

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.02.016

基于响应面法的蓄能器壳体工艺优化

宋志远, 刘淑梅, 莫壮壮, 赵毅

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘要:为消除蓄能器壳体在冷挤压过程中的表面皱纹,提高表面质量,降低零件的成型载荷,课题组对原有的工艺方案进行改进,提出了一种新的成型工艺方案。方案的第1道工序为反挤压制胚;第2道冷挤压工序改为温挤压工序进行减径成型,以提高金属在成型过程中的流动性。采用响应面优化法对第2道温挤压工序进行实验分析,并找到最佳的工艺参数,即坯料加热温度为792℃、模具预热温度为292℃、液压机下压速度为18 mm/s。结合DEFORM数值模拟的结果,进行实际的工艺验证,获得了合格的零件,为同类型零件提供参考,对实际生产实践具有一定的参考意义。

关键词:金属成型工艺;温挤压;响应面法;DEFORM软件

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2020)02-0090-05

Process Optimization of Accumulator Housing Based on Response Surface Method

SONG Zhiyuan, LIU Shumei, MO Zhuangzhuang, ZHAO Yi

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to eliminate the surface wrinkles of the accumulator shell during cold extrusion, improve the surface quality and reduce the forming load of the part, a new forming process plan was proposed by improving the original process. The first procedure was the reverse extrusion of the embryo, the second procedure of the cold extrusion process was changed to the warm extrusion process for reducing the diameter to improve the fluidity of the metal during the forming process. The response surface optimization method was used to analyze the second warm extrusion process, and the optimal process parameters were found, that is, the billet heating temperature is 792℃, the mold preheating temperature is 292℃, and the hydraulic press down speed is 18 mm/s. Combined with the results of DEFORM numerical simulation, the actual process verification was carried out, and qualified parts were obtained, which provides a reference for the same type of parts and has certain reference significance for the actual production practice.

Keywords: metal forming process; warm extrusion process; response surface method; DEFORM

蓄能器是液压气动系统中的一种能量储蓄装置,蓄能器壳体作为蓄能器保护装置,承受较大的压力。但在蓄能器壳体冷挤压工艺中,蓄能器壳体端部存在填充不满以及表面质量较差等缺陷。究其原因,是由于壳体在冷挤压过程中凹模入模角度与凸模的下压速度不合理,导致金属在冷挤压成型过程中流动不均匀,严重影响了壳体表面质量。该蓄能壳体采用冷挤压与温挤压结合的方式,第1步为反挤压制胚工艺,第2步为正挤压减径工艺。

温挤压成型是一种精进成型工艺方法,较之于冷挤压,温挤压降低了单位成型压力,延长了模具寿命,提高了金属的流动性。目前,国内外学者已经对各种类型的蓄能器壳体的成型工艺及应力应变做了大量研究。牛亚平等^[3]对囊式蓄能壳体进行静力强度可靠性分析并将蓄能壳体的失效率降低到 10^{-10} 。仇丹丹等^[4]针对汽车蓄能器壳体冷挤压工艺进行工艺参数优化。王星星等^[6]对动压衬套冷挤压工艺进行了设计及优化。课题组采用响应面分析法和数值模拟相结

收稿日期:2019-07-31;修回日期:2019-11-04

第一作者简介:宋志远(1994),男,山东曲阜人,硕士研究生,主要研究方向为金属锻造挤压成型。通信作者:刘淑梅(1968),女,上海人,硕士,副教授,主要研究方向为模具CAD/CAE/CAM。E-mail:18852146831@163.com

合的方法来提高蓄能器的成型质量,并以降低成型载荷、提高表面质量为目标,对蓄能壳体挤压工艺参数进行优化设计;通过响应面模型和非线性拟合对模拟结果进行分析,得到了最佳的工艺参数。

