

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.05.015

基于响应面法的单座阀阀杆预锻工艺优化

张静, 郭竞宇, 梁颖, 查心怡, 刘怀福, 张学奇, 董万鹏

(上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620)

摘要:为解决单座阀阀杆实际锻造生产中预锻坯料摆放定位不准的问题,课题组提出了开设等效阻力墙的模具优化方案。基于响应面法对坯料初始温度、飞边厚度及等效阻力墙高度3个参数进行了优化设计,分析了各参数分别对最大模具应力和模具磨损深度的影响规律,确定了最佳参数组合为:初始坯料温度1 150 ℃,飞边厚度6 mm,等效阻力墙高度2.45 mm,对应的模具磨损深度的期望值为 5.67×10^{-5} mm,模拟验证值为 6.24×10^{-5} mm,优化目标相比优化前均有明显改善。课题组通过试验验证了优化结果的可靠性。

关键词:模具;单座阀阀杆;模具磨损深度;响应面法

中图分类号: TG315.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2017)05-0065-05

Optimization of Single Seat Valve Stem Pre Forging Process Based on Response Surface Method

ZHANG Jing, GUO Jingyu, LIANG Ying, ZHA Xinyi, LIU Huaifu, ZHANG Xueqi, DONG Wanpeng

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

Abstract: In order to solve the single seat valve stem actual forging production of pre forging billet arrangement positioning problem, a die optimization scheme of setup an equivalent resistance wall was proposed. The response surface method to optimize the design of the initial temperature of billet, edge thickness and equivalent resistance wall height of three parameters based on the analysis of the parameters of the maximum die stress and wear depth, the optimum combination of parameters: the initial billet temperature 1 150 ℃, the edge thickness of 6 mm, the equivalent resistance wall height of 2.45 mm, the depth of die wear corresponding to the expected value 5.67×10^{-5} mm, simulation value 6.24×10^{-5} mm, the optimization goal was significantly improved. Finally, the reliability of the optimization results is verified by experiments.

Keywords: mould; single seat valve stem; die wear depth; response surface method

食品工业从20世纪50年代开始发展经历了约60年时间,至今已成为初具规模、体制较为完善的机械制造类行业。国内食品机械行业的起步点不高,但近年来发展迅速使得机械行业的产值得到了大幅度的提高^[1]。食品机械制造工业的飞速发展在很大程度上推动了锻造行业的发展,使得锻造业的竞争日趋激烈,提高锻件品质,提高生产效率和降低生产成本成为如今锻造业发展的主流方向。为提高产业效益,降低锻造能耗和减少生产污染,生产对产品的高质和轻量

化提出了迫切要求^[2]。使用模锻生产具有效率高、锻件内部组织良好和尺寸精度高等优势,而模锻的弊端也较为明显,若模锻工艺设计不合理则可能引起模具载荷过大,模具磨损加剧甚至断裂失效,从而导致模具报废的不良后果^[3]。所以模锻工艺的设计成为整个生产过程中关键的环节之一。

1 模具优化方案提出

单座阀阀杆是一种应用于中型食品机械的阀类锻件产品,锻件如图1所示。其材质为316L奥氏体不锈

收稿日期:2017-01-27;修回日期:2017-04-12

基金项目:上海工程技术大学本科生科研创新项目(Cz1605005)。

第一作者简介:张静(1997),女,山东济宁人,学士,主要研究方向为模具CAD/CAM。通信作者:董万鹏(1976),男,上海人,工学博士,高级工程师,主要研究方向为材料成型技术。E-mail: dong@sues.edu.cn

