

消除某发动机壳体旋压裂纹的工艺改进

廉国安¹, 程茜茜², 范国军¹, 李婷¹

(1. 晋西工业集团有限责任公司, 山西 太原 030027; 2. 驻太原地区第四军代表室, 山西 太原 030027)

摘要: 薄壁、长形发动机壳体是弹箭类的关键零件, 使用材料为 D6AE 高强度合金钢, 对旋前毛坯进行球化退火处理, 在强力旋压成形过程中筒体出现批量周向裂纹, 裂纹呈鱼鳞状, 由内腔沿壁厚向外表面延展而且裂纹位置集中。为解决该问题, 基于强力旋压成形机理、成形工艺、热处理工艺等理论, 对裂纹形貌、产生位置及旋压受力状态进行分析, 获得了裂纹产生的根本原因, 进而优选出在不增加成本的前提下通过改进旋压工艺得到的最佳解决方案: 通过改善裂纹产生阶段的受力状态, 使该阶段受力变小。该解决方案彻底消除了裂纹源, 避免了重大经济损失, 为大批量生产发动机壳体提供了良好的技术基础。

关键词: 发动机壳体; 正向旋压; 裂纹; 循环球化退火; 最大减薄率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.016

中图分类号: TG376.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 01-0115-04

Process improvement on eliminating spinning cracks for a certain engine housing

Lian Guoan¹, Cheng Xixi², Fan Guojun¹, Li Ting¹

(1. Jinxi Industries Group Co., Ltd., Taiyuan 030027, China; 2. The Fourth Military Representative Office in Taiyuan, Taiyuan 030027, China)

Abstract: The thin-walled and long-shaped engine housing is a key component of projectiles and arrows, and the material used is D6AE high-strength alloy steel. Before spinning, the blank is subjected to spheroidizing annealing treatment, and during the power spinning process, mass circumferential cracks appear on the cylinder body, which are fish-scale-like and extending from the inner cavity to the outer surface along the wall thickness direction, and the crack positions are concentrated. In order to solve the above problem, based on the theories of power spinning mechanism, forming process and heat treatment process, etc., the morphology, generating location and spinning stress state of cracks were analyzed to obtain the root cause of the cracks, and the best solution scheme obtained by improving the spinning process without increasing the cost was chosen, which improved the stress state in the crack generation stage to reduce the stress. Thus, the crack source was completely eliminated to avoid major economic losses in this solution scheme, which provided a good technical foundation for mass production of engine housing.

Key words: engine housing; forward spinning; crack; cycling spheroidal annealing; the maximum thinning rate

发动机壳体为薄壁筒形件, 是弹箭类的关键零件, 其工作时的受力条件复杂, 主要工艺流程为: 下料→退火→旋前毛坯机加工→旋压^[1]→时效→调质处理→机械加工→水压→探伤。工艺相对稳定, 但在旋压、水压和探伤工序发现批量内表面裂纹, 据不完全统计, 产生裂纹的产品占生产产品总数的 7.3%。给工厂造成较大经济损失, 严重影响生产进度。

1 问题分析

1.1 裂纹位置及形状

裂纹 (图 1、图 2) 产生的部位非常集中, 在

距小端 (直径为 $\Phi 272$ mm) 端面 140~150 mm 处 (图 3, 其中虚线表示旋前毛坯, 实线为旋后壳体), 裂纹均为横向张嘴开裂, 部分已裂透, 为剪切式的鱼鳞状, 断面呈锯齿形状, 内表面裂纹的周围有许多微裂纹, 其触感凸凹不平。理化报告检测结果为旋压产生的裂纹。

1.2 强力旋压机理

筒形件强力旋压 (即变薄旋压) 借助旋轮对随旋压芯模转动的预成形坯料作进给运动并施压, 其变形近似于点、线接触, 且只减小毛坯外径及壁厚, 内径不变。发动机壳体旋压采用正向旋压, 变形区受力状态为径向和切向压应力、轴向拉应力, 已变形区不仅承受拉应力还要承受由于传递扭转力矩所产生的切向剪应力。强力旋压变形的不均匀性产生了附加应力。对轴向附加应力和残余应力进行分析^[2-3]可知: 轴向应变随着壁厚减薄率和相对高度