1 零件结构及成型工艺设计

蓄能器材料选用的 35 号钢是一种中碳钢,具有良好的韧性和塑性,锻造、焊接和冷冲压性能良好,冷变形塑性高。其力学性能:抗拉强度 ≥ 530 MPa,屈服强度 ≥ 315 MPa,断面收缩率 $\psi \geq 45\%$ 。采用 UG 三维软件进行建模,蓄能壳体模型及几何尺寸参数如图 1 所示。

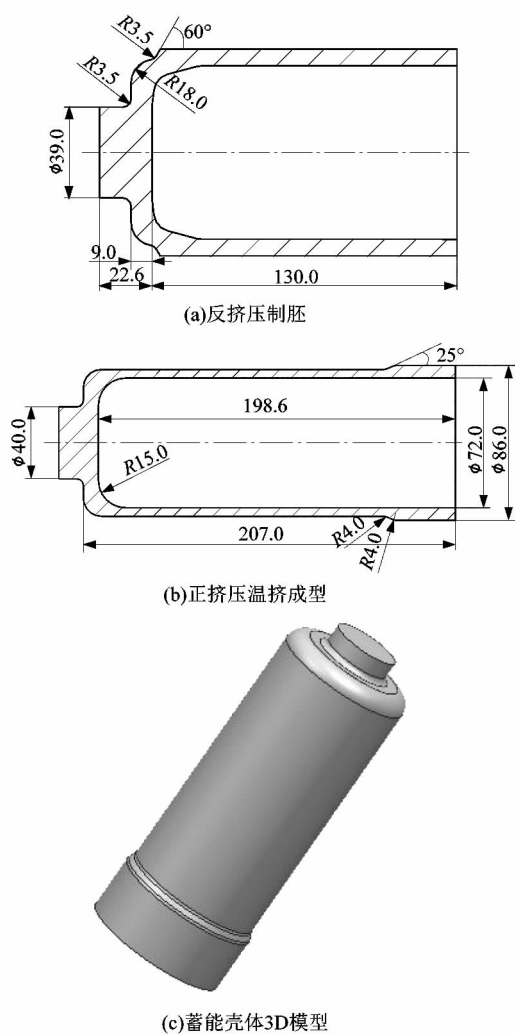


图 1 蓄能器零件尺寸和 3D 模型

Figure 1 Accumulator part size and 3D model

该蓄能器壳体外形尺寸居中,成型精度较高、结构紧凑复杂、壳体结构变化较多。根据零件的外形特点及挤压成型工艺特性,考虑了 3 种成型方案。

方案 I:一次复合挤压成型;

方案 II:复合挤压-正挤压成型-车削加工;

方案 III:冷挤压反挤制胚-温挤压正挤成型。

其中方案 I 在理论上是可行的,但经 DEFORM 模拟之后,由于其变形量过大,金属流动极度不均匀,导致单位挤压力过大而破坏模具,对模具的强度刚度要求更高,所以方案 I 不满足实际生产的要求。方案 II 中切削加工工艺虽然保证了零件的尺寸精度,但是破坏了金属流线的连续性,严重影响了蓄能器壳体的力学性能。图 1(a)和图 1(b)为方案 III 的反挤压与正挤压的设计图,其中在零件中产生的皱纹是由于在反挤压过程中,凹模用于外凸缘成型的上下圆角以及凸模的下压速度过大,使得在正挤压过程中的表面磨损过大,金属流动不均匀导致。

2 有限元模型及响应面模型的建立

2.1 有限元模型的建立

使用三维建模软件进行模具结构的设计可以缩短研发周期,节约企业成本。课题组在 UG 中建立 3D 模型,转化成 STL 格式后导入 DEFORM 软件中进行有限元模拟。在冷挤压成型的过程中,金属的变形包括塑性和弹性变形。由于弹性变形量远远小于塑性变形量,所以在 DEFORM 中使用刚塑性有限元模型进行模拟,简化模型复杂度以减少计算量。

