

灰色关联改进 TOPSIS 的二维超声挤压 表面质量研究

任元超, 郑建新, 段玉涛

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: **目的** 获得二维超声挤压最优工艺参数, 并研究工艺参数以及其交互作用对工件表面质量的影响。**方法** 采用正交试验法对 7075-T651 铝合金进行二维超声挤压加工试验, 运用熵权法确定表面粗糙度和显微硬度的影响权重, 结合灰色关联法和 TOPSIS 法构建最优表面质量评价模型, 以此获得最佳表面质量时的最优工艺参数, 并基于极差分析获得工艺参数以及其交互作用对工件表面质量的影响结果。**结果** 经二维超声挤压加工后, 零件表面粗糙度值显著降低, 表层显微硬度大幅提高, 建立的评价模型可准确获得最优工艺参数。**结论** 最优工艺参数为: 静压力 300 N, 挤压速度 30 m/min, 进给量 0.1 mm/r。此时表面粗糙度 R_a 值约为 0.41 μm , 显微硬度约为 378HV。工艺参数间的交互作用对零件表面粗糙度、显微硬度和表面综合质量的影响远大于主效应, 对表面综合质量起主要影响作用的是挤压速度分别与静压力、进给量间的交互作用。

关键词: 二维超声挤压; 表面质量; TOPSIS 法; 灰色关联分析法; 熵权法

中图分类号: TG376.3; TG663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0121-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.020

Surface Quality in Two-dimensional Ultrasonic Extrusion Process with TOPSIS Improved by Gray Relational Analysis

REN Yuan-chao, ZHENG Jian-xin, DUAN Yu-tao

(School of Mechanical & Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain optimal process parameters, and study effects of process parameters and their interactions on surface quality of workpieces. 2D ultrasonic extrusion processing test was performed to 7075 aluminum alloy in the method of orthogonal test. Influence weight of surface roughness and microhardness was determined in entropy weight method. Optimal evaluation model of surface quality was built by combining grey correlation method and TOPSIS method. Optimal process parameters for the best surface quality were obtained. The effects of process parameters and their interactions on the

收稿日期: 2017-11-03; 修订日期: 2017-12-05

Received: 2017-11-03; Revised: 2017-12-05

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (16A460006); 国家自然科学基金项目 (51005071, 51575163)

Fund: Supported by the Key Scientific Research Projects of Henan Province (16A460006), National Natural Science Foundation of China (51005071, 51575163)

通讯作者: 郑建新 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事精密与特种加工技术和表面工程技术方面的研究。

Corresponding author: ZHENG Jian-xin (1979—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and non-conventional machining, surface engineering technology.

surface quality were studied based upon range analysis. The surface roughness values decreased substantially and the surface microhardness increased significantly after 2D ultrasonic extrusion processing. The optimal process parameters could be obtained accurately by the as-built evaluation model. Provided with static force of 300 N, extrusion speed of 30 m/min and feed-rate of 0.1 mm/r, the optimal surface quality may be obtained with surface roughness R_a of 0.41 μm and microhardness of nearly 378HV. The effect of interactions among processing parameters on surface roughness, microhardness and surface quality is far greater than the main effect. The interaction between static force and extrusion speed as well as the interaction between extrusion speed and feed-rate play a major role on surface overall quality.

KEY WORDS: 2D ultrasonic extrusion; surface quality; TOPSIS method; gray relational analysis; entropy weight method

7075 铝合金是典型的高强度、高硬度材料,常用于航空航天、武器装备等领域。在恶劣环境中,7075 铝合金零件常因其表面的腐蚀、磨损而导致过早失效^[1]。超声表面强化工艺,如超声深滚加工、超声挤压加工等,可有效提高零件的表面质量,如降低零件表面粗糙度、提高表面显微硬度和残余应力等^[2-5],从而提高零件的耐疲劳性、耐磨性和耐腐蚀性,达到提高零件使用寿命的目的^[6-7]。

