重,会导致凸凹模间隙越来越大,切边后产生显著毛刺等缺陷。电液冲裁能够解决普通冲裁凸模刃口部位间隙磨损严重这一问题,具有明显的应用价值。GOLOVASHCHENKO S F 等^[26]利用液电

FORMED TRANSITION FORMED NOZZLE DRAWN HEMISPHERE



a 不锈钢管成形



b 铝合金管成形

图4 电液成形的典型应用

Fig.4 Typical applications of electrohydraulic forming



图5 电液成形在校形领域的应用

Fig.5 Application of electrohydraulic forming for shape calibration

效应,对高强钢和超高强度钢进行电液冲裁研究,所设计装置模型见图6。研究发现,板坯上面的空腔纵向距离影响能量利用率,必须保证其大于3倍板料厚度,才能成功切断板材。另外,在2 mm厚的4130钢板冲裁件中发现了二次剪切区,见图7^[26],表明电液成形冲击波载荷幅值和传递路径决定剪切变形的分区及其变形顺序。

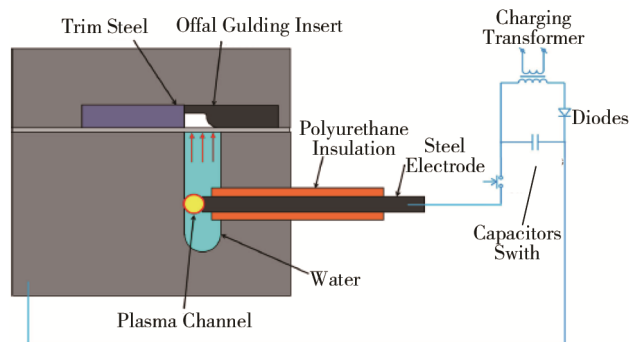
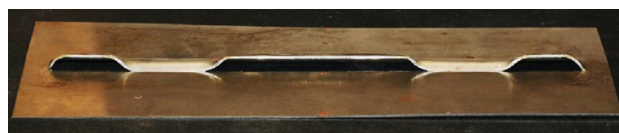
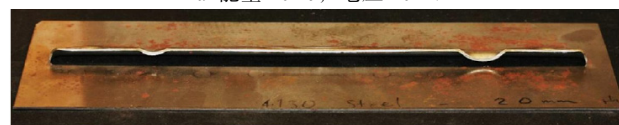


图6 电液冲裁原理

Fig.6 Schematic diagram of electrohydraulic blanking



a 能量 40 kJ, 电压 20 kV



b 能量 50.6 kJ, 电压 22.5 kV

图7 电液冲裁产生的二次剪切

Fig.7 Secondary shear in electrohydraulic blanking

2.2 两步法电液成形

对于成形面积大、局部变形复杂、有破裂或起皱危险区等加工要求,单次电液成形可能不足以获得满足尺寸和形状精度要求的工件。虽然电液成形能显著提高材料成形性能,但是毕竟变形时间极短,变形过程中的可控性几乎为0,因此,单步电液成形难以实现复杂形状零件的均匀变形控制。针对此问题,在单步成形的基础上,目前有学者和工程技术人员借鉴多步(分段)加工的思路提出了两步(法)电液成形。研究发现,两步法电液成形能够解决单步电液成形的上述条件下的局限性。

对于有危险区的零件,可以采用先拆分成形再焊接的方法,也可采用超塑成形或热态成形工艺,但工艺过程对成形材料有特殊要求、能耗高、材料氧化、加工周期长等。GOLOVASHCHENKO S F^[27]提出了两步法电液成形,其核心思想是终成形前在危险区附近得到“凸起”的中间毛坯形状,扩大变形区面积、增加参加终成形的材料,有助于实现危险区金属的填充,

提高板材成形性能, 与为提高管材液压胀形极限所设计的有益褶皱^[28]原理相似。第1步成形或预成形可采用多种成形方法来完成, 后一步成形或终成形由电液成形方法完成。带有危险区的零件模型见图8^[27]。为充分发挥预成形的作用, GOLOVASHCHENKO S F等^[27]通过有限元数值模拟, 由目标件最终形状向预成形后中间毛坯形状逆向设计, 确定了板材变形均匀性最有利的预成形中间毛坯形状。GILLARD A J等^[29]首先对工件进行准静态预变形, 再用电液成形方法进行终成形, 研究了准静态预变形对2种双相钢 DP780 和 DP980 成形性的影响。实验发现, 单步电液成形和有预变形的电液成形数据点均在传统成形极限线以上, 说明电液成形是提高材料的成形极限的决定因素。

