

工艺参数对注塑制品沉降斑的影响分析及优化

郑晓培 路书芬 王利霞 申长雨

(郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 郑州 450002)

摘要 采用最大沉降斑指数表征注塑制品的沉降斑, 结合 CAE 和 Taguchi DOE 技术研究了工艺参数对(丙烯腈/丁二烯/苯乙烯) 共聚物、高密度聚乙烯、聚丙烯注塑制品沉降斑的影响。对实验结果进行方差分析, 估计选用 3 种不同形态的材料时各个工艺参数对制品最大沉降斑指数的影响度, 同时对工艺参数进行优化并通过实验验证使制品的最大沉降斑指数降低。

关键词 注塑制品 CAE Taguchi DOE 沉降斑 工艺优化

注射成型现已成为塑料制品的主要成型技术。注塑制品的质量主要取决于模具的设计与加工、材料的性能和成型工艺。传统提高塑料制品质量的方法主要是改进模具设计和采用性能较好的材料。但是即便采用最佳的模具设计和最优性能的材料, 有时仍然很难获得令人满意的制品, 这是因为成型工艺参数对制品质量有重要的影响。近年来, CAE 技术在塑料成型工艺中的应用极大地提高了制品成型的效率, 运用 CAE 技术可以在很大程度上提高模具设计和修改的灵活性。然而由于注射成型工艺参数繁多, 而且变化范围大, 使用 CAE 软件虽然可以代替传统的实际试模, 但是实验次数较多, 工作量依然很大。应用实验设计(DOE) 技术, 可以减少实验次数, 并且能获得比较充分的实验信息。因此将 CAE 和 DOE 技术结合起来研究注射成型工艺参数对制品质量的影响可以减少工作量, 是一种十分有效的方法。

沉降斑是注塑制品常见的一种缺陷, 它是由保压过程中熔体的热收缩引起的。在注射成型中热的熔体充入型腔, 与冷的模壁接触后迅速冷却, 就会在热熔体表面形成薄的凝固层, 随后热的熔体冷却并产生收缩, 如果收缩没有得到足够的补偿, 外部皮层就会下沉产生沉降斑, 尤其在制品的厚壁部分和壁厚突变处容易产生沉降斑, 为了将制品的这种缺陷降到最小程度, 必须了解工艺参数对沉降斑的影响。笔者采用最大沉降斑指数来表征制品的沉降斑, 应用 CAE 技术预测制品的最大沉降斑指数, 并结合 CAE^[1] 和 Taguchi DOE 技术研究了工艺参数对制品最大沉降斑指数的影响, 获得了优化的工艺参数。

1 CAE 技术

CAE 技术可用来模拟给定条件下熔体在模具内的流动、传热情况, 较为准确地预测出注射成型过

程中充填、保压、冷却等各阶段的情况, 进而可以预测制品的最大沉降斑指数、翘曲、收缩率和件重等重要的质量指标。这样便于设计者及时修改制品和模具设计, 同时能在较短的时间内找出成型过程的优化工艺条件。

沉降斑指数表征的是由于熔体热芯的存在而可能产生的潜在收缩。在后充填阶段, 当局部压力降为零时, 制品的沉降斑指数(SMI) 由(1) 式计算^[2]。

$$SMI = \frac{x^+ - x^- - \rho(T_{trans}, P_{atm}) - \int_{-}^{x^+} \rho(z) dz}{2h - \rho(T_{trans}, P_{atm})} \times 100\% \quad (1)$$

式中: x^+ ——熔体与凝固层的上界面;

x^- ——熔体与凝固层的下界面;

ρ ——固态密度;

T_{trans} ——转换温度;

P_{atm} ——标准大气压;

ρ ——熔体密度;

z ——型腔厚度方向;

h ——型腔厚度的一半。

根据充填、后充填模拟结果, 由(1) 式可以方便地预测制品的沉降斑分布情况。在成型过程中, 应尽可能使最大沉降斑指数减到最小。

2 Taguchi DOE 技术

Taguchi DOE 技术是一种因子实验设计技术。它主要基于一定的规则设计正交实验矩阵, 确保以最少的实验次数获得全因子实验中影响性能参数的全部信息。通过 Taguchi DOE 方法可以用较少次数的实验找出所用因素的最优水平组合和实验因素对实验指标的影响度。

