基于剪普复合旋压方法的双轮同步旋压技术

王东坡　马世成　孙　昂　张　晨

（航天特种材料及工艺技术研究所，北京　100074）

文　摘　以解决小平面封底、二次曲线型、大直径、厚壁头罩类壳体旋压成形难题为目的，提出集成了厚壁板坯短剪切渐进成形轨迹设计、普旋预成形与短剪切成形轨迹配合设计、镜像双旋轮同步旋压精确控制、加热旋压控温曲线标定等技术内容，有别于传统的剪切旋压、普通旋压的单模具剪普复合旋压方法。通过试验，摸索了多道次普旋预成形和单模具剪普复合旋压成形基本规律，总结了旋压轨迹设计方法。实现了二次曲线厚壁头罩单模具一次成形，直径、壁厚、轮廓度等主要精度误差均小于0.2 mm。

关键词　二次曲线，厚壁头罩，旋压，复合旋压

中图分类号：TG306　　DOI：10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.006

Processing Technology of Double-Roller Mirror Spinning Based on Conventional-Shear Composite Spinning

WANG Dongpo　MA Shicheng　SUN Ang　ZHANG Chen

(Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing　100074)

Abstract　Aming at the processing problem of the thick wall head cover shell which has small plane back cover, quadratic curve shape, large diameter, we put forward a new method of conventional-sheear composite spinning using single die, which is different from the traditional conventional spinning and shear spinning, integrating several technology contents including thick plate short shear incremental forming path design, and conventional spinning preforming and short shear forming path design, the controlof double-roller mirror spinning, hot spinning temperature curve calibration. Through trial, we explore the basic rules of the multiprocess conventional spinning performing and conventional-sheear composite spinning using single die, summarize the spinning trajectory design method. Single-die forming of quadratic curve shape thick wall head cover is realized. Accuracy error such as diameter, wall thickness, profile are less than 0.2 mm.

Key words　Quadratic curve shape, Thick wall head cover, Spinning, Composite spinning

0　引言

文献[1]报道的二次曲母线头罩旋压成形方法基本为薄壁零件单旋轮成形，对于厚壁头罩旋压介绍的很少，且通常采用多次剪切旋压和普通旋压的多模具、多道次旋压方法成形。普遍存在局部拉伸变薄严重、旋压力不平衡产品偏摆、产品不易贴合模具等问题，通过工程试验验证，很难满足以5A06铝合金为代表的常规难成形材料厚壁头罩成形需求。本文提出了基于单模具剪普复合旋压方法的、二次曲线型厚壁头罩双旋轮镜像同步旋压成形技术，针对典型5A06铝合金带封底厚壁曲母线头罩进行了旋压成形工艺研究，分析了单模具剪普复合旋压和双旋轮镜像同步旋压的技术特点、解决热旋压精确控温难题。

1　旋压成形性分析及方案

1.1　旋压成形性分析

某5A06铝合金头罩为小平面封底半椭球型壳体，壳体厚度11.5 mm，长度600 mm，外径Φ550 mm，属于典型的大直径、二次曲线形厚壁头罩类壳体（图1）。

收稿日期：2015-06-08

作者简介：王东坡，1980年出生，工程师，主要从事金属旋压成形、复合材料机械加工等研究工作。E-mail：wangdongpo2003@163.com

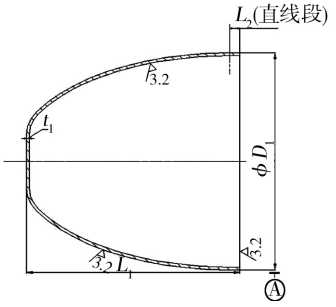


图 1　有封底厚壁头罩示意图

Fig. 1　Conventional diagram of the thick wall head cover shell with back cover

1.1.1　材料分析

5A06 铝合金是一种常见的 Al-Mg 系防锈铝合金,具有较高的室温强度、抗疲劳性能和腐蚀稳定性,不能热处理强化,在退火和挤压状态下塑性尚好,冷作硬化时塑性低,室温加热至 250℃以上时,塑性大幅提高,其室温抗拉强度 315 MPa,屈服强度 160 MPa,延伸率 15%,300℃屈服强度 75 MPa。

1.1.2　成形性分析

对于目标产品来说,考虑到成形难易度、材料利用率、生产效率等因素,通常采用板坯旋压成形。根据旋压理论,其板坯厚度一般须达到 16 mm 以上才能成形。对于这个厚度的板坯,如果采用传统的单旋轮普旋工艺用板坯一次成形,由于 5A06 这种材料强度高,变形难度大,采用单次普旋成形则材料很难贴合模具,材料拉薄严重,产品型面、壁厚很难满足要求[2-3]。如果增大毛坯厚度确保最薄处厚度达到 11.5 mm,其板坯厚度可能需要达到 25 mm 甚至更多,这种厚度的 5A06 板坯成形难度很大。如果采用单模具剪切旋压成形,产品尺寸过大、半锥角变化范围大、壁厚过厚,按照现有旋压理论几乎无法实现。如果采用多次剪切旋压后再单旋轮普旋工艺成形(每次旋压使用的模具尺寸、形状不同),在产品厚度、旋压力大的现实情况下,单旋轮普旋产品受力不均,产品旋压时偏摆严重,很难成形。同时,由于该头罩为有封底头罩,端部仅能靠尾顶的摩擦力定位,多次成形定位不准确、产品型面无法保证,成形次数多、生产效率低等问题也很突出。