2.2 设计变量筛选

本次研究采用响应面法和 DEFORM 软件数值模拟相结合的方法,消除由于金属流动不均匀产生的皱纹,确定工艺参数的最佳方案。其中,模具材料设置为刚性体,选用剪切摩擦类型,反挤压工序摩擦因数设置为 0.12,正挤压工序摩擦因数为 0.25,热传导系数设置为 0.000 3,并选用 Archard 磨损模型^[10]。

蓄能壳体在生产过程中,成型温度是温挤压成功的重要因素,选择材料塑性好、变形阻力低的温度范围对于获得好的成型质量至关重要。根据 35 号钢的材料性能与设备能力,初定蓄能壳体温挤压的温度为 800 ℃ 左右;合理模具温度能够延长模具寿命,并能减小与坯料的温度差防止温度应力的产生;液压机的下压速度对成型质量有很大的影响,挤压速度与金属流动的速度相关性很大,当挤压速度过大时,可以获得较高的金属流速;高流速使得摩擦因数降低,金属的惯性增加,并且高流速使热效应突出,快速成型使得金属温度流失减小,更有利于保持金属的塑形。故文中选取的设计变量为坯料温度 A、模具预热温度 B 及液压机下压速度 C,优化目标为最终成型载荷 R_1 ,设计变量因素水平数如表 1 所示。

表1 温挤压水平因素表

Table 1 Warm extrusion level factor table

水平	因素		
	坯料温度	模具预热温度	液压机下压速度
	A/℃	B/℃	C/(mm·s ⁻¹)
1	750	200	15
2	850	300	25

根据试模经验,当坯料温度为750℃、模具预热温度为300℃时,液压机下压速度为20 mm/s时,温挤压成型载荷为106 kN。

响应面分析法通常有响应面中心组合设计法(central composite design, CCD)和Box Behnken(BBD)2种实验设计方法。其中BBD响应面法适合于因素不超过3个,水平较少的实验设计情况;CCD响应面法适合多因素多水平的情况并且有连续变量存在的情况。故课题组采用CCD响应面法设计3因素2水平的实验,将实验参数范围输入Design-Expert软件,生成CCD响应面实验表。实验方案及其对应的响应目标如表2所示。

表2 实验方案及其响应目标

Table 2 Test program and response target

序号	因素			响应目标 R_1/kN
	坯料温度	模具预热	液压机下压速度	
	A/℃	温度 B/℃	C/(mm·s ⁻¹)	
1	800	250	20.0	100.0
2	800	334	20.0	111.0
3	750	300	15.0	97.8
4	800	250	20.0	99.6
5	850	300	25.0	99.2
6	850	300	15.0	103.0
7	800	166	20.0	106.0
8	716	250	20.0	118.0
9	750	200	25.0	119.0
10	800	250	11.6	107.0
11	850	200	25.0	101.0
12	800	250	20.0	104.0
13	884	250	20.0	98.4
14	850	200	15.0	98.8
15	750	300	25.0	108.0
16	800	250	28.4	102.0
17	800	250	20.0	105.0
18	750	200	15.0	109.0

3 响应面模型的拟合与分析

3.1 响应面模型的拟合

基于表2所示的模拟响应结果,采用线性回归的方法建立温挤压成型载荷与工艺参数坯料温度、模具

预热温度及液压机下压速度之间的回归模型:

$$R_1 = 101.65 - 4.93 \times A + 0.13 \times B + 2.49 \times C + 1.43 \times AB - 2.82 \times AC - 2.37 \times BC + 1.91 \times A^2 + 2.37 \times B^2 - 1.46C^2。$$

图2所示为响应模型的线性预测结果和真实值离散点离散对比图。根据响应模型对响应目标 R_1 的拟合程度,可用真实值离散点与预测值之间的拟合程度来判断。由图2可知,预测值与模拟值大致一致,由此证明,该回归模型的准确度较高。