Taguchi DOE 技术利用信噪比对实验性能进行

估计。所谓信噪比就是信号与噪音的比值。Taguchi DOE 技术通过正交实验得到目标值受噪音影响最小的实验,即获得最大的信噪比,由此对实验进行优化。制品沉降斑属于越小越优的质量指标,信噪比采用(2)式计算^[2]:

$$\eta = -10\lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$$

(2)

式中: η ——信噪比, dB;
 n ——实验次数;
 y_i ——第 i 次实验结果。

3 实验与结果

以图 1 所示的塑料制品为例来研究工艺参数对制品最大沉降斑指数的影响。该制品的主体结构为一块平板,其中一端附近有 4 个筋板,主体板的厚度为 2.0 mm,筋板的厚度分别为 1.4、1.6、1.8、2.0 mm。为了保证熔体在充填时保持一维流动,在平板的另一端设置了一个导流槽。

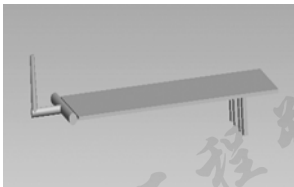


图 1 制品的三维造型

3.1 材料

材料的分子结构影响到其熔体的收缩行为,并最终影响制品的质量。选用 3 种材料即无定形聚合物(丙烯腈/丁二烯/苯乙烯)共聚物(ABS, 牌号 ABS 680)、半结晶性聚合物高密度聚乙烯(HDPE, 牌号 Dowlex IP-60)及结晶性聚合物聚丙烯(PP, 牌号 Generic PP),考察工艺参数对注塑制品最大沉降斑指数的影响。

3.2 实验设计

为考察熔体温度(T_{mel})、模具温度(T_{mold})、熔体注射时间(t_{fil})、保压时间(t_p)和保压压力(p_{hold})5 个工艺参数对制品最大沉降斑指数的影响,将这 5 个参数作为因素,分别记为 A、B、C、D、E。对于每一种材料,首先由 CAE 分析获得成型工艺窗口,然后以此为参考设计各个工艺参数的水平。表 1 列出这 3 种材料工艺参数的水平设置(各个工艺参数的变化步长基于相同的比例)。

根据所选因素及水平划分,采用五因素四水平的正交实验矩阵 $L16(4^5)^{[3]}$ 设计实验,结果如表 2 所示。采用不同网格尺寸进行模拟,将网格尺寸对

表 1 3 种材料工艺参数的水平设置

材料	水平	因 素				
		A	B	C	D	E
ABS	1	224	61	1.40	14.0	72.3
	2	232	63	1.45	14.5	74.9
	3	240	65	1.50	15.0	77.5
	4	248	67	1.55	15.5	80.1
HDPE	1	209	38	0.95	9.5	20.4
	2	220	40	1.00	10.0	21.5
	3	231	42	1.05	10.5	22.6
	4	242	44	1.10	11.0	23.7
PP	1	220.8	36.8	0.92	9.2	31.2
	2	230.4	38.4	0.96	9.6	32.6
	3	240.0	40.0	1.00	10.0	33.9
	4	249.6	41.6	1.04	10.4	35.3

表 2 五因素四水平正交实验矩阵 $L16(4^5)$

实验号	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

分析结果的影响作为噪音进行实验模拟。对于每次实验均在 5、6、7 mm 3 种网格尺寸下用 CAE 软件 Moldflow 进行模拟。

3.3 实验结果

表 3 列出 3 种材料在 3 种网格尺寸下的最大沉降斑指数及每次实验的信噪比。

4 分析与讨论

对模拟结果进行分析,主要是基于方差分析(ANOVA),通过计算各个变量的主效应定量地估计各个因素对整体测量响应的相对贡献,得到各个工艺参数对质量指标的影响程度并获得优化的工艺组合。

4.1 方差分析

正交实验表中所有实验信噪比的总体平均值(m)采用(3)式计算:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta$$

(3)

式中: n ——实验次数;