钢,具有较大的变形抗力^[4]。其主要锻造工艺流程为:热挤制坯、预锻和终锻。文献[5]分析了单座阀阀杆在不同预锻模具硬度下的模具磨损深度变化规律,提出由于锻件的材质和高筋薄壁的特殊外形特点导致了对应模具的磨损深度较高。预锻工序中由于制坯件的头部尺寸较大,将制坯件放入预锻模具上时,其头部与模具的法兰槽接触,而杆部底端则受重力作用向下倾斜,与模具的杆部型腔接触,而制坯件的大圆角部位在头、杆两点已定位的情况下,无法与模具的圆角部位形成有效的接触,在这种摆料条件下制坯件容易在预锻模具上发生沿着图2所示方向的转动或移动,无法精确定位。课题组提出在模具双法兰中间豁口处开设凹槽,即“等效阻力墙”,从而达到图2所示3点都形成接触的效果。

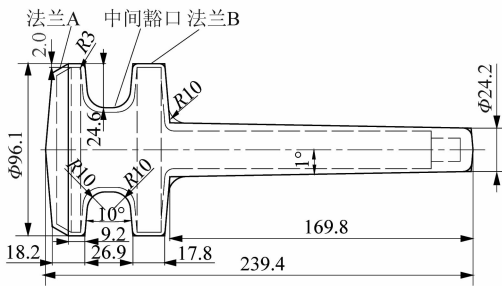


图1 锻件图
Figure 1 Forging

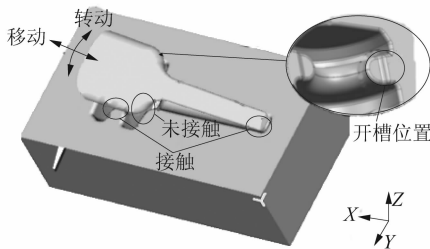


图2 预锻坯料定位图
Figure 2 Blank location of pre forging

2 优化变量与优化目标

在打击速度、模具和坯料初始温度、模具硬度、模具结构、润滑条件、飞边厚度以及坯料规格参数等影响因素中,由于生产成本和生产效率等因素的限制,实际生产都是采用比较稳定的模具硬度、打击速度和润滑条件;而在单座阀的热锻采用二火锻造,即热挤制坯后将制坯件再次加热到所需的预锻温度进行预锻和终锻,所以预锻初始温度可控制到较为准确的值;坯料规格直接影响了热挤制坯模具的更换,这会增加模具制

造成本。课题组最终选取的设计变量为:预锻坯料初始温度 T_1 ,飞边厚度 d 和等效阻力墙高度 h ,等效阻力墙的各主要参数如图3所示,表1所示为各参数取值范围^[6]。参考前文分析可知,模具磨损深度应作为优化目标。

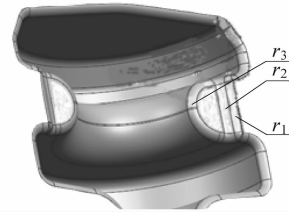


图3 等效阻力墙的各主要参数

Figure 3 Main parameters of equivalent resistance wall

表1 等效阻力墙设计参数

槽深 h /mm	圆角 $r_1 = r_2$ /mm	圆角 r_3 /mm
1.5 ~ 3.0	1.5 ~ 2.0	2.0

3 响应面设计

3.1 响应面试验设计

1951年,科研人员提出的响应面法 RSM 是数学方法和统计方法相结合的产物,用来对所感兴趣的响应受多个变量影响进行建模和分析,最终目的是优化该响应值^[7]。杨艳慧等^[8]基于响应面法进行了预锻成形多目标优化设计。课题组采用中心复合响应面设计方法(CCD)进行优化设计,各因素水平取值如表2所示。其中 α 为 CCD 响应面设计方法中轴向点的坐标值, $-\alpha$ 和 $+\alpha$ 分别表示因素取值的上限和下限。

表2 因素水平表

Table 2 Factors and levels table

水平	因素		
	A 初始温度 T_1 /°C	B 飞边厚度 d /mm	C 等效阻力墙 高度 h /mm
水平下限	900	4.5	1.5
水平上限	1 150	6.0	3.0
$-\alpha$	814.776	2.488 66	0.988 66
$+\alpha$	1 235.220	5.011 34	3.511 34