零件的表面质量受挤压工艺参数的影响很大。当前的超声表面强化工艺研究主要集中在工艺参数对表面粗糙度、显微硬度或残余应力等单一指标的影响^[8-9],对表面综合质量的影响则有待进一步探讨。一般情况下,由于形成机理的差异,工艺参数对表面粗糙度、显微硬度的影响规律是不同的,有时甚至是矛盾的^[10-11]。要获得最优的表面质量,则需要进行多目标综合决策,研究工艺参数对超声强化后的表面质量的综合影响。

在多目标综合决策方法中,TOPSIS 分析法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)、灰色关联分析法(Gray Relational Analysis, GRA)等得到广泛的应用^[12-13]。本文将对 7075-T651 铝合金轴件进行二维超声挤压加工,选取表面粗糙度和显微硬度作为评价指标,运用熵权法进行客观赋权,结合灰色关联分析采用 TOPSIS 法对试验结果进行评价和研究,获得最优工艺参数组合。通过极差分析,研究和讨论各加工工艺参数及其交互作用对表面粗糙度、显微硬度和综合表面质量的影响,为超声挤压强化加工的工艺优化提供理论依据。

1 试验设计

1.1 试验装置与试验材料

在 CAK50186di 数控车床上进行二维超声振动挤压加工试验,单激励纵弯复合振动声学系统安装在车床刀架上。加工原理如图 1 所示,超声振动谐振频率设置为 20.6 kHz,硬质合金工具头纵向振动振幅约为

9.6 μm ,横向振动振幅约为 4.9 μm 。

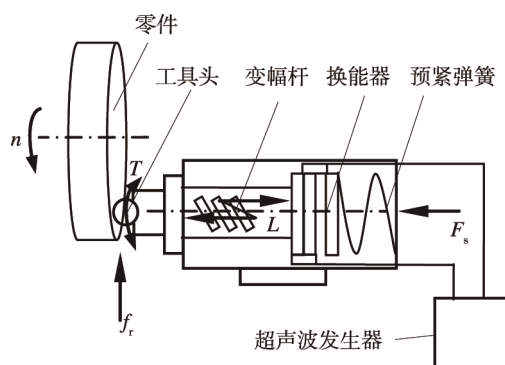


图 1 加工原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of machining principle

工件为供应态 7075-T651 铝合金棒料。在二维超声挤压加工前,以相同的切削工艺参数对工件进行端面切削预处理^[14]。加工后工件采用 SURTRONIC3+ 粗糙度仪测量表面粗糙度值,采用 MH5 硬度计测量表面显微硬度值。在工件圆周方向取 5 个点进行测量,以其平均值作为测量值。预处理后工件长 20 mm,直径 $\phi 90$ mm,表面粗糙度约为 1.72 μm ,维氏硬度约为 225HV。

1.2 试验方案与试验结果

试验中声学系统的谐振频率和振幅均不变,考察静压力 F_s 、进给量 f_r 、挤压速度 v 以及交互作用对试件加工后的表面粗糙度 R_a 值和显微硬度 HV 值的综合影响,并确定最佳工艺方案。根据正交表 $L_{27}(3^{13})$ 实施试验,并将加工参数和试验结果列于表 1。

表 1 表明,经二维超声挤压后,7075-T651 铝合金表面粗糙度值显著降低,降幅最低为 56.4%,最高为 76.2%;而表层显微硬度大幅提高,增幅最低为 45.8%,最高为 74.2%。从表面粗糙度来看,第 20 组试验的工艺效果最佳,但其显微硬度增幅仅为 68%;从显微硬度来看,第 19 组试验最佳,但其表面粗糙度值降幅仅为 58.7%。