1.2　试验方案

针对产品特点,将剪切旋压局部拉伸变薄程度低、普通旋压材料可以在单模具内实现很大变形的特点相结合,提出采用有别于传统剪切旋压、普通旋压的单模具剪普复合旋压方法,再结合双旋轮镜像同步旋压方法、加热旋压方法开展工艺研究,力求解决前述问题。其中单模具剪普复合旋压方法是整个工艺的关键。其基本特征是在单模具、多道次成形过程中,在经过初始的多次普旋预成形后,进行多道次剪普复合旋压。每个单模具剪普复合旋压道次轨迹均由短剪切段、预剪切段、余段三部分平滑过渡而成。在一个完整旋压道次中,首先进行符合正弦率的短剪切成形。之后将预剪切段普旋成形,使该段符合下一道次开始时短剪切成形所需的、满足剪切旋压正弦率规律的形状和尺寸。最后,完成余段的普旋成形,实现板坯半锥角的逐渐变化,为预剪切段的变形提供条件。通过多次重复剪普复合旋压过程,最终实现产品成形。

在此基础上,采用双旋轮镜像同步旋压方式解决单旋轮旋压时板坯偏摆、振动、边部起皱等问题,实现力的平衡,降低成形难度、保证旋压过程的平稳性。采用热旋压的方式,进一步降低材料强度、降低旋压力、促进贴模。

基本工艺流程如下:板坯加工→去应力处理→板坯安装→预热升温→普旋预成形→多道次剪普复合旋压(保温加热)→精整→脱模→切边。

1.3　试验设备

为了实施所选定的工艺方案和旋压工艺规范,选定的旋压设备为西班牙 DENN 公司生产的 ZENN-120 数控旋压机。

1.4　试验参数

(1)旋轮直径 $D_r = 165$ mm,圆角半径 $R = 22$ mm;(2)坯料为退火态 5A06 铝板,直径 $D_0 = 835$ mm,初始厚度 $t_0 = 18$ mm;(3)进给速度为 180 mm/min;(4)主轴转速为 120 mm/min;(5)加热方式为氧气、丙烷火焰加热。

2　旋压工艺研究

2.1　普旋预成形工艺

根据旋压理论,剪切旋压过程中应符合正弦率规律,坯料为平板和锥形件的正弦率公式分别如公式(1)、(2)所示。其基本原理如图 2 所示。

$$t = t_0 \times \sin\alpha \tag{1}$$

$$t_1/\sin\alpha = t_2/\sin\beta \tag{2}$$

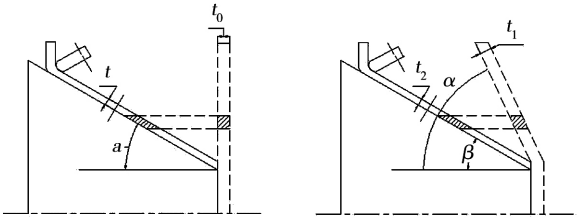


图 2　剪切旋压正弦率

Fig. 2　Sine rate of shear spinning

图 1 所示头罩前端半锥角变化剧烈,有效初始半锥角约 44°,如直接进行剪普复合旋压,依据正弦率规律,原始毛坯厚度需达到 17 mm,单次减薄率达到

33%，单次减薄量 5.5 mm，根据以往经验及相关文献研究结论，是很难直接实现的，必须通过普旋预成形使板坯形成一定锥度，以适应第一次剪切贴模旋压。

2.1.1 普旋轨迹设计

普旋预成形的轨迹形状直接决定普旋的效果，同时，其对坯料形状的改变还会一直影响坯料各个位置的半锥角，从而对后续剪普复合旋压产生重要影响，是工艺研究过程中十分关键的一项研究内容。一般来说，普旋轨迹主要有直线型、圆弧形和渐开线形三种。日本的叶山先生在大量试验的基础上，建议普旋轨迹宜采用渐开线形状。本文也采用这种形式的轨迹开展工艺研究。依据渐开线理论公式(3)和(4)设计普旋轨迹形状和普旋起旋点[4]。