3.2 响应面预测模型

采用不完全二阶模型建立目标响应 f 关于设计变量的预测模型。对于3因素的情况,采用多项式表示的不完全二阶模型为

$$f = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \beta_6 X_3^2 + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3 \quad (1)$$

将采用最小二乘法得到的回归分析数据代入公式(1)中得到响应面函数

$$f = 2.30795 - 5.22512 \times 10^{-3} X_1 - 0.040807 X_2 + 0.36851 X_3 - 5.02638 \times 10^{-5} X_1 X_2 - 4.03842 \times 10^{-4} X_1 X_3 + 0.017377 X_2 X_3 + 4.08231 \times 10^{-6} X_1^2 + 7.25396 \times 10^{-3} X_2^2 - 0.011333 X_3^2 \quad (2)$$

式中: f 为响应目标; X_1, X_2, X_3 分别为 A, B, C 3因素变量; $\beta_1 \sim \beta_9$ 为回归参数。

图4所示为预锻模具首次磨损深度预测值与真实值的对比情况,由图可见,预测值与真实值极为接近,说明利用上述响应面模型能够准确的预测模具应力值和模具磨损深度值。

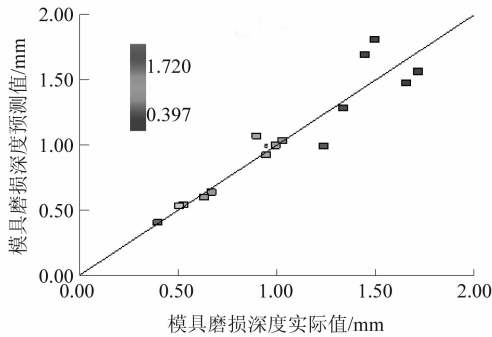


图4 响应预测值与实际值对比

Figure 4 Comparison between predicted and actual responses

3.3 结果分析

为进一步验证响应面模型能够正确反映响应面与设计因素间的统计规律,对公式(2)进行方差分析,对模型中的平方项、线性项和交叉项等进行显著性分析。各试验方案及其模拟结果如表3所示。

表3 各试验方案及其模拟结果

Table 3 Test plans and simulation results

试验号	因素 A/°C	因素 B/mm	因素 C/mm	响应值/ μm
1	1 025.00	5.25	3.51	8.99
2	1 025.00	3.99	2.25	10.30
3	900.00	4.50	1.50	15.10
4	900.00	6.00	1.50	14.50
5	900.00	6.00	3.00	13.40
6	1 025.00	5.25	2.25	9.95
7	1 025.00	5.25	2.25	9.95
8	1 150.00	6.00	1.50	5.04
9	1 150.00	6.00	3.00	6.34
10	1 025.00	6.51	2.25	9.49
11	1 025.00	5.25	2.25	9.95
12	1 025.00	5.25	2.25	9.95
13	1 235.22	5.25	2.25	3.97
14	814.78	5.25	2.25	17.20
15	1 150.00	4.50	1.50	5.26
16	1 025.00	5.25	0.99	12.40
17	1 150.00	4.50	3.00	6.70
18	1 025.00	5.25	2.25	9.95
19	900.00	4.50	3.00	16.60
20	1 025.00	5.25	2.25	9.95

