

曲母线型铝合金筒形零件的旋压加工

曾向东

(西安航天发动机厂, 西安 710100)

摘要: **目的** 加工出 3 mm 厚的曲母线连接直壁段的大尺寸筒形铝合金零件。**方法** 利用卧式数控旋压机, 采用强旋、普旋相结合并辅以热旋的方案进行工艺试验。**结果** 通过工艺试验摸索相关加工要点, 采用先强旋出零件的小端锥曲线部位, 再通过多道次加热普旋, 加工出了厚度为 3 mm 的曲母线连接直壁段的大尺寸筒形铝合金零件。**结论** 对于带有锥曲型面的大尺寸铝合金筒形件, 采用强旋、普旋结合的工艺进行加工是可行的; 零件毛坯方案、普旋时的收口量、零件扩径等因素是影响旋压加工成败的主要因素。

关键词: 铝合金; 筒形件; 旋压加工; 强普结合

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.010

中图分类号: TG386

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2016)04-0054-06

Spinning of Cylindrical Al Alloy Part with Curvilinear Generatrix

ZENG Xiang-dong

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

ABSTRACT: In order to machine 3 mm thick large-size cylindrical Al alloy part with curvilinear generatrix followed by straight-walled section, power-conventional spinning combination method supplemented with heat spinning via horizontal CNC spinning machine was explored through process tests, namely, power spinning of the conical curve section at the small end followed by multi-pass heat conventional spinning. It has been proved that power-conventional spinning combination method is feasible for the machining of large-size Al alloy cylindrical parts with cone-curved profile. Part blank design, necking amount of conventional spinning and part expanding are primary factors affecting the success of the above spinning processes.

KEY WORDS: Al alloy; cylindrical part; spinning; power-conventional spinning combination

某铝合金筒形零件, 是小锥度曲母线连接直壁段的大尺寸筒形件, 零件小端处直径为 $\Phi 630$ mm, 分 3 段沿轴线呈抛物线形过渡为直筒件, 长度为 1200 mm, 直筒段高为 330 mm, 大端直径为 $\Phi 820$ mm, 零件壁厚要求为 (3 ± 0.1) mm, 内表面轮廓度 ≤ 1 mm, 其结构尺寸如图 1 所示。零件属空心回转体, 采用拉伸胀形加工难度很大; 该零件若使用拼焊工艺成形, 存在焊缝较长且多、焊接质量不易保证、零件

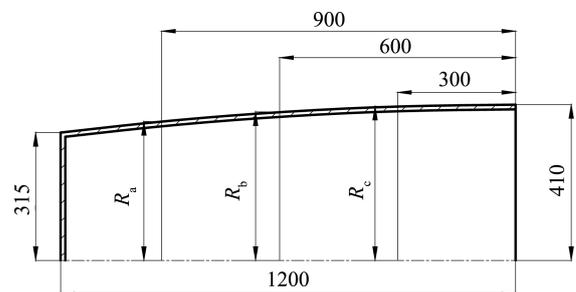


图 1 铝合金筒形零件
Fig.1 Structure of cylindrical part

收稿日期: 2016-06-05

作者简介: 曾向东(1972—), 男, 四川人, 高级技师, 主要从事金属塑性加工成形方面的工作, 擅长不锈钢、钛合金、铝合金等材料的强力旋压加工。

强度低等不利因素, 故不适用。据零件形状特征优先考虑旋压加工成形工艺^[1-4]。

1 旋压前期工作

1.1 零件材料的可旋性

该零件采用 5A06-0 铝合金材料, 具有较高的强度和腐蚀稳定性, 在退火和挤压状态下塑性尚好, 其抗拉强度为 315 MPa, 屈服强度为 155 MPa, 断后伸长率(50 mm)为 16%, 退火温度为 310~335 °C, 材料屈强比小, 延伸率高, 适用于旋压成形加工^[5-7]。