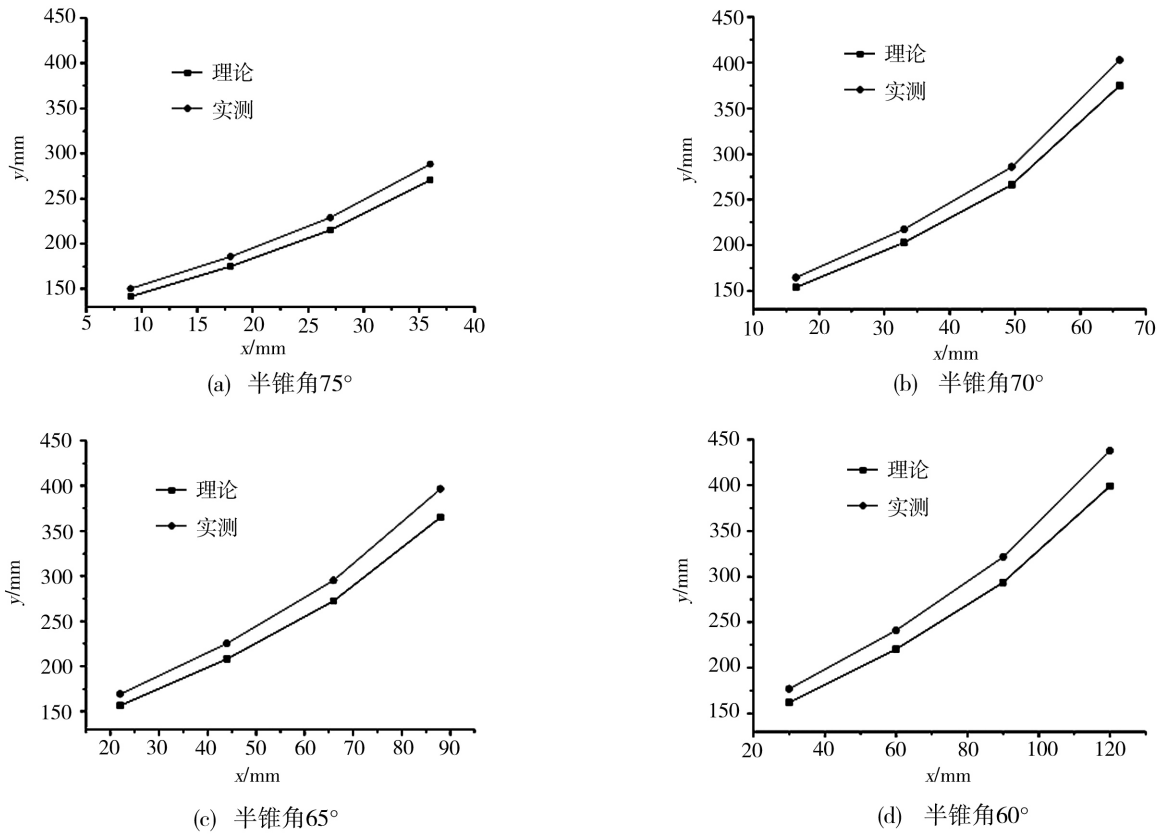
$$\begin{cases} \varphi = 0.97(r/a)^{0.5138} \\ x = r\cos\varphi \\ y = r\sin\varphi \\ a = \eta(h + x_m - t_0) \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} x_0 = \bar{x}_m + \bar{\rho}_m(1 - \sin\theta_0) \\ y_0 = \bar{y}_m - \bar{\rho}_m(1 - \cos\theta_0) \\ \theta_0 = 0.485[(x_0/a)^2 + (y_0/a)^2]^{0.2569} + \mathrm{arctg}(y_0/x_0) \\ \bar{\rho}_m = \rho_m + t_0, \bar{x}_m = x_m - t_0, \bar{y}_m = y_m + t_0 \end{cases} \tag{4}$$

2.1.2 普旋预成形变形规律

2.1.2.1 普旋后板坯半锥角控制

在进行普旋预成形工艺试验过程中发现，在普旋结束、旋轮离开坯料后，坯料所呈的母线形状与旋轮预设轨迹有一定偏差，即坯料有一定弹复。这对本工艺后续短剪切旋压的设计、计算影响很大。因此，进行不同目标半锥角的单次普旋试验和多次连续普旋试验以探寻不同程度变形的弹复率和多次连续普旋的弹复率规律。普旋后坯料的形状通过旋压机自带的录返装置获取，并在数控系统中直接生成轨迹图形，在图形系统中采用分段法，自模具端面至靠近板坯端部轴向位置处近似等分 4 段，与预设轨迹进行径向位置对比研究。不同目标半锥角的单次普旋试验共进行四组，目标半锥角分别设为 75°、70°、65°、60°，其结果见图 3、图 4。



(a) 半锥角75°　(b) 半锥角70°　(c) 半锥角65°　(d) 半锥角60°

图 3　单次普旋试验反弹值

Fig. 3　Rebound value of the single conventional spinning test

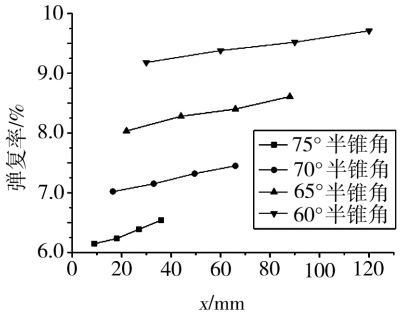


图 4　单次普旋试验弹复率

Fig. 4　Rebound rate of the single conventional spinning test

从图 3、图 4 可看出,不同目标半锥角的单次普旋试验中,单个轨迹内,由中心向外,弹复率略有增大,但基本可以认为一致(未考虑边缘处)。各轨迹之间比较,目标半锥角越小,弹复率越大,这也表现出半锥角越大,成形难度越大的基本特点。多次连续普旋的弹复率规律试验进行 4 组,预设轨迹半锥角分别为 75°、70°、65°、60°,其试验结果如图 5、图 6 所示。可以看出,多次连续普旋的弹复率规律试验中,单个轨迹内,由中心向外,弹复率略有增大的规律没有变化。各轨迹之间比较,除第一次普旋弹复率较大外,后几次弹复率逐渐增大,但增大幅度较小,最后两次的弹复率较为接近,基本稳定在 7.5% 左右。这表明材料经过连续变形后会有一定程度的硬化,但在加热状态下并不明显,随着旋压次数的增加,弹复率趋于稳定。依据上述结论,可以进行普旋和剪普复合旋压成形轨迹设计等工作,是后续工艺研究的重要依据之一。