表4 模具磨损深度响应模型方差分析表

Table 4 ANOVA table for response model of die wear depth

方差来源	偏差平方和	自由度	方差	F 值	P 值	ζ	R_1^2	R_2^2
模型	4.810 000 000 00	9	0.530 000 000 00	39.430 000 000	<0.000 1	23.525	0.972 6	0.947 9
A-A	4.130 000 000 00	1	4.130 000 000 00	304.390 000 000	<0.000 1			
B-B	0.016 000 000 00	1	0.016 000 000 00	1.210 000 000	0.296 6			
C-C	0.006 975 000 00	1	0.006 975 000 00	0.510 000 000	0.489 7			
AB	0.000 000 098 69	1	0.000 000 098 69	0.000 007 277	0.997 9			
AC	0.082 000 000 00	1	0.082 000 000 00	6.010 000 000	0.034 1			
BC	0.001 880 000 00	1	0.001 880 000 00	0.140 000 000	0.717 4			
A ²	0.560 000 000 00	1	0.560 000 000 00	41.510 000 000	<0.000 1			
B ²	0.000 809 500 00	1	0.000 809 500 00	0.060 000 000	0.811 9			
C ²	0.001 811 000 00	1	0.000 181 100 00	0.130 000 000	0.722 4			
残差	0.140 000 000 00	5	0.027 000 000 00					

表4所示为预锻模具磨损深度 r_1 的方差分析表,表中具体的分析项包括相关系数 R_1^2 、校正系数 R_2^2 、模型信噪比(即模型分辨能力) ζ 、F值和P值。其中P值越小代表模型对响应值的影响越为显著,信噪比越大代表模型的分辨能力越好,校正系数与相关系数则分别表示模型对响应值的解释覆盖率、拟合程度。表

4中模型的显著F值为39.43,P值小于0.000 1表示出现F更大值的几率只有0.01%,当P值小于0.05时表示为显著项,当P值大于0.1时则表示为非显著项,据此判断,模型中A,AC及A²为显著项,其余为非显著项。相关系数 R_1^2 值为0.972 6,说明模型的拟合情况较好。校正系数 R_2^2 值为0.947 9,说明只有

5.21% 响应值的变化不能用该模型来解释。当信噪比 $\zeta > 4$ 时是可取的,本模型的信噪比 $\zeta = 23.525$,远大于 4,模型的分辨能力良好。

3.4 响应曲面分析

图 5 所示为三维响应曲面,反映了 3 个因素交互作用对模具磨损深度的影响。由图 5(a)和(b)可以看出,保持飞边厚度与等效阻力墙高度不变时,磨损深度随着坯料初始温度的升高而减小;由图 5(b)和(c)可以发现,保持坯料初始温度和飞边厚度不变时,随着阻力墙高度的增大,模具磨损深度呈现降低的趋势;由图 5(a)和(c)可以看出,保持初始温度和等效阻力墙高度不变时,随着飞边厚度的增加,模具磨损深度呈现降低的趋势。图 5(c) 曲面波动趋于平缓,说明等效阻力墙高度和飞边厚度的交互对模具磨损深度的影响较小。响应曲面的分析结果与预期基本一致。