收稿日期: 2021-01-22; 修订日期: 2021-04-21

作者简介: 廉国安 (1966-), 男, 学士, 研究员级高级工程师

E-mail: 1192330036@qq.com

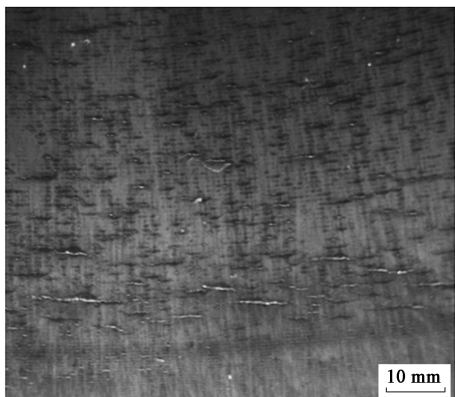


图 1 裂纹的宏观形态

Fig. 1 Macroscopic morphology of crack

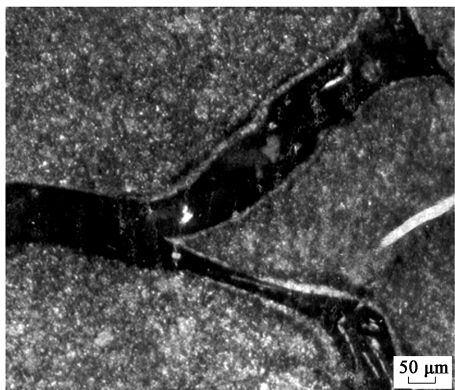


图 2 裂纹形貌及其周围组织

Fig. 2 Crack morphology and its surrounding microstructure

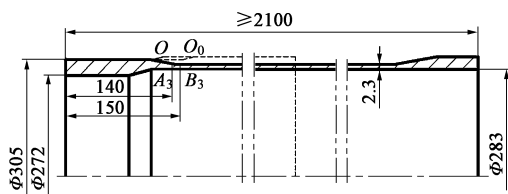


图 3 发动机壳体旋压工艺图

Fig. 3 Spinning process diagram of engine housing

的增大而增大,即毛坯上越接近外表面的纤维在旋压后轴向延伸越大,因此,在轴向外层为压应力、内层为拉应力(图4,其中“+”表示拉应力,“-”表示压应力)。这样就很好地解释了旋压件周向裂纹多产生于内表面的原因。

1.3 工艺分析

1.3.1 旋压工艺分析

旋压工艺设计的基本原则为:保持零件正常旋压变形、尽可能地选取大减薄率,以提高材料的利用率。发动机壳体使用的材料为 D6AE 高强度合金钢,根据经验公式法与试验法,确定了现行的发动

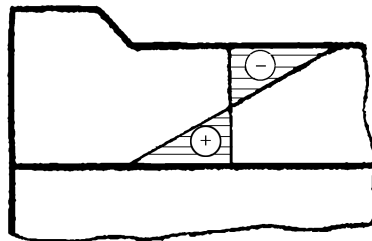


图 4 轴向附加应力

Fig. 4 Axial additional stress

机壳体旋压的减薄率为 78%^[4-5]。

1.3.2 热处理工艺分析

为满足旋压变形所需的综合性能、获得较高的减薄率,对于发动机壳体旋压前毛坯采用往复循环球化退火^[6]的热处理工艺。球化退火的目的为:获得均匀的、塑性较好的球状珠光体组织,尽量减少片状碳化物。

在产生裂纹的零件的未旋压处(旋前毛坯状态)取样,其组织为少量球状珠光体+片状珠光体+铁素体(图5),断面收缩率为 49%~61%。未出现裂纹的旋前毛坯组织为均匀的球状珠光体(图6)。