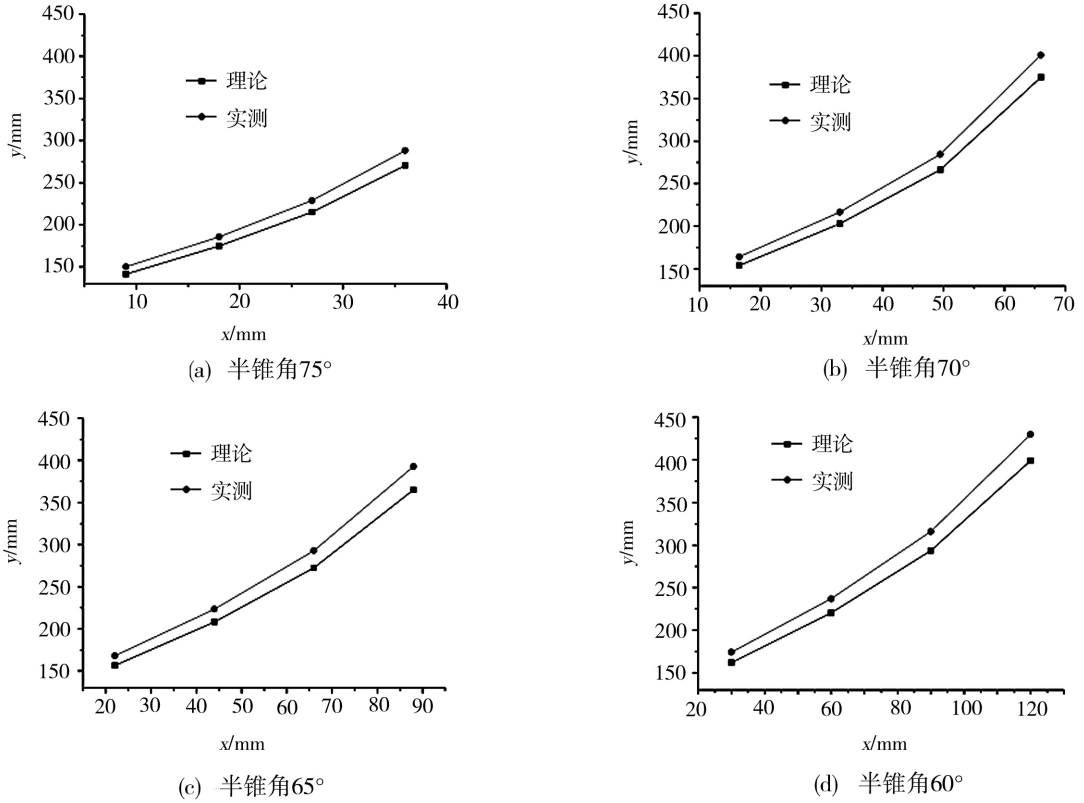


图 5　连续普旋试验反弹值

Fig. 5　Rebound value of continuous conventional spinning test

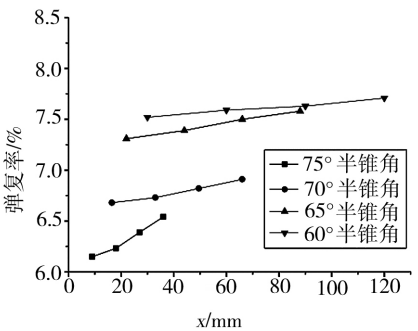


图 6　连续普旋试验弹复率

Fig. 6　Rebound rate of continuous conventional spinning test

2.1.2.2　旋压减薄

在进行普旋预成形工艺试验过程中发现,板坯经过普旋后有一定程度的减薄。为探寻普旋过程中板坯减薄规律,设计了一组工艺试验。连续进行 4 次普旋成形,预设轨迹半锥角分别为 75°、70°、65°、60°,自模具端面至靠近板坯端部处轴向距离近似等分 4 段,测量与其轴向 x 坐标相对应处的平均壁厚,与通过理论计算所得数据进行对比分析。其结果如图 7、图 8 所示。

