

Vague 集在 Cr12MoV 钢激光淬火工艺优化中的应用

舒服华

武汉理工大学机电工程学院, 湖北 武汉 430070

摘要 提出了正交试验和 Vague 集相结合的 Cr12MoV 工具钢工艺参数优化方法。以激光功率、扫描速度、搭接率、黑漆涂层厚度为优化工艺参数,以淬火后材料表面硬度、淬层深度、淬层相对磨损量和腐蚀速度为综合工艺优化目标。首先进行了正交试验获得数据样本,然后借助 Vague 集理论对数据进行分析处理实现对工艺参数的优化。先进行单工艺目标优化,再通过单工艺目标权重求和进行综合工艺目标优化,将多目标优化问题转化为单目标优化问题。优化结果为:激光功率 1400 kW、扫描速度 15 mm/s、搭接率 40%、涂层厚度 60 μm 。验证试验结果表明,优化工艺参数使淬火层硬度提高了 1.62%,相对磨损量下降了 9.84%,腐蚀速度下降了 9.26%,淬层深度仅减小 1.33%。

关键词 激光技术; 模具钢; 激光淬火; 工艺参数优化; Vague 集

中图分类号 TG156.33 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.011403

Application of Vague Set in Process Optimization of Laser Quenching of Cr12MoV Steels

Shu Fuhua

*School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology,
Wuhan, Hubei 430070, China*

Abstract An optimization method of laser quenching process parameters of Cr12MoV die steel is proposed based on the orthogonal experiment and Vague set. The laser power, scanning speed, overlap rate, black paint thickness are taken as optimizing process parameters, while the quenching layer surface hardness after quenching, quenching layer depth, relative wear rate and corrosion rate of quenching layer are taken as integrated process optimization objectives. Orthogonal experiment is first carried out to obtain the data samples, and then the data are analyzed and processed by the Vague set theory to realize the optimization of process parameters. The optimization of single process is first carried out, and then comprehensive process optimization is taken through single process objective weight sum, where the multi-objective optimization problem is transformed into a single objective optimization problem. The optimization results are listed as laser power of 1400 kW, scanning speed of 15 mm/s, lap ratio of 40%, and coating thickness of 60 μm . Test experimental results indicate that the optimization of process parameters make the hardness of quenching layer increase by 1.62%, the relative abrasion value decrease by 9.84%, the corrosion rate decrease by 9.26%, and the quenching layer depth only decrease by 1.33%.

Key words laser technique; die steel; laser quenching; process parameter optimization; Vague set

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引言

Cr12MoV(12%为 Mo 所占的质量分数)钢是模具生产普遍使用的材料,含碳量比 Cr12 钢低很多,因加入了钼、钒元素,钢的热加工性能、冲击韧度和碳化物分布情况都得到了明显改善^[1-2]。淬火是 Cr12MoV 钢主要的热处理方法,是改善材料综合机械性能和提高零件使用寿命的重要手段。激光淬火的功率密度高、冷却速度快,不需要水或油等冷却介质,因此该工艺是一种清洁、快速的淬火工艺。与感应淬火、火焰淬火、渗

收稿日期: 2016-08-17; 收到修改稿日期: 2016-09-27; 网络出版日期: 2017-01-04

作者简介: 舒服华(1967—),男,硕士,副教授,主要从事机械设计与制造方面的研究。E-mail: cannon777@126.com

碳淬火工艺相比,激光淬火具有淬硬层分布均匀、硬度高、工件变形小、加热层深度和加热轨迹易于控制以及自动化易于实现等诸多优点^[3-4]。激光淬火工艺参数对材料淬火层的性能影响较大,优化工艺参数是Cr12MoV钢激光淬火工艺设计和生产控制的关键。在工具钢激光淬火研究方面,大部分研究仅限于工艺参数对淬火材料性能和组织的影响^[5-6],虽然有少部分研究涉及到工艺参数优化问题,但主要是针对正交试验优化方法,且工艺目标比较单一^[7-8]。虽然正交试验优化是一种高效、快速、经济的方法,但其对数据的处理较为简单,当因素和水平较多、或者试验结果比较接近时,正交试验优化方法难以作出准确的判断。Vague集拓展了模糊集对事物表达的范围,弥补了模糊集的一些不足,比传统的模糊集有更强的表达不确定性的能力,是一种新的不确定系统智能信息处理方法,广泛应用于方案评价与决策。本文利用正交试验和Vague集相结合的方法,优化了Cr12MoV模具钢激光淬火工艺参数。优化目标采用多工艺综合目标,不仅能避免正交试验优化分辨率差、精度低等问题,而且能全面考察工艺参数对淬层性能的影响,与Cr12MoV钢激光淬火的实际应用更加贴近。