表 1 试验方案与试验结果
Tab.1 Test program and test results

No.	F_s/N	$v/(m \cdot min^{-1})$	$f_t/(mm \cdot r^{-1})$	$Ra/\mu m$	HV
1	220	30	0.06	0.58	334
2	220	30	0.10	0.51	345
3	220	30	0.14	0.44	378
4	220	50	0.06	0.45	344
5	220	50	0.10	0.51	383
6	220	50	0.14	0.58	342
7	220	70	0.06	0.58	373
8	220	70	0.10	0.55	364
9	220	70	0.14	0.62	390
10	260	30	0.06	0.6	369
11	260	30	0.10	0.44	355
12	260	30	0.14	0.54	361
13	260	50	0.06	0.55	355
14	260	50	0.10	0.51	387
15	260	50	0.14	0.63	378
16	260	70	0.06	0.48	369
17	260	70	0.10	0.44	349
18	260	70	0.14	0.69	346
19	300	30	0.06	0.71	392
20	300	30	0.10	0.41	378
21	300	30	0.14	0.42	329
22	300	50	0.06	0.45	347
23	300	50	0.10	0.61	366
24	300	50	0.14	0.59	328
25	300	70	0.06	0.64	383
26	300	70	0.10	0.63	373
27	300	70	0.14	0.75	360

2 最优表面质量评价模型

TOPSIS 分析法是依靠评价对象到最优解、最劣解的综合距离来进行排序,如果评价对象离最优解最近,同时离最劣解又比较远,则为最好;否则为最差^[13]。

由于传统的 TOPSIS 法不能体现方案间的相似性,且对无典型分布规律的有限样本数据进行分析时难以保证有效决策,而灰色关联分析法(Gray Relational Analysis, GRA)能使用有限样本所提供的全部信息,等同对待各评价指标,因此本文将两种多目标决策分析方法相结合,来确定获得最优表面质量的工艺方案。

2.1 试验数据处理

将表面粗糙度和显微硬度两个评价指标下的试验结果组合成决策矩阵 $X=(x_{ij})_{27 \times 2}$ 。采用式(1)和式(2)对表面粗糙度和显微硬度进行归一化处理,其结果组成矩阵 $D=(d_{ij})_{27 \times 2}$,并列入后文表 2 中。

$$d_{i1} = \frac{\max(x_{i1}) - x_{i1}}{\max(x_{i1}) - \min(x_{i1})} \quad i=1,2,\dots,27 \quad (1)$$

$$d_{i2} = \frac{x_{i2} - \min(x_{i2})}{\max(x_{i2}) - \min(x_{i2})} \quad i=1,2,\dots,27 \quad (2)$$

式中: x_{i1} 为第 i 组试验获得的表面粗糙度值; x_{i2} 为第 i 组试验获得的显微硬度值; d_{i1} 和 d_{i2} 分别为第 i 组试验表面粗糙度和显微硬度的归一化处理结果。

2.2 权重确定

表面粗糙度和显微硬度对零件使用性能的影响重要性程度不同,因而其权重系数也不同。熵权法是依靠各指标变异程度,并利用信息熵求出各指标的客观权重,可有效避免主观不确定性的缺点^[15]。求各指标的权重可先通过式(3)求信息熵,然后再运用式(5)求对应的权重 θ 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (3)$$

$$p_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}} \quad (4)$$

$$\theta_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (5)$$

式中: e_j 表示与第 j 个指标有关的信息熵, $j=1$ 或 2,若 $d_{ij}=0$,则定义 $E_{ij}=0$; n 表示试验组数, $n=27$; θ_j 表示与第 j 个指标有关的权重值; m 表示评价指标的数量,这里 $m=2$ 。

经计算,确定表面粗糙度的权重值 $\theta_1=0.417$,显微硬度的权重值 $\theta_2=0.583$ 。

2.3 灰色关联系数计算

灰色关联系数 ε 反映了两变量之间的相关联系,可采用式(6)进行计算。

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\min_i \min_j |d_i^0 - d_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |d_i^0 - d_{ij}|}{|d_i^0 - d_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |d_i^0 - d_{ij}|} \quad (6)$$