表 3 3 种材料在 3 种网格尺寸下的最大沉降斑指数及信噪比

材料	实验号	最大沉降斑指数 / %			η/dB
		5 mm	6 mm	7 mm	
ABS	1	3.464	3.447	3.439	-10.76
	2	3.362	3.336	3.333	-10.49
	3	3.216	3.192	3.186	-10.10
	4	3.107	3.085	3.081	-9.80
	5	2.965	2.975	2.947	-9.43
	6	3.087	3.077	3.066	-9.76
	7	3.297	3.284	3.275	-10.33
	8	3.402	3.389	3.377	-10.60
	9	3.168	3.176	3.156	-10.01
	10	3.321	3.318	3.301	-10.41
	11	2.870	2.875	2.853	-9.15
	12	3.031	3.032	3.014	-9.62
	13	2.975	2.980	2.960	-9.46
	14	2.849	2.860	2.836	-9.09
	15	3.221	3.222	3.203	-10.15
	16	3.064	3.067	3.046	-9.71
HDPE	1	0.513	0.489	0.460	6.24
	2	0.346	0.335	0.312	9.59
	3	0.249	0.214	0.195	13.14
	4	0.152	0.150	0.108	17.21
	5	0.545	0.580	0.506	5.28
	6	0.406	0.399	0.372	8.12
	7	1.008	0.930	0.888	0.51
	8	0.741	0.758	0.680	2.77
	9	0.774	0.746	0.713	2.56
	10	0.991	0.956	0.909	0.42
	11	1.253	1.222	1.183	-1.73
	12	1.528	1.494	1.414	-3.40
	13	1.742	1.706	1.661	-4.63
	14	1.983	1.989	1.909	-5.85
	15	1.332	1.240	1.183	-1.96
	16	1.582	1.542	1.441	-3.65
PP	1	1.535	1.463	1.394	-3.32
	2	1.339	1.308	1.234	-2.24
	3	1.210	1.184	1.068	-1.26
	4	1.028	1.018	0.965	-0.04
	5	1.551	1.519	1.445	-3.56
	6	1.427	1.393	1.316	-2.79
	7	1.917	1.852	1.828	-5.42
	8	1.730	1.711	1.630	-4.56
	9	1.778	1.742	1.663	-4.75
	10	1.915	1.847	1.813	-5.39
	11	2.136	2.118	2.044	-6.44
	12	2.322	2.295	2.226	-7.16
	13	2.472	2.446	2.382	-7.72
	14	2.683	2.648	2.584	-8.43
	15	2.204	2.132	2.107	-6.64
	16	2.319	2.294	2.229	-7.16

η——第*i*次实验结果, dB。

各因素各水平对质量指标的主效应(m_{fi})可通过求出包含该因素水平的所有实验的信噪比均值得到,可采用(4)式^[4]计算:

$$m_{fi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta \tag{4}$$

式中:*f*——实验因素;

i——实验水平;