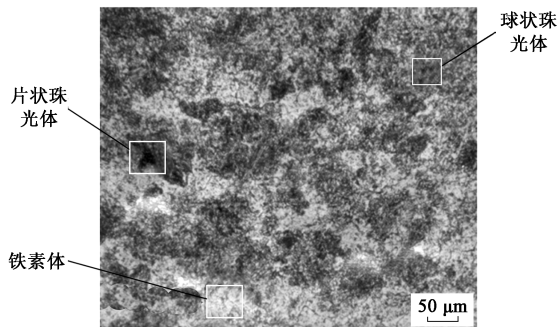


图 5 旋前裂纹处的毛坯组织

Fig. 5 Microstructure of blank near crack before spinning

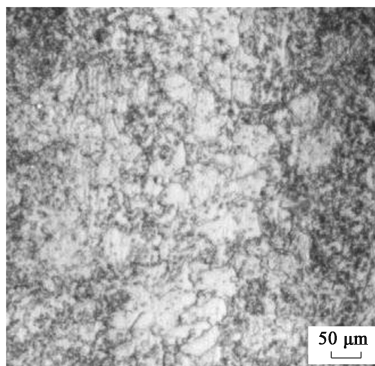


图 6 未出现裂纹的旋前毛坯组织

Fig. 6 Microstructure of blank without crack before spinning

综上所述：壳体旋压选取的减薄率已接近材料的最大减薄率，加之旋前毛坯球化退火不充分、材料塑性下降，从而导致了壳体产生旋压裂纹。

1.4 裂纹部位集中的原因分析

一般认为，强力旋压筒形件产生周向裂纹的原因除了毛坯粗糙度和热处理外，主要有两种：（1）道次减薄率过小，材料压不透，会引起工件厚度变形不均，工件变形不充分而出现裂纹；（2）轴向拉力过大，将工件拉裂。但为什么旋压裂纹绝大部分发生在距小端（直径为 $\Phi 272$ mm）端面 140 ~ 150 mm（图 3 中 A_3B_3 段）处，而其他部位则完成了塑形成形。不论是道次减薄率过小还是轴向拉应力过大，裂纹应散布在整个零件上，而非位置相对集中，除非受力不均匀，因此，从裂纹位置、变形零件受力方面进一步分析裂纹产生的原因。

1.4.1 裂纹位置受力分析

强力旋压的整个变形过程大致可划分为 3 个阶段^[7-8]，即旋入阶段 I、稳定旋压阶段 II 和旋压終了阶段 III。旋入阶段是指从旋轮开始接触毛坯，旋至达到所要求的壁厚为止，其特点为：壁厚减薄率逐渐增大，轴向旋压力逐渐增大，在这一阶段结束时达到极大值。虽然这一阶段比较短，但若减薄率过大，正旋毛坯将在此阶段断裂^[8-9]（图 7）。

当旋轮旋入毛坯达到所要求的壁厚减薄率后，旋压变形进入稳定阶段。在这一阶段中，旋压力基本保持不变。

1.4.2 裂纹原因分析

按体积不变原则，还原裂纹轴向位置（图 3 中 A_3B_3 段）在毛坯、第 1 道次旋压、第 2 道次旋压的位

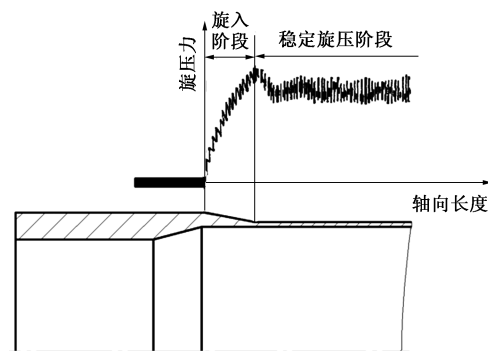


图 7 旋入阶段末旋压力出现极大值

Fig. 7 The maximum value of spinning force occurring at end of screwing stage

置，分别对应 AB 段、 A_1B_1 段、 A_2B_2 段（图 8，其中，粗线表示旋前毛坯，细线表示旋后工件，虚线表示第 1 道次旋压后工件，双点划线表示第 2 道次旋压后工件）^[9-10]。详细分析见表 1，其中，相对距离指裂纹实际发生点距旋入阶段实际终点的距离。

