

难变形板材复杂形状构件 粘性介质压力成形技术

Viscous Pressure Forming (VPF) for Difficult-to-Form Sheet Metal Parts With Complex Three-Dimensional Shape

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 王忠金



王忠金

哈尔滨工业大学教授、博士生导师。长期从事难变形板材塑性成形技术和材料加工过程力学解析与数值模拟研究,所提出的高强、低塑、耐热材料薄壁/超薄壁复杂形状构件粘性介质压力整体成形技术,已有多项研究成果在航空航天领域实现工程化应用,解决了制约某些飞行器制造技术瓶颈问题,发表学术论文60余篇,获得授权发明专利7项。

板材构件在工业领域占有较大的比例,其成形制造是重要的加工技术课题之一。随着装备制造水平的发展,对板材构件的使用性能、可制造性提出了更高的要求。就材料而

为了提高板材零件成形制造性能,适应零件使用性能和可靠性的要求,缩短新材料应用周期,解决多品种、小批量、难变形板材和复杂形状构件成形制造技术问题,迫切需要发展新的成形技术。

言,对高强度耐热合金(如镍基高温合金)及低塑性轻质合金(如铝合金)等难变形材料的需求越来越多,成形制造技术应能够较快地发展以适应新材料的应用。就板材构件形状而言,具有特殊功能作用的异形复杂形状零件日益增多,力求降低分体组焊程度,提高整体成形制造水平,减少焊缝,提高零件的使用可靠性。就装备减重与提高使用性能而言,在满足设计要求的前提下,能够减小构件壁厚,降低构件重量,充分发挥已有成熟材料的应用潜力,提高轻量化构件的可成形制造性,有利于提高飞行器的推质比。就零件的表面质量而言,力求最大限度地减少表面缺陷,降低或避免二次加工带来的质量隐患,提

高装备的疲劳寿命、使用的可靠性等。上述需求使得已有成形制造技术面临着挑战,为了提高板材零件成形制造性能,适应零件使用性能和可靠性的要求,缩短新材料应用周期,解决多品种、小批量、难变形板材和复杂形状构件成形制造技术问题,迫切需要发展新的成形技术。

20世纪90年代中期发展起来的粘性介质压力成形(Viscous Pressure Forming, VPF)较好地适应了这种需求,国外对该技术在航天、航空、车辆领域的应用进行了深入研究,已研制了13000kN粘性介质压力成形机。国内哈尔滨工业大学率先开展了此项技术的基础性和应用性研究,已取得较好的成果,解决了高新工程关键

制造技术,已在涡扇、涡喷、涡轴、冲压等飞行器研制中实现工程化应用,充分反映出该技术所具备的独特优势与应用价值和潜力。

VPF 原理

粘性介质压力成形(VPF)是1992年提出的一种板材成形技术^[1]。与已有成形方法的本质区别在于,粘性介质压力成形采用半固态、可流动并且具有一定粘度和速率敏感性的物质作为凸模材料,称作粘性介质。粘性介质不同于液压成形采用的液体压力源,不符合帕斯卡(Pascal)定律,受力状态下的粘性介质所形成的压力场可以呈现非均匀分布,使板坯料受到的粘性介质压力可以是非均匀的;由于粘性介质速率敏感性,粘性介质压力场可以自适应于板坯料的变形而变化;具有粘性特征的粘性介质不但对板坯料施加正向压应力,而且沿板坯料表面的切向方向施加粘性附着应力,切向粘性附着应力

使板坯料处于较好的应力状态,有利于变形均匀化;粘性介质也不同于固态凸模(如金属、聚氨酯橡胶等),具有的半固态性质可以采用注入的方式加载和排放,成形过程中粘性介质可以通过控制注入和排放,得到可控制的非均匀粘性介质压力场。成形过程粘性介质始终包覆在板坯料表面,施加可控制的自适应于板坯料变形的非均匀压力场(正向压应力和切向粘性附着应力),使板坯料变形过程材料流动的控制成为可能,板材成形性的提高有了可实施的途径,这有助于提高板材构件(尤其是难加工材料)成形制造性^[1-3]。

