

板材柔性介质加压成形技术的研究现状

石文勇^{1,2}, 马岩², 李哲³

(1. 哈尔滨理工大学 研究生部 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 东北林业大学 机电工程学院 黑龙江 哈尔滨 150040;
3. 哈尔滨理工大学 工程训练中心 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 柔性介质成形是指利用如液态的水或油、粘性的高分子聚合物及固态颗粒等作为传力介质使板材加工成形的制造方法。与传统工艺相比, 板料柔性成形技术的工艺灵活度较高, 兼具能保证质量、降低成本和缩短工序等优点, 成为低塑性、难成形板材提高成形极限的有效途径之一。综述了液压成形、粘性介质成形和固体颗粒介质压力成形等代表性板材柔性介质成形方法近年来国内外的研究及发展现状, 为航空航天、汽车制造等领域多品种、大批量、复杂形状零件的加工成形提供了技术指导。

关键词: 板材; 介质; 加压成形; 柔性成形; 成形极限

DOI: 10.15938/j.jhust.2016.05.002

中图分类号: TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2016)05-0007-06

Research Status on the Sheet Flexible Medium Forming Technology

SHI Wen-yong^{1,2}, MA Yan², LI Zhe³

(1. Division of Graduate, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
3. Engineering Training Center, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The flexible medium forming is a manufacturing sheet method regarding the liquid water or oil, the viscous polymer or the solid particle, etc as the transmitting force medium. Compared with the traditional technology, the sheet flexible medium forming is a process that the process flexibility is higher, both to ensure quality, reduce costs and shorten the process and so on. It becomes one of the effective ways to improve the forming limit of sheet with low plasticity and difficult forming. This paper generalizes the research and development situation of sheet flexible forming, such as hydraulic forming, viscous medium forming and solid particle medium forming in recent years, to provide a scientific basis for many varieties, large quantities and complex shaped parts in the field of aerospace, automobile manufacturing and other fields.

Keywords: sheet; medium; compression molding; flexible forming; forming limit

收稿日期: 2016-03-22

基金项目: 黑龙江省自然科学基金面上项目(E2016048).

作者简介: 石文勇(1980—)男, 博士研究生, 副研究员, E-mail: shiwenyong@hrbust.edu.cn;

马岩(1955—)男, 博士, 教授, 硕士研究生导师;

李哲(1972—)男, 博士, 研究员.

0 引言

随着航空航天、汽车制造等领域的飞速发展,对零部件在轻量化、高精度、低消耗等方面的要求也随之提高,板材液压成形、粘性介质成形及固体颗粒介质压力成形等板材柔性介质加压成形工艺正是顺应这种需求而逐渐发展起来的^[1-2]。该方法不仅适于多品种、大批量、复杂形状零件的成形,也解决了一些低塑性金属材料成形性能差等难题^[3]。

1 流体介质加压成形的研究现状

1.1 液压成形

板材液压成形即将传统冲压成形中的刚性凸模或凹模用传力介质(水、油或其他介质)来代替,从而实现传递载荷使金属板件成形的目的,如图1所示。按照液压取代形式与工艺方式的差异,可分为充液拉深和液压胀形法。

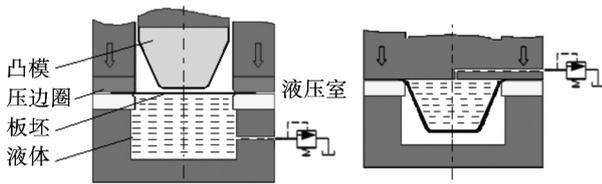


图1 板材液压成形工艺原理

随着近年来高压密封和控制等关键技术的突破^[4],同时各国学者投入了大量精力对其进行研究,充分发挥了充液拉深技术柔性化的加工优势,促进了多种新工艺的出现,包括超声波充液拉深、差温充液拉深或热态液压成形、周向加压充液反拉深、可控径向加压充液拉深、橡皮囊液压充液拉深(如图2所示)等^[5]。

