

7075 铝合金二维超声挤压加工的灰色关联分析

郑建新 任元超

(河南理工大学机械与动力工程学院, 焦作 454003)

文 摘 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, 运用灰色关联分析法研究工艺参数对表面粗糙度和显微硬度的综合影响, 采用多元线性回归方法构建灰色关联度预测模型, 并基于预测模型通过规划求解确定最优工艺参数。结果表明: 各工艺参数对表面粗糙度、显微硬度和灰色关联度的影响规律不同, 基于灰色关联度排序获得的工艺参数值也并非最优值; 建立的灰色关联度模型可对试验进行准确预测, 基于该模型进行非线性规划求解获得的最优工艺参数为静压力 220 N, 挤压速度 30 m/min, 进给量 0.14 mm/r, 此时表面粗糙度 Ra 值约为 0.44 μm , 显微硬度约为 637 HL。

关键词 二维超声挤压, 灰色关联分析, 表面质量, 7075 铝合金

中图分类号: TB559, TG663

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2018.01.014

Grey Relational Analysis on Two Dimensional Ultrasonic Extrusion 7075 Aluminum Alloy

ZHENG Jianxin REN Yuanchao

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

Abstract The orthogonal test of two dimensional ultrasonic extrusion 7075 aluminum alloy were carried out. The comprehensive influence of process parameters on the surface roughness and micro hardness were studied with grey relational analysis. The prediction model of the grey relational degree was constructed with the multiple linear regression method. The optimal process parameters were determined based on the prediction model. The results indicate that the influence of the process parameters on the surface roughness, micro hardness and gray relational degree are different, and process parameters obtained by ranking the grey relational degree are not the optimal value. The prediction model of grey relational degree can accurately forecast the test results, and the optimal process parameters obtained by the nonlinear programming solver based on the model. When the static force is 220 N, the extrusion speed is 30 m/min and the feed-rate is 0.14 mm/r, the optimal surface quality may be obtained with the surface roughness of Ra 0.44 μm and the microhardness of 637 HL.

Key words Two dimensional ultrasonic extrusion, Grey relational analysis, Surface quality, 7075 Aluminum alloy

0 引言

7075 铝合金由于具有比强度高、断裂韧性好等优点, 在航空航天和兵器工业中得到广泛应用。由于其服役环境严苛, 常因疲劳、磨损和腐蚀等问题引起过早失效^[1]。零件的失效大多从表层开始, 为提高 7075 铝合金零件的服役寿命, 在零件制造时应设法提高其表面质量, 如降低表面粗糙度值, 提高表层显微硬度, 并在表层形成适度的残余压应力等。

超声表面强化工艺是基于传统的表面机械强化工艺, 如喷丸、挤压和滚压等, 通过对工具施加纵向超声振动, 对零件表面进行超声频撞击而强化零件表面^[2-5]。R.Ramos 等人^[6]对 7475-T7351 铝合金超声喷丸处理与普通喷丸处理进行对比, 发现超声喷丸处理可以降低表面粗糙度、提高表层硬度、增加疲劳寿命。郑建新等人^[7]对 6061-T6 铝合金进行超声深滚处理, 结果表明超声深滚加工可明显降低表面粗糙

收稿日期: 2017-06-28

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (No.16A460006); 国家自然科学基金项目 (No.51005071, 51575163)

第一作者简介: 郑建新, 1979 年出生, 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工作。E-mail: zhengjx@hpu.edu.cn

度,大幅增加表面显微硬度。张勤俭等人^[8]进行超声挤压 30CrMoA 车轴钢试验,试验发现超声挤压加工可提高金属材料的疲劳强度和使用寿命。

超声强化后零件的表面质量由多个指标来综合衡量,而这些性能指标又受约于多个加工工艺参数。如何选择合理的加工方案使多个评价指标达到最优,是工程应用中必须考虑的问题。

为了解决多目标优化的难题,给决策提供科学的依据与方法,邓聚龙教授于 1982 年提出了灰色系统理论和灰色关联分析法(GRA)^[9],在多目标响应方面得到了广泛运用^[10-11]。