成形过程中粘性介质可以作用于板坯料一侧,或者在两侧同时加载,通过注入与排放顺序和速度的调整,控制在板坯料表面的压力分布和大小,同时与压边力控制相匹配,使板坯料在粘性介质压力和压边力的协调作用下成形为所要求的零件形状,粘性介质压力成形过程原理如图

1所示^[1]。图1为板坯料两侧同时加载粘性介质情况,粘性介质压力和压边力之间的匹配控制是粘性介质压力成形技术的关键。

采用粘性介质作为凸模,填补了半固态材料作为凸模的空白,形成了固态→半固态→液态连续物态凸模材料的选择。

VPF 特点

1 粘性介质选择范围宽

粘性介质一般可选择高分子聚合物材料如硅橡胶类等,如美国的C-11、C-12和国产的聚二甲基硅氧烷等^[2,4]。粘性介质对板材零件表面无损害作用,并可重复使用。成形过程粘性介质对板坯料表面具有润滑作用,对压边圈位置板坯料流动十分有利,避免表面划痕、擦伤等缺陷的产生,零件表面质量保持或接近于原坯料水平^[4-6]。

粘性介质介于固态和液态之间,与液体和固体凸模材料比较具

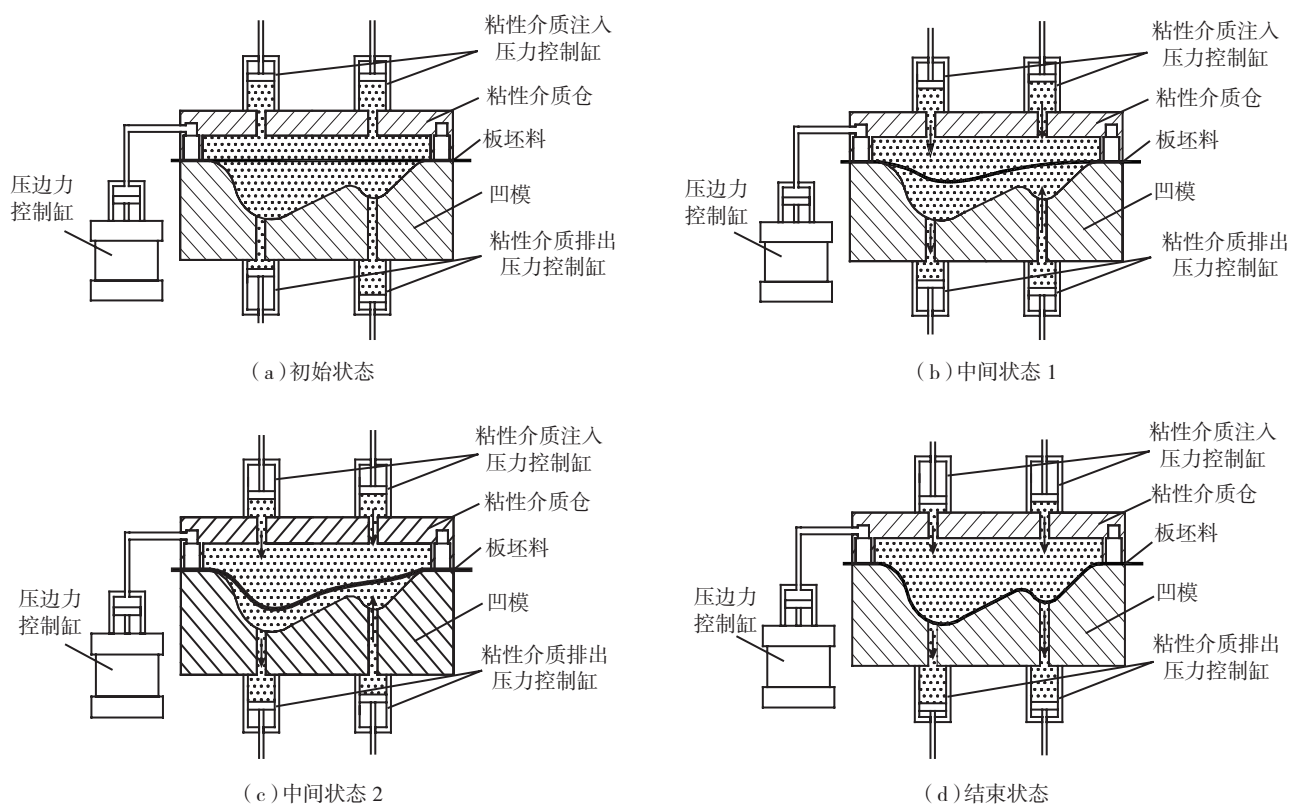


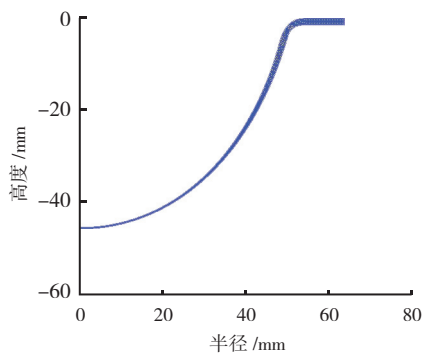
图1 粘性介质压力成形过程原理

有较宽的选择范围。粘性介质粘度较低时,粘性介质压力成形类似于液压成形;粘性介质粘度较高时,与刚性凸模成形相近;粘性介质的性能对板材粘性介质压力成形性有很大的影响。