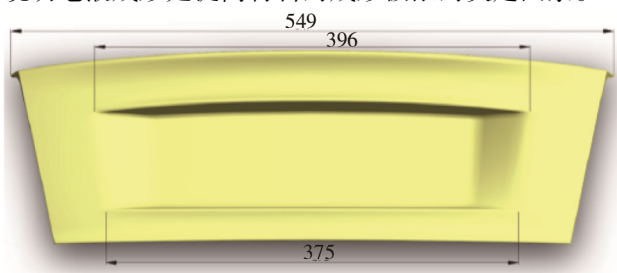


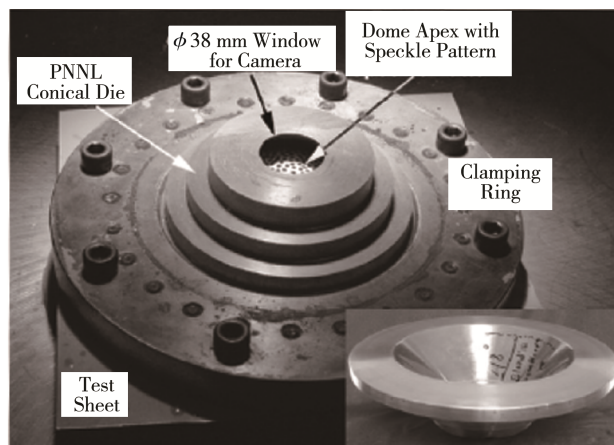
图8 局部深凹或弯角尖锐的复杂形状零件

Fig.8 Complex parts with deep concave or sharp corners

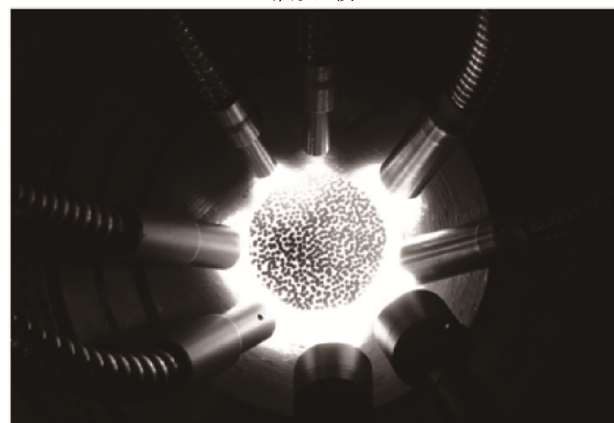
2.3 材料成形性及其影响因素

在高速率电液成形过程中, 材料成形性得到显著提高, 很多学者对这方面进行过相关论述^[27,29-31]。ROHATGI A 等^[30-31]对无凹模自由电液成形和圆锥形凹模电液成形过程进行研究, 首次应用图像数字散斑处理技术(DIC)测试动态变形, 对无凹模自由成形过程垂直方向位移、运动速度、应变及应变速率随时间变化规律进行了测试和分析。应用的试验装置见图9^[30], 对5182-O铝合金和DP600钢板材电液成形中的变形历史进行量化分析, 结果见图10^[32]。研究表明, 无论是自由胀形还是在锥形模具中成形, 板料顶点处的应变路径大体上是线性的。当加外部约束时, 其应变路径相对于自由胀形发生了改变, 某一方向上的主应变相对增大。由于应用高速 DIC 技术无法观测局部发生破裂时的应变状态, 因此还不能证实外部约束能够提高材料的成形性, 但是能证明不同的外部约束条件确实改变了坯料的应力状态及应变路径, 为深入分析提高成形性机制提供了可靠的实验。应变与应变速率之间关系曲线见图10a, 表明随着应变和应变速率不断增大, 在濒临断裂时达到最大的应变速率, 约为 3900 s^{-1} ; 应变路径对比见图10b, 表明实际测量的应变路径较理论模型分析应变路径更接近平面应变状态。

