

文章编号: 1000-582X(2013)05-037-07

曲面法优化超高强度钢的淬火工艺参数

周 杰, 李世云, 李 崇, 尚 欣, 李 慧

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 为获得超高强度钢 22MnB5 热成形过程中最佳的淬火工艺参数, 采用正交实验设计法进行实验设计, 并采用响应曲面法对实验结果进行优化分析。选择奥氏体化温度和保温时间作为优化因子, 研究各因子对淬火硬度和抗拉强度的影响。先对淬火硬度以及抗拉强度进行了单目标优化, 获得了单目标最优值, 再结合理想点法对各目标进行了多目标优化, 获得全局最优值。最后从微观角度对优化结果展开了探讨, 进一步验证了预测模型的可靠性。

关键词: 热成形; 超高强度钢; 淬火; 曲面响应法; 优化

中图分类号: TG156.3

文献标志码: A

Optimization of quenching parameters for ultra high strength steel using response surface method

ZHOU Jie, LI Shiyun, LI Chong, SHAN Xin, LI Hui

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to optimize the quenching parameters of ultra high strength steel 22MnB5, orthogonal experimental design method is applied to design the experiments and response surface methodology (RSM) is used to analyze the experimental results. Austenitizing temperature and soaking time are taken as the optimization factors. The effect of these factors on quenching hardness and elongation are investigated. The optimization results of each single objective are firstly obtained. Then, ideal point method is used to find the solution to the multi-objective programming, and global optimums are gained. Finally, the optimal results are discussed from the microstructure angle and the reliability of the prediction models is demonstrated.

Key words: hot stamping; ultra high strength steel; quenching; response surface method; optimization

随着钢材强度增加, 延伸率下降, 钢材的成形性受到了限制。针对高强度钢以及超高强度钢成形性差的缺陷, 近几年开发出了热冲压成形技术。热冲压成形实质是将高温的超高强度钢板料在带有冷却水道的模具中冲压成形同时实现固态淬火, 最终得到的高强度、高硬度零件。围绕超高强度钢的热冲压成形工艺, Abdulhay 等^[1-2]对热冲压传热过程进

行了研究。Merklein 等^[3-6]对可淬火超高强度钢的成形性能进行了研究。Ikeuchi 等^[7]利用热成形模拟器探讨了热冲压参数对零件性能影响的评价方法。Bok 等^[8-10]对热冲压工艺过程进行了有限元模拟。Liu 等^[11-14]对热冲压成形过程中的相变进行了研究。Naderi 等^[15]对不同含碳量的钢材热冲压成形后的微观组织及力学性能进行了研究。

收稿日期: 2012-12-14

基金项目: 重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2009BA4065)

作者简介: 周杰(1965-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事模具技术及模具 CAD/CAM/CAE、材料成形过程数值模拟仿真与优等研究, (Tel)023-65111493; (E-mail)zhoujie@cqu.edu.cn。

国外在热冲压成形技术的研究及应用方面已经先行多年,并且取得了巨大的成绩。在国内,超高强度零件目前多处在研发阶段,各汽车企业对超高强度钢的性能及其潜力的认识依旧不足。因缺乏合理的热成形工艺参数等原因,致使生产出来零件的性能不能达到顾客需求,这局限了热成形高强度构件在车身上的应用。因此,合理的工艺参数对于成功研发出超高强度的零件至关重要。笔者将针对可淬火超高强度钢 22MnB5,采用正交实验设计法进行实验设计,研究奥氏体化温度和保温时间对淬火硬度和抗拉强度的影响。利用响应曲面模型对奥氏体化温度和保温时间进行单目标优化,并采用理想点法对其进行多目标优化,最后对所获得微观组织展开探讨,以判定优化结果的可靠性。

1 实验材料及方法

本实验所用材料为可淬火硼钢 22MnB5,其化学成分如表 1 所示。图 1 为实验试样尺寸图。

表 1 22MnB5 各元素质量分数 %

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	B
质量分数	0.221	0.28	1.39	0.018	0.001	0.193	0.018