采用两种粘度分别为 $10000\text{Pa}\cdot\text{s}$ 和 $5000\text{Pa}\cdot\text{s}$ 粘性介质,对AA2008-T4板材粘性介质压力胀形过程进行有限元分析(如图2所示),粘度为 $5000\text{Pa}\cdot\text{s}$ 时对应的壁厚最大减薄位置位于中心处,而粘度为 $10000\text{Pa}\cdot\text{s}$ 时壁厚最大减薄位置转移到距中心约25mm处^[2],对于一定材料的构件要选择合适粘度的粘性介质。

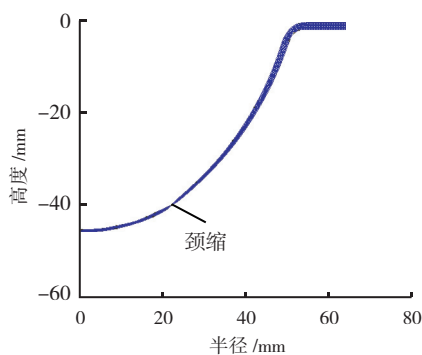
2 粘性介质充填性好、构件成形尺寸精度高

粘性介质的可流动性使得板坯料成形过程充填性好,尤其对于具有小半径曲面的复杂形状构件,成形贴模性好、尺寸精度高^[6-8]。比较聚氨酯橡胶成形,与聚氨酯橡胶成形相比,聚氨酯橡胶的有限变形极限限制了充填性,不适合于具有小半径曲面板材构件成形。飞行器相当部分复杂板材构件由橡皮囊液压成形,但是对于成形落差很大的构件存在着困难。对于刚性凸模成形,凸、凹模之间的相对位置精度会限制较高尺寸精度构件成形;如具有等间距、不等高度、局部小半径曲面的波纹状构件(如图3所示)、局部具有形状突变的异形曲面板材零件(如图4所示)等无法用刚性模成形,而采用粘性介质可成功地成形出这些零件。粘性介质的速率敏感性使得板坯料所受到的粘性介质压力自适应于自身的变形,在发挥良好充填性的同时,对于板坯料的回弹、扭曲、翘曲等具有很好的抑制作用,避免了形状和尺寸缺陷。这对于高强度材料(如镍基高温合金)、大尺寸超薄壁厚(0.3~0.5mm)零件成形质量的提高十分有利^[6-7]。