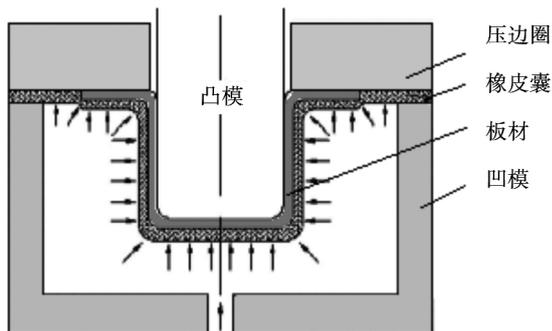


图2 橡皮囊液压充液拉深工艺

板材充液拉深技术最早出现在1890年,真正开始研究是在二战以后,早期主要集中在德国和日本。其中,日本学者于1955年开始这项研究,春日保男等最先提出了在凹模中充以液体介质的拉深工艺。20世纪70年代中期以后,中村及中川等进行了筒形件和方盒件的充液拉深实验,提出了成形过程中的五种失效形式和解决措施,还研究了锥形件充液拉深中反胀是防止起皱的关键所在。

日本学者片岡征二提出了超声波充液拉深法^[6],即对充液拉深中的凸模、凹模进行高频率的振动,该工艺可对法兰区的板材补料进行充分润滑,降低法兰区的摩擦阻力。该学者以板材铝合金A5052为试验件,通过改变润滑剂为实验参数进行工艺研究,结果表明在润滑剂粘度较低的情况下,得到的实验结果也可以满足要求。

中村和彦等^[7]通过温度差方法将板材变形区的变形抗力降低,即差温充液拉深工艺,该工艺进一步提高了传力区坯料的变形能力,从而提高材料的成形性能。但该工艺由于自身特点,受介质耐热温度所限,适用于铝合金与镁合金等温热拉深成形。

Halkaci等^[8]通过改进实验装置提高板材的拉深极限,研究得出在法兰处施加的浅拉深筋可以增加板材在法兰处的应变硬化,利用该方法使AA5754-O拉伸极限比从2.65提高到2.78,经方差分析研究表明,增加浅拉深筋法比其他因素的调整更加有效。

国内学者将充液拉深与预胀技术进行了较好的结合^[9],对具有复杂形状的铝合金件进行了预胀研究,通过数值模拟确定了合理加载路径,分析了板材壁厚分布、所受应力变化以及起皱缺陷等各个参数,研究结果表明,选择合理的预胀压力可以有效减缓板材起皱状况,板材的变形均匀性与成形极限都显著增强。

Singh等^[10]通过有限元软件LS-DYNA与实验相结合的方法,对模拟结果进行了充分验证,在3150 kN液压机上成功制出杯形件,且拉深极限值与数值模拟结果吻合较好。Sato等^[11]将充液拉深技术引进微成形中,设计了简单可靠的实验装置,在双动压力机上可实现高精度尺寸控制,成形过程中不需要定位及压力控制,最后成功研制出直径为0.8 mm的微型杯形件。

后来,诸多国外学者对液压成形技术的改进与提升做了大量研究工作,如Abdolhamid Gorji、Farzad Rahmani与Bagherzadeha等^[12-14]都对液压成形的

各个细节进行了修整与应用,使液压成形技术的应用领域更加广泛与贴合实际。

目前,日本已有超过300余种工件是通过充液拉深成形获得的,材料包括软钢、铝合金、钛合金和不锈钢板,板厚从0.2 mm到3.2 mm。针对聚四氟乙烯覆盖的高强钢板和软钢板的研究已有展开,应用领域大多数为轻量化设备,飞行器和汽车零件。除此以外,其他国家研究了如纯铜和黄铜等成形。

国内学者对充液拉深的研究也突飞猛进,哈工大康达昌教授堪称一面旗帜,在原来技术的基础上提出了充液变薄拉深新工艺,该工艺基于数值模拟与实验研究同时进行,成功总结出了非常有价值的系列实验参数,为后来学者们的研究提供了保障。他同时研制出了基于通用压力机的充液拉深成形装置,在丹麦被称为康氏方法^[15],此外,国内的中科院金属所^[16-17]、北京航空航天大学^[18-20]、燕山大学^[21-22]等科研单位对充液拉深进行了扩展研究并都取得了一系列的成果,为充液拉深技术在国内的发展奠定了坚实基础。