2 试验方法

试验材料为Cr12MoV钢,试件尺寸为100 mm×60 mm×6 mm;设备为光纤激光器(YLS-3000型,阿帕奇光纤激光有限公司,中国),功率为1500~1800 W,使用积分镜将光斑聚焦为12 mm×12 mm的矩形光斑,焦距为450 mm,扫描方式为单道搭接扫描。将试样表面打磨光亮,用丙酮清洗表面,在试件表面喷涂86-1型黑漆,以提高试样对激光束能量的吸收率。保护气体为氩气,流量为15 L/min。

激光功率(A)、扫描速度(B)、搭接率(C)、黑漆涂层厚度(D)为待优化工艺参数,相邻光斑间的覆盖量以搭接率度量。搭接率 η 的定义为

$$\eta = \left(1 - \frac{L}{H}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中 L 为相邻光斑的中心点之间的距离, H 为光斑的边长。选择淬火后材料表面硬度(x_1)、淬层深度(x_2)、淬层相对磨损量(x_3)、淬层腐蚀速度(x_4)为综合优化工艺目标^[7-8],设计一个4因素4水平的正交试验,试验设计见表1。将试件切割成10 mm×10 mm×6 mm的小块,采用硬度计(HRS-15型,东莞市鹏展电子仪器有限公司,中国)测量淬层的表面硬度;采用显微硬度计(HV-1000型,济南恒思盛大仪器有限公司,中国)按照极限维氏硬度法测量淬层的深度。磨损试验在往复摩擦磨损试验机(HSR-2M,上海五久自动化设备有限公司,中国)上进行,摩擦副是直径为5 mm的陶瓷球,试验载荷为9.8 N,磨损时间为30 min,往复长度为6 mm。以相对磨损量衡量淬层的耐磨性能,相对磨损量 ρ 定义为

$$\rho = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中 M_0 为磨损试验前试件的质量, M_1 为磨损试验后试件的质量。腐蚀试验在质量分数为6%的HCl溶液中进行,溶液温度为25℃,腐蚀时间为24 h。以腐蚀速率衡量淬层的耐腐蚀性能,腐蚀速率 μ 定义为

$$\mu = \frac{M_0 - M_1}{T}, \quad (3)$$

式中 T 为腐蚀试验时间。每组试验在相同的条件下重复三次,数据取三次的平均值。试验结果见表2,其中HRC为洛氏硬度。

表1 激光淬火正交试验设计

Table 1 Design of laser quenching orthogonal experiment

Level	Laser power	Scanning speed	Overlap ratio	Coating thickness
	A /W	B /(mm/s)	C /%	D / μm
1	1000	10	20	50
2	1200	15	30	60
3	1400	20	40	70
4	1600	25	50	80

表2 激光淬火试验结果
Table 2 Experimental results of laser quenching

No.	Parameter level				HRC	Quenching layer	Relative wear	Corrosion rate
	A	B	C	D	x_1	depth x_2 /mm	rate x_3 /%	x_4 /($\mu\text{g/h}$)
1	1	1	1	1	55.7	1.08	0.253	1.02
2	1	2	2	2	56.4	1.25	0.250	1.12
3	1	3	3	3	58.3	1.22	0.237	1.16
4	1	4	4	4	55.1	0.94	0.166	1.20
5	2	1	2	3	52.3	1.01	0.189	0.94
6	2	2	1	4	57.4	1.03	0.245	1.04
7	2	3	4	1	53.7	0.85	0.230	0.97
8	2	4	3	2	54.3	1.11	0.205	1.06
9	3	1	3	4	62.1	1.46	0.221	1.22
10	3	2	4	3	61.6	1.50	0.181	1.17
11	3	3	1	2	57.5	1.21	0.201	1.11
12	3	4	2	1	61.2	1.35	0.240	1.16
13	4	1	4	2	62.8	1.39	0.210	1.25
14	4	2	3	1	60.4	1.44	0.173	0.92
15	4	3	2	4	59.6	1.28	0.195	1.15
16	4	4	1	3	55.1	1.17	0.226	1.08

