

某 H70 合金弹壳体收口成形工艺数值模拟研究

王兴雷 冯再新 姚宇康 郭小森
(中北大学材料科学与工程学院)

摘 要 某新型 H70 弹壳体的收口成形按传统理论计算工艺,弹壳毛坯待变形传力区和斜肩变形区均存在成形失稳问题,且制件口部壁厚增厚严重,超出产品尺寸要求。经模拟和试验研究,得出了毛坯变形区和传力区不发生失稳且工艺最简的变形条件。对于弹壳口部壁厚,可增大缩口系数,采用 4 次收口工艺控制口部壁厚的增加程度。修正了本壳体传统收口成形工艺,所得制件满足产品尺寸要求。

关键词 收口成形;成形失稳;数值模拟;模具结构

中图分类号 TG376.3 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Necking Process of a H70 Alloy Shell Body

Wang Xinglei, Feng Zaixin, Yao Yukang, Guo Xiaosen

(School of Materials Science and Engineering, North Central University)

Abstract: According to the traditional theoretical calculation of a novel H70 shell body, the forming instability problem occurs in the force transfer area and oblique shoulder deformation area, and the wall thickness of riser is seriously thickened, which exceeds the product size requirements. Through simulation and experimental investigation, the deformation conditions of blank deformation area and force transfer area without instability and the simplest process were obtained. For the shell riser wall thickness, the shrinkage coefficient can be increased, which is controlled by quartic closing process. The traditional closing forming process of the shell is modified, and the obtained parts meet the requirements of product size.

Key Words: Closing Forming, Forming Instability, Numerical Simulation, Mold Structure

对于薄壁管的成形,有研究者提出用颈缩法确定薄壁管成形极限的方法^[1],获得了薄壁管件的极限应变,首次确定了薄壁管的成形线,该研究方法在薄壁管成形工艺的设计中有重大意义。张小光等^[2]对弹壳类零件进行多种成形工艺分析,指出了弹壳零件复合冷挤压成形工艺的可靠性,但缺少通过挤压成形工艺控制壁厚尺寸精度的研究。

某新型弹壳体产品属于高性能弹体,广泛用于航、陆等军事领域,对弹壳体的成形品质要求较高。实践

中,壳体采用反挤压、变薄引伸等传统生产工艺较为顺利,但因壳体壁厚薄,收口时存在斜肩变形区和待变形传力区易失稳、制件口部尺寸精度难以控制的问题。本研究拟采用数值模拟及试验方法确定该弹壳体的收口成形工艺,解决壳体失稳和壁厚尺寸精度问题,旨在为类似问题的解决提供参考。

1 弹壳体基本情况

弹壳体毛坯尺寸及二次收口后的实物图见图 1。

收稿日期:2022-10-26;**修改稿收到日期:**2022-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51871075)

第一作者简介:王兴雷,男,1998 年出生,硕士研究生,太原(030051),E-mail:986253843@qq.com

通信作者:冯再新,男,1968 年出生,教授,太原(030051),E-mail:fengzaixin@nuc.edu.cn

引用格式:王兴雷,冯再新,姚宇康,等. 某 H70 合金弹壳体收口成形工艺数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):595-598.

WANG X L, FENG Z X, YAO Y K, et al. Numerical simulation of necking process of a H70 alloy shell body[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):595-598.

[28] 夏雅童.压铸 AE44 和 AM60 合金的微观组织、缺陷和力学性能[D]. 重庆:重庆大学, 2021.

[29] WANG C, LAVERNIA E J, WU G, et al. Influence of pressure and temperature on microstructure and mechanical behavior of squeeze cast Mg-10Gd-3Y-0.5Zr alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2016, A47(8): 4 104-4 115.

[30] 谭唯. Al-10Si-0.3Mg 压铸薄壁试样微观组织和缺陷表征及其对塑

性的影响[D]. 重庆:重庆大学, 2019.

[31] 胡泊,熊守美,村上正幸,等. AM50 镁合金真空压铸件孔洞分布与力学性能的关系[J]. 铸造, 2009, 58(11): 1 115-1 122.

[32] 王程程. 铝合金真空压铸气致缺陷及力学性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2020.