1.2 粘性介质

粘性介质成形有着自身独特的技术属性,粘性介质材料为一种可根据成形板材在成形过程中的变形特点而产生自适应成形,可分为单侧实施加载与双侧同时协调加载,从而使板材的单侧或双侧受到粘性介质的非均匀压力作用从而辅助板材成形。

由于粘性介质压力成形的自身特殊性与优越性,近些年来受到了国内外学者的广泛关注。Gao等^[23]提出了一种利用粘性介质成形的新工艺,通过有限元分析和实验研究表明粘性介质可有效地缓解实验中易出现的翘曲和起皱问题,同时表明高应变速率敏感性的粘性介质材料可以更好的提高板材成形极限。

文[24]研究在粘性介质作用下成形铝合金薄壁件,对成形件的起皱缺陷进行分析,最后得出随着粘性介质摩擦力的增大,可以有效地减少成形件的翘曲和起皱,且数值模拟和实验结果吻合较好。

文[25]研究得出可以调节压边力与注入型腔内粘性介质流速之间的相互关系来提高板材的成形性能。压边力较低时增加粘性介质的注入速度可以增大板材进入型腔的流入速度,同时针对复杂零件成形,设计出多点压边装置;文[26]利用粘性介质试验装置成功测试出金属板材的流动应力及应力-应变曲线及材料属性如应变硬化指数、材料强度系数与板材壁厚分布、圆顶半径、圆顶高度之间的相互

关系,测试装置如图3所示。

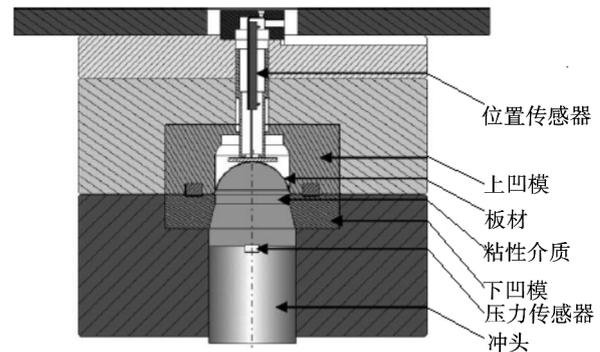


图3 粘性介质测试装置示意图

文[27-32]在粘性介质方面的研究取得了一定成绩。提出了一种适合于评价板材软模成形的数值方法,用于分析板材与软模之间的耦合变形,通过有限元软件与函数法相结合进行数据处理及实验验证,证明这种分析方法的可行性。通过对薄壁零件粘性介质成形中端部密封问题的分析,获得并总结出端部密封流速的最佳方式应该采用先慢后快。华中科大王新云等^[33]通过诸多实验进行研究,结果表明在双向同时加载粘性介质的情况下,极限胀形高度明显高于单侧加载的情况,得到的成形件壁厚分布更加均匀,板材的成形性能也更加优越。

与液压软模成形方法相比,粘性介质具有高粘度易于实施密封,但需要特殊的压力控制系统,操作要求较高,导致成本相对较大,同时增加了后续清理工序。

2 固态介质加压成形的研究现状

与液压成形、粘性介质成形相比,固态颗粒介质成形比较容易密封,无需专用装置,所以其特有的成形效果一直是学者们的研究方向与热点,按颗粒的种类不同,可具体分为固体(金属)颗粒成形、陶瓷颗粒成形、粉体成形等。

2.1 固体(金属)颗粒

金属固体颗粒介质成形可获得液体介质所不具有的非均匀分布压力,研究表明这样更有利于金属成形时的板材流动,减少成形件拉深时产生的拉应力,从而提高板材的拉深成形极限。

文[34-36]最先提出此项新技术,不仅成功设计出了应用金属固体颗粒为传力介质进行板材成形的实验装置,同时应用此装置成功试制出诸多典型零件,如锥形、抛物线形、圆筒形、方盒形等。同时变