本文将采用正交试验法对 7075-T651 铝合金进行二维超声挤压加工试验,运用灰色关联分析法对试验结果进行综合评定,研究各加工工艺参数对表面粗糙度和显微硬度的综合影响,优选工艺方案并建立灰色关联度数学模型,以供生产应用。

1 试验设计

1.1 试验材料及设备

在 CAK50186di 数控车床上将自主研发的单激励纵弯复合振动二维超声振动挤压加工声学系统安装在车床刀架上,加工原理如图 1 所示。超声振动声学系统的谐振频率为 20.6 kHz,工具头纵向振动振幅 $L=9.6 \mu\text{m}$,横向振动振幅 $T=4.9 \mu\text{m}$ 。

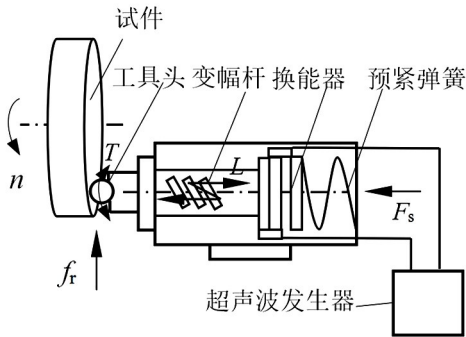


图 1 加工原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of machining principle

材料为供应态 7075-T651 铝合金棒料,化学成分如表 1 所示。

表 1 7075-T651 化学成分

Tab.1 Chemical composition of 7075-T651 质量分数/%									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ti+Zr	Al
≤0.4	≤0.5	1.2~2.0	≤0.3	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	≤0.2	≤0.28	余

7075-T651 铝合金棒料直径为 $\Phi 90 \text{ mm}$,长度为 20 mm。每次试验前先对棒料端面在相同切削用量下进行端面车削,然后进行二维超声挤压加工试验。

采用 SURTRONIC3+粗糙度测量仪测量试件表面粗糙度 Ra 值;采用配备 DL 探头的 TH160 便携式硬

度测试仪测试试件里氏硬度 HL 值。在被加工表面上均布选取 7 个测试点,测试用竖直冲击方式,测试值取 7 个测试点的均值。经车削后试件表面粗糙度 Ra 测试值约为 $1.72 \mu\text{m}$,显微硬度约为 512 HL。

1.2 试验方案及结果

主要研究在二维超声挤压加工中静压力 F_s 、进给量 f_r 和挤压速度 v 三个挤压工艺参数对试件加工后的表面粗糙度 Ra 值和表层显微硬度 HL 值的影响。每个因素各安排三个水平,选用正交表 $L_9(3^4)$ 安排试验,试验方案和结果如表 2 所示。

表 2 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,而表层显微硬度大幅提高。

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Test matrix and results

No	F_s/N	$v/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	$f_r/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	$Ra/\mu\text{m}$	HL
1	220	30	0.06	0.58	605
2	220	50	0.1	0.51	640
3	220	70	0.14	0.62	645
4	260	30	0.1	0.44	620
5	260	50	0.14	0.63	637
6	260	70	0.06	0.48	630
7	300	30	0.14	0.42	601
8	300	50	0.06	0.45	615
9	300	70	0.1	0.63	633

2 灰色关联分析

2.1 灰色关联度计算

由于试验结果不具有相同的增减性,需要对试验结果进行信噪比计算,计算后的结果越大表示相应质量越好。

计算表面粗糙度 Ra 的信噪比和显微硬度 HL 的信噪比 S/N 分别选用式(1)和式(2)^[12]。计算结果如表 3 所示。

$$S/N = -10 \times \lg X_i^2 \quad (1)$$

$$S/N = -10 \times \lg \frac{1}{Y_i^2} \quad (2)$$

式中, X_i 表示第 i 组试验获得的表面粗糙度 Ra 值; Y_i 表示第 i 组试验获得的显微硬度 HL 值。

经信噪比处理后的结果量纲不同,不能直接进行灰色关联度分析,故需要使用式(3)^[12]将其标准化。计算结果如表 3 所示。

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}} \quad (3)$$

式中, x_{ij} 表示第 j 个标准的第 i 个试验信噪比值的标准化值, y_{ij} 表示第 j 个标准的第 i 个试验信噪比 S/N

的值;这里 $i=1\sim 9, j=1\sim 2$ 。

计算灰色关联度 (GRD) γ_j 前必须先计算灰色关联系数 $\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{ij}$ 采用式 (4)^[13] 进行计算。计算结果如表 3 所示。