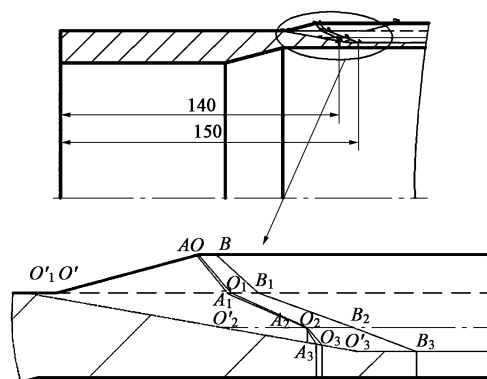


图 8 裂纹位置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of location for crack

表 1 裂纹位置分析

Table 1 Analysis of location for crack

项目	毛坯	第 1 道次旋压	第 2 道次旋压	第 3 道次旋压
裂纹实际起点、终点	A, B	A_1, B_1	A_2, B_2	A_3, B_3
裂纹理论起点、终点	O', O	O', O_1	O_1', O_2	O_1', O_3
理论上旋入阶段起点、终点	O', O	O', O_1	O_1', O_2'	O_2', O_3'
相对距离	$AO=0.20$ mm, $BO=2.00$ mm	$A_1O_1=0.39$ mm, $O_1B_1=2.70$ mm	$O_2'A_2=8.10$ mm, $O_2'B_2=13.10$ mm	$A_3O_3'=4.50$ mm, $O_3'B_3=5.50$ mm

由表 1 可知：裂纹实际发生的起点均在理论起点之后，裂纹实际发生的终点距离理论终点最大距离 $O_3'B_3=5.5$ mm。若记入计算误差和加工误差，裂纹发生点基本在旋压的旋入阶段，处于不均匀变形阶段，因此，认为裂纹点出现在旋压的旋入阶段 I。

基于以上分析，旋入阶段的 O 点在第 1、2、3 道次旋压时均处于不稳定的状态，3 个道次的旋压

力叠加，必然产生比稳定阶段更大的轴向力，零件内表面承受不住大的拉应力，从而导致在筒体旋入阶段断裂^[10]。

2 改进措施

为消除裂纹的批量产生，针对以上分析特采取

以下两项措施。

2.1 改进旋压工艺

旋入阶段不均匀变形和大的旋压力的叠加导致裂纹^[11-12]的产生,因此,从旋压力、变形均匀性两个方面来解决。

(1) 旋压力。壳体旋压的大批量生产证实:旋压进入稳定阶段的力量不足以使工件产生裂纹,对于减薄率的选择,稳定阶段是可以承担的,若减小总减薄率,势必会增加材料和生产成本。仅从材料上考虑,若将总减薄率取 70%,那么毛坯需增长 180 mm,批量生产时的费用非常可观。暂不考虑此方案。

(2) 变形均匀性。对于旋入阶段,在旋轮下压的瞬间必然有部分金属倒流,倒流的金属造成材料发生不稳定流动,致使变形不均匀,不均匀的变形必然增大旋压力。在 O 点(图 3)倒流的金属轴向上的流动空间很小(接近斜面),而 O_0 点的相对空间就较大,形成的不均匀性较 O 点要小,因此旋压力的突变也小。 O_0 点远离 O 点,旋压力由不稳定的 3 次叠加变为两次叠加,旋压力变小,效果越好。为了不增加成本,通过计算,将 O 点向后移动 40 mm。