换多种实验状态与调换多种板材进行实验,如高压状态、镁合金与铝合金,通过对零件成形过程不同阶段的截面形状和壁厚变化规律进行测试分析,建立了子午面为抛物线的有限元模型、圆曲线的函数模型等,结果表明,板材自由变形区形状近似球冠且为拉深过程中减薄最严重区域。根据这一成形特征提出了板材固体颗粒介质背压拉深工艺,在固体颗粒介质作用下,抑制危险断裂面的产生,从而整体上提高板材的成形性能,工艺原理如图4所示。

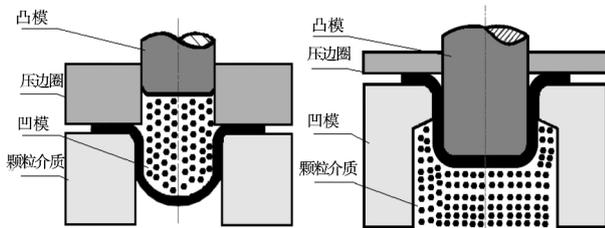


图4 固体颗粒成形原理图

2.2 陶瓷颗粒

陶瓷材料拥有其独特的优越性,耐高温、耐磨耗等,亦可以作为生物材料,研究陶瓷材料的应用范围是材料科学与工程中的一个重要领域,Wakai等^[37]首先将3Y-TZP陶瓷管成功进行鼓胀成形,在陶瓷管中装入SiC粉,在上下柱塞被挤压后,SiC粉将陶瓷管挤压到模具中使之成形,这项技术的产生成功的将陶瓷材料引领到了板材成形领域,同时将陶瓷的使用范围拓展的更加广泛。

德国学者Merklein等^[38-39]率先提出了应用陶瓷颗粒代替流体作为传力介质进行板材成形,同时对陶瓷颗粒本身的行为特征进行研究,与板材变形的成形特点相结合,首先分别选用了直径63 μm与850 μm的陶瓷颗粒进行单向压缩试验,测试其压缩率,并针对在压缩方向与法向的压力分布情况以及陶瓷颗粒的破坏效应进行调查。通过万能试验机测定了板材与颗粒之间摩擦系数,并基于JSC修正模型计算压缩下的剪切应力,从而实现了陶瓷颗粒“液压”成形。

国内学者陈国亮等^[40]将陶瓷颗粒代替传统的刚性凸模与凹模进行了板材实验研究,对颗粒直径、润滑条件等因素逐一进行分析。在代替凸模情况下,成形板材与凹模之间的摩擦力是影响板料成形性能的主要因素;在替代凹模情况时,明确了颗粒介质成形的非均匀传力特性以及板材成形性能与各个影响因素之间的关系。

2.3 粉体颗粒

粉末成形工艺是利用型腔内充入粉末作为传力介质进行成形的一种软模成形新方法,工艺原理如图5所示。当粉末代替凸模或者凹模时,随着凸模的下行,板材发生变形,粉末也随之发生压缩变形,具有可随板材变形而自身产生变化的流动能力,产生的反作用力使变形板材紧贴在凸模或者粉末的表面,产生有益摩擦,抑制板材壁厚减薄来提高成形极限,同时粉末与板材之间产生相对的滚动,抑制有害摩擦阻力的产生,从而减少局部减薄而产生破裂的可能性。