AA6061-T4 铝合金在高速率电液成形和准静态成形时的成形极限对比见图11a, 高速率成形时, 在



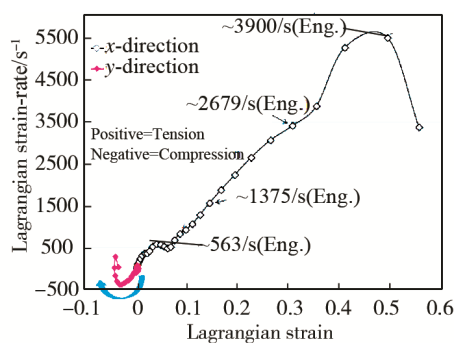
a 锥形凹模



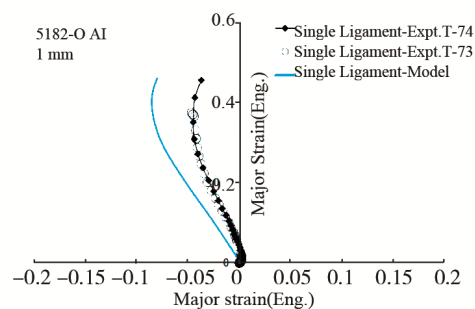
b 高速摄像实验过程

图9 试验装置实物

Fig.9 Pictures of test equipment



a 应变与应变速率之间关系曲线



b 应变路径对比

图10 试件顶点处实验数据

Fig.10 Experimental data at specimen vertex

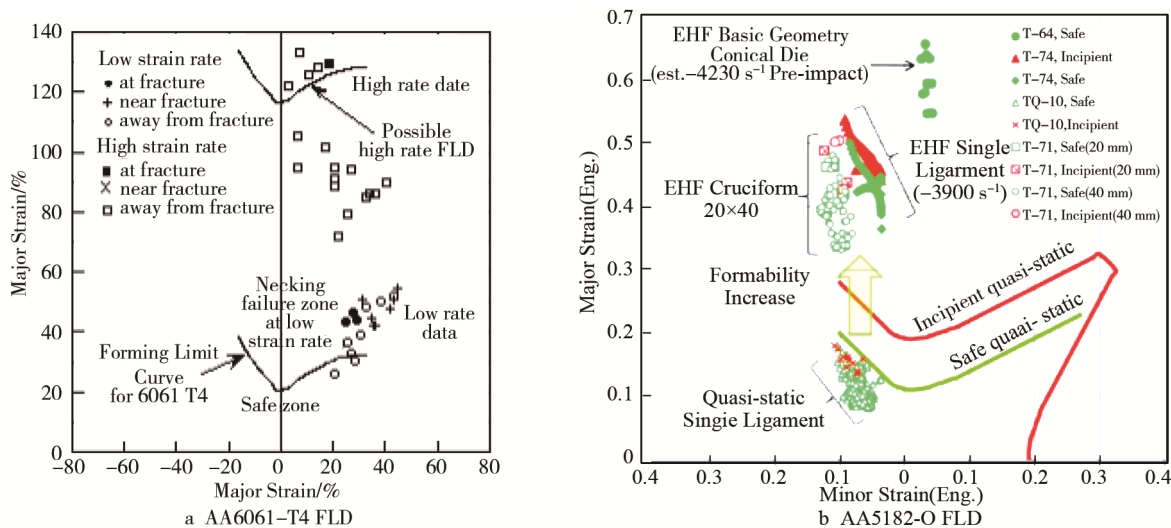


图 11 2 种铝合金板材的成形极限

Fig.11 Forming limit diagram of two kind of aluminum alloy sheets

较宽的成形速率范围内工件成形性能都可以明显提高,成形极限提高到近 6 倍左右^[33]; AA5182-O 铝合金准静态和多种实验条件下的电液成形得到的双拉应变状态成形极限见图 11b,数据表明电液成形将该材料的成形极限提高了 2.5 倍左右^[32]。