3 粘性介质可以抑制板材局部减薄、降低回弹



(a) $5000\text{Pa}\cdot\text{s}$



(b) $10000\text{Pa}\cdot\text{s}$

图2 粘度对AA2008-T4板材粘性介质压力成形过程的影响

粘性介质的粘性特性使得板坯料表面受到切向粘性附着应力的作用,相当于沿板坯料表面施加拉力,有利于板坯料流入模具型腔,这是其他成形技术所不具备的,这对于低塑性和形状复杂的板材构件成形制造性的提高十分有益。板坯料这种应力状态缓解或避免了局部的应力集中,成形件壁厚变化较小。对于图3中的构件,板坯料在切向粘性附着应力的作用下,材料向小半径曲面处流动,有利于局部小半径($\leq 2.0\text{mm}$)曲面成形,使得壁厚很薄(0.3~0.5mm)的构件可以实现近等壁厚成形(减薄率 $\leq 4\%$)。而对于刚性凸模成形,刚性凸模逐渐与板坯料接触,形成局部拉伸,导致应力集中,出现局部颈缩现象^[4,10]。

对阶梯形构件成形要合理分配板坯料的流动,通常的钢凸模成形采用多道次成形,而采用粘性介质压力成形可以一步成形,通过优化压边力

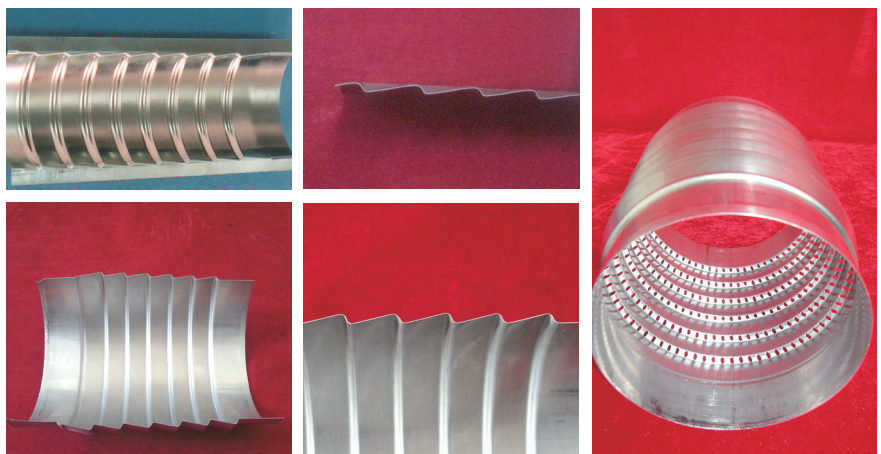


图3 局部小半径曲面的波纹状构件

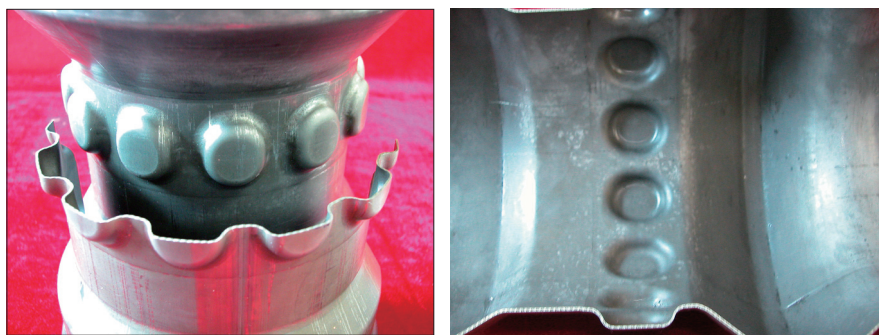


图4 局部具有形状突变的异形曲面板材构件^[9]

和粘性介质注入压力的匹配关系,控制板料流动,成形构件尺寸精度高,表面质量较好。采用粘性介质压力成形的材料为防锈铝的阶梯形构件如图5所示,虽然所用铝合金延伸率和抗拉强度较低、回弹较大,但对壁厚为1.0mm的成形构件,壁厚分布较为均匀,尺寸精度较高。

粘性介质压力成形的有机透明材料构件如图6所示,对于厚度为1.0mm的坯料,可以实现较大程度的变形,变形后的构件仍具有很好的透明性,克服了其他成形方法对透明性产生不利影响的缺点。