(编辑:张正贺)

冷成形可以提高产品组织致密度及其性能^[2],产品选用 H70 合金,其成分见表 1,通过冷成形方法完成,收口所用毛坯是由棒状坯料经过反挤压-变薄引伸-整形等工序制得,结构见图 1b。

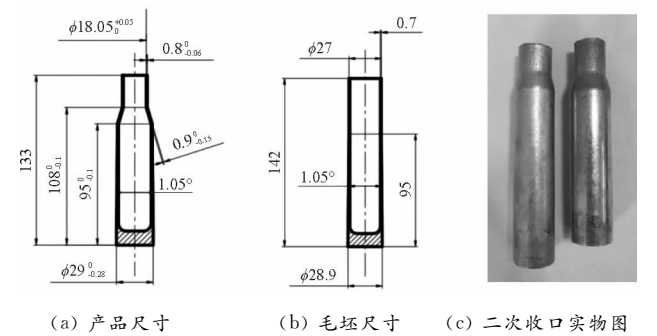


图 1 弹壳体毛坯尺寸图及二次收口后的实物图

Fig.1 Dimension diagram of product and blank as well as entity after the second necking

表 1 H70 合金的主要化学成分

Tab.1 Main chemical composition of H70 alloy %						
w_B						
Zn	Pb	Ni	Fe	Sb	Bi	其他
28.5~31.5	≤0.03	≤0.5	≤0.1	≤0.002	≤0.002	≤0.3
						Cu 余量

该弹壳体壁厚薄、尺寸精度高,口部壁厚为 0.74~0.80 mm,壁厚公差小于 0.06 mm;斜肩部壁厚为 0.75~0.90 mm,壁厚公差小于 0.15 mm。经传统两次收口成形所得制件见图 1c,左侧为第 1 次缩口成形制件,待变形传力区产生“凹坑”失稳变形;右侧为第 2 次缩口成形制件,斜肩变形区产生“鼓圈”失稳变形。此外,所得制件口部壁厚增厚现象严重,实测口部壁厚为 0.9 mm,不符合产品尺寸要求。

2 收口成形过程分析

图 2 为典型的收口方法及应力应变简图。其中, σ_2 远小于 σ_1 和 σ_3 ,可忽略。从收口过程来看,可将收口毛坯件分成待变形传力区、缩径变形区及变形完成区 3 个部分^[3]。在弹壳毛坯收口过程中,由于轴向载荷 F 的作用,管壁逐渐进入凹模锥孔,此时薄壁毛坯在凹模圆

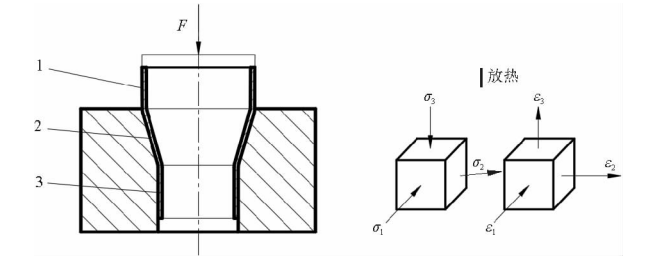


图 2 收口成形过程及应力应变状态示意图

Fig.2 Schematic diagram of necking forming process and stress deformation state

1.待变形传力区 2.缩径变形区 3.变形完成区

角过渡部分会产生少量的弯曲和切向的压缩变形^[4]。

在待变形区进入缩径变形区后,毛坯在轴向载荷的作用下会紧贴凹模锥形部分,并向下沿凹模出口方向流动。随缩径量增加,毛坯件应变硬化现象逐渐严重,收口成形力急剧增加^[4],由于切向压应力 σ_1 的作用,斜肩变形区易失稳起皱,待变形传力区需承受凸模全部载荷,也易产生失稳变形。当所受应力达到各自变形抗力极限时,则产生屈服,影响成形。毛坯进行缩径变形时,切向 ϵ_1 产生更大的压缩变形,在高度和壁厚方向上表现为略微增大^[5]。毛坯在凹模斜肩出口处所受切向压应力最大,壁厚达到最大,壁厚的增加程度会严重影响产品成形品质。因此,防止弹壳毛坯发生失稳、控制产品尺寸精度是收口工艺的主要问题。