N——实验次数。

由(4)式可得到各个工艺参数对注塑制品最大沉降斑指数的主效应,结果如图2所示^[5,6]。

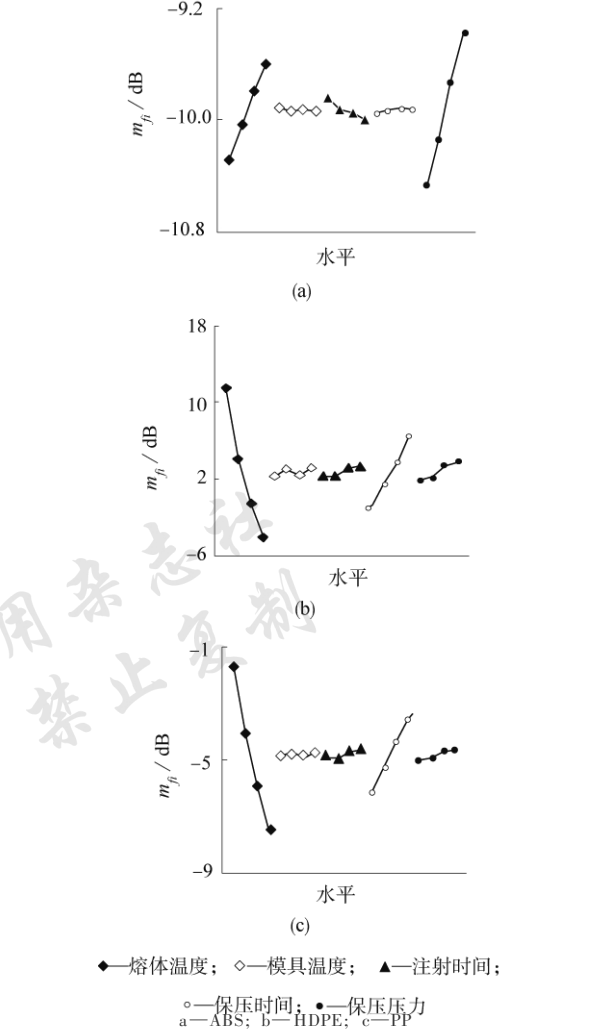


图 2 工艺参数对注塑制品最大沉降斑指数的主效应

为了确定各个因素对产品性能指数的影响程度,需要计算方差和。总体方差(TSS)定义为^[3]:

$$TSS = \sum_{i=1}^{16} (\eta - m)^2 \tag{5}$$

各因素变化引起的方差(SSSF)定义为^[3]:

$$SSSF = 4(m_{f_1} - m)^2 + 4(m_{f_2} - m)^2 + 4(m_{f_3} - m)^2 + 4(m_{f_4} - m)^2 \tag{6}$$

求解每个因素对实验目标的影响度,比较简单的算法就是求出每个因素对应的方差在总体方差中所占的百分比,得到因素对实验目标的影响度。表4给出了3种材料的各个工艺参数对其质量指标的影响度。

由图2和表4可以看出,对不同的材料,工艺参数对注塑制品最大沉降斑指数的影响是不一样的。对ABS来说,保压压力是影响最大的参数,其次为

表 4 工艺参数对注塑制品最大沉降斑指数的影响度 %

因素	影响度		
	ABS	HDPE	PP
A	27.09	81.08	83.16
B	0.15	0.32	0.15
C	1.44	0.57	0.24
D	0.20	16.67	16.13
E	71.63	1.37	0.35

熔体温度的影响,而注射时间、保压时间和模具温度的影响比较小。对于 HDPE 和 PP 而言,影响最大的是熔体温度,其次是保压时间,而模具温度、注射时间和保压压力的影响较小。这样在质量控制中就可选择对制品质量影响较大的因素。

4.2 工艺参数优化及优化性能预测

实验的主要目的是确定各个因素的优化水平。由图 2 可以得到使最大沉降斑指数最小的优化因素水平,从而得到 3 种材料的优化因素水平组合,结果见表 5。

表 5 3 种材料的优化工艺组合

优化质量指标	优化因素水平组合		
	ABS	HDPE	PP
沉降斑	A4B1C1D3E4	A1B4C4D4E4	A1B2C4D4E4

如果得到的优化因素水平组合没有包含在正交矩阵的主实验中,则需要预测对应于优化因素水平组合的制品质量响应。假定选用的五个因素之间没有相互作用,对于任意优化因素水平组合 $A_iB_jC_kD_lE_n^{[6]}$,可以基于 (7) 式预测对应于优化工艺下的信噪比。

$$\eta_{iB_jC_kD_lE_n} = m + (m_{A_i} - m) + (m_{B_j} - m) + (m_{C_k} - m_m) + (m_{D_l} - m_m) + (m_{E_n} - m) \quad (7)$$

所用材料为 HDPE 时所得到的沉降斑的优化水平组合包含在主实验中,故仅对材料为 ABS 和 PP 时进行预测,所预测的 ABS 的信噪比值为 -8.857 dB,而 PP 为 -0.005 dB。