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}{|x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|} \quad (4)$$

式中, x_i^0 为参照数, 一般取最优组, 这里取 $x_i^0 = 1$; ξ 为分辨系数, $\xi \in [0, 1]$, 其取值可根据下列计算:

$$\Delta = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |x_i^0 - x_{ij}| \quad (5)$$

式中, m 表示试验组数, $m=9$; n 表示评价标准个数, $n=2$; Δ 表示差值绝对值的均值。

由式 (5) 知, $\Delta = 0.493$ 。

由于 $2 < 1/\Delta < 3$, 故 $\xi = 2\Delta = 0.986$ ^[14]。

使用式 (6) 进行灰色关联度 γ_j 计算, 结果如表 3 所示。

$$\gamma_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

表 3 灰色关联度分析结果

Tab.3 Analysis results of GRD

No	试验结果		S/N		x_{ij}		ε_{ij}		γ_j	排 序
	Ra	HL	Ra	HL	Ra	HL	Ra	HL		
1	0.58	605	4.731	55.635	0.204	0.094	0.553	0.521	0.537	9
2	0.51	640	5.849	56.124	0.521	0.890	0.673	0.900	0.786	1
3	0.62	645	4.152	56.191	0.039	1.000	0.507	1.000	0.753	3
4	0.44	620	7.131	55.848	0.885	0.441	0.896	0.638	0.767	2
5	0.63	637	4.013	56.083	0.000	0.823	0.496	0.848	0.672	7
6	0.48	630	6.375	55.987	0.671	0.667	0.750	0.748	0.749	4
7	0.42	601	7.535	55.577	1.000	0.000	1.000	0.496	0.748	5
8	0.45	615	6.936	55.778	0.830	0.326	0.853	0.594	0.723	6
9	0.63	633	4.013	56.028	0.000	0.734	0.496	0.788	0.642	8

灰色关联度反映了工艺参数对零部件表面质量综合影响的好坏, 其值越大表示表面质量越好。对灰色关联度进行排序可知, 第 2 组灰色关联度值最大, 说明它是这 9 组试验中最佳的参数优化组合, 即获得最佳表面质量的工艺参数为: $F_s = 220 \text{ N}, v = 50 \text{ m/min}, f_r = 0.1 \text{ mm/r}$ 。

2.2 各工艺参数对加工质量的影响

基于试验结果可分析工艺参数对加工质量的影响。结合表 2 和表 3, 确定表面粗糙度、显微硬度和灰色关联度的极差分析结果, 如表 4~表 6 所示。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 1 期

表 4 表明, 挤压速度对表面粗糙度的影响最大, 其次是静压力, 进给量的影响最小。获得最小表面粗糙度值时的工艺参数为: $F_s = 300 \text{ N}, v = 30 \text{ m/min}, f_r = 0.06 \text{ mm/r}$ 。表 5 表明, 挤压速度对显微硬度的影响最大, 其次是进给量, 静压力与进给量的影响较接近。获得最高显微硬度值时的工艺参数为: $F_s = 220 \text{ N}, v = 70 \text{ m/min}, f_r = 0.1 \text{ mm/r}$ 。表 6 表明, 进给量对灰色关联度的影响最大, 其次是挤压速度和进给量, 且两者较为接近。获得最大灰色关联度时的工艺参数为: $F_s = 260 \text{ N}, v = 50 \text{ m/min}, f_r = 0.1 \text{ mm/r}$ 。