式中: d_i^0 为参照数,一般取最优组,这里取 $d_i^0=1$; ζ 为分辨系数, $\zeta \in [0, 1]$,其取值取决于 Δ (由式(7)计算),由于 $\Delta=0.4425$,有 $2 < 1/\Delta < 3$,故 $\zeta=2\Delta=0.885$ ^[16]。计算结果组成矩阵 $\varepsilon=(\varepsilon_{ij})_{27 \times 2}$,具体结果如表 2 所示。

$$\Delta = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^{27} |d_i^0 - d_{ij}| \quad (7)$$

2.4 决策矩阵加权和最优/劣解确定

基于灰色关联系数矩阵, ε 利用式(8)进行赋权处理,得到加权后决策矩阵 $W=(w_{ij})_{27 \times 2}$,具体计算结

果如表 2 所示。

$$W = \varepsilon \begin{bmatrix} \theta_1 & 0 \\ 0 & \theta_2 \end{bmatrix} \tag{8}$$

由表 2 可知：在加权后决策矩阵 W 中，表面粗糙度最大值为 0.417，最小值为 0.196；加权后的最大显微硬度代表值为 0.583，最小代表值为 0.274。因此，最优解为 $w^+=(0.417, 0.583)$ ，最劣解为 $w^-(0.196, 0.274)$ 。

2.5 贴近度计算与排序

第 i 组数据到正理想解和负理想解的距离，即正偏差 s_i^+ 和负偏差 s_i^- ，由式（9）和式（10）确定。

$$s_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (w_{ij} - w_j^+)^2} \tag{9}$$

$$s_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (w_{ij} - w_j^-)^2} \tag{10}$$

式中： w_j^+ 和 w_j^- 分别表示集合 w^+ 和 w^- 的第 j 个元素^[13]。
由此确定 i 个工艺方案的相对贴近度 c_i ：

$$c_i = \frac{s_i^-}{s_i^+ + s_i^-} \tag{11}$$

贴近度 c 越大表示离最优解越近且离最劣解越远^[13]。贴近度及排序结果如表 2 所示。贴近度 c 反映了零部件表面综合质量好坏，其值越大表示表面综合质量越好。

由表 2 可知，第 20 组贴近度 c 最大，因而在 27 组试验中获得最佳表面质量的工艺参数为 $F_s=300\text{ N}$ ， $v=30\text{ m/min}$ ， $f_t=0.1\text{ mm/r}$ 。此时，表面粗糙度值降幅为 76.2%，显微硬度值增幅为 68%。

表 2 引入 GRA 后的 TOPSIS 分析结果
Tab.2 Analysis results of TOPSIS after GRA being introduced