3 成形模拟与试验结果分析

图 1c 是经收口系数分别为 $K_1=0.826, K_2=0.881$ 的两次传统收口工艺制得,两次收口后口部外直径分别为 22.3 及 19.65 mm,口部壁厚分别为 0.8 及 0.9 mm。并测得待变形传力区“凹坑”两侧直径差为 0.3 mm,斜肩高度为 11.8 mm,严重偏离产品尺寸要求。待变形传力区产生的凹痕可能影响枪弹在枪膛中的定位以及弹壳体的强度,必须加以解决。分析发现,产生不同形态失稳的主要原因是:根据传统收口理论,所选用的收口系数对于该材料、规格的弹壳体而言偏小,使得每次缩口工艺超过了许用变形程度,在挤压过程中,导致毛坯失去了保持轴向平衡的能力。分析可知,在二次缩口成形中,当毛坯口部接触到凹模斜肩并开始缩口变形时,毛坯的斜肩仍处于悬空状态,凹模斜面并不能给予支撑作用。随挤压力增加,则可能使得毛坯斜肩在压力作用下发生“鼓圈”变形,并使斜肩高度减小。为此,在传统收口理论的基础上,选择减小每次缩口变形量,即适当增大收口系数的方法进行数值模拟及试验。

3.1 3 次收口成形模拟与试验

对于本薄壁壳体收口成形已不符合传统收口工艺计算方法,现拟定 3 次收口工艺直径分别为 22.50、20.80 及 19.65 mm,其收口系数分别为 $K_1=0.833, K_2=0.924, K_3=0.945$,3 次收口成形主要减小了二次缩口的变形量。为保证弹壳毛坯在成形过程中,凹模斜肩出口处不会产生新的成形点,满足产品成形品质要求,需使得凹模斜肩长度与产品斜肩长度基本一致,即保证变形区面积最小,还可减少斜面对毛坯的摩擦。

采用 DEFORM-3D 软件进行数值模拟计算,以四面体单元划分网格,最小元素尺寸约为 1.46 mm,设置凸模挤压速度为 1 mm/s,摩擦因数恒定为 0.12^[6]。

H70 材料选用塑性模型,变形屈服函数类型为 Mises 屈服函数,摩擦类型选择剪切摩擦^[7]。为降低成本和试验简单便行,收口模具选用分段式^[8],模具结构及成形等效应力云图见图 3。可以看出,模拟成形过程中弹壳毛坯没有产生失稳变形等问题。经查询 DEFORM-3D 后处理中等等效应力等高线分布情况得知,3 次收口成形斜肩变形区平均等效应力分别为 364、233 及 207 MPa,待变形传力区分别为 298、147 及 131 MPa。

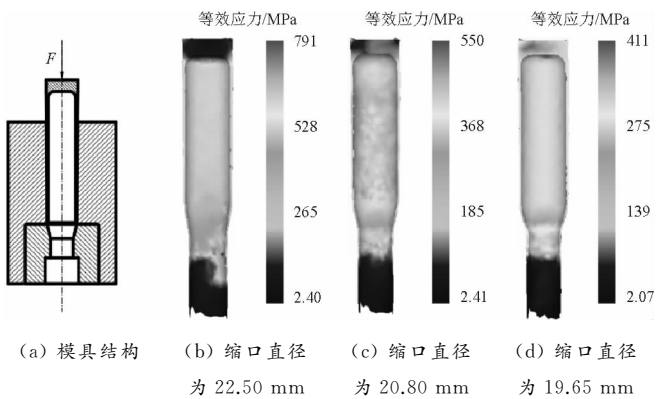


图 3 试验模具结构及 3 次收口成形等效应力云图
Fig.3 Die structure and equivalent stress nephogram of triple necking forming

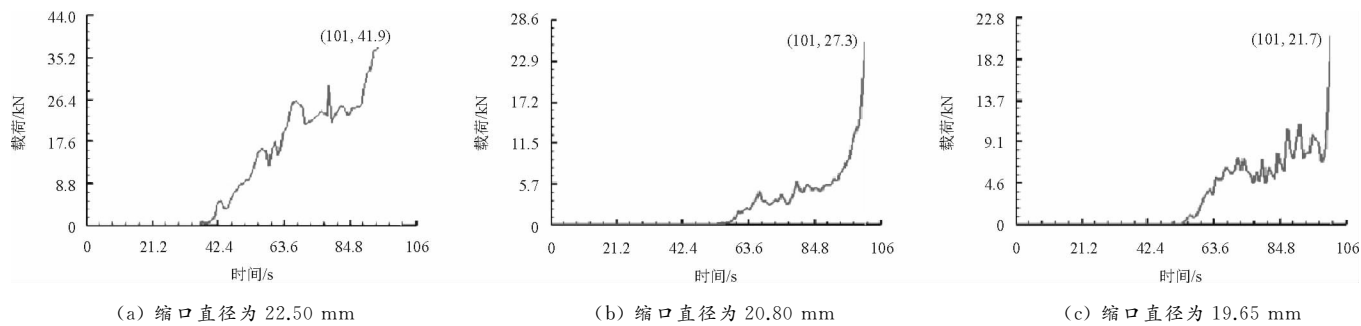


图 4 3 次收口成形凸模载荷随时间变化曲线
Fig.4 Variation curves of punch load for triple necking forming with time