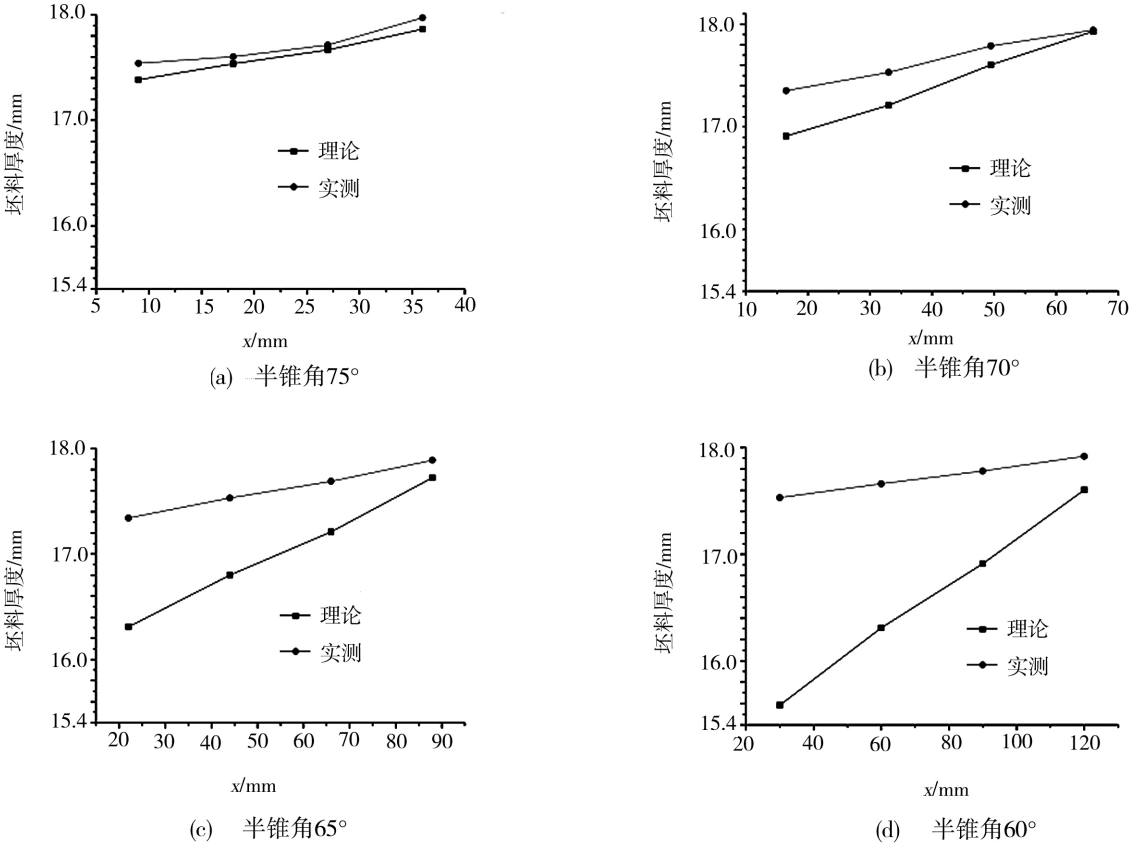


图 7 连续普旋试验中的坯料厚度变化

Fig. 7 Variation in thickness of blank in the continuous conventional spinning test

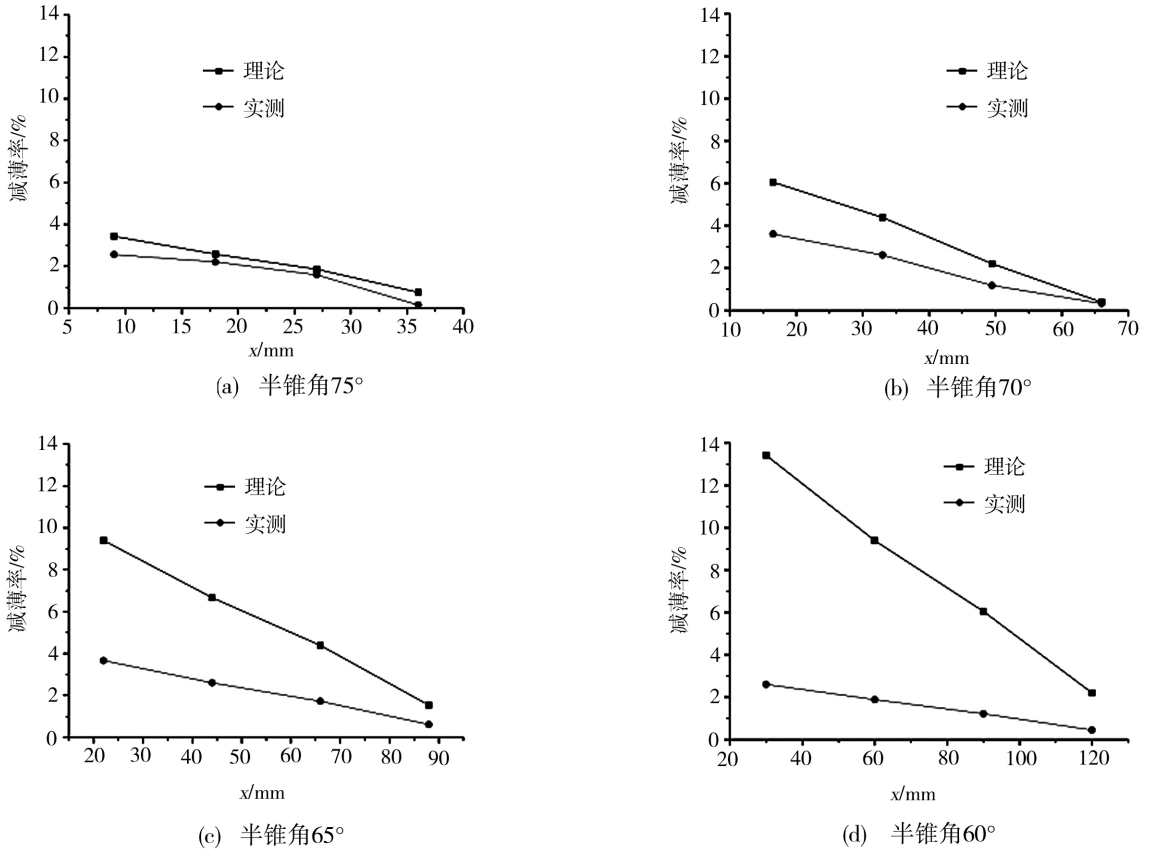


图 8 连续普旋试验中的坯料减薄率变化

Fig. 8 Variation in reduction ratio of blank in the continuous conventional spinning test