2.2 毛坯的热处理

对毛坯进行热处理的目的是为增大抵抗不均匀变形的能力,即改善旋前毛坯热处理的性能,使组织均匀,获得更好的球化效果,根据每冶炼炉含碳量的不同,对旋前毛坯分别采取了不同温度(公差范围内的微调)的循环球化退火工艺^[3],并规定作金相组织检查,参照 JB/T 5074—2007^[13]进行评级,达到 4 级以上的毛坯才可以下转。

3 结语

通过采取以下措施,避免了裂纹的产生:(1)旋压工艺在不改变总减薄率、不增加费用的基础上改善了旋入阶段的受力状态,使旋入阶段的轴向拉应力突变减小;(2)旋前毛坯热处理上采用不同温度的循环球化退火工艺并制定严格的金相指标。经过大批量的连续生产验证,对成品进行超声波检测,均无裂纹产生,避免了重大的经济损失。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会锻压学会. 锻压手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- Forging & Stamping Branch of Chinese Mechanical Engineering So-

ciety Society. Forging Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

- [2] 贾文铎. 筒形件强旋若干物理现象的变形机理 [A]. 第三届全国旋压技术交流会会议论文 [C]. 北京, 1986.
- Jia W D. Deformation mechanism of some physical phenomena of strong rotation of cylindrical parts [A]. The Third National Spinning Society Paper [C]. Beijing, 1986.
- [3] 陈适先, 贾文铎, 曹庚顺, 等. 强力旋压工艺与设备 [M]. 北京:国防工业出版社, 1986.
- Chen S X, Jia W D, Cao G S, et al. Powerful Spinning Process and Equipment [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986.
- [4] 陈文耀, 朱效教, 丁继良, 等. 超高强度 D6AC 钢壳体、30CrMnSiA 尾管旋压工艺研究 [A]. 第三届全国旋压技术交流会会议论文 [A]. 北京, 1986.
- Chen W Y, Zhu X J, Ding J L, et al. Spinning technology of 30CrMnSiA liner for ultra-high strength D6AC steel shell [A]. The Third National Spinning Society Paper [C]. Beijing, 1986.
- [5] 赵云豪. 筒形件强力旋压过程中堆积现象的浅析 [A]. 第四届全国旋压技术交流会会议论文 [C]. 北京, 1987.
- Zhao Y H. Analysis of the stacking phenomenon in the process of strong spinning of cylindrical parts [A]. The Fourth National Spinning Society Paper [C]. Beijing, 1987.
- [6] 崔忠圻. 金属学与热处理 [M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
- Cui Z X. Metallography & Heat Treatmen [M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [7] 徐洪烈. 强力旋压技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 1984.
- Xu H L. Powerful Spinning Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1984.
- [8] 马泽恩. 筒形件强力旋压的变形分析与旋压力计算 [A]. 第一届旋压会议论文 [C]. 北京, 1980.
- Ma Z E. Deformation analysis and spin pressure calculation of cylindrical parts under strong spinning [A]. The first Spinning Society Paper [C]. Beijing, 1987.
- [9] 王成和. 旋压力的测定试验 [A]. 中国机械工程学会第三届锻压年会交流论文 [C]. 北京, 1986.
- Wang C H. Measurement test of rotary pressure [A]. The Third National Spinning Society Paper [C]. Beijing, 1986.
- [10] 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 Y H, Li Y L. Spinning Technology and Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [11] 安章荣. 铝合金旋压舱的研究 [A]. 第三届全国旋压技术交流会会议论文 [C]. 北京, 1986.
- An Z R. Study on aluminium alloy spinning tank [A]. The Third National Spinning Society Paper [C]. Beijing, 1986.
- [12] 日本塑形加工学会. 旋压成形技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 1988.
- Japan Plastic Processing Society. Spinning Forming Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [13] JB/T 5074—2007, 低、中碳钢球化体评级 [S].
- JB/T 5074—2007, Spheroidite grade of low and medium carbon steel [S].