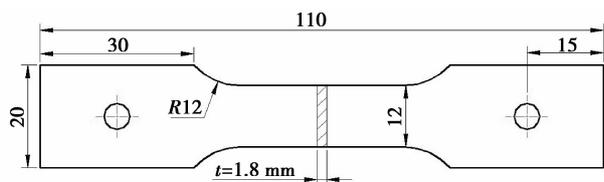


图 1 试样外形及尺寸

为探讨奥氏体化温度与保温时间对 22MnB5 力学性能的影响,本实验以奥氏体化温度和保温时间为设计因子,以试样的淬火硬度和抗拉强度为输出变量进行 2 因子 5 水平的正交试验设计。设计因子奥氏体化温度 θ ,保温时间 t 的水平如表 2 所示。

表 2 实验因素与实验水平

因素	实验水平				
$\theta / ^\circ\text{C}$	810	845	880	915	950
t / min	0	8	16	24	32

实验步骤:①将试样加热到设定温度并开始计算保温时间。②保温时间达到设定值后将试样迅速转移至带有冷却水道的模具中冷却,实现试样的固态淬火。③取出试样,用洛氏硬度计和 SY-6014 电子拉伸试验机测试试样的硬度 H 和抗拉强度 σ 。为保证硬度测量的准确性,对每个试样取 6 个不同点进行测量,取平均值作为测量值。

根据正交试验设计法,2 因子 5 水平的正交实验共需要进行 25 次实验。正交实验表及实验值如表 3 所示。

表 3 正交表及实验值

实验序号	$\theta / ^\circ\text{C}$	t / min	H / HRC	σ / MPa
1	810	0	47.78	1 553.15
2	810	8	48.97	1 629.80
3	810	16	49.02	1 645.45
4	810	24	48.35	1 623.77
5	810	32	47.41	1 588.47
6	845	0	51.37	1 552.58
7	845	8	50.96	1 582.18
8	845	16	49.64	1 583.73
9	845	24	47.83	1 567.05
10	845	32	45.97	1 541.93
11	880	0	52.26	1 612.56
12	880	8	51.02	1 584.19
13	880	16	49.09	1 558.00
14	880	24	46.92	1 529.89
15	880	32	44.92	1 495.77
16	915	0	50.98	1 671.13
17	915	8	49.68	1 607.47
18	915	16	47.93	1 573.45
19	915	24	46.16	1 551.08
20	915	32	44.80	1 522.37
21	950	0	48.09	1 538.82
22	950	8	47.51	1 496.13
23	950	16	46.70	1 507.79
24	950	24	46.11	1 541.90
25	950	32	46.16	1 566.61

2 响应曲面法

在统计学中,响应曲面法(RSM)探讨的是多个因素与一个或多个响应变量的关系。它以回归方法作为函数估计的工具,将各影响因素与响应变量的关系用多项式近似,把因素与实验结果的关系函数化。再运用图形技术将函数关系显示出来,供观测者直观、定量分析各因素及其交互作用对响应值的影响,从而得出各因素的最优值。

在实验中响应变量 y 与自变量 x 关系可表示为

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon, \quad (1)$$

其中: x_1, x_2 为自变量(影响因素); ε 为响应变量 y 的观察误差。若记期望响应 $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$, 则由 $\eta = f(x_1, x_2)$ 表示的曲面叫做响应曲面。在大多数 RSM 的问题中,响应和自变量间的关系是未知的。因此,RSM 第一步就是寻求响应 y 和自变量 x_1, x_2 之间真实函数关系的一个合适的逼近式。通常在自变量的某一区域内一个低阶的多项式是可用的,而在本实验中,对淬火硬度和抗拉强度回归分析的结果显示三阶多项式能逼近淬火硬度和影响因素的真实函数,而采用四阶多项式更能逼近抗拉强度和影响因素的真实函数。因此本实验对淬火硬度采用三阶多项式进行拟合,对抗拉强度采用四阶多项式拟合。