4.3 实验验证结果

上述性能预测是采用简化模型进行预测的,需要对优化的因素水平进行实验验证^[5]。采用 CAE 软件 Moldflow 进行数值实验验证,在各优化因素水

平组合条件下进行数值分析。通过模拟实验验证,ABS 的最大沉降斑指数在 3 种不同的网格尺寸下分别为 2.794%、2.802%、2.780%。这些值都比主实验中的最大沉降斑指数要小,验证实验的信噪比为 -8.919 dB,比主实验的值都高。HDPE 的沉降斑的优化水平组合已包含在主实验中,主实验中的实验 4 的最大沉降斑指数最小。PP 的最大沉降斑指数在 3 种不同的网格尺寸下分别为 1.028%、1.017%、0.965%,都小于主实验中的最大沉降斑指数,验证实验的信噪比为 -0.037 dB,比主实验的值要高。通过实验验证,可见在优化因素水平下注塑制品的沉降斑分布得到了明显改善。

5 结论

(1) CAE 和 Taguchi DOE 技术相结合成为研究工艺参数对制品质量的影响并优化工艺参数的有效工具。

(2) 在所研究的工艺范围内,对于 ABS 来说,熔体温度和保压压力对最大沉降斑指数的影响较大,增大熔体温度、降低模具温度、减少注射时间、增加保压时间和保压压力可以使最大沉降斑指数降低;而对于 HDPE 和 PP 而言,熔体温度和保压时间对最大沉降斑指数影响较大,降低熔体温度、提高模具温度、延长注射时间和保压时间、增大保压压力可以使最大沉降斑指数降低。

参考文献

1 单岩. Moldflow 模具分析技术基础. 北京: 清华大学出版社, 2004.

2 王利霞. 应用 Taguchi 实验设计法最小化注塑成型制品沉降斑. 塑料工业, 2004, 32(4): 26

3 栾军. 现代实验设计优化方法. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.

4 王利霞. 基于数值模拟的注塑成型工艺优化及制品质量控制研究: [博士论文]. 郑州: 郑州大学, 2004.

5 Vaatainen O, Jarvela P. The effect of processing parameters on the quality of injection moulded parts by using the Taguchi parameter design method. Rubber and Composites Processing and Applications, 1994, 21(4): 211

6 Chang T C. Shrinkage behavior and optimization of injection molded parts studied by Taguchi method. Polymer Engineering and Science, 2001, 41(5): 703

EFFECT OF PROCESSING PARAMETERS ON SINK MARKS OF INJECTION

- MOLDED PARTS AND PROCESS OPTIMIZATION

Zheng Xiaopei, Lu Shufen, Wang Lixia, Shen Changyu

(NERC for Appt, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT The sink marks of injection-molded parts are characterized by sink mark indexes, and the effects of processing parameters on sink marks of the injection-molded parts of ABS, HDPE and PP are researched using CAE and Taguchi DOE technology.

The effects of parameters on the maximum sink mark indexes of the parts of three kinds of materials are estimated using method of variance analysis. The process parameters are optimized and validated to minimize the sink marks.

KEYWORDS injection molding, CAE, Taguchi DOE, sink mark, process optimization

汽车产业“十一五”规划将颁布塑料零部件发展方向

据了解,《中国汽车产业“十一五”发展规划纲要》即将颁布。其中,对汽车相关产业发展也提出了明确要求,汽车塑料零部件发展方向是节能、安全和环保。

据介绍,“十一五”期间中国汽车产业发展将不再提倡生产能力增长,此间产量将保持年均增长 10% 的水平。在产量适度增长的同时,国家鼓励企业从单纯的生产能力扩张向以技术提升品质方向转变,骨干企业应具备主导产品自主开发和创新能力。规划纲要明确指出了技术进步、自主创新、自主品牌、国际市场等发展方向。

汽车产业是制造业升级的领头羊,是各种新工艺、新材料、新技术、新装备的集中体现,因而相关产品如塑料零部件及原料的技术含量直接影响着我国汽车产业发展。规划纲要对汽车相关产业的发展提出了明确要求,鼓励关键塑料零部件生产企业及原料供应商充分利用现有基础,发挥比较优

势,建立自己的产品研发机构,培育核心技术开发能力,发展自主品牌,积极参与国际竞争。目前我国汽车生产企业主要以外资和合资为主,零部件产业发展相对滞后。2004 年后,由于利润大幅下降,汽车生产企业更加关心零部件和原料的国产化,这为“十一五”我国汽车塑料零部件自主品牌的创建提供了机遇。