No.	Test results		D		ε		W		Deviation		C	Order
	Ra	HV	Ra	HV	Ra	HV	Ra	HV	s_i^+	s_i^-		
1	0.58	334	0.500	0.094	0.639	0.494	0.266	0.288	0.331	0.072	0.179	25
2	0.51	345	0.706	0.266	0.751	0.546	0.313	0.319	0.284	0.126	0.306	22
3	0.44	378	0.912	0.781	0.909	0.802	0.379	0.467	0.122	0.267	0.687	3
4	0.45	344	0.882	0.250	0.883	0.541	0.368	0.316	0.272	0.177	0.395	17
5	0.51	383	0.706	0.859	0.751	0.863	0.313	0.503	0.131	0.258	0.663	4
6	0.58	342	0.500	0.219	0.639	0.531	0.266	0.310	0.312	0.079	0.203	24
7	0.58	373	0.500	0.703	0.639	0.749	0.266	0.437	0.210	0.178	0.458	11
8	0.55	364	0.588	0.563	0.682	0.669	0.285	0.390	0.234	0.146	0.385	18
9	0.62	390	0.382	0.969	0.589	0.966	0.246	0.563	0.173	0.294	0.630	5
10	0.6	369	0.441	0.641	0.613	0.711	0.256	0.415	0.233	0.153	0.396	16
11	0.44	355	0.912	0.422	0.909	0.605	0.379	0.353	0.234	0.200	0.461	10
12	0.54	361	0.618	0.516	0.698	0.646	0.291	0.377	0.242	0.140	0.368	19
13	0.55	355	0.588	0.422	0.682	0.605	0.285	0.353	0.266	0.119	0.309	21
14	0.51	387	0.706	0.922	0.751	0.919	0.313	0.536	0.114	0.287	0.715	2
15	0.63	378	0.353	0.781	0.578	0.802	0.241	0.467	0.211	0.199	0.486	9
16	0.48	369	0.794	0.641	0.811	0.711	0.338	0.415	0.186	0.200	0.519	8
17	0.44	349	0.912	0.328	0.909	0.568	0.379	0.331	0.254	0.192	0.430	12
18	0.69	346	0.176	0.281	0.518	0.552	0.216	0.322	0.330	0.052	0.136	27
19	0.71	392	0.118	1.000	0.501	1.000	0.209	0.583	0.208	0.310	0.598	6
20	0.41	378	1.000	0.781	1.000	0.802	0.417	0.467	0.116	0.294	0.718	1
21	0.42	329	0.971	0.016	0.968	0.473	0.404	0.276	0.307	0.208	0.403	15
22	0.45	347	0.882	0.297	0.883	0.557	0.368	0.325	0.263	0.180	0.406	14
23	0.61	366	0.412	0.594	0.601	0.685	0.250	0.400	0.248	0.137	0.356	20
24	0.59	328	0.471	0.000	0.626	0.469	0.261	0.274	0.347	0.065	0.158	26
25	0.64	383	0.324	0.859	0.567	0.863	0.236	0.503	0.198	0.233	0.541	7
26	0.63	373	0.353	0.703	0.578	0.749	0.241	0.437	0.229	0.169	0.425	13
27	0.75	360	0	0.500	0.469	0.639	0.196	0.373	0.305	0.099	0.244	23

3 工艺参数及交互作用对表面质量的影响

基于试验结果和 TOPSIS 分析结果，采用极差分析方法确定工艺参数以及其两两之间交互作用对表面粗糙度、显微硬度以及综合表面质量的影响。极差分析时，以因素 A、B 和 C 分别代表静压力、挤压速度和进给量，相应因素之间的交互作用分别表示为 A×B、A×C 和 B×C。

3.1 对表面粗糙度的影响

为方便分析工艺参数以及其两两之间的交互作用对表面粗糙度的影响，将极差分析结果列于表 3 所示。表 3 中， k_1 、 k_2 和 k_3 分别表示每一列上的因素在同一水平上试验结果的均值， R 表示极差，下同。表 3 表明：主效应和交互效应对表面粗糙度影响的主次顺序依次是 B×C、B、C、A×B、A×C 和 A，且挤压

速度与进给量这两个因素间的交互作用对表面粗糙度的影响最显著。

3.2 对显微硬度的影响

工艺参数以及其之间的交互作用对显微硬度的影响结果列于表 4。表 4 极差 R 值表明：主效应和交互效应对显微硬度影响的主次顺序依次是 A×B、A×C、B×C、C、B 和 A，交互作用的影响显著高于主效应，且静压力和挤压速度的交互作用最显著。

3.3 对综合表面质量的影响

以贴近度 c 表征综合表面质量，则可确定各工艺参数及其交互作用对综合表面质量的影响，结果如表 5 所示。表 5 极差 R 值表明：主效应和交互效应对表面综合质量影响的主次顺序依次是 A×B、B×C、A×C、C、B 和 A。交互作用的影响同样显著高于主效应，且静压力和挤压速度、挤压速度和进给量的交互作用最显著。