表 4 表面粗糙度极差分析

Tab.4 Range analysis of surface roughness

水平	F_s/N	$v/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	$f_r/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$
1	0.570	0.480	0.503
2	0.517	0.530	0.527
3	0.500	0.577	0.557
极差	0.070	0.097	0.053

表 5 显微硬度极差分析

Tab.5 Range analysis of micro hardness

水平	F_s/N	$v/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	$f_r/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$
1	630.000	608.667	616.667
2	629.000	630.667	631.000
3	616.333	636.000	627.667
极差	13.667	27.333	14.333

表 6 灰色关联度极差分析

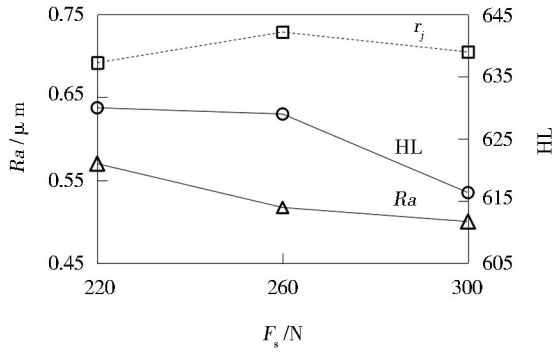
Tab.6 Range analysis of GRD

水平	F_s/N	$v/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	$f_r/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$
1	0.692	0.684	0.670
2	0.729	0.727	0.732
3	0.705	0.715	0.725
极差	0.037	0.043	0.062

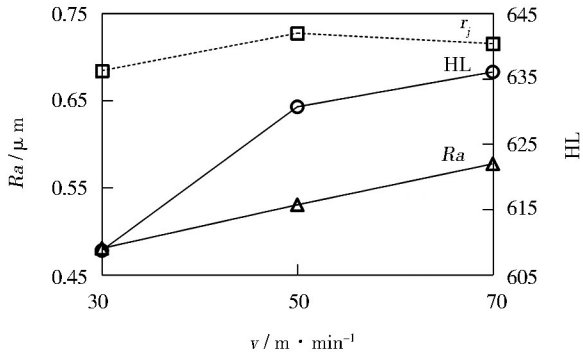
基于表 4~表 6 进一步分析静压力、挤压速度和进给量对表面粗糙度、显微硬度和灰色关联度的影响, 其主要效应如图 2 所示。图 2 直观表明, 表面粗糙度值随静压力的增大逐渐减小, 而随着挤压速度和进给量的增大逐渐增大; 显微硬度值随着静压力的增大逐渐减小, 随着挤压速度的增大逐渐增大, 随着进给量的增大先增后减; 灰色关联度随着静压力、挤压速度和进给量的增大先增后减。

显然, 各工艺参数对表面粗糙度、显微硬度和灰色关联度的影响规律不同, 同时各工艺参数之间可能存在的交互作用, 从而导致获得最小表面粗糙度值和最高显微硬度值的最优工艺参数各不相同, 获得最大灰色关联度的最优工艺参数也发生变化。

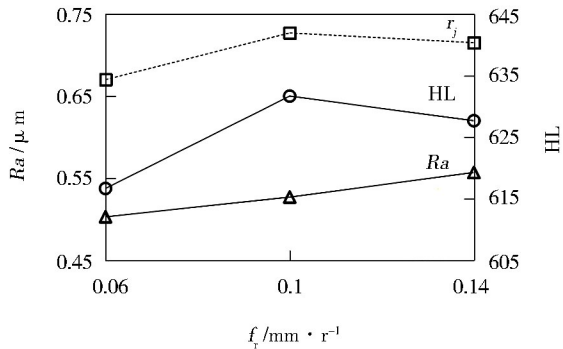
已有研究从物理力学角度探讨了超声强化加工工艺参数对表面粗糙度和显微硬度的影响^[6-8],此处不再赘述。