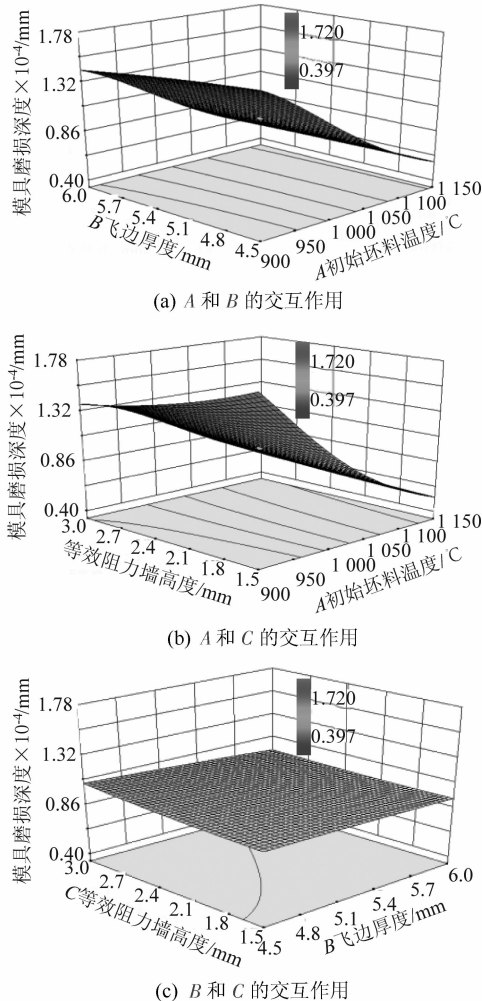


图 5 预锻模具磨损深度响应面
Figure 5 Response surface of pre forging die wear depth

3.5 最优参数组合预测与验证

综合分析响应优化结果,可在已给定的工艺参数取值范围内确定最优工艺参数组合。本次响应面法优化最优参数组合为:初始坯料温度 1 150 °C、飞边厚度 6 mm 和等效阻力墙高度 2.45 mm,模具的磨损深度的期望值分别为 5.67×10^{-5} mm。根据上述工艺参数进行有限元模拟验证。图 6 所示为优化前后预锻模具磨损深度场分布情况,优化后最值为 6.24×10^{-5} mm,与优化期望值接近,证明了响应面优化最优参数组合选取结果可靠。对比预锻模具优化前的模具磨损深度值 5.61×10^{-5} mm,优化目标处于理想值范围。

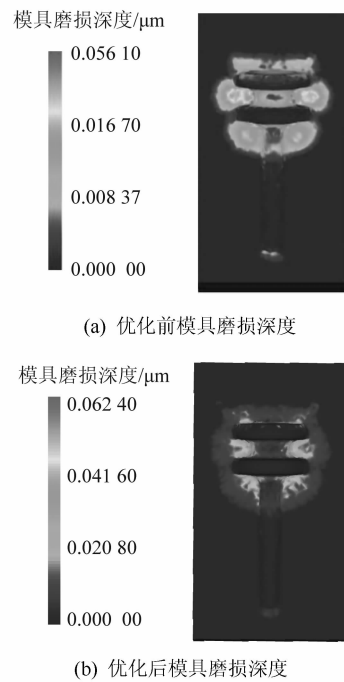


图 6 优化前、后模具磨损深度
Figure 6 Die wear depth before optimization and after optimization

4 试验验证

工艺参数的变更会导致最终产品内部组织特征和硬度的变化,所制定工艺应当保证锻件产品的晶粒等级与硬度符合要求。图 7 所示为响应面法参数优化后试验所得锻件的硬度试验取样位置及硬度打点位置,最终获得 2 个部位的布氏硬度平均值分别为 130.5 HB, 135.3 HB,符合产品硬度检测要求。图 8 所示为过渡区与杆尾 2 处的晶粒图根据《钢制模锻件金相组织评级图及评定方法》(GB/T 13320—2007)^[9-10],采用面积法评定晶粒级别,测得过渡区的奥氏体组织级别为 6 级,杆尾奥氏体组织级别为 5 级,均符合晶粒度要求。