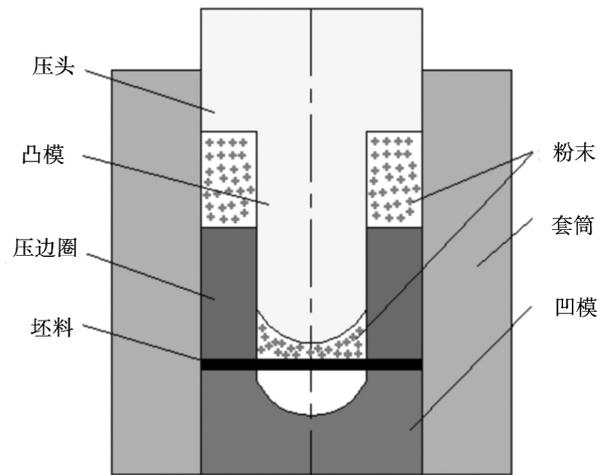


图5 粉末成形工艺原理

由于粉末具有耐高温的特性,所以可在高温条件下使用,增加了传力介质的推广范围,同时还克服了其它传力介质所存在的添加工序繁琐与不易控制等问题,每次成形后无需调换传力介质即可实施下一次成形,大大的缩短了生产周期和提高了工作效率,更易操作与控制,特别适合难变形材料的低温成形及高温成形。

燕山大学骆俊廷等^[41]通过将传统工艺中的凹模用粉末所替代并进行了实验验证。同时对宽板弯曲的运动模型进行了有限元分析,建立了各个区间运动特点模型。对粉体运动进行了物理模拟,总结了各个运动区间的规律,为板材粉体成形工艺的研究奠定了理论基础。

2.4 聚氨酯成形

聚氨酯具有其它传力介质所不具备的特殊属性,是无可替代的弹性材料^[42]。十九世纪中期聚氨酯橡胶从德国问世,具有很高的透明度,良好的物理与力学性能,其耐磨性与耐油性是天然橡胶无法比拟的^[43-47],同时耐温性也非常好,成形温度最高可

承受 150℃, 可以承受 50 000 次反复加载和卸载过程, 应用涉及汽车、轻工、建筑等诸多领域, 被人们认为是一种新型的软模材料, 可用来代替凸模或凹模, 在加压时表现出高粘性的流动性质, 工艺原理如图 6 所示。

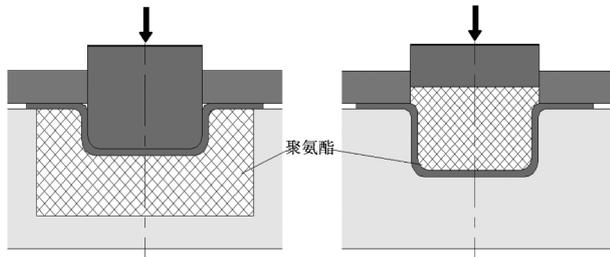


图 6 聚氨酯板材成形工艺原理

聚氨酯软模成形与传统的刚性模具比较, 能够使材料具有良好的成形性能, 适合复杂程度高的金属零件, 同时改变了板材成形时法兰部位的受力状态, 减小板材发生起皱的可能性。聚氨酯成形的模具结构简单, 操作方便, 减少了生产工序和提高了生产效率且避免了液压成形的密封困难问题, 如图 7 所示。

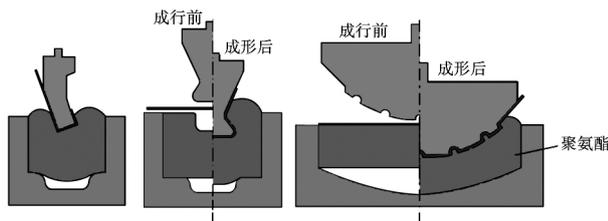


图 7 聚氨酯成形简图

聚氨酯成形由于没有传统模具的刚性接触, 成形件表面质量很高, 少有刮痕和压伤现象出现。但是聚氨酯成形也有一定的缺点, 高温性能具有一定的局限性, 长时间的工作使聚氨酯自身会产生一定的热量, 导致不能正常工作; 由于聚氨酯橡胶材料的原因, 对工作表面的粗糙度要求较高; 在高压状态下, 使用寿命比传统刚性模具要短。

3 存在问题及展望

综上所述, 板材柔性介质加压成形是顺应轻量化需求而逐渐发展起来的一种先进制造技术。该方法不仅适于多品种、大批量、复杂形状零件的成形, 也解决了不可避免地存在密封困难、传力效果差或后续处理工序繁多等系列难题。