3 实验结果与讨论

3.1 响应变量的回归模型

拟合淬火硬度 H , 抗拉强度 σ 的回归模型如下:

$$\begin{aligned} H = & -175.486 + 31.9587 \times t + \\ & 8.783 \times 10^{-4} \times \theta^2 - 7.085 \times 10^{-2} \times \theta \times t - \\ & 5.406 \times 10^{-2} \times t^2 - 6.639 \times 10^{-7} \times \theta^3 + \\ & 3.912 \times 10^{-5} \times \theta^2 \times t + 5.153 \times 10^{-5} \times \\ & \theta \times t^2 + 4.106 \times 10^{-4} \times t^3, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma = & -1.788 \times 10^6 + 8.509 \times 10^3 \times \theta - \\ & 1.023 \times 10^4 \times t - 15.1549 \times \theta^2 + \\ & 36.0643 \times \theta \times t - 2.9722 \times t^2 + \\ & 0.012 \times \theta^3 - 0.0421 \times \theta^2 \times t + \\ & 0.0033 \times \theta \times t^2 - 3.54 \times 10^{-6} \times \theta^4 + \\ & 1.632 \times 10^{-5} \times \theta^3 \times t. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: θ 为奥氏体化温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为保温时间, min 。上述方程表示的是各个响应变量与自变量的近似关系。利用如上拟合方程可预测淬火硬度和抗拉强度的值。图 2(a)、(b)所示为拟合方程预测值与实验测量值的对比。

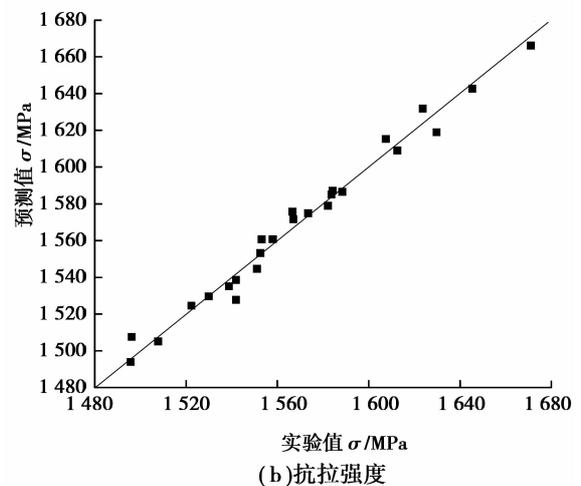
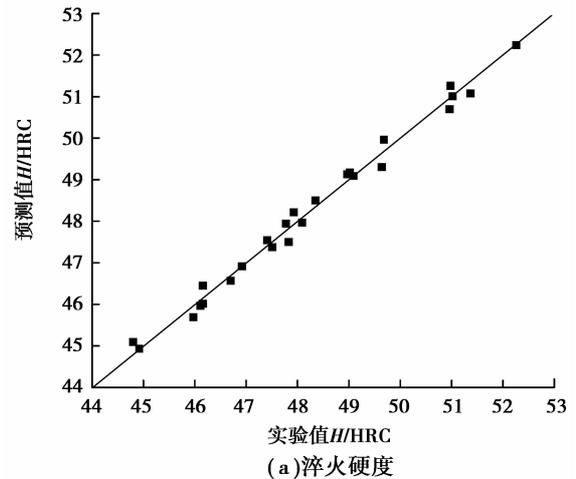


图 2 方程预测值与实验测量值的对比图

从图 2 预测值与实验测量值的对比可以看出,在 95% 的置信区间内回归模型的预测值与实验值十分接近,意味着拟合的回归响应模型能够比较精确地预测结果。

3.2 回归模型的显著性检验

为了评估实验值的可信度与回归模型的可靠性,需要对回归模型及其回归系数进行显著性检验。本实验采用方差分析法(ANOVA),通过计算 P 值, F 值(或 T 值),模型的决定系数(R^2)以及模型的校正决定系数(\bar{R}^2)来检验模型的可靠性。