1.2 旋压工艺方案选择

实施旋压加工时有 2 种成形方案可供选择: 一是分段旋压出曲母线段、直筒段, 然后焊接成形; 二是直接旋压成形出零件整体。前者旋压加工难度小, 但牵涉到焊接质量影响打压效果, 强度低, 所需工装模具多, 生产周期长, 零件面临质检问题较多, 故不宜采用; 后者零件直筒段长, 材料变形量大, 零件成形难度大, 毛坯设计、贴模控制等存在诸多不确定因素; 但材料利用率高, 工装简单, 生产周期短, 假如能成功非常有利于生产, 所以初步确定直接旋压成形零件整体^[8]。

旋压成形通常分为强旋和普旋两种, 强旋过程中板材壁厚遵循正弦规律减薄, 适用于厚板零件加工; 普旋一般只改变板坯形状, 壁厚基本不变或变化较少, 适用薄板零件加工^[9-14]。

根据产品结构特点, 零件前半段为锥形曲母线等壁厚结构, 适用强旋中的剪切旋压, 后半段为直

筒形, 也适用于强旋中的减薄旋压; 但如何处理二者之间的过渡衔接, 是一个很难处理的问题, 也是此次旋压加工成败的关键, 还需要在实际加工中具体分析。

1.3 旋压设备的确定

目前国内大尺寸筒类零件的旋压加工, 大多采用的是在卧式三轮筒式旋压机上进行, 有利于零件的对中性和贴模性。我厂仅有两轮卧式数控旋压机床可供采用, 根据零件特点, 确定在 CNC1500 数控旋压机床上进行加工。该机床加工范围适宜, 主要是尾顶行程长可达 2 m, 零件加工完毕后有足够的空间可以完成卸活, 而且不会对左右床身产生干涉; 另外机床工作吨位适合, 设备调整快速易行^[15-16]。

1.4 毛坯设计

毛坯的设计与处理很重要, 是旋压加工中的重要环节, 关系到零件成形是否成功和成形质量的高低, 所以要谨慎对待。初步设想是将 4.8 mm 厚的平板毛坯进行机加、退火后再进行旋压, 如图 2 所示。

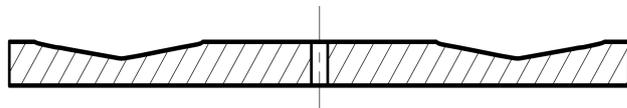


图 2 毛坯方案
Fig.2 Blank design

机加时的车削量依据零件上对应点位, 在正弦律计算下的数值并配以适量的余量, 使材料在旋压时尽量处于负偏离状态, 如表 2 所示(局部数据)。

表 2 旋压毛坯内形面各点坐标值及壁厚(局部数据)

Table 2 Coordinate values and wall thickness data of different points of blank inner profile during spinning (local data)

各点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X_1	0	7.82	21.07	34.33	47.60	60.89	74.19	87.51	100.83
Y_1	324.0	326.22	329.98	333.64	337.19	340.64	343.98	347.22	350.35
δ_1	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
a_1	15.863	15.863	15.426	14.982	14.541	14.102	13.664	13.228	12.793
X_2	0	14.56	39.546	64.546	89.546	114.546	139.546	164.546	189.546
Y_2	324.00	326.22	329.98	333.64	337.19	340.64	343.98	347.22	350.35
δ_2	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
a_2	8.681	8.681	8.446	8.207	7.969	7.732	7.495	7.259	7.023

考虑到实际操作中, 此方案毛坯机加的难度较大, 检测繁琐, 质量和进度都不易保证, 而且后部直

筒段旋压时收口量太大,可能无法成形加工。在多次思考后决定,采用图3所示毛坯进行旋压加工。方案采用环形锻件车切出具有一定锥度的预制坯,直接减少零件后部直筒段旋压时的收口量,降低旋压加工难度。