粘性介质压力成形的独特优势为型面曲率变化大、无法整体成形制造、只有借助于分体成形组焊的构件整体成形提供了条件,提高了使用可靠性并且减少了工序。单位尺寸直径变化比较大的异形曲面构件如图7所示,原有制造方法为先分体成形,然后组合焊接。粘性介质压力成形可一次整体成形,零件壁厚变化较小。

粘性介质压力成形过程板坯料在切向粘性附着应力作用下,有助于坯料流入和充填曲率变化较大的型腔。切向粘性附着应力随粘性介质压力的增大而提高,对于不同强度板材构件的成形,可以通过粘性介质压力控制其大小。

4 粘性介质易于密封和形成可控高压场

粘性介质压力是粘性介质压力成形技术的重要技术指标,获得较高的压力并能够在成形过程进行控制,是满足不同强度板材零件成形和工程化应用的必要条件。由于粘性介质的可流动性,粘性介质压力成形过程处于一定压力状态的粘性介质必须放置于密封的容仓内,并能够与注入和排放系统连接以对成形的板坯料加载和卸载。因此,至少要考虑粘性介质容仓与板坯料、粘性介质容仓与注入和排放系统之间的界面密封

问题。

由于粘性介质的半固态特性,与液压成形比较,界面密封比较容易实现,这为获得和控制成形所需较高的粘性介质压力提供了可能性。对于

圆端界面,采用国产密封元件,最大成形工作压力已达到160MPa;对于非圆端大尺寸矩形界面,采用国产低成本材料,在800mm×80mm的尺寸界面上,最大成形工作压力已达到



图5 铝合金阶梯形构件

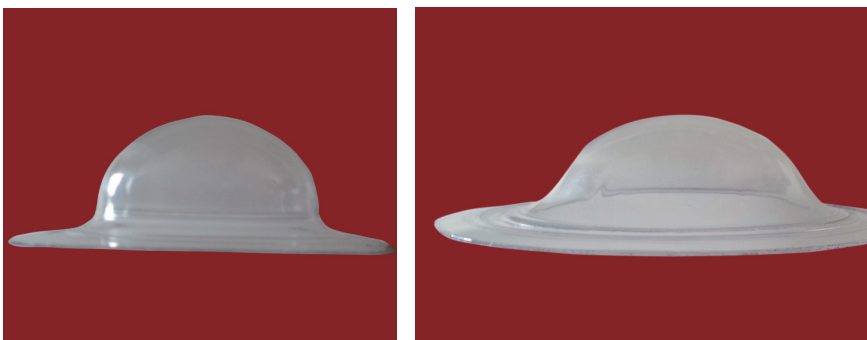
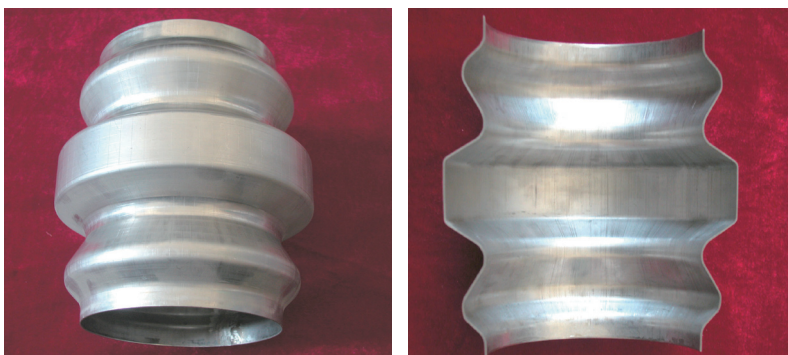
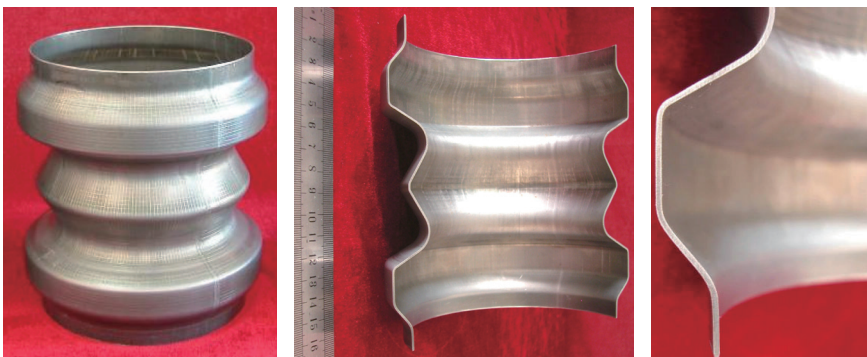