图 5 3 次收口成形方案试验结果
Fig.5 Results of triple necking forming scheme

3.2 4 次收口成形模拟与试验

对比传统 2 次收口成形和 3 次收口工艺,发现收口次数的增加不仅解决了弹壳毛坯成形失稳问题,而且减

图 4 是在凸模挤压速度为 1 mm/s,摩擦因数恒为 0.12 的挤压参数下得到的凸模载荷随时间变化曲线。由图 4 可知,3 次成形凸模挤压载荷分别为 41.9、27.3 及 21.7 kN。缩口直径的减小可明显降低毛坯斜肩变形区和待变形传力区所受等效应力及凸模挤压载荷。由弹壳收口成形过程可知,等效应力的减小可最大程度降低斜肩变形区和待变形传力区产生不同形态失稳变形的可能性,提高壳体的成形品质。

图 5 为在以猪油、二硫化钼和机油按 1 : 1 : 8 混合熬制而成润滑剂的润滑条件下,挤压速度为 1 mm/s,进行 3 次收口成形所得试验结果。可以看出,3 次收口成形较传统理论两次收口成形所得制件成形品质有明显改善,斜肩变形区和待变形传力区已无成形失稳等问题。经测量,斜肩高度为 13.0 mm,斜肩高度符合产品尺寸要求,但首次、中间次及末次收口成形毛坯口部壁厚分别为 0.78、0.80 及 0.84 mm。首次缩口成形口部壁厚较毛坯原件壁厚增加了 11.4%,壁厚增加较大,使毛坯在后序缩口成形中,口部壁厚没有可允许的增厚余量。由此可见,毛坯件经 3 次收口成形工艺虽解决了斜肩变形区和待变形传力区成形失稳问题,但成形件口部壁厚已超出产品尺寸要求。

小了毛坯口部壁厚的增加程度,为使口部壁厚满足产品尺寸精度要求,现拟设采用 4 次收口成形工艺进行试验。由于 3 次收口成形工艺中第 2、第 3 次收口系数已足够大,因此对于 4 次收口成形工艺,只需减小第 1 次缩口变形量即可。拟设 4 次收口模具直径分别为 24.50、22.50、20.80 和 19.65 mm,收口系数分别为 0.907、0.918、0.924 和 0.945。

图 6 为 4 次收口成形时弹壳毛坯等效应力云图。可以看出,毛坯所受等效应力较 3 次收口要小且分布均匀。4 次收口斜肩变形区所受等效应力分别为 282、251、238 和 213 MPa,传力区分别为 205、168、151 及 134 MPa。