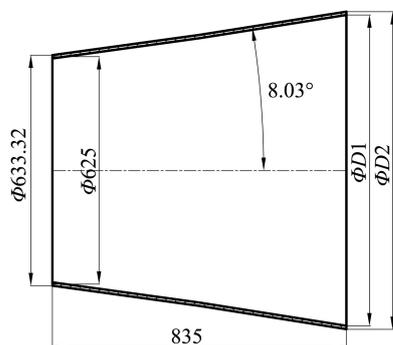


图3 锥筒形旋压毛坯

Fig.3 Conical cylindrical blank for spinning

2.5 模具设计

模具采用耐热钢锻造后车削加工而成,硬度为HRC45;考虑到筒形件存在扩径因素,模具大端直筒部分直径较图纸要求略小1.5 mm。为解决零件毛坯固定问题,首先在零件毛坯小端口部增加25 mm的直线段部分,然后在模具小端留有与之对应的台阶,同时尾顶设计出对应的环状工作部分作用于毛坯,便于零件的夹持、锁定,如图4所示。

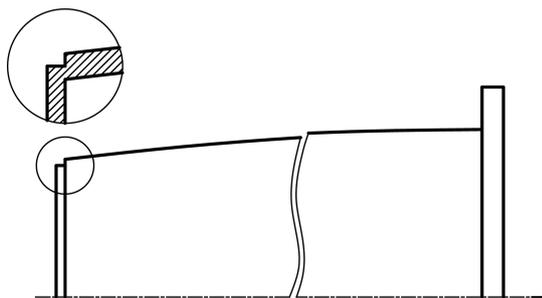


图4 模具结构设计

Fig.4 Mould structure design

2 旋压实施

2.1 直接强旋成形试加工

由于5A06-0铝合金材料塑性较好,因此想先尝试一下直接强旋成形该零件的可能性,同时找到该零件旋压加工时易出现的困难和问题。

设备:CNC1500 数控旋压机。旋压参数:转速

$n=50$ r/min,进给 $f=80\sim 60$ mm/min,间隙 $z=2.6$ mm,旋轮圆角半径 $R=10$ mm,旋轮攻角尽量要兼顾零件大小端的形状特征,避免铲料、反挤等缺陷的发生;润滑剂:外表面涂抹 MoS_2 膏剂+氯化石蜡,内表面及模具涂抹90#机油。

加工效果:零件壁厚3.5~3.6 mm,小端曲线部贴模较好;小端曲面最后30 mm处贴模间隙逐渐变大,在刚旋完小端的曲线后50 mm处出现较大的失稳隆起,最终导致零件撕裂,方案失败,见图5。



图5 强旋失败零件

Fig.5 Failure of power spinning

2.2 强旋、普旋结合的试加工

2.2.1 存在问题

根据之前的试旋加工观察,危险区处于模具曲线与直筒段的过渡区域。再仔细观察发现:模具曲线与直筒段连接处的过渡段半径太小,显得过于尖锐,不利于材料的流动和成形;旋制直筒段时,由于前期曲面成形时的挤压应力作用,使得未加工段材料在产生一定量的后仰扩张效应,造成坯料与模具之间的夹角张大,导致旋压时旋轮尚未下压到位坯料就已经后翻与旋轮产生摩擦,非常不利于最后直筒段的旋压,在失稳、刮蹭的作用下造成零件断裂。

2.2.2 应对措施

1) 将模具型面的交接棱线圆弧加大处理:使用粗砂轮、油石、砂纸手工打磨,圆滑修整模具上的棱线,减少陡降率对材料成形的干扰。

2) 根据对已加工失败零件的检测数据分析,适当缩小旋压间隙,在保证零件厚度的前提下加强贴模效果。

3) 对零件后段直筒部分采取先普旋收口再强旋的方案,为避免材料加工硬化影响成形效果,辅以

加热手段。

2.2.3 措施落实情况

1) 将模具上棱线由 $R3\text{ mm}$ 打磨至 $R8\text{ mm}$ 。

2) 强旋参数: 转速 $n=50\text{ r/min}$, 进给 $f=40\text{ mm/min}$, 间隙 $z=2.45\text{ mm}$ 。