3 Vague 集基本知识

Vague 集的特点是能同时给出支持和反对的证据,能够更为全面地表达模糊信息,是解决多目标决策的一种非常有效的方法。

设 X 是一个论域空间, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, n 为工艺目标数量。对于 $\forall x_i \in X$, X 中的一个 Vague 集 R 用一个真隶属函数 $t_R(x_i)$ 和一个假隶属函数 $f_R(x_i)$ 表示。 $t_R(x_i)$ 是从支持 x_i 的证据中导出的肯定隶属度上界, $f_R(x_i)$ 是从反对 x_i 的证据中导出的否定隶属度下界。 $t_R(x_i)$ 和 $f_R(x_i)$ 将区间 $[0, 1]$ 中的实数与 X 中的元素联系起来,即 $t_R: X \rightarrow [0, 1]$, $f_R: X \rightarrow [0, 1]$, 其中 $t_R(x_i) + f_R(x_i) \leq 1$ 。

元素 x_i 在 Vague 集 R 的隶属度被区间 $[0, 1]$ 的子区间 $[t_R(x_i), 1 - f_R(x_i)]$ 界定,称该区间为 x_i 在 R 中的 Vague 值。对于 $\forall x_i \in X$, $h_R(x_i) = 1 - t_R(x_i) - f_R(x_i)$ 为元素 x_i 相对 Vague 集 R 的 Vague 度,它刻画了元素 x_i 相对 Vague 集 R 的不确定程度,也称踌躇程度。 $h_R(x_i)$ 值越大,说明 x_i 相对 R 的未知信息越多。Vague 集理论的核心是用相似度来表征两个 Vague 集之间的关联。设有两个 Vague 集分别为 $R = [t_R(x_i), 1 - f_R(x_i)]$, $S = [t_S(x_i), 1 - f_S(x_i)]$, 则 R, S 的相似度为^[9]

$$M(R, S) = 1 - \left[\frac{t_R(x_i) - t_S(x_i)}{1 + t_R(x_i) + t_S(x_i)} + \frac{f_R(x_i) - f_S(x_i)}{1 + f_R(x_i) + f_S(x_i)} \right]. \quad (4)$$

4 试验结果分析

4.1 试验结果分析步骤

利用 Vague 集优化 Cr12MoV 钢激光淬火工艺参数的基本方法是:将试验数据转化为 Vague 集,确定一个理想解为参考对象,在 Vague 集的环境下衡量每组试验方案与理想解的相似度,通过加权求和的形式将多工艺目标优化问题转化为单工艺目标优化问题,获得最佳工艺参数。具体步骤如下。

1) 生成 Vague 集

对于效益型数据(取值越大越好),转化成 Vague 值的公式为^[10]

$$R_i(x_j) = [t_R(x_{ij}), 1 - f_R(x_{ij})] = \left[\frac{x_{ij}^P - x_{j\min}^P}{x_{j\max}^P - x_{j\min}^P}, 1 - \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \right], \quad (5)$$

对于成本型数据(取值越小越好),转化成 Vague 值的公式为^[10]

$$R_i(x_j) = [t_R(x_{ij}), 1 - f_R(x_{ij})] = \left[\frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}}, 1 - \frac{x_{ij}^P - x_{j\min}^P}{x_{j\max}^P - x_{j\min}^P} \right], \quad (6)$$

式中 $x_{j\min} = \min\{x_{ij}\}$, $x_{j\max} = \max\{x_{ij}\}$; i 代表第 i 次试验方案且 $i=1, 2, \dots, 16$; j 代表第 j 个工艺目标且 $j=1, 2, \dots, 4$; P 为设定的指数且 $P=2, 3, \dots$, 通常 P 取 2。

在 Cr12MoV 钢激光淬火 4 个性能指标中, 淬层表面硬度、淬层深度为效益型指标, 淬层相对磨损量、淬层腐蚀速度为成本型指标, 转化为 Vague 集的结果见表 3。