图6 有机透明材料构件



(a) 曲率变化最大位置在中心处



(b) 曲率变化最大位置靠近两端

图7 异形曲面构件粘性介质压力整体成形

80MPa^[11-13]。所达到的技术指标为高强度、复杂形状板材零件成形和工业应用提供了条件,完全满足所研制的涡扇、涡喷、涡轴、冲压等飞行器工程化应用需要。

由于压力控制或成形失败溢出的粘性介质可以回收,不存在压力控制或成形失败泄漏飞溅造成生产现场明显污染的问题。

基础与应用研究

1 板材粘性介质压力成形性

LY12CZ 的粘性介质压力胀形和液压胀形对比试验结果表明,粘性介质压力胀形试件极限高度提高了 12.2% (如图 8 所示),应变分布较好^[13-14]。

Al6111-T4 材料粘性介质压力胀形和刚性半球凸模胀形有限元分析表明粘性介质压力胀形改进了厚向应变分布的均匀性,如图 9 所示(μ 为摩擦系数)^[15]。

粘性介质的粘性附着力与粘性介质粘度、压力等因素有关,粘性附着力对粘性介质压力胀形件减薄率的影响的有限元分析表明(如图 10 所示),随着粘性介质粘度的升高,减薄率降低;当粘度超过一定值后,减薄反而严重^[13-14]。因此粘度选择非常重要。

2 应用研究

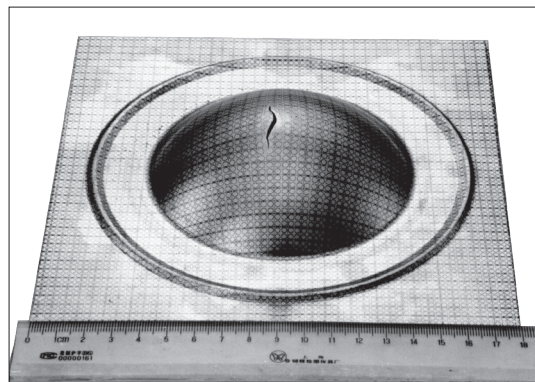
美国 Pratt & Whitney 公司(波音)研制了喷嘴内壁板构件(Nozzle Inner Panel)材料为 Inconel718SPF,壁厚为 0.76mm。该公司与美国俄亥俄州立大学合作,在对镍基高温合金板材成形制造性研究的同时,对铝合金(如 6061-O,6111-T4,2008-T4 等)、深冲钢 AKDQ 和高强钢的粘性介质压力成形制造性进行了深入研究。在美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)支持和资助下,Pratt & Whitney 公司(波音)与美国俄亥俄州立大学合作研制了两代粘

性介质压力成形机,其吨位分别为 6000kN (第一代)和 13000kN (第二代),从而为粘性介质压力成形技术的应用和深入研究提供了很好的硬件基础^[16-18]。

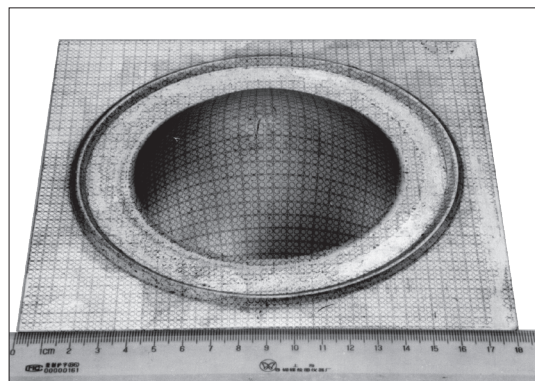
国内,哈尔滨工业大学作者课题组开展了镍基高温合金大尺寸、超薄壁厚轻量化构件整体成形;铝合金较大落差阶梯形薄壁构件近等壁厚成形等研究,取得了某些突破性成果,解决了航空航天制造技术的某关键问题,已授权发明专利 7 项,并已应用于涡扇、涡喷、涡轴、冲压等飞行器研制。整体成形制造的某高温合金异形曲面构件,焊缝数量减少 75%,制造工序减少 80% 以上。所研制的大尺寸高精度功能性构件、非对称局部大落差隔热构件已经成功用于某飞行器。自主研发的 6500kN 粘性介质压力成形机已实现了工程化应用^[6-13,19-24]。