与传统成形工艺相比, 板料柔性成形技术的工艺灵活度较高, 兼具能保证质量、降低成本和缩短加工工序等优点, 成为低塑性、难成形板材的提高成形极限的有效途径之一。柔性传力介质对板材加压成形时所体现的效率及成本优势是传统刚模冲压成形所无法比拟的。

随着大量冷成形性能差的新材料及结构更复杂的薄壁钣金构件在航空航天和汽车制造领域的广泛应用, 促进了板材柔性介质成形技术研究需要不断推陈出新。因此, 热介质、磁性介质等板材成形是柔性成形技术领域中的一个潜在的可能取得重要突破的研究方向。

参考文献:

- [1] KUANG W H. Numerical Simulation of Hydro-forming Cylindrical Cup with a Hemispherical Bottom [J]. Key Engineering Materials, 2011(460/461): 32-35.
- [2] 梁伟, 杨晓翔, 傅明旺, 等. 第 II 类尺寸效应影响下金属薄板液压胀形本构模型研究 [J]. 固体力学学报, 2013(2): 194-199.
- [3] HUANG G M, WANG J P, CHEN T T, et al. Optimal Design for the Fluid Cavity Shape in Hydromechanical Fine Blanking [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(1/4): 153-160.
- [4] 苑世剑, 刘伟, 徐永超. 板材液压成形技术与装备新进展 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(8): 20-28.
- [5] 徐鹏. 磁性介质加压板材软模拉深成形规律研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [6] 片岡征二. 動・液圧深絞り加工における振動条件および潤滑油粘度の影響 [J]. 轻金属, 1997, 48(2): 73-77.
- [7] 中村和彦. 1050 アルミニウム板の温間対向液圧深絞り特性 [J]. 轻金属, 1997, 46(6): 323-328.
- [8] HALKACI H S, TURKOZ M, DILMEC M. Enhancing Formability in Hydromechanical Deep Drawing Process Adding a Shallow Drawbead to the Blank Holder [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(8): 1638-1646.
- [9] XU Y C, LI F, LIU X, et al. Effects of Pre-bulging on 2024 Aluminum Alloy Complex-shaped Components [J]. Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2011, 76(12): 866-873.
- [10] SINGH S K, KUMAR D R. Numerical Prediction of Limiting Draw Ratio and Thickness Variation in Hydromechanical Deep Drawing [J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2004, 21(13): 106-123.
- [11] SATO H, MANABE K, ITO K, et al. Development of Servo-Type Micro-Hydromechanical Deep-Drawing Apparatus and Micro Deep-Drawing Experiments of Circular Cups [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 224: 233-239.
- [12] ABDOLHAMID G, HASAN A, SALMAN N, et al. Investigation of Hydrodynamic Deep Drawing for Conical-cylindrical Cups [J]. In-