3) 零件旋完曲母线段后, 先暂停; 用 2 把乙炔火焰枪对余下未加工段的材料均匀加热后(见图 6), 再辅以三道次的前擗前收式下压收口。将材料尾端口部收至距模具约两指宽时, 进行最后一次强旋, 将零件加工完毕。普旋时加工参数: 转速 $n=80\text{ r/min}$, 进给 $f=240\text{ mm/min}$, 每次收口大端的下压量 12 mm 。



图 6 热旋加工
Fig.6 Heat spinning

实际加工时由于铝合金散热快、模具尺寸较大、火焰加热损失等原因, 将零件分别加热到 $180, 260\text{ }^{\circ}\text{C}$, 各试旋一件。

加工效果: 所试 2 件, 一件刀痕较重, 一件加工快结束时产生裂口, 效果都不是很好。零件壁厚 $3.15\sim 3.35\text{ mm}$ 左右, 加热温度高的壁厚小些, 温度低的壁厚要大些, 表面质量都不是太好; 零件加工至最后 100 mm 段时, 由于失稳、冷作硬化等因素, 极易发生断口、撕裂缺陷(见图 7), 导致旋压失败。同时零件扩径现象很严重($\geq 10\text{ mm}$ 左右), 无法满足工艺文件要求。



图 7 破损缺陷
Fig.7 Breakage defect

2.3 改进后的强旋、普旋方案

2.3.1 技术分析

1) 目前所可能实施的各种措施不能将扩径 10 mm 的缺陷完全解决, 因此需要对模具尺寸中扩径退让量的合理性进行斟酌。

2) 为减小后段普旋时的成形压力, 应在前期强旋时尽可能将材料后擗, 使材料尽可能前倒贴向模具, 尽可能增加强旋时零件有效成形部分的长度。

3) 普旋时的下压量不宜过大, 否则会对材料产生过度的变形疲劳, 塑性迅速下降导致旋压失败。

4) 温度的高低与控制是影响加工效果的重要环节, 过高易造成大减薄量、失稳、扩径; 过低会导致材料塑性不足, 零件成形失败。经观察温度处于 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时对应加工效果较好。

2.3.2 应对措施

1) 先行对模具进行返修: 将其直筒部分直径在原有基础上车小 6 mm , 再行旋压加工。

2) 对毛坯进行无损检测, 剔除有分层、夹渣等缺陷的毛坯, 避免对旋压质量造成影响。

3) 小端强旋时减小进给比, 适当缩小对刀间隙。

4) 尽可能地加大零件强旋成形有效部分, 减小普旋加工时收口的长度; 并适当分配普旋时的道次下压量。

5) 均匀加热, 并控制热旋时坯料加热温度, 使其加工时尽量保持在 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

2.3.3 措施落实

1) 模具返修除减小直筒段直径尺寸外, 还对其过渡段棱线进行圆滑过渡处理。

2) 小端强旋时: 将进给比减至 0.6 mm/r , 间隙缩小 0.05 mm ; 适当地缩小零件壁厚, 改善贴模度, 减小过渡区域的失稳。

3) 零件强旋成形至过锥曲母线段 100 mm 处后, 再进行普旋加工; 改三道次普旋为四道次普旋, 每道次的下压量分别为 $12, 10, 10, 8\text{ mm}$ 。普旋时加工参数: 转速 $n=80\text{ r/min}$ 、进给 $f=240\text{ mm/min}$, 考虑到热损失、待机时间等因素, 实际坯料温度加热到 $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后再行普旋加工, 加热操作时, 一人从前向后操作, 一人从后向前操作, 匀速平缓移动。

4) 直筒段最后道次强旋时的加工参数: 转速 $n=50\text{ r/min}$, 进给 $f=30\text{ mm/min}$, 间隙 $z=2.30\text{ mm}$; 旋轮圆角半径 $R=10\text{ mm}$; 润滑剂: 外表面涂抹 MoS_2 膏剂+氯化石蜡, 内表面及模具涂抹 $90\#$ 机油。