结论与展望

(1)粘性介质压力成形采用新型凸模材料所具备的特点,为板材构件壁厚均匀性、复杂形状可制造性、高强度与低塑性难加工板材可成形制造



(a)粘性介质压力胀形试件



(b)液压胀形试件

图8 VPF胀形与液压胀形试件^[13-14]

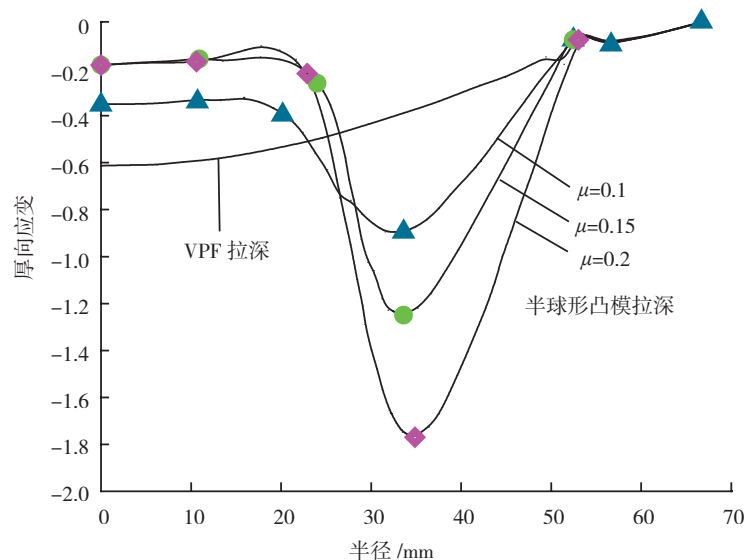


图9 粘性介质压力胀形与刚性凸模成形形成形件厚向应变分布有限元分析^[15]

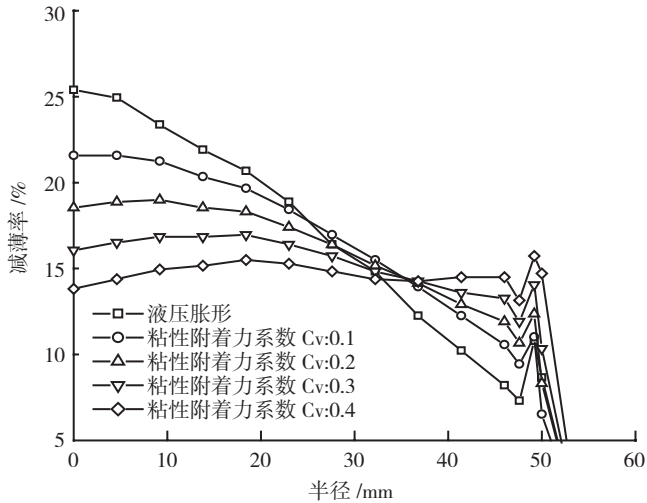


图10 粘性随着力对胀形件减薄率的影响^[13-14]

性、表面质量及减重轻量化等航空航天板材构件制造所关注的问题提供了新的解决途径。

(2) 粘性介质压力成形应用结果显示该技术对于难变形板材复杂形状、薄壁和超薄壁厚构件制造方面的不可替代性,并已在涡扇、涡喷、涡轴、冲压飞行器研制中实现工程化应用,表明该技术的巨大优势和应用潜力。

(3) 对于飞行器复杂三维轴线条异形曲面构件、不规则曲面构件成形,可充分利用粘性介质压力成形的特点,满足可制造性和提高成形制造质量,降低成本,克服产品尺寸精度低、质量(尤其表面)差的问题。