取显著性水平为 $\alpha = 0.05$, 如果回归模型的显著性概率 $P > \alpha = 0.05$ 则认为回归方程有统计学意义。若回归系数的显著性概率 $P < \alpha = 0.05$, 则认为多项式的项对响应变量具有显著性影响。模型的决定系数 R^2 值越接近 1, 则表示自变量对响应变量的解释程度越高, 自变量引起的变动占总变动的百分比越高。当方程中加入有显著作用的自变量时 \bar{R}^2 增大, 剩余标准差(RMSE)减小; 若方程

中引入无显著作用的自变量时, \bar{R}^2 可能减小而剩余标准差增大。校正决定系数 \bar{R}^2 越大说明回归效果越好。

3.2.1 淬火硬度的方差分析

淬火硬度回归模型的方差分析结果如表 4 所示。从表 4 所示淬火硬度回归模型各个项的 P 值都小于 α ($\alpha=0.05$), 表明回归模型的项都对响应变量(淬火硬度)具有显著性影响。回归模型总 P 值、 F 值为: $P=1.88\text{E}-14 < 0.05$, $F=194.058 > F_{0.05}(8, 16)=2.59$, 表明模型方程式(2)极显著。模型的决定系数 $R^2=0.9898$ 说明预测值与实测值之间具有高度的相关性, 方程拟合性好。 $R^2=0.9847$ 说明该模型能解释 98.47% 响应值的变化。

表 4 淬火硬度回归模型的方差分析结果

项	自由度	系数	标准误差	T 值	P 值
t	1	31.958 7	1.716 2	18.621	0
θ^2	1	8.783E-04	4.317E-05	20.344	0
$\theta \times t$	1	-7.085E-02	3.872E-03	-18.296	0
t^2	1	-5.406E-02	8.916E-03	-6.064	0
θ^3	1	-6.639E-07	3.261E-08	-20.360	0
$\theta^2 \times t$	1	3.912E-05	2.193E-06	17.842	0
$\theta \times t^2$	1	5.153E-05	9.599E-06	5.368	0.000 1
t^3	1	1.406E-04	5.856E-05	2.401	0.028 8

RMSE=0.254 4 $R^2=0.989 8$ $\bar{R}^2=0.984 7$

项目	自由度	离差平方和	均方差	F 值	P 值
模型	8	100.49	12.561 6	194.058	1.88E-14
残差	16	1.035 7	0.064 7		
总值	24	101.53			

3.2.2 抗拉强度的方差分析

抗拉强度回归模型的方差分析结果如表 5 所示。从表 5 所示抗拉强度回归模型各个项的 P 值都小于 α ($\alpha=0.05$), 表明抗拉强度回归模型的项对抗拉强度都具有显著性影响。回归模型总 P 值、 F 值为: $P=2.21\text{E}-10 < 0.05$, $F=74.705 2 > F_{0.05}(10, 14)=2.6$, 表明模型方程式(3)极显著。模型的决定系数 $R^2=0.9816$ 说明预测值与实测值之间具有高度的相关性, 方程拟合性好。 $\bar{R}^2=0.9685$ 说明该模型能解释 96.85% 响应值的变化。