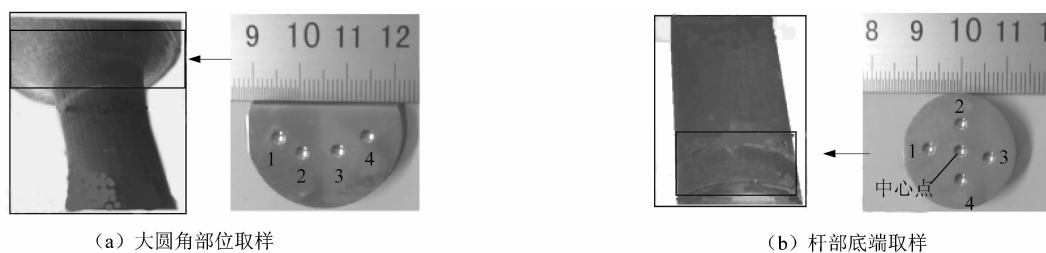


图 7 硬度试验
Figure 7 Hardness test

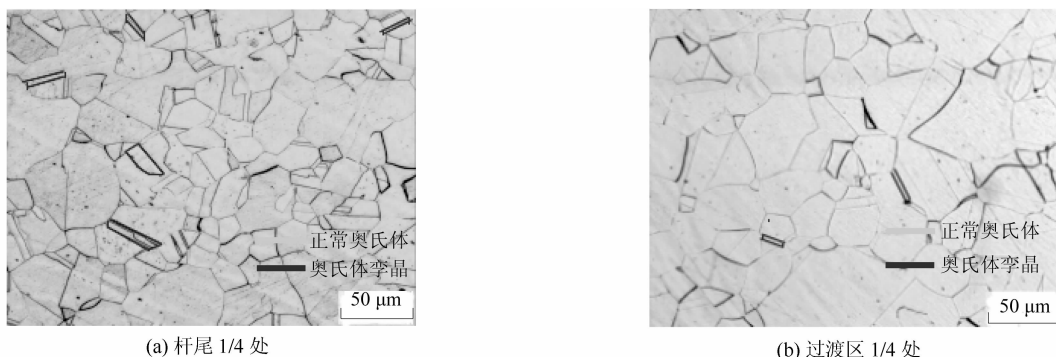


图 8 奥氏体及其孪晶组织
Figure 8 Austenitic organization and twin crystal

5 结语

1) 通过增加“等效阻力墙”的模具结构优化方法,有效的解决了预锻坯料定位不准的问题;

2) 采用响应面法对坯料初始温度、飞边厚度和等效阻力墙高度进行优化,得到最小模具磨损深度的参数组合为:初始坯料温度 1 150 ℃、飞边厚度 6 mm 和等效阻力墙高度 2.45 mm;

3) 经实际生产试验,发现新工艺下的锻件硬度与晶粒组织都合格,验证了本次响应面法优化结果的可靠性,可为今后类似锻件生产工艺的制定提供参考。

参考文献:

[1] 姜晔. 浅谈我国食品机械的发展[J]. 农业科技与信息, 2011 (20):61-62.
[2] 姚泽坤. 锻造工艺学与模具设计[M]. 西安:西北工业出版社, 2013.

[3] 徐静,戚文军,农登,等. 热锻模失效与强化的研究现状[J]. 材料研究与应用, 2011,5(3):181-185.
[4] 潘勇. 不锈钢法兰锻造工艺[J]. 广船科技, 2004(3):45-46.
[5] 张学奇,董万鹏. T型回转件锻压模具寿命数值模拟分析[J]. 上海工程技术大学学报, 2016,30(2):101-105.
[6] 周杰,刘敏,王平,等. 汽车曲轴终锻模阻力墙新型结构参数试验[J]. 机械工程学报, 2007,43(8):229-234.
[7] MONTGOMERY D C. Design and Analysis of Experiments[M]. New York:John Wiley, 1984.
[8] 杨艳慧,刘东,贺子延,等. 基于响应面法(RSM)的锻造预成形多目标优化设计[J]. 稀有金属材料与工程, 2009,38(6):1019-1024.
[9] 机械工业理化检验人员技术培训和资格鉴定委员会. 金相检测[M]. 北京:中国计量出版社, 2008.
[10] 中国机械工业联合会. 钢制模锻件金相组织评级图及评定方法: GB/T 13320—2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.

(上接第 64 页)

[7] SANGEETHA A L, NAVEENKUMAR B, GANRSH A B, et al. Experimental validation of PID based cascade control system through SCADA-PLC-OPC and internet architectures [J]. Measurement, 2012,45(4):643-649.
[8] 郭肖静,苗积臣,吴志芳. 基于 OPC 的凸度仪数据交互客户端开发[J]. 原子能科学技术, 2011,45(8):1015-1019.

[9] 西门子(中国)自动化与驱动集团. 如何在 C#中实现 OPC 数据访问[G]. 北京:2009.
[10] 刘昉. 基于 WPF 技术的股票信息系统的设计与实现[D]. 长春:吉林大学, 2012:16-18.
[11] 蒲哲,朱名日. 基于 WPF MVVM 的甘蔗种植管理系统[J]. 计算机与现代化, 2014(2):110-114.