2.3.4 加工效果

经两批次的零件加工验证,零件壁厚 3.0~3.1 mm 左右,内径尺寸公差 ≤ 1 mm,内壁光滑,外表面纹理均匀,强度经打压测试可经受住 435 MPa 的压力,大于工艺文件要求的 417 MPa,可以批次加工,满足使用要求,见图 8。

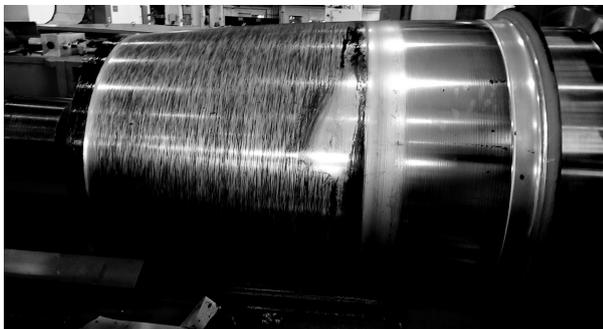


图 8 旋压成功的零件

Fig.8 Successfully spun part

2.3.5 操作要点

1) 强旋操作。起旋时要注意避让小端用来固定零件的台阶部分,以免对零件的夹紧造成影响;旋压间隙应尽量使材料处于负偏离状态,使零件更好地实现贴模。

2) 普旋操作。采用双轮同步收口操作,避免单轮普旋收口时材料单边受力,形成口部歪斜,不利于成形与零件壁厚的保证。普旋时首道收口的长度要足够,以保证最后道次强旋时的终点不与普旋时的停驻点发生重叠,应保持 10~15 mm 的间隔距离;同时后续每道次的普旋起止点也相应地与上道次普旋的起止点错开 10~15 mm 的间隔,起点向前错,止点向后错;避免材料由于多次重复碾压,塑性下降导致零件断裂;收口收至坯料与模具间隙约为两指间隙为最佳,太宽、太窄最后强旋时都易发生断裂,导致旋压失败。

3) 关于接刀。为减少双曲线与直筒段的接刀痕深度,第一次普旋时起刀点从首次强旋时的停刀位置向后退 25 mm 处开始;最后道次强旋时接刀点位考虑到材料受热后变软,易产生台阶,接刀处从首次强旋时的停刀位置向后退 100 mm 处开始,间隙可略小些,从 2.1 mm 逐渐过度到 2.3 mm,防止发生应变裂纹;

4) 加热。采用 2 把乙炔火焰枪左右对称式加热;由于加热面积大,一把枪在近端加热时另一把就在远端加热,零件表面涂抹 MoS_2 膏剂可提高升温速度。

加热时主轴旋转速度为 60 r/min,不宜过快,否则影响升温效果;测量加热温度时要多测几个点,温升是否均匀对加工能否成功很重要(温度保持在 210 °C 时效果最好)。另外要注意设备的防火措施,保证安全生产。

5) 零件加工途中,停顿时间不宜超过 40 min,否则由于材料的疲劳敏感性、冷作硬化等因素,导致材料内部晶粒畸变,塑性下降,产生断裂缺陷导致加工失败;

6) 依据材料被旋轮碾压时发出的声音,以及旋轮工作面前的材料堆积量,判断、调整旋压加工参数。声音大说明下压过量,材料接近疲劳极限;堆积量大时,则间隙偏小易失稳。在一定范围内,可通过操作者及时对间隙、转速、进给量等进行调整来优化。