GOLOVASHCHENKO S F 等^[5]对双相钢的电液成形性能进行了测试,同时采用极限弧顶高度试验(limiting dome height testing)测定 4 种材料(DP500, DP590, DP780, DP980)的准静态成形极限。通过成形极限数据对比表明,电液成形能够提高双相钢材料的成形性能,在平面应变状态下,金属的最大延伸率大约提高 3~5 倍。对于双相钢而言,高速率变形过程对成形性的影响与应变速率值范围有关,尤其对于应变速率不敏感材料,如 DP590^[34]。NEUGEBAUER R 等^[34]研究了应变速率(10^{-3} ~ 10^2 s⁻¹)对 DP590 钢板的成形性能的影响,通过凸模胀形实验对准静态和高应变速率下的成形极限进行测定。在上述应变速率范围内,DP590 的高应变速率成形极限线在全域内相对准静态成形极限降低 0.5%~2.8%。由此可推知,高速率变形对成形性能的影响因材料和应变速率而异,要依据具体工件对材料成形性的要求和与成形工艺对应的材料应变速率范围来决定成形速度。此外,陆辛通过实验发现,当电极间爆炸丝长度超过一定值时变形能趋于定值,而爆炸丝直径有最佳值^[35]。邓琦林等^[36]在拉深实验中发现,多次电液成形驱动拉深可以提高极限成形深度,减小变薄率。

目前美国、俄罗斯等发达国家对电液成形方法研究得较为成熟,能够对多种高强度合金钢、耐高温合金等难变形材料进行加工,具备生产高精度复杂零件的技术能力。近年来,美国福特汽车公司、奥克兰大学、西北太平洋国家实验室(PNNL)和法国斯特拉斯

堡大学等单位进行了汽车用先进高强钢板材的电液成形研究,在可持续电极系统、密封系统、高效排气系统和数值模拟技术等方面取得了一系列研究成果,已经能够用电液成形方法加工出具有复杂形状的典型构件,在该研究领域处于领先地位。

国内北京机电所曾在 21 世纪初开展过电液成形相关研究^[20,35],哈工大于 2014 年开始电液成形研究工作^[18,37]。在先进高强钢板材的电液成形研究方面,国内则刚刚启动,在理论和实践上存在许多未知点,与国外先进水平相比有很大差距。

3 研究与发展趋势

目前,国外的电液成形研究主要分为以下几个方面:材料成形性研究,应变速率、应变路径对成形性的影响,两步法、预应变提高材料成形性实验研究,变形过程数值模拟以及电液冲裁等。通过对电液成形过程材料成形性能及提高成形性工艺方案进行研究,论证了电液成形中材料成形性及成形极限得到明显提高。与电磁成形、爆炸成形等高速率成形方法提高成形极限机理相似,电液成形也可以用同样的方式进行解释。也有部分学者认为,并不是所有材料在电液成形中均表现出更好的成形性,只有当应变速率敏感性材料处于某种应变状态下,其成形性才会得到提高。通过高速摄像及图像处理技术,电液成形过程中各变形参量得到量化,这对分析材料变形过程及成形性具有重要意义。应变路径的改变提高了成形性,但这只是某种成形条件下的现象,这种分析只是对现象的描述,对于成形性提高是否与应变路径有关,目前还不能给出肯定的结论。

电液成形相对于电磁成形和爆炸成形优点明显,

随着对电液成形的理论研究与工程应用的不断推进, 该技术将会在难变形的特种成形领域有非常广阔的应用前景。目前正在进行管件电液成形的数值模拟与试验研究, 相信不久的将来仿真技术将会被广泛应用于成形领域, 并且理论模型将会得到进一步的突破。随着研究的不断深入, 相信未来对于“应变路径的改变提高了成形性与否”这一问题将会得到明确的答案, 并且在现有的基础上对成形设备进一步精简与完善, 使模具结构更加简单, 降低成本。希望理论研究与实际运用更加契合, 尽量使更多的材料在电液成形中表现出更好的成形性, 提高成形效率。

目前国内从事电液成形研究工作的科研人员较少, 这严重制约了国内电液成形技术的发展。针对新时期先进制造领域对材料特种成形技术的迫切需求, 希望能够扩展可加工材料范围和成形能力, 最终为高强度、高温合金材料等难变形板材成形提供一个有效技术手段。

参考文献:

- [1] 康永林. 汽车轻量化先进高强度钢与节能减排[J]. 钢铁, 2008, 43(6): 1—7.
KANG Yong-lin. Lightweight Vehicle, Advanced High Strength Steel and Energy-Saving and Emission Reduction[J]. Iron and Steel, 2008, 43(6): 1—7.
- [2] 李春峰. 高能率成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
LI Chun-feng. High Energy Rate Forming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [3] 龚维四. 液电成型[J]. 新技术新工艺, 1984, 6: 17—18.
GONG Wei-si. Electrohydraulic Forming[J]. New Technology & New Process, 1984, 6: 17—18.
- [4] 张雷, 周锦进. 液中放电成形技术[C]// 第八届全国电加工学术年会论文集, 1997.
ZHANG Lei, ZHOU Jin-jin. Underwater-discharge Forming Technology[C]// Proceedings of the 8th National Symposium on Electrical Processing, 1997.
- [5] GOLOVASHCHENKO S F, GILLARD A J, MAMUTOV A V. Formability of Dual Phase Steels in Electrohydraulic Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213 (7): 1191—1212.
- [6] 王兵. 液电效应及其应用[J]. 科技创新导报, 2009, 22: 52—53.
WANG Bing. Electrohydraulic Effect and its Application[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009, 22: 52—53.
- [7] 黄文力, 孙广生, 王珏, 等. 液体介质击穿机理研究进展[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 131—134.
HUANG Wen-li, SUN Guang-sheng, WANG Jue, et al. Progress in the Study of Breakdown Mechanism about Liquid Dielectric[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(2): 131—134.
- [8] 张赞阁, 庞桂兵, 卜繁岭, 等. 液电成形技术研究进展[C]// 第15届全国特种加工学术会议论文集(下), 2013.
ZHANG Zan-ge, PANG Gui-bing, BU Fan-ling, et al. Research Progress of Electrohydraulic Forming Technology[C]// Proceedings of the 15th National Conference on Special Processing (II), 2013.
- [9] 金明剑. 水下等离子体声源电特性的基础性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(电工研究所), 2004.
JIN Ming-jian. Fundamental Study on the Electrical Characteristics of Underwater Plasma Sound Source[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Electrical Engineering), 2004.
- [10] 王一博. 水中等离子体声源的理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
WANG Yi-bo. Theoretical and Experimental Study of the Underwater Plasma Acoustic Source[D]. Hunan: National Defense Science and Technology University, 2012.
- [11] 孔祥利. 脉冲大电流的微分电路法测试[D]. 西安: 西北大学, 2010.
KONG Xiang-li. Differential Circuit Method for Measuring High Pulse Current[D]. Xi'an: Northwestern University, 2010.
- [12] 朱锦. 自动丝段式电爆方法的实现及工艺试验[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
ZHU Jin. The Achievement of Method of Wire Explosion and Experiments[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010.
- [13] 李业勋. 金属丝电爆炸机理及特性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2002.
LI Ye-xun. Study on the Mechanism and Characteristics of Electrically Exploding Wire[D]. Mianyang: Institute of Fluid Physics Chinese Academy of Engineering Physics, 2002.
- [14] 陈长东. 金属丝段电爆炸的电参数测试研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
CHEN Chang-dong. The Measurement and Study of Electrical Parameters during the Segmented Wire Electrical Explosion[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [15] 杨家志. 电爆喷涂过程中阻抗变化规律与实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
YANG Jia-zhi. The Variation of Wire Impedance and Experimental Research during Wire Exploding Spray Coating Process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [16] TIMOSHKIN I V, FOURACRE R A, GIVEN M J, et al. Hydrodynamic Modeling of Transient Cavities in Fluids Generated by High Voltage Spark Discharges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(22): 4808—4817.
- [17] BRUNO E J. High-velocity Forming of Metals[M]. American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 1968.
- [18] 于海平, 孙立超, 张旭, 等. 铝合金管坯电液成形实验研究[J]. 锻压技术, 2016, 41(3): 51—57.