从图 7 可以看出,普旋过程中壁厚有较为明显的变化,特别是第一次普旋后,坯料厚度接近按照正弦率计算所得的坯料厚度,仅边部区域厚度有明显增加。第一次普旋实现了一次无模的剪切旋压,仅边部区域由于失去张力限制,减薄急剧下降,这一点与文献[5]的结论十分吻合。而在第二、三、四次普旋后,坯料厚度有所减薄,但程度明显减小,正弦率偏离越来越大,这可能是材料硬化程度增加、壁厚减薄后阻力变小、形状变化等原因导致,有待进一步深入研究。从试验结果来看,第二、三、四次普旋后壁厚减薄率也具有一定规律性,其与正弦率计算所得理论减薄率的比率大致为 0.6、0.4、0.2,即壁厚减薄程度明显降低。依据这些规律,可以设计普旋道次数、合理分配减薄率。

2.1.3 普旋预成形道减薄率设计

根据 5A06 铝合金材料特点及剪切旋压理论,单道次旋压减薄率在 20% 左右较为合理。以此为出发点,再考虑整形余量,将旋压厚度设定为 12.5 mm,依据公式(2),设定减薄率为 20% 左右,通过计算可知,剪普复合旋压前最后一次普旋须将坯料减薄至 15.6 mm 左右,其半锥角应在 60°左右。第一次普旋由于减薄最严重,为防止后续道次厚度不足,应尽可能减小其减薄率,增大目标半锥角,考虑将第一次普旋目标半锥角设定为 75°。本着逐渐变形、避免由于剧烈变形导致的局部拉薄问题,设定普旋道次数为 4 次,各道次半锥角按等差递减,即分别为 75°、70°、65°、60°。最后,根据正弦率及前述摸索的第二、三、四次普旋后壁厚减薄率与正弦率计算所得理论减薄率的比率大致为 0.6、0.4、0.2 的结论反推计算,可知旋压板坯厚度约为 18 mm。

2.2 剪普复合旋压成形工艺

采用一个平滑过渡的轨迹先后实现短剪切成形、下道次短剪切段普旋预成形及余段普旋预成形三个过程即称为剪普复合旋压。其基本轨迹如图 9 所示。

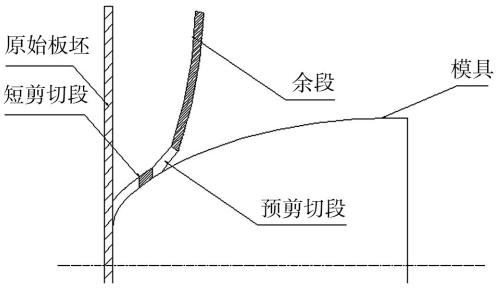


图 9 剪普复合旋压轨迹

Fig. 9 Track of conventional-shear composite spinning

依据剪切旋压理论,旋压前坯料的形状、位置、厚度均需满足正弦率的要求才能完成减薄,否则很容易出现过减薄或欠减薄导致材料起皱、断裂等问题出现。如按照本方案的思路采取短轨迹渐进减薄的方式减薄毛坯、促进贴模,则必须合理选择减薄率、减薄轨迹长度、减薄轨迹形状,才能实现渐进方式剪切成形。

2.2.1 短剪切减薄率的设计

采用剪普复合旋压进行曲母线头罩单模具旋压成形的关键问题即在可控的预设短剪切段坯料形状、可选择的短剪切段长度的前提下,实现在一定范围内可控的剪切减薄,从而实现坯料渐进式贴合模具,完成产品成形。在这个过程中,要避免各段减薄不同导致的贴合率不同、受力不均,造成产品变形严重。因此,在这种情况下,各剪普复合旋压道次的短剪切减薄率应当基本固定,在一个较小的范围内根据需要调整,这是此项工艺的首要条件。

根据前述研究结论,本文将各道次短剪切减薄率设定在 20% 左右。

2.2.2 道次数量及短剪切长度设计

根据本文提出的剪普复合旋压的基本原理,短剪切半锥角确定后,可以通过调整其前一道次预剪切段角度实现各道次等减薄率剪切旋压,因而在暂不考虑普旋减薄的情况下,根据变形规律,一般设每道次半锥角变化程度相同而设计旋压道次,各道次短剪切长度可由作图获得。根据试验验证,将角度差设定为 3.75°较为合适。由此计算出本文目标产品需进行 12 次剪普复合旋压。

由于曲母线头罩的半锥角是逐渐变小的,因而,各道次短剪切长度逐渐变长,特别是到最后接近直线段时,短剪切段长度达到 60 mm,而两个道次间板坯普旋预成形的变形程度变得很大,在试验过程中出现了起皱、隆起甚至断裂的情况,无法顺利成形,需要进行修正。通过分析,认为出现这种情况,主要是因为边部厚度较厚,在前次短剪切时受旋轮接触部位压力影响,与主轴轴线夹角增大,在半锥角过小时,其与半锥角之差远超过半锥角较大的部位,因而给普旋预成形增加了很大难度。如果此时短剪切长度过大,边部没有有效压下,极容易出现前述缺陷。因而,需要在后部半锥角小于 10°后,逐渐减小道次减薄率,保持短剪切长度基本不变,相对减小短剪切长度,保证厚度最厚的边部顺利成形。

综上所述,在半锥角大于 10°时,按照前述等角度差设计剪普复合旋压道次,在半锥角小于 10°时按照等剪切长度设计,最终确定剪普复合旋压道次为 15 次,经过试验验证,可顺利实现产品成形。

2.2.3 短剪切段旋前板坯厚度和半锥角的控制

如前所述,在进行短剪切后,还需对下一道次的短剪切段及余段进行普旋预成形,使下一道次的短剪切段满足减薄率 20% 所需的厚度和半锥角。而根据 2.1.2 的结论,在普旋预成形时,坯料会产生一定减薄,为消除普旋减薄的影响,使短剪切坯料厚度符合