表 3 激光淬火性能指标的 Vague 集

Table 3 Vague sets of laser quenching performance indexes

No.	R_{x1}	R_{x2}	R_{x3}	R_{x4}
1	[0.37, 0.39]	[0.20, 0.40]	[0, 0]	[0, 0]
2	[0.43, 0.45]	[0.46, 0.52]	[0.19, 0.22]	[0.04, 0.05]
3	[0.59, 0.62]	[0.41, 0.47]	[0.44, 0.49]	[0.19, 0.22]
4	[0, 0]	[0, 0]	[0.08, 0.10]	[0.93, 0.94]
5	[0.09, 0.10]	[0.09, 0.11]	[0.15, 0.18]	[0.74, 0.78]
6	[0.51, 0.54]	[0.24, 0.29]	[0.30, 0.35]	[0.09, 0.11]
7	[0.20, 0.22]	[0.14, 0.18]	[0.24, 0.29]	[0.26, 0.30]
8	[0.25, 0.27]	[0.28, 0.34]	[0.38, 0.43]	[0.56, 0.61]
9	[0.93, 0.94]	[0.84, 0.87]	[0.92, 0.94]	[0.37, 0.42]
10	[0.89, 0.90]	[1.00, 1.00]	[0.85, 0.87]	[0.83, 0.86]
11	[0.52, 0.55]	[0.39, 0.45]	[0.49, 0.54]	[0.96, 0.97]
12	[0.85, 0.86]	[0.64, 0.69]	[0.66, 0.70]	[0.15, 0.17]
13	[1.00, 1.00]	[0.71, 0.76]	[1.00, 1.00]	[0.50, 0.55]
14	[0.78, 0.80]	[0.79, 0.82]	[0.81, 0.83]	[1.00, 1.00]
15	[0.71, 0.73]	0.50, 0.56]	[0.71, 0.75]	[0.61, 0.67]
16	[0.32, 0.34]	[0.33, 0.39]	[0.55, 0.60]	[0.32, 0.36]

2) 确定理想解

理想解为各项指标中 Vague 值最大者, 即 $R_i^+ = \{\max[t_i(x_{ij})], \max[1 - f_i(x_{ij})]\}$ 。根据表 3 中 Vague 值可知, Cr12MoV 钢激光淬火 4 个性能指标的理想解为 [1.00, 1.00]、[1.00, 1.00]、[1.00, 1.00]、[1.00, 1.00]。

3) 确定单工艺目标与理想解的相似度

根据(4)式得到单工艺目标与理想解的相似度为^[9]

$$m_{ij} = 1 - \left[\frac{1 - t_j(x_{ij})}{2 + t_j(x_{ij})} + \frac{f_j(x_{ij})}{1 + f_j(x_{ij})} \right], \quad (7)$$

相似度结果见表 4。

表 4 单工艺目标和综合工艺目标的相似度

Table 4 Similarities of single and general process objectives

No.	Single process objective similarity				General objective similarity M_i
	m_{i1}	m_{i2}	m_{i3}	m_{i4}	
1	0.3553	0.2045	0	0	0.1371
2	0.4106	0.4562	0.1919	0.1961	0.3131
3	0.5663	0.4088	0.4327	0.1919	0.3981
4	0	0	0.0840	0.9195	0.2507
5	0.0909	0.0937	0.1541	0.7248	0.2658
6	0.4897	0.2455	0.3017	0.0937	0.2798
7	0.1982	0.1476	0.2455	0.2608	0.2128
8	0.2447	0.2866	0.3764	0.5475	0.3646
9	0.9195	0.8286	0.9160	0.3671	0.7573
10	0.8710	1.000	0.8323	0.8171	0.8810
11	0.4992	0.3899	0.5095	0.7617	0.5390
12	0.8246	0.6270	0.1414	0.1511	0.5587
13	1.000	0.6994	1.000	0.4897	0.7949
14	0.7542	0.7722	0.7945	1.000	0.8303
15	0.6804	0.4944	0.6930	0.6516	0.6283
16	0.3093	0.3336	0.5378	0.3167	0.3757

4.2 确定权重

Cr12MoV 钢激光淬火多工艺目标优化是按照加法原则将各单工艺目标组合成为综合工艺目标,将多目标决策问题转化为单目标决策问题。由于各单工艺目标对综合工艺目标的重要程度不同,需要以权重的形式体现。采用变异系数法确定各单工艺目标的权重。变异系数法是直接利用各项工艺目标包含的信息确定其权重的客观赋权方法,取值差异大的工艺目标能较好地反映工艺目标的差距,因而被赋予较大的权重。