- ternational Journal of Advanced Manufacturing Technology ,2011 , 56(9/12) : 915 - 927.
- [13] FARZAD R , SEYED J H , HASSAN M , et al. Numerical and Experimental Study of the Efficient Parameters on Hydromechanical Deep Drawing of Square Parts[J]. Journal of Materials Engineering and Performance ,2013 , 22(2) : 338 - 344.
- [14] BAGHERZADEHA S , MOLLAEI-DARIANIB B , MALEKZADEHC K. Theoretical Study on Hydro-Mechanical Deep Drawing Process of Bimetallic[J]. Journal of Materials Processing Technology ,2012 , 212(9) : 1840 - 1849.
- [15] SCHWARZ S , RUPP M , ROTHE H , et al. Production of a High-strength Steel Roof Outer Panel by AHU Hydroformmechanical Sheet Forming[C]// Hydroforming of Tubes Extrusions and Sheet Metals ,2005 : 37 - 58.
- [16] XU Y , ZHANG S H , CHENG M , et al. Application of Pulsating Hydroforming in Manufacture of Engine Cradle of Austenitic Stainless Steel[J]. Procedia Engineering ,2014 , 81 : 2205 - 2210
- [17] ZHANG S H , JENSEN M R , KANG D C , et al. Effect of Anisotropy and Prebulging on Hydromechanical Deep Drawing of Mild Steel Cups [J]. Journal of Materials Processing Technology , 2003 , 167(2) : 544 - 500.
- [18] ZHANG S H , WANG Z R , XU Y , et al. Recent Developments in Sheet Hydroforming Technology[J]. Journal of Materials Processing Technology ,2004 , 151(1/3) : 237 - 241.
- [19] LANG L H , DANCKERT J , NIELSEN K B. Analysis of Key Parameters in Sheet Hydroforming Combined with Stretching Forming and Deep Drawing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture , 2004 , 218(8) : 845 - 856.
- [20] LANG L H , DANCKERT J , NIELSEN K B. Study on Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto the Blank [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture ,2004 , 44(5) : 495 - 502.
- [21] LANG L H , LI H L , YUAN S J , et al. Investigation Into the Pre-forming's Effect During Multi-stages of Tube Hydroforming of Aluminum Alloy Tube by Using Useful Wrinkles[J]. Journal of Materials Processing Technology , 2009 , 209(5) : 2553 - 2563.
- [22] ZHAO C C , LI W M , LIU Z B. Mechanical Analysis of Dead Load Crown and Structure Parameter of Hydraulic Elastic Bulging Roll[J]. Journal of Iron and Steel Research ,2003 , 10(3) : 28 - 31.
- [23] GAO T J , LIU Z J , WANG Y , et al. Research on Forming Process and Deformation Rule for the Necking of Viscous Medium Under Outer Pressures[J]. Advanced Materials Research ,2012(482 - 484) : 2126 - 2130.
- [24] LIU J G , WANG Z J. Prediction of Wrinkling and Fracturing in Viscous Pressure Forming (VPF) by Using the Coupled Deformation Sectional Finite Element Method[J]. Computational Materials Science ,2010 , 48(2) : 381 - 389.
- [25] SHULKIN L B , POSTERARO R A , AHMETOGLU M A , et al. Blank Holder Force (BHF) Control in Viscous Pressure Forming (VPF) of Sheet Metal[J]. Journal of Materials Processing Technology ,2000 , 98 : 7 - 16.
- [26] GUTSCHER G , WU H C , NGAILE G , et al. Determination of Flow Stress for Sheet Metal Forming Using the Viscous Pressure Bulge(VPB) Test[J]. Journal of Materials Processing Technology ,2004 , 146(1) : 1 - 7.
- [27] WANG Z J , WANG X Y , WANG Z R. Viscous Pressure Forming (VPF) of Corrugated Thin-walled Sheet Part with Small Radius [J]. Journal of Materials Processing Technology ,2004 , 145(3) : 345 - 351.
- [28] WANG Z J , WANG X Y , WANG Z R. Effect of Blank Holder Pressure on Viscous Pressure Forming Aluminum Alloy Ladder Parts[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China , 2002 , 12(1) : 109 - 114.
- [29] WANG Z J , YUAN B X. Numerical Analysis of Coupled Finite Element with Element-Free Galerkin in Sheet Flexible-Die Forming [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China ,2014 , 24(2) : 462 - 469.
- [30] 王忠金. 难变形板材复杂形状构件粘性介质压力成形技术[J]. 航空制造技术 ,2014 , (10) : 26 - 31.
- [31] LIU J G , WANG Z J. Prediction of Wrinkling and Fracturing in Viscous Pressure Forming (VPF) by Using the Coupled Deformation Sectional Finite Element Method[J]. Computational Materials Science ,2010 , 48(2) : 381 - 389.
- [32] 李继光, 赵瑞峰, 刘京平, 等. 端部密封对薄壁零件粘性介质压力的影响[J]. 锻压技术 ,2014 , 39(3) : 10 - 14.
- [33] WANG X , WANG Z J , WANG Z R. Finite Element Analysis and Experiment Research on Aluminum Alloy Ladder Bowl with Viscous Pressure Forming (VPF) [J]. Harbin Institute of Technology (New Series) ,2002 , 2(9) : 1 - 5.
- [34] GUO J D , ZHAO C C , CAO M Y , Process of Back Pressure Deep Drawing with Solid Granule Medium on Sheet Metal[J]. Journal of Central South University ,2014 , 21(7) : 2617 - 2626.
- [35] 曹秒艳, 董国疆, 赵长财, 等. 基于离散元法的固体颗粒介质传力特性研究[J]. 机械工程学报 ,2011 , 47(14) : 62 - 69.
- [36] DONG G J , ZHAO C C , CAO M Y. Flexible-Die Forming Process with Solid Granule Medium on Sheet Metal [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China ,2013 , 23(9) : 2666 - 2677.
- [37] WAKAI F , SAKAGUCHI S , KANAYAMA K. Ceramic Materials and Components for Engineering Using [C]// Proceedings of The Second International Symposium VDKG. Luebeck-Travemuende , 1986 : 315 - 318.
- [38] MERKLEIN M , GRUNER M. Mechanical Behaviour of Ceramic Beads Used as Medium for Hydroforming at Elevated Temperatures [J]. Key Engineering Materials ,2009(410/411) : 61 - 68.
- [39] GRUNER M , MERKLEIN M. Numerical Simulation of Hydro Forming at Elevated Temperatures with Granular Material Used as Medium Compared to the Real Part Geometry [J]. International Journal of Material Forming ,2010 , 3(1) : 279 - 282.
- [40] 陈国亮. 使用陶瓷颗粒介质进行拉深成型[J]. 机械工程材料 ,2008 , 32(12) : 33 - 39.