- YU Hai-ping, SUN Li-chao, ZHANG Xu, et al. Experimental Investigation on Electrohydraulic Forming of Aluminum Alloy Tube[J]. Forging &Stamping Technology, 2016, 41(3): 51—57.
- [19] UAKOSHI M, YOSHITOM T, KATO A. Preparation of Aluminum and Aluminum-silicon Powders by Wire Explosion Resulting from Electric Discharge[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30: 1240—1244.
- [20] 陆辛, 王仲仁. 电液线爆成形工艺[J]. 锻压技术, 2002, 27(2): 34—35.
- LU Xin, WANG Zhong-ren. Electrohydro Wire Exploding Forming Technology[J]. Forging & Stamping Technology, 2002, 27(2): 34—35.
- [21] VOKURKA K, PLOCEK J. Experimental Study of the Thermal Behavior of Spark Generated Bubbles in Water[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 51: 84—93.
- [22] GILLARD A J, GOLOVASHCHENKO S F, MAMUTOV A V. Effect of Quasi-static Prestrain on the Formability of Dual Phase Steels in Electrohydraulic Forming[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(2): 201—218.
- [23] DEHRA M S. High Velocity Formability and Factors Affecting it[D]. Columbus: The Ohio State University, 2006.
- [24] 庞桂兵, 张赞阁, 赵益昕, 等. 高速率成形技术进展[J]. 大连工业大学学报, 2014, 5: 381—386.
- PANG Gui-bing, ZHANG Yun-ge, ZHAO Yi-xin, et al. Advance in High Speed Forming Technology[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2014, 5: 381—386.
- [25] GOLOVASHCHENKO S F, GILLARD A J, MAMUTOV A V, et al. Pulsed Electrohydraulic Spring back Calibration of Parts Stamped from Advanced High Strength Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 2796—2810.
- [26] GOLOVASHCHENKO S F, GILLARD A J, MAMUTOV A V, et al. Electrohydraulic Trimming of Advanced and Ultra High Strength Steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(4): 1027—1043.
- [27] GOLOVASHCHENKO S F, BESSONOV N M, ILINICH A M. Two-step Method of Forming Complex Shapes from Sheet Metal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5): 875—885.
- [28] 王小松, 苑世剑, 王仲仁. 内高压成形起皱行为的研究[J]. 金属学报, 2003, 39(12): 1276—1280.
- WANG Xiao-song, YUAN Shi-jian, WANG Zhong-ren. Research on Wrinkling Behavior in Tube Hydro-forming[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(12): 1276—1280.
- [29] GILLARD A J, GOLOVASHCHENKO S F, MAMUTOV A V. Effect of Quasi-static Prestrain on the Formability of Dual Phase Steels in Electrohydraulic Forming[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(2): 201—218.
- [30] ROHATGI A, STEPHENS E V, DAVIES R W, et al. Electrohydraulic Forming of Sheet Metals: Free-forming vs. Conical-die Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(5): 1070—1079.
- [31] ROHATGI A, STEPHENS E V, SOULAMI A, et al. Experimental Characterization of Sheet Metal Deformation during Electrohydraulic Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1824—1833.
- [32] ROHATGI A, SOULAMI A, STEPHENS E V, et al. An Investigation of Enhanced Formability in AA5182-O Al during High-rate Free-forming at Room-temperature: Quantification of Deformation History[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3): 722—732.
- [33] VOHNOUT V J. A Hybrid Quasi-static/Dynamic Process for Forming Large Sheet Metal Parts from Aluminum Alloys[D]. Columbus: Ohio State University, 1998: 1—20.
- [34] NEUGEBAUER R, BOUZAKIS K D, DENKINA B, et al. Velocity Effects in Metal Forming and Machining Processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(2): 627—650.
- [35] 陆辛, 王仲仁. 电液成形工艺实验研究[J]. 锻压技术, 2002, 27(3): 29—31.
- LU Xin, WANG Zhong-ren. Experimental Study on Electrohydraulic Forming Process[J]. Forging &Stamping Technology, 2002, 27(3): 29—31.
- [36] 邓琦林, 刘宏军, 周锦进, 等. 液电成形金属零件的实验研究[J]. 航空精密制造技术, 1999, 35(4): 15—17.
- DENG Qi-lin, LIU Hong-jun, ZHOU Jin-jin, et al. Experimental Study on Electrohydraulic Forming of Metal Parts[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1999, 35(4): 15—17.
- [37] YU Hai-ping, Sun Li-chao, ZHAGN Xu, et al. Experiments on Electrohydraulic Forming and Electromagnetic Forming of Aluminum Tube, 2017, 89(9): 3169—3176.