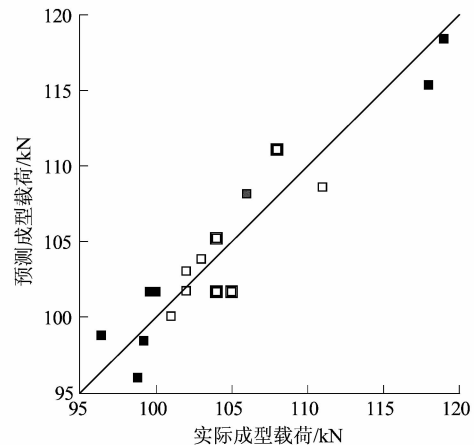


图2 成型载荷目标预测值和模拟值的拟合曲线

Figure 2 Fitting curve of predicted load value and simulated value of forming load target

3.2 响应曲面分析

为了更加直观地表示各因素与响应目标之间的关系,利用三维曲面图进一步分析各因素对温挤压成型载荷的影响,同时利用方差分析法验证模型的精度和显著性。

图3所示为成型载荷与设计变量之间的关系。由图3(a)可知,当下压速度为定值时,随着初始坯料温度的升高温挤压成型载荷在逐渐下降;当初始坯料温度达到850℃时,成型载荷最低约为102 kN。由图3(b)可知,当坯料初始温度为定值,随模具预热温度的升高,成型载荷先降低后升高;随液压机下压速度升高,成型载荷总体呈现上升的趋势,在成型过程中略有起伏。当模具预热温度为300℃,液压机下压的速度区中偏高值时,成型载荷最低。

表3所示为成型载荷的方差分析,该模型的 P 值为0.005 3,模型的校正系数为 $R_0^2=0.866 8$,即表明对于模具磨损深度的实验采用该回归模型可以对其中的86.68%的实验响应值进行解释,只有13.32%的响应值不能用该回归模型进行解释。模型的相关系数 R^2

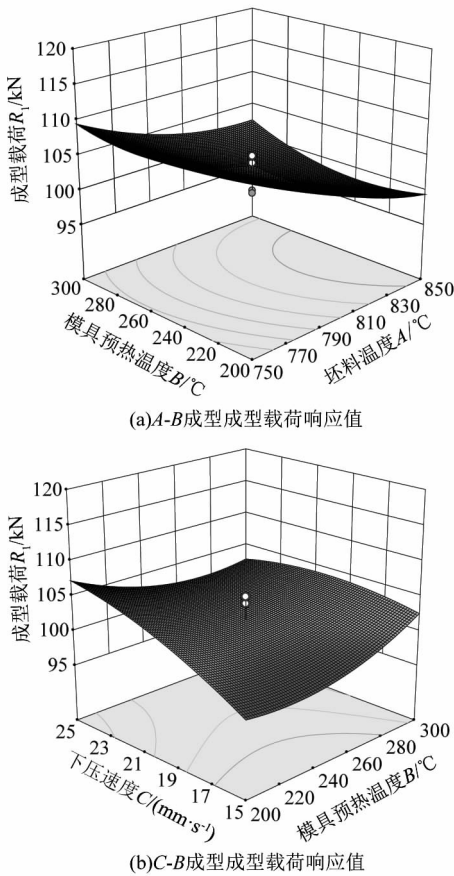


图3 温挤压成型载荷 R_1 的响应面
Figure 3 Response surface of warm extrusion forming load R_1

为 89.02% ,进一步验证了真实值与模拟值之间拟合程度良好、误差较小。模型的残差为 9.2,模型信噪比 $r=9.926>4$,说明模型分辨能力足够。

表3 成型载荷的方差分析

方差来源	偏差平方和	方差	F 值	P 值
模型	596.81	66.31	7.210	0.005 3
A-A	331.82	331.82	36.080	0.000 3
B-B	0.24	0.24	0.026	0.004 5
C-C	55.29	55.29	6.010	0.039 8
AB	16.25	16.25	1.770	0.220 5
AC	63.84	63.84	6.940	
BC	45.12	45.12	4.910	
A ²	47.50	47.50	5.160	
B ²	73.10	73.10	7.950	
C ²	17.37	17.37	1.890	