表 5 抗拉强度回归模型的方差分析结果

项	自由度	系数	标准误差	T 值	P 值
θ	1	8.509E+03	2.263E+03	3.761	0.002 1
t	1	-1.023E+04	1.320E+03	-7.748	0
θ^2	1	-15.154 9	3.864E+00	-3.922	0.001 5
$\theta \times t$	1	36.064 3	4.515E+00	7.987	0
t^2	1	-2.972 2	2.664E-01	-11.157	0
θ^3	1	0.012 0	2.930E-03	4.087	0.001 1
$\theta^2 \times t$	1	-0.042 1	5.139E-03	-8.200	0
$\theta \times t^2$	1	0.003 3	3.023E-04	11.037	0
θ^4	1	-3.540E-06	8.323E-07	-4.254	0.000 8
$\theta^3 \times t$	1	1.632E-05	1.946E-06	8.385	0

RMSE=8.011 $R^2=0.981 6$ $\bar{R}^2=0.968 5$

项目	自由度	离差平方和	均方差	F 值	P 值
模型	10	4.79E+04	4.79E+0374.705 2	2.21E-10	
残差	14	8.98E+02	6.42E+01		
总值	24	48 843.03			

3.3 响应曲面分析与优化

响应面分析法将模型的响应作为一个或多个因素的函数, 运用图形技术将这种函数关系显示出来。通过响应面, 观测者可直观地判别优化区域及其最优化的位置, 从而得到最优化条件。

图 3 为淬火硬度的响应曲面与等高线图。从图可知, 淬火硬度优化区域(淬火硬度大于 50HRC)在奥氏体化温度 830~930 °C, 保温时间 0~14 min。在优化区域内: 淬火硬度 H 随着奥氏体化保温时间 t 升高而降低; 而随着奥氏体化温度 θ 升高, 淬火硬度先增加至一个最高值再逐渐降低。

根据方程式(2)求得淬火硬度的最优值, 最优值如表 6 所示。

表 6 淬火硬度的最优值

变量	$\theta / ^\circ\text{C}$	t / min	H / HRC
最优值	882	0	52.24

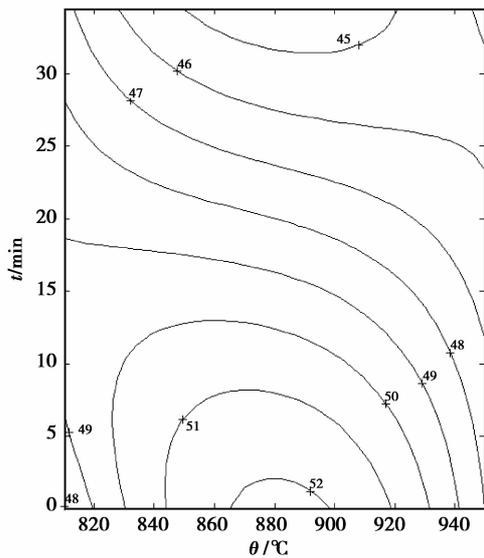
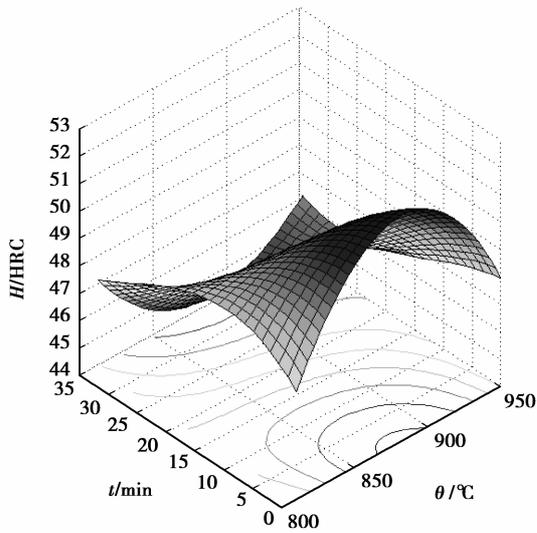