减薄 20% 的要求,需要在每一次普旋预成形后增加一次反向普旋,使材料回流至下一道次短剪切预成形段。同时,采用这种方法也可以将短剪切所需板坯角度变化量通过正、反两次实现,降低板坯变形难度,降低拉伸减薄程度。通过试验验证,正、反向普旋轨迹半锥角之比为 2∶3 时,可有效保证下一道次短剪切段的厚度。

在有效保证预短剪切段厚度后,通过公式(2),可计算出预剪切段所需达到的半锥角。而半锥角的控制关键是正反普旋后板坯的弹复率。针对这一问题,进行了 10 次多道次剪普复合旋压试验,分别测量 2 ~ 10 次旋压预剪切段的弹复率,试验结果如图 10 所示。

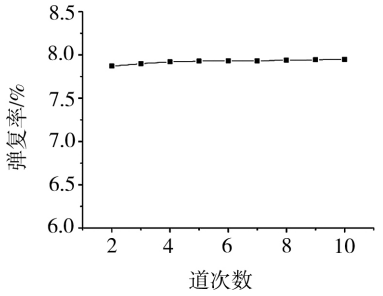


图 10　剪普复合旋压弹复率

Fig. 10　Rebound rate of conventional-shear composite spinning

从图 10 可以看出,在经过多道次普旋预成形后,材料变形规律趋于平稳,经过正反普旋预成形后,可以发现预短剪切段弹复率稳定在 8% 左右,这就为该段半锥角的设计提供了依据。从而在下道次短剪切半锥角为任意允许值时,均可通过控制此道次预剪切段半锥角,使下道次旋压满足正弦率规律,从而顺利实现贴模旋压。

2.2.4　余段半锥角及厚度控制

在研究余段普旋预成形的变形规律时,通过试验发现,其变形规律与预剪切段变形规律相近,可较容易实现控制。同时,正反普旋预成形对半锥角、厚度的影响规律也十分接近。

在成形过程中,一般使余段厚度基本保持不变且半锥角略大于预剪切段半锥角可以有效降低此段,特别是边部的成形难度,可以有效保证成形。

2.3　双旋轮镜像同步旋压方法

对 18 mm 厚的 5A06 板材进行传统的单旋轮普旋成形时发现,因为只有板坯一侧受到旋轮的作用,旋压力大,板坯和尾顶产生摆动,而由于头罩有封底,只能采用尾顶通过摩擦力定位,径向定位不可靠,因此板坯定位偏移,工件产生巨大的冲击力,即使在使用直径为 Φ340 mm 的尾顶顶紧时,工件和尾顶仍产生巨大的摆动,从而致使旋压时冲击过大,产品壁部在旋轮的冲击下断裂,同时产品头部与尾顶接触处磨损严重。因而,如何解决厚板旋压时力的不平衡问题是产品旋压成形的关键问题。

在这种情况下,本文利用了数控系统的通道调用功能,通过在副通道中设计与主通道镜像的旋压程序,设计对称的工装结构,并采用旋轮 R 角尺寸虚拟变化进行参考点补偿设置,以修正由于两侧工装、旋轮的些许偏差导致的两通道理论对称误差,解决了双旋轮同步性问题,将两旋轮旋压时径向、轴向偏差均减小到 0.02 mm,真正实现了镜像旋压,解决旋压力的平衡问题,降低厚壁产品的成形难度,保证了旋压过程的稳定进行。

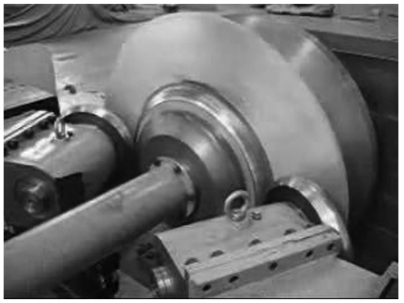


图 11　双轮镜像同步旋压

Fig. 11　Double-roller mirror spinning

2.4　热旋压过程中的温度设定及控制

5A06 铝合金在室温下为 α+β 相,由于 β 相的存在,在室温下加工塑性较差,但加热到 300℃ 左右时,进入 α 单相区,此时材料塑性明显提高。采取加热旋压的工艺,可以降低材料的变形抗力,提高材料的塑性及极限减薄率,降低对旋压设备的要求。当加热温度低于 200℃ 时,材料塑性不够,流动性不好,旋压力大,产品贴模差,容易产生裂纹、断裂,无法旋压下去。当温度达到 400℃ 以上时,一方面已接近材料过烧温度,在手持火焰加热很难均匀加热的情况下,很容易出现局部过烧导致产品报废的问题;另一方面热态下过高的塑性必然导致强度降低,塑性变形不稳定,可能出现金属压挤起包的现象,当变形力大于材料强度时,就会出现断裂。此外,旋压时罩体各段受热不均,出现局部缩径或局部胀径过大、不贴合模具的问题。因此,在加热工艺的选择方面,采取在刚开始旋压时,为防止因内外应力差过大出现裂纹,需要提高加热温度,温度一般设定为 320℃。随着旋压的进行,为防止温度过高,将温度保持在 250℃。而在大端口部旋压时,材料堆积,变形抗力较大,需要再次增高加热温度至 320℃ 的热旋工艺保证旋压产品最终质量。