(a) 静压力的影响



(b) 挤压速度的影响



(c) 进给速度的影响

图2 主效应图

Fig.2 Main effect on surface quality

3 灰色关联度预测

本文研究获取最优工艺参数,以获得最佳的综合表面质量,即最小的表面粗糙度值和最高的显微硬度值。以上分析表明,基于灰色关联度计算获得的最优工艺参数与利用极差分析获得的最优工艺参数并不一致。为此,基于表2~表3数据采用多元线性回归模型构建灰色关联度预测模型。

定义: $F_s = x_1, v = x_2, f_r = x_3, \gamma_j = f(x_1, x_2, x_3)$,则获得 γ_j 预测模型如式(7)所示。

$$\gamma_j = -1.017 + 0.02x_2 + 28.5x_3 - 0.00004821x_1x_2 -$$

$$0.058x_1x_3 - 0.132x_2x_3 + 0.00001347x_1^2 + 0.00004595x_2^2 - 33.72x_3^2 \quad (7)$$

基于式(7)获得的灰色关联度预测值与基于表3获得的计算值基本一致,最大误差不超过3%,该预测模型在 $F_s = 220 \sim 300 \text{ N}, v = 30 \sim 70 \text{ m/min}$ 和 $f_r = 0.06 \sim 0.14 \text{ mm/r}$ 范围可对灰色关联度进行有效预测。

基于式(7)对灰色关联度在 $F_s = 220 \sim 300 \text{ N}, v = 30 \sim 70 \text{ m/min}$ 和 $f_r = 0.06 \sim 0.14 \text{ mm/r}$ 范围内进行非线性规划求解,设置初值为 $[300 \ 70 \ 0.14]$,经迭代计算后所得解为 $[220 \ 30 \ 0.14]$,此时可获得最大灰色关联度值 $\gamma_j = 0.946$,远大于表3中各组试验得到的最大关联度值。

进一步进行工艺试验,当 $F_s = 220 \text{ N}, v = 30 \text{ m/min}, f_r = 0.14 \text{ mm/r}$ 时获得的表面粗糙度 Ra 约为 $0.44 \mu\text{m}$,比第2组试验获得的最小表面粗糙度值降低了13.73%;显微硬度约为637 HL,比第2组试验获得的最大显微硬度值降低了0.47%。在该工艺参数下,显微硬度基本不变,而表面粗糙度值显著降低,因而可认为基于灰色关联度预测模型进行规划求解获得的最优工艺参数是工艺参数范围内的最优解。

4 结论

对7075-T651铝合金二维超声挤压加工后,试验结果表明:

(1)表面粗糙度值随静压力的增大逐渐减小,而随着挤压速度和进给量的增大逐渐增大。

(2)显微硬度值随着静压力的增大逐渐减小,随着挤压速度的增大逐渐增大,随着进给量的增大先增后减。

(3)表面质量随着静压力、挤压速度和进给量的增大先增后减。

(4)采用多元线性回归模型构建的二维超声挤压加工灰色关联度预测模型可对试验进行有效预测。

(5)基于灰色关联度预测模型进行规划求解获得了最优工艺参数,即 $F_s = 220 \text{ N}, v = 30 \text{ m/min}, f_r = 0.14 \text{ mm/r}$,此时表面粗糙度 Ra 约为 $0.44 \mu\text{m}$,显微硬度约为637 HL。

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] 郑建新, 罗傲梅, 刘传绍. 超声表面强化技术的研究进展[J]. 制造技术与机床, 2012(10): 32-36.

[3] ZHANG Q, CAO J, WANG H. Ultrasonic surface strengthening of train axle material 30CrMoA [J]. Procedia Cirp, 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018年 第1期

[4] VASYLYEV M A, CHENAKIN S P, YATSENKO L F. Ultrasonic impact treatment induced oxidation of Ti6Al4V alloy [J]. Acta Materialia, 2016, 103:761-774.

[5] CHENG M, ZHANG D, CHEN H, et al. Development of ultrasonic thread root rolling technology for prolonging the fatigue performance of high strength thread [J]. Journal of Materials Processing Tech., 2014, 214(11):2395-2401.