图 3 淬火硬度的响应曲面与等高线图

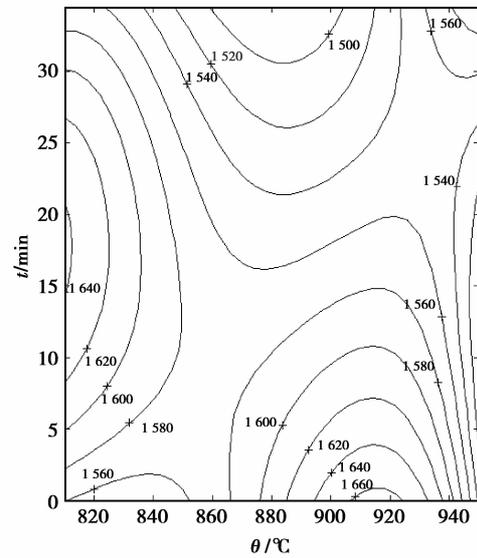
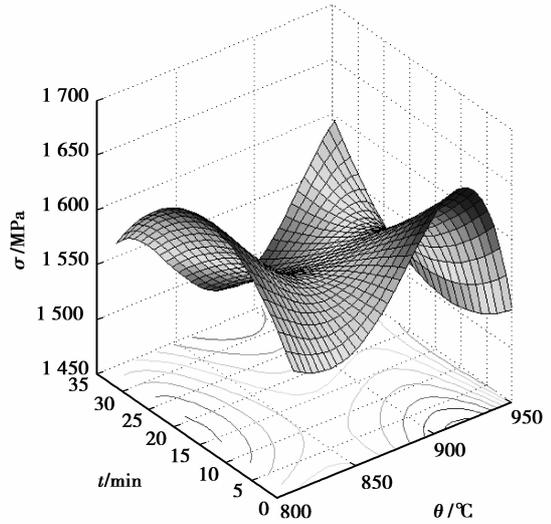


图 4 抗拉强度的响应曲面与等高线图

抗拉强度的响应曲面与等高线图如图 4 所示。从图可知,抗拉强度优化区域(σ 大于 1 600 MPa)有两个:一个在奥氏体化温度 810~840 °C,保温时间 5~30 min。在此区域内抗拉强度 σ 随着奥氏体化保温时间 t 升高,抗拉强度先增大,在达到最高值后随奥氏体化保温时间升高逐渐降低。另一个在奥氏体化温度 870~940 °C,保温时间 0~10 min。在此区域内抗拉强度 σ 随着奥氏体化保温时间 t 升高而降低。随着奥氏体化温度 θ 升高,抗拉强度先增大,在达到最高值后随奥氏体化温度升高逐渐降低。

根据方程式(3)求得各优化区域的抗拉强度最优值,最优值如表 7 所示。

表 7 抗拉强度的最优值

变量	$\theta / ^\circ\text{C}$	t / min	σ / MPa
区域	810	17.5	1 643.2
最优值	916	0	1 666.2

3.4 多目标优化

用超高强度钢做的零件通常为汽车加强件。作为加强件,淬火硬度和抗拉强度越大,零件力学性能

越好。笔者采用理想点法,以淬火硬度 H 、抗拉强度 σ 最大为优化设计目标进行多目标优化。先分别对单目标求解。

求解单目标方程,方程如下:

$$\begin{cases} \max H(\theta, t) = H^*, \text{ s. t. } 810 \leq \theta \leq 950; \\ \max \sigma(\theta, t) = \sigma^*, 0 \leq t \leq 32. \end{cases} \quad (4)$$

由如上方程组解得 H^*, σ^* 值。设其最优值为 f_i^* , 称 $f_i^* = (H^*, \sigma^*)^T$ 为值域中的一个理想点。一般理想点很难达到,于是寻求距离 f_i^* 最近的 f 作为近似值。构造评价函数如下:

$$\varphi(z) = \sqrt{\sum_i^p (z_i - f_i^*)^2}. \quad (5)$$

然后极小化 $\varphi(z)$, 即求解如下方程,得到最优解 (θ^*, t^*) 。

$$\begin{cases} \min \varphi(H, \sigma) = \sqrt{(H(\theta, t) - H^*)^2 + (\sigma(\theta, t) - \sigma^*)^2}; \\ \text{s. t. } 810 \leq \theta \leq 950, 0 \leq t \leq 32. \end{cases} \quad (6)$$