(下转第19页)

- 技术学报 2014 24(6): 61 - 64.
- [7] 李超. 空间汇流环的探讨[J]. 电子机械工程学报, 2011, 90(4): 35 - 39.
- [8] 张武. 汇流环接触问题分析[J]. 火控雷达技术学报, 2009, 38(9): 64 - 69.
- [9] 孙丽. 滚环的优化设计[J]. 大连铁道学院学报, 1999, 20(9): 112 - 115.
- [10] 邱明, 钱亚明. 摩擦学原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [11] 桂长林. Archard 的磨损设计计算模型及其应用方法[J]. 润滑与密封, 1990(1): 12 - 21.
- [12] 周文韬. 导电滑环的接触力学特征与磨损寿命分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- [13] JOHNSON KL. 接触力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [14] 高彩桥, 刘家浚. 材料的粘着磨损与疲劳磨损[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [15] 陈怀松. 边界润滑状态下往复摩擦磨损的数值仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [16] 刘军涛. 导电滑环接触材料摩擦磨损特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [17] 冯伟. 滑动磨损试验的有限元法数字仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [18] 林敏. 基于计算接触力学的磨损仿真分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2006.
- [19] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [20] 汪选国. 销盘滑动磨损试验的仿真方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.

(编辑: 温泽宇)

(上接第 12 页)

- [41] 黄倩影, 骆俊廷, 范存杰, 等. 板料颗粒介质软凹模成形颗粒运动规律研究[J]. 中国机械工程, 2012, 13(1): 113 - 116.
- [42] 杨文会, 覃新林. 热塑性聚氨酯弹性体(TPU) 研究及应用[J]. 塑料制造, 2015(7): 70 - 77.
- [43] MOSSEDALE P J. The Use of "Avothane" for Sheet Metal Forming[J]. Sheet Metal Industries, 1965, 42: 257 - 267.
- [44] AL-QURESHI H A. Analytical Investigation of Ram Movement in Piercing Operation with Rubber Pads[J]. International Journal of Mechine Tool Design, 1972(12): 229 - 248.
- [45] KALPAKJIAN S, SCHMID S R. Manufacturing Engineering and Technology[M]. Fifth Edition. Prentice Hall, 2005: 424 - 481.
- [46] THIRUVAUDCHELVAN S, Tan M J. The Drawing of Conical Cups Using an Annular Urethane Pad[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 147(2): 163 - 166.
- [47] 王淼, 李东生, 杨伟俊, 等. 橡皮成形数值模拟回弹预测精度的影响因素[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(1): 1 - 6.

(编辑: 关毅)