工艺目标的变异系数为

$$V_j = \sigma_j / \bar{x}_j, \quad (8)$$

式中 V_j 为第 j 个工艺目标的变异系数, \bar{x}_j 为第 j 个工艺目标的平均值, σ_j 为第 j 个工艺目标的标准差。工艺目标的权重为

$$\omega_j = V_j / \sum_{j=1}^n V_j. \quad (9)$$

4 个 Cr12MoV 钢激光淬火单工艺目标的相似度平均值、标准差、变异系数分别为 $\bar{x}_j = (0.5134, 0.4367, 0.4819, 0.4684)$ 、 $\sigma_j = (0.3062, 0.2841, 0.3093, 0.3149)$ 、 $V_j = (0.5964, 0.6506, 0.6418, 0.6272)$, 因此 4 个单工艺目标的权重为 $\omega_j = (0.2370, 0.2586, 0.2550, 0.2493)$ 。

4.3 确定综合工艺目标与理想解的相似度

综合工艺目标与理想解的相似度为各单工艺目标与理想解的相似度的加权平均和,即

$$M_i = \sum_{j=1}^n \omega_j m_{ij}, \quad (10)$$

其结果见表 4。

4.4 激光淬火工艺参数优化

由正交试验的均衡搭配性质可知,各参数在不同水平下的平均相似度与其他参数无关,只反映不同水平下该参数对综合工艺目标的影响程度。比较各个水平,相似度值最高的水平为表征综合工艺目标时的最优水平。各工艺参数在不同水平下的相似度平均值见表 5。由表 5 可知,激光功率对淬火层综合性能影响的相似度排序为 $M_{A_3} > M_{A_4} > M_{A_2} > M_{A_1}$, 扫描速度对淬火层综合性能影响的相似度排序为 $M_{B_2} > M_{B_1} > M_{B_3} > M_{B_4}$, 搭接率对淬火层综合性能影响的相似度排序为 $M_{C_3} > M_{C_4} > M_{C_2} > M_{C_1}$, 涂层厚度对淬火层综合性能影响的相似度排序为 $M_{D_2} > M_{D_3} > M_{D_4} > M_{D_1}$ 。因此,推荐的参数组合为 $A_3B_2C_3D_2$, 即激光功率为 1400 kW、扫描速度为 15 m/s、搭接率为 40%、涂层厚度为 60 μm 。从表 5 中的极差还可以知道,4 个工艺参数对激光淬火层综合性能的影响由大到小分别为激光功率、搭接率、扫描速度、涂层厚度。

表 5 工艺参数在不同水平下的平均相似度

Table 5 Average similarity of process parameters at different levels

Factor	Average similarity				Range
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	
A	0.2121	0.3540	0.6840	0.6560	0.4719
B	0.4888	0.5761	0.4446	0.3874	0.1887
C	0.3329	0.4415	0.5876	0.5349	0.2547
D	0.4347	0.5029	0.4802	0.4790	0.0682

4.5 试验验证

对优化的工艺参数组合 $A_3B_2C_3D_2$ 进行验证试验,并将结果与正交试验 Vague 集分析相似度最高组 $A_3B_2C_4D_3$ (第 10 组,相似度为 0.8810) 的试验结果进行对比,见表 6。

表 6 验证试验结果比较

Table 6 Comparison among test experimental results

Process parameter	HRC	Quenching layer depth	Relative wear rate	Corrosion rate
$A_3B_2C_4D_3$	61.6	1.50 mm	0.181%	1.17 $\mu\text{g}/\text{h}$
$A_3B_2C_3D_2$	62.6	1.48 mm	0.163%	1.08 $\mu\text{g}/\text{h}$
Variation range	1.62%	-1.33%	-9.84%	-9.26%

由表 6 可见,优化后的工艺参数使淬火后的材料的表面硬度提高了 1.62%,淬层相对磨损量下降了 9.84%,淬层腐蚀速度下降了 9.26%,淬层深度仅减小了 1.33%,淬火后的材料耐磨和耐腐蚀性能的改善最为显著,证明了优化结果的有效性。通过优化工艺参数得到的淬层组织和形貌如图 1 所示,从上往下依次为过热区、相变区、过渡区和基体。从图中可见,淬火层相变结构均匀,组织致密,说明淬火效果较好。