基于响应面的优化结果对得出的设计参数进行非线性优化,找出最佳的工艺参数组合。对于优化设计

参数目标分别为坯料加热温度 A、模具预热温度 B、液压机下压速度 C。表 4 所示为响应面优化水平值,对应的最优设计变量的组合如表 5 所示。

表4 非线性算法优化条件

	坯料温度 A/°C	模具预热 温度 B/°C	液压机下压速度 C/(mm·s ⁻¹)	温挤压成型 载荷/kN
上限	850	300	25	119.0
下限	750	200	15	97.8

表5 最优设计变量取值

坯料温度 A/°C	模具预热温度 B/°C	液压机下压速度 C/(mm·s ⁻¹)	温挤压成 型载荷/kN
792	292	18	96.5

4 优化后的数值模拟结果分析

图 4 所示为由响应面作为最佳参数进行模拟所得到的成型载荷曲线。由图可知,将第 2 道工序由冷挤压改为温挤压,工件的成型载荷降低约 9.4% ,金属的流动性增加。经过优化过后,在温挤压成型过程中的载荷保持相对的平稳,说明金属流动速度均匀,填充情况良好,由此保证了蓄能壳体的表面质量。

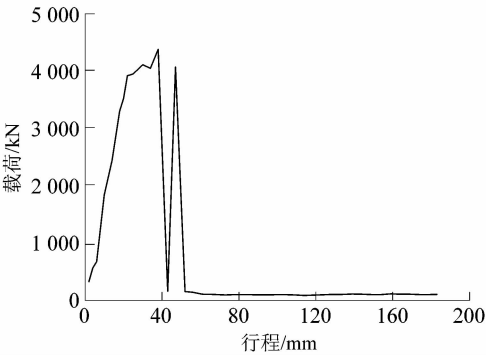


图4 优化后成型载荷
Figure 4 Optimized forming load diagram

5 工艺实验验证

为了验证平衡轴优化结果的准确性,对优化设计实验得出的最优结果进行实验验证,将高 57 mm,直径 83 mm 的坯料在 500 T 液压机上进行验证。图 5(a)所示为在工艺改进之前的结果,头部尾部由于流动不均匀的产生表面缺陷,严重影响蓄能器壳体的力学性能。图 5(b)为改进工艺并进行优化之后的结果,由图可知,由于第 2 步工序采用了温挤压减径,减小成型的变形抗力,提高了金属的流动性。头部产生的折叠凹痕消失,尾部皱纹减少,提高了成型的质量。

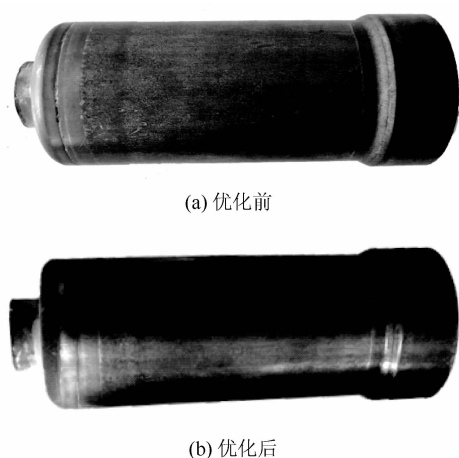


图5 工艺优化前后工件
Figure 5 Workpiece before and after
process optimization

6 结语

课题组对原有的工艺方案进行改进,将原工艺冷挤压减径改为温挤压减径,并针对新工艺方案设计了响应面优化实验,结合实际的工艺条件,选取了坯料加热温度、模具预热温度以及液压机下压速度作为优化变量,最终成型载荷作为响应目标 R_1 ,结合 DEFORM 进行数值模拟。得到了各个变量因素共同作用的响应模型,通过对该响应面分析,找到了最优的参数组合,即坯料加热温度为 792 ℃、模具预热温度为 292 ℃、液压机下压速度为 18 mm/s。再次运用 DEFORM 数值模拟软件对响应面模型得出的最佳参数组合进行模拟验证,结果表明优化后的载荷比优化前降低了 9.4%。