3 结论

1) 在卧式数控旋压机上采用强普结合,旋压成形带有锥曲面大尺寸铝合金筒形件是可行的,需要辅以热旋,但与其他加工方案相比仍具有一定的成本优势。

2) 带有锥曲面大尺寸铝合金筒形件的毛坯设计,不光涉及加工成本、生产进度,更是影响到旋压加工成败的关键要素之一。

3) 大尺寸的铝合金筒形件,扩径量较多,具体数值需要具体对待;模具设计时应比钢件旋压时的余量放大 2~3 mm。

4) 鉴于铝合金材料敏感性强,升温的方式与热旋时温度的稳定性很重要。

5) 对于收口量大的普旋,前期应尽量减小其普旋时的成形加工量,普旋时采用双轮同步收口操作,使用多道次、小下压量的分配方法更有利于零件的加工。

参考文献:

- [1] 张涛. 旋压成形工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. ZHANG Tao. Spinning Forming Process[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [2] 赵云豪, 李彦利. 旋压技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. ZHAO Yun-hao, LI Yan-li. Spinning Technology and Its Applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [3] 陈适先. 强力旋压及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社,

1966.
CHEN Shi-xian. Power Spinning and Its Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1966.
- [4] 徐银丽. 异型薄壁壳体强力旋压成形机理及规律的三维有限元分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
XU Yin-li. Research on the Deformation Mechanism and Laws of Thin-walled Abnormal Shell Power Spinning Using 3D FEM[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [5] 魏志强. 薄壁镍基合金管材的变薄旋压研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2000.
WEI Zhi-qiang. Research on Power Spinning of Thin-walled Nickel-based Alloy Tubes[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2000.
- [6] 李玉强. 多道次拉深旋压成形规律的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
LI Yu-qiang. Research on the Forming Law of Multi-process Draw-spinning[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.
- [7] 李海峰, 唐定勇. 半球形厚壁封头拉深成形壁厚变化规律[C]. 中国工程物理研究院科技年报(2002), 2002.
LI Hai-feng, TANG Ding-yong. Thickness Variation Research of Drawing Process of Thick-wall Semi-spherical Heads[C]. Annual Report of China Academy of Engineering Physics (2002), 2002.
- [8] 杨洁, 马世成, 吴伏家. 旋压成形技术数值模拟方法的应用现状与发展趋势[J]. 现代制造工程, 2011(1):130—134.
YANG Jie, MA Shi-cheng, WU Fu-jia. Status of Appliance and Trends of Numerical Simulation in Spinning Technique [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2011(1): 130—134.
- [9] 张华. 旋压药筒筒体成形过程工艺参数优化仿真研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
ZHANG Hua. Cartridge Spinning in the Molding Process Simulation and Optimization of Process Parameters[D]. Xi'an: North University of China, 2012.
- [10] 陈汇, 郎利辉, 杜传军, 等. 薄壁精密罐多道次缩口过程及其机理[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(7): 805—810.
CHEN Hui, LANG Li-hui, DU Chuan-jun, et al. Multi-stages Necking Process and Mechanism of Precision Thin-walled Can[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(7): 805—810.
- [11] 许兰贵. 变壁厚大锥度薄壁铝罐成形关键技术的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
XU Lan-gui. Study on the Key Technology of Thin-walled Aluminum Can Forming with Variable Thickness and Large Tapers[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [12] 王哲. 超声旋压材料流变规律及机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
WANG Zhe. The Rheological Regularity and Mechanism of Ultrasonic Spinning Study [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [13] 刘建华. 多道次普通旋压成形机理与旋轮运动轨迹作用的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
LIU Jian-hua. Research on Forming Mechanism of Multi-pass Conventional Spinning Process and Influence of Roller-trace on the Process [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [14] 陈辉. 复杂曲面、薄壁件精密旋压成形技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
CHEN Hui. Research on the Turning-forming of Thin and Complicated Contour Surface[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.
- [15] 赵博. 薄壁筒体构件反旋减薄旋压载荷与鼓形规律研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
ZHAO Bo. Research on the Load and Drum of Thin Walled Tube during the Spinning Process [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [16] 时丰兵. 卧式普通旋压机床结构优化设计及整机研制[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
SHI Feng-bing. The Structural Optimization Design and Development of the Common Horizontal Spinning Machine[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.