节能、环保、安全正在成为汽车产业新的关注点,欧盟已经出台相关法规要求汽车制造商担负起处置所有报废汽车的责任,2006 年汽车材料回收利用率要达到 85%,2010 年要达到 95%。我国也要根据国际发展趋势,结合国情,将在“十一五”规划纲要中首次增加标准法规发展方向章节,希望通过法制化管理和标准的制定与执行,促进企业开发节能、环保、安全性更高的产品。因而业界专家提醒塑料汽配企业要加强信息交流与沟通,尽早做好技术储备。

(塑料加工中心)

塑料助剂配方设计与流变试验学习研讨班通知

为了提高塑料加工企业工程师对塑料助剂、塑料配方和配制技术以及对塑料流变性能和流变仪的深入了解,学会用流变试验指导配方设计和成型工艺,以增强企业参与市场竞争的能力,塑料助剂专业委员会、中国塑协异型材及门窗制品专业委员会和哈尔滨理工大学将于 2006 年 8 月 19 日 ~ 24 日在哈尔滨联合举办塑料助剂配方设计与流变试验学习研讨班。对参加研讨班的学员经考核后将颁发结业证书。

本次研讨班采取专家讲课、论文交流、学员研讨和向专家咨询等多种形式。研讨班设有开放实验室供学员使用,学员可自带样品树脂与相关助剂在教师的指导下进行配方设计和流变试验。参会者可将要咨询的问题寄回专委会,以便专家准备,希望通过研讨班使与会者能解决一些生产实际中的技术难点。

学习研讨内容: 转矩流变曲线特性参数的微观本质、物理意义及其对加工性能影响 北京加成助剂研究所刘芳高工; 转矩流变仪和螺杆挤出毛细管流变仪 哈尔滨理工大学赵洪教授、博导; 阻燃材料及应用 东北林业大学李斌教授、博导; 环保 PVC 热稳定剂应用技术 深圳志海实业有限公司严一丰总经理; 稀土多功能助剂在塑料改性中的应用 广东伟林纳功能材料有限公司郑德教授; 聚氯乙烯配方设计与流变试验 北京化工大学毛立新博士; 相容剂与塑料合金 辽宁大学吕通建教授; 钛白粉技术市场及其在塑料异型材中的应用 四川龙蟒钛业有限责任公司韩小刚部长; 塑料助剂流变性能研究 实德研究院周洪荣工程师; 转矩流变仪在塑料配方设计中的应用 山东日科化学有限公司赵东日博士; CPE 对 UPVC 流变性能的影响 威海市金泓化工集团

有限公司白文业总工。

报到时间: 2006 年 8 月 19 日全天。

报到地点: 哈尔滨果戈里酒店(地址:哈尔滨市南岗区果戈里大街 84 号 电话:0451-82579000)。

乘车路线: 火车站乘 109 路、7 路公交车至革新街下车或打车(车费 8 元左右); 飞机场乘坐机场大巴到中山路民航大厦下车后打车(车费 8 元左右)。

收费标准: 在规定的时间内(2006 年 7 月 31 日)发回报名表至专委会的单位:会员单位 1200 元/人,非会员单位 1400 元/人;未发回报名表的单位:会员单位 1300 元/人,非会员单位 1500 元/人。住宿由会议统一安排,费用自理。住宿按会议优惠价收费,标准为双人标间 200 元/(天·间)。学习期间将组织学员参观五大连池,费用自理。

联系方式:

哈尔滨理工大学电气与电子工程学院

联系人: 计成 电话: 0451-82137917 传真: 0451-82137917 地址: 哈尔滨理工大学东区 281 信箱 邮编: 150040 E-mail: jicheng79@163.com

中国工程塑料工业协会塑料助剂专业委员会

联系人: 杨小玲 电话: 025-86626096 传真: 025-86620386 地址: 南京市中华门钓鱼台 119 号 邮编: 210006 E-mail: paia@jlonline.com

中国塑料加工工业协会异型材及门窗制品专业委员会

联系人: 李静霞 电话: 0312-3139661 传真: 0312-3108039 地址: 保定市朝阳北大街 1098 号 邮编: 071051 E-mail: ljx010@yahoo.com.cn