[6] RAMOS R, FERREIRA N, FERREIRA J A M, et al. Improvement in fatigue life of Al 7475-T7351 alloy specimens by applying ultrasonic and microshot peening [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 92:87-95.

[7] 郑建新, 罗傲梅. 6061-T6 铝合金纵-扭复合振动超声深滚加工试验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(3):733-737.

[8] 张勤俭, 王会英, 刘月明, 等. 30CrMoA 车轴材料超声表面挤压强化技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015(s1):177-184.

[9] DENG J L. Control problems of grey systems [J]. Sys-

tems & Control Letters, 1982, 1(5): 288-294.

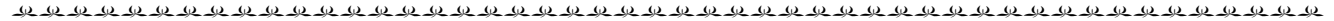
[10] DHARMALINGAM S, SUBRAMANIAN R, KOK M. Optimization of abrasive wear performance in aluminium hybrid metal matrix composites using taguchi - grey relational analysis [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology, 2013, 227(7):749-760.

[11] OTIM F J, CHOI S J. Influence of cutting parameters on energy consumption and material removal rate in turning process [J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 799-800: 282-290.

[12] 刘春景, 唐敦兵, 何华, 等. 基于灰色关联和主成分分析的车削加工多目标优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4):293-298.

[13] 贾振元, 顾丰, 王福吉, 等. 基于信噪比与灰关联度的电火花微小孔加工工艺参数的优化[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7):63-67.

[14] 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(自然科学版), 2008, 40(4):589-592.



(上接第 53 页)

3 结论

采用适量的 BECE 树脂和 Mx 加入的 Novolac-CE 树脂中,得到兼具韧性、耐热性和良好工艺性的胶膜用混合树脂,该树脂冲击韧性达到 13 kJ/m², 热失重温度大于 400 °C,与石英纤维的浸润较好(浸润角 72.8°),其与经过 0.5%KH550/乙醇溶液处理过的石英布复合制备得到了耐温 400 °C、低损耗的改性氰酸酯载体胶膜。该胶膜具如下特点:400 °C 剪切强度大于 5 MPa,400 °C 下连续使用 60 min,强度保持率大于 80%,介电损耗小于 0.014;胶膜具有良好的自粘性且室温适用期大于 15 d;胶膜多次固化后粘接强度保持率大于 95%,且耐久性较好。该胶膜的研制成功完善了氰酸酯类胶黏剂产品的耐温等级,在航天、航空领域上有广阔的应用前景。

参考文献

[1] NAIR C P R, FRANEIS T. Blends of bisphenola based cyanate ester and bismaleimide; cure and thermal characteristics [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 74:3665- 3375.

[2] SHIMP D A, HUDOCK F A, BOBO W S. Toughening cyanate functional resins for structural composite matrix applica-

tion[C]//18th Int. SAMPE Tech. Conf., 1986, 18:851-862.

[3] 王冠,付刚,等. 氰酸酯基耐高温、低介电载体结构胶膜的制备与性能[J]. 宇航材料工艺,2008,38(2):22-27.

[4] 王冠,付刚,高堂铃,等.一种先进雷达天线罩粘接用胶膜的研制[J].中国胶黏剂,2016,25(11):23-27.

[5] MATHEW D, NAIR C P R, NINAN K N. Bisphenol a dicyanate-novolac epoxy blend: cure characteristics physical and mechanical properties and application in compsoitie[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 74(7):1675-1685.

[6] SUDHA J D, PRADHAN S, VISWANATH H, et al. Studies on the cure parameters of cyanate ester-epoxy blend system through rheological property measurements [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 115(1):743-750.

[7] SUDHA J D, PRADHAN S, VISWANATH H, et al. Studies on the cure parameters of cyanate ester-epoxy blend system through rheological property measurements [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 115(1):743-750.

[8] WANG G, WANG R G, FU G, et al. Study on phenolphthalein poly(ether sulfone)-modified cyanate ester resin and epoxy resin blends[J]. Polymer Engineering and Science, 2015, 55(11):2591-2602.