(4) 数值仿真是粘性介质压力成形应用的重要手段。粘性介质压力成形的特点如何能够充分发挥和具体应用,数值仿真可以针对具体问题快速给出解决方案,研发粘性介质压力成形体积变形与板材耦合的有限元分析软件,是这一技术能够较快、较好地广泛应用的重要因素。

参考文献

[1] Roades M L, Roades L J. Method and apparatus for die forming sheet materials. United States Patent NO.5085068, Feb 4, 1992.
 [2] Liu J, Westhoff B, Ahmetoglu M, et al. Application of viscous pressure forming (VPF)

to low volume stamping of difficult-to-forming alloys—results of preliminary FEM simulations. Journal of Material Processing Technology, 1996, 59(1): 49-58.

[3] 王忠金,王仲仁. 板料粘性介质胀形过程应变速率变化的模拟研究. 塑性工程学报, 1999, 6(3):46-48.

[4] 王新云. 薄板件粘性介质压力成形过程数值模拟与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.

[5] Liu J H, Tuz A, Ahmetoglu M A, et al. Viscous pressure forming (VPF) technology of plasticity. Proceedings of Fifth International Conference on Technology of Plasticity, Columbus, 1996(2): 671-674.

[6] 胡震宇. 粘性介质压力成形高温合金波纹形薄壁件的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.

[7] Wang Z J, Wang X Y, Wang Z R. Viscous pressure forming (VPF) of corrugated thin-walled sheet part with small radius. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 145(3): 345-351.

[8] 王忠金,王仲仁,王君平,等. 冲压发动机超薄壁波纹形件的粘性介质压力成形. 推进技术, 2002, 23(1):84-88.

[9] 王忠金. 局部大落差异形曲面构件粘性介质压力成形. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.

[10] Wang Z R, Wang X Y, Wang Z J. Numerical simulation and experimental research on the forming of thin-walled complex parts with viscous pressure forming (VPF). Korea Numisheet' 2002, 2002.

[11] 王忠金. 大尺寸超薄壁厚构件粘性介质压力整体成形. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.

[12] 王忠金. 非对称局部大落差构件粘性介质压力整体成形. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[13] Liu J G, Wang Z J, Wang Z R. Numerical simulation of the influence of viscous adhesive stress on the viscous pressure bulging process of hemispherical sphere. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(6): 1354-1359.

[14] 刘建光. 板料粘性介质压力胀形过程有限元模拟与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.

[15] Liu J, Ahmetoglu M, Altan T. Evaluation of sheet metal formability, viscous pressure forming (VPF) dome test. Journal of Material Processing Technology, 2000(98): 1-6.

[16] Shulkin L B, Posteraro R A, Ahmetoglu M A, et al. Blank holder force (BHF) control in viscous pressure forming (VPF) of sheet metal. Journal of Material Processing Technology, 2000(98): 7-16.

[17] Shulkin B L. Design for temporal and spatial variation of blank holder pressure in sheet metal forming [D]. The Ohio State University, 1997.

[18] Gutscher G, Wu H C, Ngaile G, et al. Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test. Journal of Materials Processing Technology, 2004(146): 1-7.

[19] Wang Z J, Liu J G, Wang Z R, et al. Deformation behavior of sheet metals and viscous medium in viscous pressure bulging process with back viscous pressure. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(1): 136-139.

[20] 王忠金,王新云,王仲仁. 粘性介质压力成形的应用研究. 航空学报, 2003, 24(1): 79-83.

[21] 王忠金,王新云,王仲仁. 阶梯形件粘性介质压力成形的试验研究. 锻压技术, 2001, 26(4):31-33.

[22] 刘建光,王忠金,王仲仁,等. 涡扇发动机铝合金碗形件的粘性介质压力成形. 推进技术, 2003, 24(6):573-576.

[23] Wang Z J, Wang X Y, Wang Z R. Effect of blank holder pressure on viscous pressure forming aluminum alloy ladder parts. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2002, 12(1): 109-114.

[24] 王忠金. 镍基高温合金大变径比构件粘性介质成形. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

(责编 深蓝)