图 7 为凸模载荷随时间变化曲线。可以看出,4 次

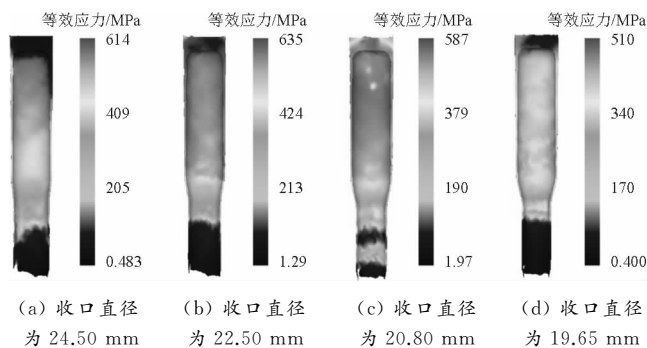


图 6 4 次收口成形方案等效应力云图

Fig.6 Equivalent stress nephogram of quarticnecking forming scheme

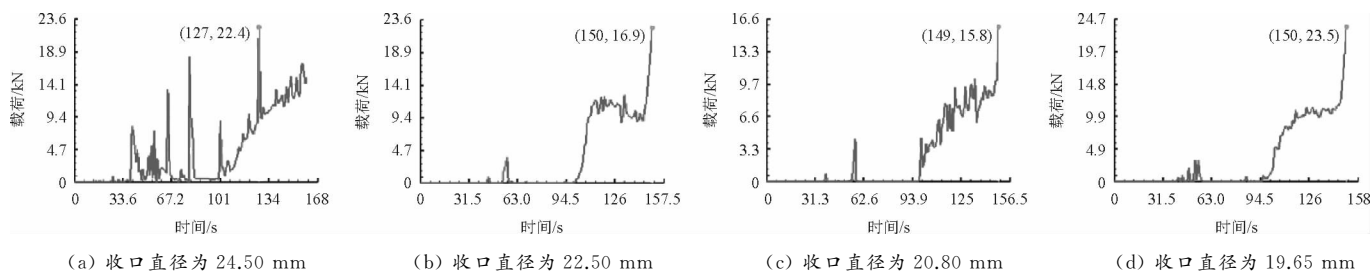


图 7 4 次收口成形凸模载荷随时间变化曲线

Fig.7 Variation curves of punch load for quarticnecking forming with time



图 8 4 次收口成形方案试验结果

Fig.8 Results of quarticnecking forming scheme

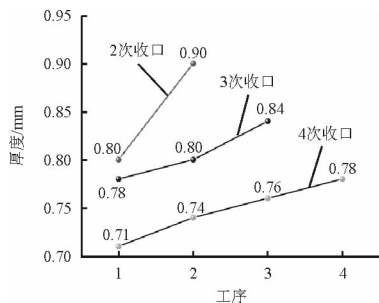


图 9 收口工序与口部壁厚变化

Fig.9 Variation of necking process and riser wall thickness

4 结 论

(1)弹壳体毛坯收口成形时,待变形传力区要先于斜肩变形区发生失稳变形,结合 3 次收口成形等效应力云图,得出壳体工艺最简且不发生失稳的变形条件为,斜肩变形区许用平均等效应力为 364 MPa,待变形传力区为 298 MPa。

收口成形最大挤压力分别为 22.4、16.9、15.8 和 23.5 kN,末次收口成形中凸模有更多载荷用于斜肩角度的弯曲成形,以形成产品的最终尺寸。

图 8 为 4 次收口成形弹壳毛坯。可以看出,弹壳毛坯在收口成形中无失稳问题。经测量,斜肩高度为 13.0 mm,4 次成形口部壁厚分别为 0.71、0.74、0.76 和 0.78 mm,壳体高度分别为 142.9、143.6、144.1 和 144.4 mm,满足产品尺寸精度要求。

图 9 为口部壁厚变化与收口工序次数的关系。可以看出,传统 2 次收口工艺口部壁厚增幅最大,3 次收口次之,4 次收口工艺最小。

(2)首次缩口变形量由 4.5 mm 变为 2.5 mm 可极大降低首次缩口制件口部壁厚的增加,并为多次收口成形留有增厚余量,因此可通过减小每次缩径变形量的方法控制壁厚尺寸精度。

(3)弹壳体可经收口系数均大于 0.9 的 4 次收口工艺进行制备,最大壁厚增加幅度小于 4.3%,斜肩变形区平均等效应力应小于 282 MPa。所得制件口部和底部均留有切削余量,满足后期机加尺寸要求。

参 考 文 献

- [1] MAGRINHO J P, SILVA M B, CENTENO G, et al. On the determination of forming limits in thin-walled tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 155: 381-391.
- [2] 张小光,钟志平,边翊,等. 弹壳类零件冷挤压复合成形工艺研究[J]. 锻压技术, 2002, 27(3): 1-3.
- [3] 卢险峰,褚亮. 弹壳形状零件缩口力描述模型研究[J]. 塑性工程学报, 2004, 11(6): 43-46.
- [4] 夏巨湛,王英,胡国安,等. 薄壁管缩径挤压工艺的模拟分析与应用[J]. 石油机械, 1997, 25(3): 18-21.
- [5] 褚亮. 锥形凹模缩口工艺试验及理论研究[D]. 南昌:南昌大学, 2005.
- [6] 姚宇康,冯再新,郭小森,等. 某薄壁壳体精密成形工艺数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(5): 627-630.
- [7] CHEN Q, HU H, LIN J, et al. Multi-stage cold forging process for H68 brass cylindrical shell part with deep blind hole: simulation and experiment[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9-12): 3 789-3 798.
- [8] 金龙建,陈炎嗣. 气瓶缩口模具设计与制造[J]. 模具制造, 2016, 16(12): 29-32.

(编辑:刘晨辉)