加热温度的控制对于热旋压来说十分关键。热旋压时采用火焰加热,加热量受加热方式、距离、气体成分、环境等复杂因素影响很难控制。同时,热旋压多数情况下采用开放式局部加热,加工温度不易控制。采用红外测温仪,属于非接触式测量,红外测温

时的温度检测受零件工艺、材质、表面质量等影响较大,很难达到理想的加工温度精度。此外,温度对各道次影响规律不尽相同也增加了控温难度。因而,加热温度的准确性和有效性控制是加热旋压的难点之一。

针对上述问题,仔细分析了影响加热旋压产品贴模的各项因素,认为环境温度、测温时被测表面状态、旋压时毛坯与模具的相对温度差以及毛坯的绝对温度是关键。因此,首先确定环境温度应在 18 ~ 25℃进行热旋生产;其次对板坯经第一次普旋后表面温度作为起始测试温度,以消除毛坯表面状态不一致影响红外测温准确性的问题,第一次普旋起始时机以时间确定,一般要求加热 8.5 min 即起旋;最后,设计组合试验,标定了特定红外测温仪测量的、各个道次毛坯与模具温度差曲线,以保证曲线尽量平直为前提,调控各道次旋压前毛坯温度,保证旋压后贴合模具,从而有效保证了热旋压贴模质量。

通过上述措施,实现了旋压温度的精确控制,大幅提高了产品成形质量和生产合格率,解决了产品研制的关键问题。

2.5 实施效果

针对普旋预成形变形规律研究结论和剪普复合旋压成形研究结论,设计进行了 5 件次连续旋压验证试验。分别验证以 75°、70°、65°、60°4 个角度进行 4 道次连续普旋过程中各道次坯料弹复率、厚度情况,验证剪普复合旋压短剪切段减薄情况;验证预短剪切段半锥角角度、预剪切段厚度、旋压段厚度等情况;验证双轮旋压同步性情况;验证加热旋压曲线准确性及产品贴模程度,各项试验验证结果与本文研究结论一致,数据离散性不超过 10%。

在此基础上,采用本文前述研究成果,经过 4 个道次普旋预成形和 15 个采取正反普旋与短剪切相结合的剪普复合旋压道次的双旋轮镜像同步加热旋压过程,实现了二次曲线厚壁头罩单模具一次成形。连续生产 50 件产品,产品工艺稳定,产品一致性高,全部产品各项尺寸精度全部达到技术指标要求(表 1),相关工艺方法得到了有效的验证。

表 1 技术指标

Tab. 1 Technical indexes

数据来源	口部外径/mm	壁厚/mm	外形轮廓度/mm
技术要求	550±0.1	11.5±0.15	0.2
实测值	550±0.1	11.5±0.1	0.2

3 结论

(1)单模具剪普复合旋压前需要进行多次连续普旋预成形。其变形规律为:单个轨迹内,由中心向外,弹复率略有增大。各轨迹之间除第一次普旋弹复率较大外,后几次弹复率逐渐增大,但增大幅度较小,最后基本稳定在某一固定比率。普旋预成形过程中壁厚有较为明显的变化,特别是第一次普旋后,坯料厚度接近按照正弦率计算所得的坯料厚度,仅边部区域厚度有明显增加。在第二、三、四次普旋后,坯料厚度有所减薄,但程度明显减小,正弦率偏离越来越大,大致趋于固定比率。

(2)单模具剪普复合旋压采用正反普旋预成形避免普旋减薄,使各道次短剪切旋压前坯料厚度基本一致;通过控制预剪切段普旋形状使其满足下一道次短剪切正弦率规律,从而实现了各道次采用相同的减薄率进行短剪切旋压。在道次数量设计方面,在半锥角大于 10°时,按照等角度差设计剪普复合旋压道次,在半锥角小于于 10°时按照等剪切长度设计,经过试验验证,可顺利实现产品成形。

(3)通过在副通道中设计与主通道镜像的旋压程序、设计对称的工装结构、采用旋轮 R 角尺寸虚拟变化进行参考点补偿设置等方法可以解决双旋轮同步性问题,将两旋轮旋压时径向、轴向偏差均减小到 0.02 mm,能够实现双旋轮镜像同步旋压,消除厚壁头罩旋压力大、力不平衡、尾顶蹿动等问题,是提高厚壁头罩旋压精度的重要方法。

(4)通过采取确定环境温度、控制预热时间控制起旋温度、标定红外测温仪测量控温曲线等方式可有效控制加热旋压的旋压温度。

(5)基于剪普复合旋压方法的、二次曲线型厚壁头罩双旋轮镜像同步旋压成形技术避免了多次装夹导致的产品定位精度偏差,实现了材料有压下量变形,促进材料贴模,弱化拉伸减薄,预防了起皱、断裂等缺陷,并且产品内形面由模具保证,大幅提高了产品加工精度,直径、壁厚、轮廓度等主要精度误差均小于 0.2 mm。

参考文献

[1] 刘建华,杨合,李玉强. 旋压技术基本原理的研究现状与发展趋势[J]. 重型机械,2002 (3):1-4,12

[2] 赵云豪,李彦利. 旋压技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2008

[3] 王成和,刘克璋. 旋压技术[M]. 北京:机械工业出版社,1986

[4] 叶山益次郎,陈敬之,译. 旋压成形技术[M]. 北京:机械工业出版社,1988

[5] 康达昌,高西成,孟晓峰,等. 平板毛坯普旋变形方式的研究[J]. 塑性工程学报,1998(4):102-106

(编辑 李洪泉)