表 3 表面粗糙度极差分析
Tab.3 Range analysis of surface roughness

Factor	A	B	A×B		C	A×C		B×C	
k_1	0.536	0.517	0.532	0.582	0.560	0.569	0.529	0.590	0.620
k_2	0.542	0.542	0.571	0.521	0.512	0.551	0.581	0.541	0.540
k_3	0.579	0.598	0.553	0.553	0.584	0.537	0.547	0.526	0.497
R	0.043	0.081	0.061		0.072	0.052		0.123	

表 4 显微硬度极差分析
Tab.4 Range analysis of microhardness

Factor	A	B	A×B		C	A×C		B×C	
k_1	361.44	360.11	351.33	365.89	362.89	361.44	351.00	358.78	369.67
k_2	363.22	358.89	363.33	359.11	366.67	355.78	366.56	357.78	361.22
k_3	361.78	367.44	371.78	361.44	356.89	369.22	368.89	369.89	355.56
R	1.78	8.56	20.44		9.78	18.22		14.33	

表 5 贴近度极差分析
Tab.5 Range analysis of close degree

Factor	A	B	A×B		C	A×C		B×C	
k_1	0.434	0.457	0.353	0.432	0.422	0.391	0.383	0.362	0.435
k_2	0.424	0.410	0.411	0.452	0.495	0.376	0.432	0.401	0.428
k_3	0.428	0.419	0.522	0.402	0.368	0.519	0.471	0.523	0.423
R	0.009	0.047	0.169		0.127	0.143		0.161	

3.4 讨论

通过极差分析可知，用二维超声挤压 7075 铝合金时，交互作用的影响普遍比主效应的影响大，但其影响的主次顺序不一样，这主要是由表面粗糙度和显微硬度的成形机理不同而引起的。

在二维超声挤压加工中，工具头在静压力作用下

以超声频率冲击零件表面，隆起的表面微观波峰压入凹坑，可以有效降低表面粗糙度值。在超声频率一定的情况下，挤压速度决定了沿工件表面圆周方向上相邻两次冲击凹坑中心的距离，而进给量决定了沿轴向相邻两次冲击凹坑中心的距离。在冲击作用下产生的各个凹坑和隆起，形成了独特的表面微结构，决定了表面微观形貌，因而挤压速度和进给量间的交互作用

对表面粗糙度的影响最大。

承受静压力的工具头对工件表面做超声频冲击,使其表层产生塑性变形,并伴随着冷作硬化现象。因塑性变形做功产生的热及热传播所造成的弱化现象又会降低表层显微硬度。冷作硬化程度受超声冲击与静压力的影响,弱化程度受温度、热传播时间等因素(主要取决于挤压速度)的影响,因而静压力与挤压速度的交互作用对表层显微硬度的影响很大。

贴近度是对表面粗糙度和显微硬度的综合评价,因显微硬度的权重值略大于表面粗糙度的权重值,因而静压力与挤压速度的交互作用对贴近度的影响略大于挤压速度与进给量的交互作用。

4 结论

1) 经二维超声挤压后, 7075-T651 铝合金表面粗糙度值显著降低, 降幅最低为 56.4%, 而表层显微硬度大幅提高, 增幅最低为 45.8%。

2) 当静压力为 300 N、挤压速度为 30 m/min、进给量为 0.1 mm/r 时, 工件综合表面质量可达到最优。此时表面粗糙度值约为 0.41 μm , 显微硬度值约为 378HV。

3) 交互作用对表面粗糙度、显微硬度和表面综合质量的影响普遍比主效应的影响大。对表面粗糙度的影响最显著的是挤压速度与进给量这两个因素间的交互作用, 对显微硬度影响最显著的是静压力与挤压速度这两个因素间的交互作用, 对表面综合质量影响最大的是挤压速度分别与静压力、进给量间的交互作用。

参考文献:

- [1] RYL J, WYSOCKA J, JARZYŃKA M, et al. Effect of Native Air-formed Oxidation on the Corrosion Behavior of AA 7075 Aluminum Alloys [J]. Corrosion Science, 2014, 87(5): 150-155.
- [2] ZHANG Q J, CAO J G, WANG H Y. Ultrasonic Surface Strengthening of Train Axle Material 30CrMoA [J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 853-857.
- [3] LU L X, SUN J, LI L, et al. Study on Surface Characteristics of 7050-T7451 Aluminum Alloy by Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9-12): 2533-2539.
- [4] 邓海鹏, 于影霞. 超声冲击对焊接接头表面质量的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 208-213.
DENG Hai-peng, YU Ying-xia. Effect of Ultrasonic Impact on the Surface Quality of Welded Joint[J]. Surface Technology, 2017, 46(2): 208-213.
- [5] LOU Y, HE J S, CHEN H, et al. Effects of Vibration Amplitude and Relative Grain Size on the Rheological Behavior of Copper during Ultrasonic-assisted Micro-extrusion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5-8): 2421-2433.
- [6] LI L, KIM M, LEE S, et al. Influence of Multiple Ultrasonic Impact Treatments on Surface Roughness and Wear Performance of SUS301 Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 307: 517-524.
- [7] SINGH V, PANDEY V, KUMAR S, et al. Effect of Ultrasonic Shot Peening on Surface Microstructure and Fatigue Behavior of Structural Alloys[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2016, 69(2): 295-301.
- [8] HOU Y L, LIU C S, LIU S Q. Effect of Processing Parameters on Surface Roughness in Ultrasonic Deep Rolling 6061-T6 Aluminum Alloy with Longitudinal-Torsional Vibration[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 3773(722): 60-63.
- [9] 陈利钦, 项彬, 任学冲, 等. 表面超声滚压处理工艺对高速列车车轴钢表面状态的影响[J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 96-101.
CHEN L Q, XIANG B, REN X C, et al. Influences of Surface Ultrasonic Rolling Processing Parameters on Surface Condition of Axle Steel Used in High Speed Train[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 96-101.
- [10] 赵建, 王兵, 刘战强. 旋转超声滚压加工中的滚压力与滚压深度及表面形貌研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(4): 696-704.
ZHAO J, WANG B, LIU Z Q. The Investigation into Burnishing Force, Burnishing Depth and Surface Morphology in Rotary Ultrasonic Burnishing[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(4): 696-704.
- [11] 宋锦春, 贾志强, 张敏鑫. 超声滚压光整加工参数对 45 钢表面粗糙度和硬度的影响[J]. 制造技术与机床, 2016(11): 85-89.
SONG J C, JIA Z Q, ZHANG M X. Influence of Ultrasonic Rolling and Finishing Processing Parameters on Surface Roughness and Hardness of 45 Steel[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(11): 85-89.
- [12] WANG P, ZHU Z, WANG Y. A Novel Hybrid MCDM Model Combining the SAW, TOPSIS and GRA Methods Based on Experimental Design[J]. Information Sciences, 2016, 345: 27-45.
- [13] WANG E, ALP N, SHI J, et al. Multi-criteria Building Energy Performance Benchmarking through Variable Clustering Based Compromise TOPSIS with Objective Entropy Weighting[J]. Energy, 2017, 125: 197-210.
- [14] 段玉涛. 纵-弯复合振动超声挤压加工表面成形机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.
DUAN Y T. Research on Surface Formation Mechanism of Ultrasonic Extrusion Process with Longitudinal-flexural Vibration[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2016.
- [15] LIU Y, WANG J, LIU G Z, et al. The Generalized Product Quality's Comprehensive Evaluation Method Based on Entropy Weight Method[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1950(569): 662-665.
- [16] 东亚斌, 段志善. 灰色关联度分辨系数的一种新的确定方法[J]. 西安建筑科技大学学报, 2008, 40(4): 589-592.
DONG Y B, DUAN Z S. A New Determination Method for Identification Coefficient of Grey Relational Grade [J]. J Xi'an Univ of Arch & Tech, 2008, 40(4): 589-592.