根据如上步骤可求得全局最优值。全局最优值如表 8 所示。

表 8 全局最优值

变量	$\theta / ^\circ\text{C}$	t / min	H / HRC	σ / MPa
最优值	914	0	51.31	1 666.0

3.5 优化结果验证

用上述响应曲面法和理想点法优化的淬火工艺参数对新的试样按实验步骤进行处理,再对处理过的试样进行硬度和抗拉强度检测,并观测其显微组织。淬火硬度和抗拉强度检测结果如表 9 所示。试样的显微组织如图 5 所示。

表 9 淬火硬度和抗拉强度预测值与实验值

	优化值		预测值		实验值	
	$\theta / ^\circ\text{C}$	t / min	H^*	σ^*	H	σ
1	882	0	52.24	—	51.0	1 593.3
2	916	0	—	1 666.2	49.2	1 620.2
3	914	0	51.31	1 666.0	50.8	1 602

如表 9 所示,由实验结果与近似模型预测结果对比可知:淬火硬度误差约为 2.4%,抗拉强度误差约为 3.8%。说明模型的预测结果能够较好地反映实验结果,回归模型是可靠的。图 5(a)所示为试样原始组织,由图可知经过热轧后试样显微组织呈一

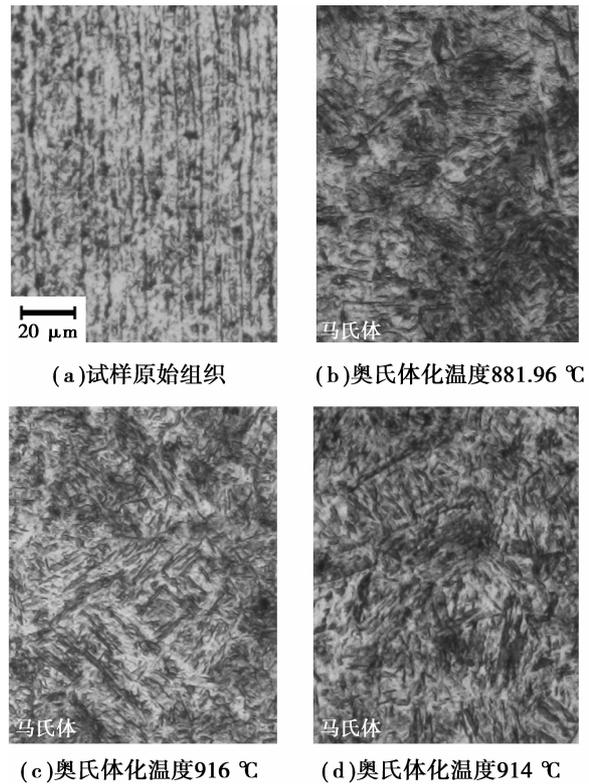


图 5 优化淬火工艺参数处理的试样
显微组织图((b)、(c)、(d),保温时间为 0 min)

定的方向性,组织中不存在马氏体。从图(b)、(c)、(d)可知经过固态淬火的试样其显微组织出现了大量的小尺寸马氏体(呈黑色)。大量的小尺寸马氏体能够阻碍位错运动从而使零件的硬度和抗拉强度得以提高。从图 5 可知图(b)的马氏体最多,图(d)次之,图(c)中马氏体较图(d)少。因此图(b)所示试样的淬火硬度最高,其次是图(d),最后是图(c)。从所获得显微组织角度进一步说明了响应曲面模型优化结果的可靠性。

4 结 论

利用响应曲面和理想点法,以超高强度可淬火钢 22MnB5 的淬火硬度、抗拉强度为输出响应,完成了淬火工艺参数(奥氏体化温度和保温时间)的优化设计。得到结论如下:

1) 回归模型的显著性检验表明:奥氏体化温度与保温时间对淬火硬度和抗拉强度都具有显著性影响。预测值与实测值之间高度相关。回归模型具有显著性意义,各方程拟合性良好。

2) 响应曲面分析表明:①淬火硬度优化区域中奥氏体化温度 830~930 $^\circ\text{C}$,保温时间 0~14 min。②抗拉强度优化区域有两个:一个在奥氏体化温度

810~840 °C,保温时间 5~30 min;另一个在奥氏体化温度 870~940 °C,保温时间 0~10 min。

3)单目标优化结果表明:在奥氏体化温度为 882 °C、保温时间为 0 min 时淬火硬度有最高值 52.24 HRC;在奥氏体化温度为 916 °C、保温时间为 0 min 时抗拉强度最高值 1 666.2 MPa。多目标优化结果表明:在奥氏体化温度为 914 °C、保温时间为 0 min 时,淬火硬度的预测值不小于 51.31 HRC,零件抗拉强度的预测值不小于 1 666.0 MPa。

4)从优化参数处理过试样的显微组织分析可知,响应曲面法和理想点法寻优能够较好地反映实验结果,进一步验证了回归模型可靠性。

参考文献:

- [1] Abdulhay B, Bourouga B, Dessain C. Experimental and theoretical study of thermal aspects of the hot stamping process [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(5):674-685.
- [2] Abdulhay B, Bourouga B, Dessain C, et al. Development of estimation procedure of contact heat transfer coefficient at the part-tool interface in hot stamping process[J]. Heat Transfer Engineering, 2011, 32(6): 497-505.
- [3] Merklein M, Lechler J. Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1):452-455.
- [4] Bariani P F, Bruschi S, Ghiotti A, et al. Testing formability in the hot stamping of HSS [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 265-268.
- [5] Min J Y, Lin J P, Tian H B, et al. Investigation on uniaxial tensile instability of usibor1500 steel sheets at elevated temperature[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1):94-99.
- [6] Ghiotti A, Bruschi S, Borsetto F. Tribological characteristics of high strength steel sheets under hot stamping conditions [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11):1694-1700.
- [7] Ikeuchi K, Yanagimoto J. Valuation method for effects of hot stamping process parameters on product properties using hot forming simulator[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(8): 1441-1447.
- [8] Bok H H, Lee M G, Kim H D, et al. Thermo-mechanical finite element analysis incorporating the temperature dependent stress-strain response of low alloy steel for practical application to the hot stamped part [J]. Metals and Materials International, 2010, 16(2):185-195.
- [9] Tekkaya A E, Karbasian H, Homberg W, et al. Thermo-mechanical coupled simulation of hot stamping components for process design [J]. Production Engineering, 2007, 1(1):85-89.
- [10] Xing Z W, Bao J, Yang Y Y. Numerical simulation of hot stamping of quenched boron steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 499(1/2):28-31.
- [11] Liu H P, Jin X J, Dong H, et al. Martensitic microstructural transformations from the hot stamping, quenching and partitioning process [J]. Materials Characterization, 2011, 62(2):223-227.
- [12] Åkerström P, Oldenburg M. Austenite decomposition during press hardening of a boron steel: computer simulation and test [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(1):399-406.
- [13] Naderi M, Durrenberger L, Molinari A, et al. Constitutive relationships for 22MnB5 boron steel deformed isothermally at high temperatures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 478(1/2): 130-139.
- [14] Zhu B, Zhang Y S, Li J. Simulation research of hot stamping and phase transition of automotive high strength steel [J]. Materials Research Innovations, 2011, 15(1):426-430.
- [15] Naderi M, Ketabchi M, Abbasi M, et al. Analysis of microstructure and mechanical properties of different high strength carbon steels after hot stamping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6):1117-1125.

(编辑 王维朗)