将响应面法所得到的最优参数应用于实际生产验证,使用的设备为 500 T 液压机。最终获得了合格零件,并且成型载荷大大减小,达到了期望的目标,对实际的同类型零件有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 李跃,张京. 基于响应面法的校床冷挤压过程数值模拟分析[J/OL]. 锻压装备与制造技术, 2019(3): 115-120 [2019-07-30]. <https://doi.org/10.16316/j.issn.1672-0121>. 2019.03.29.
- [2] 王瑞瑞,原霞,杨锋,等. 基于响应曲面法的连杆衬套温挤压工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2018, 47(23): 161-164.
- [3] 牛亚平,王小华,陈冰冰,等. 囊式蓄能器壳体静力强度可靠性分析[J]. 轻工机械, 2013, 31(6): 83-86.
- [4] 仇丹丹,龚红英,李会肖,等. 汽车过滤器壳体零件冷挤压成型方案研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(19): 134-136.
- [5] 苏晓斌,龚红英,李会肖,等. 汽车蓄能器壳体件挤压成型工艺研究[J]. 锻压技术, 2013, 38(2): 77-80.
- [6] 王星星,刘淑梅,陈凯,等. 动压衬套冷挤压工艺设计及优化[J]. 热加工工艺, 2016, 45(3): 167-170.
- [7] FARHOUMAND A, EBRHIMI R. Analysis of forward-backward-radial extrusion process[J]. Mater and Design, 2009, 30(6): 2152.
- [8] 田娇,徐新成,杨向东,等. 基于 Deform 的石油钻杆接头温挤压成型工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2015, 44(19): 164-168.
- [9] 周艳霞,洪峰. 基于 DEFORM 的温挤压凹模结构优化[J]. 制造技术与机床, 2018(11): 44-46.
- [10] 洪慎章,李名尧. 锻造实用数据速查手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 9-34.
- [11] 刘雅辉,刘淑梅,廖世绍,等. 过滤器冷挤压模具设计及数值模拟[J]. 精密成型工程, 2015, 7(1): 42-45.
- [12] 杨华龙. 连杆衬套温挤压预成型技术及数值模拟研究[D]. 中北大学, 2017: 21-33.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

西门子员工踊跃捐款支持抗击新型冠状病毒疫情

西门子在华企业 6 200 余名员工积极响应公司号召,累计捐款 220 万元人民币用于支持中国抗击新型冠状病毒疫情。此前,西门子中国和西门子医疗中国已于 2 月 3 日宣布共同向武汉当地医院定向捐赠价值 1 500 万元的医疗设备。

参与此次捐款的员工来自西门子中国各业务集团的近 50 家运营公司及西门子医疗在华企业。员工们以极大的热情参与捐赠,为抗击疫情、挽救生命贡献一己之力。本次员工们的捐赠及此前公司的捐赠将全部用于购买当地医院急需的 CT、移动 DR、超声和血气诊断等西门子医疗设备,并将通过武汉市青少年发展基金会定向捐赠给相关医院。

“在此关键时刻,西门子员工的爱心捐赠已经远远超越了金钱的价值,它承载着西门子人共同的信念:心系社会、勇担责任。”西门子大中华区总裁兼首席执行官赫尔曼(Lothar Herrmann)表示,“我们的员工齐心协力,再次表明西门子是中国长期可信赖的合作伙伴。”

此次疫情爆发后,西门子及其员工迅速响应,持续为中国抗击疫情提供全力支持。

(张 争)