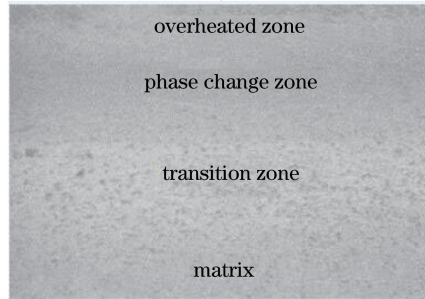


图 1 淬层组织和形貌

Fig. 1 Microstructure and morphology of quenching layers

5 结 论

在本文试验条件下,以淬层表面硬度、淬层深度、耐磨损性能和耐腐蚀性能为综合优化工艺目标,Cr12MoV 工具钢激光淬火的最佳工艺参数为:激光功率 1400 kW、扫描速度 15 mm/s、搭接率 40%、涂层厚度 60 μm 。Cr12MoV 工具钢激光淬火工艺参数对综合性能的影响由大到小依次为激光功率、搭接率、扫描速度、涂层厚度。采用 Vague 集分析方法处理正交试验数据,能有效提高决策的分辨率,使优化结果更加准确可靠。优化工艺参数使材料的淬火硬度提高了 1.62%,淬层相对磨损量下降了 9.84%,淬层腐蚀速度下降了 9.26%,淬层深度仅减小 1.33%。

参 考 文 献

- [1] Yin Yan, Wei Xiaohong, Zhang Ruihua, *et al.* Surface quenching of GCr15 steel by fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 041401.
尹 燕, 魏小红, 张瑞华, 等. GCr15 光纤激光淬火工艺及性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 041401.
- [2] Li Yanli, Li Ling, Liu Xin, *et al.* Study on corrosion resistance property of welding HAZ treated by laser surface quenching[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 071404.
李艳丽, 李 玲, 刘 欣, 等. 激光淬火对焊缝热影响区耐腐蚀性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 071404.
- [3] Zhang Yalong, Xu Xincheng, Yang Xiangdong, *et al.* Effects of laser surface hardening on microstructure and properties of H13 steel[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(8): 53-55.
张亚龙, 徐新成, 杨向东, 等. 激光表面淬火对 H13 钢显微组织及性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(8): 53-55.
- [4] Su Hui, Ma Bing, Yi Yinghui, *et al.* Research on microstructure and hardness of 42CrMo steel by laser quenching[J]. *Weapon Materials Science and Engineering*, 2011, 34(2): 84-86.
苏 辉, 马 冰, 依颖辉, 等. 42CrMo 钢激光淬火组织和硬度的研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2011, 34(2): 84-86.
- [5] Hou Qi, Liu Guangxin, Yang Guang, *et al.* Study on microstructure and wear properties of MoCr cast iron by laser quenching[J]. *Application of Laser*, 2015, 35(6): 657-660.
侯 琦, 刘广鑫, 杨 光, 等. MoCr 铸铁激光淬火组织及磨损性能研究[J]. *应用激光*, 2015, 35(6): 657-660.
- [6] Wu Gang, Song Guangming, Huang Wanjuan. Study on the influence of laser quenching process parameters on the depth and hardness of the layer[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 63-66.
吴 钢, 宋光明, 黄婉娟. 激光淬火工艺参数对层深及硬度影响敏感性研究[J]. *激光技术*, 2007, 31(2): 63-66.
- [7] Lin Jixing, Cao Honggang, Niu Liyuan, *et al.* Optimization of semiconductor laser quenching process for H13 die steel

based on orthogonal experiment[J]. *Application Laser*, 2015, 35(3): 314-318.

林继兴, 曹洪钢, 牛丽媛, 等. 基于正交试验的 H13 模具钢半导体激光淬火工艺优化[J]. *应用激光*, 2015, 35(3): 314-318.

- [8] Wang Wenchang, Xie Chunyang, Kong Dejun. The laser quenching effect of friction and wear properties of boronized layer of Cr12MoV steel[J]. *Journal of Changzhou University (Natural Science Edition)*, 2015, 27(4): 47-52.

王文昌, 谢春洋, 孔德军. 激光淬火对 Cr12MoV 钢渗硼层摩擦与磨损性能的影响[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2015, 27(4): 47-52.

- [9] Li Weisheng, Liu Dong. Evaluation of urban environmental air quality based on contact number Vague set method[J]. *China Science and Technology Information*, 2015, 17(6): 53-55.

李胃胜, 刘冬. 基于联系数 Vague 集方法的城市环境空气质量评价[J]. *中国科技信息*, 2015, 17(6): 53-55.

- [10] Wang Hongxu. The definition and transformation formula of single valued data into Vague data[J]. *Computer Engineering and Application*, 2009, 45(18): 42-44.

王鸿绪. 单值数据转化为 Vague 值数据的定义和转化公式[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(18): 42-44.