

铝合金板橡皮成形简化数值分析模型研究

杨伟俊 李东升 李小强

北京航空航天大学,北京,100191

摘要:研究了液压橡皮囊成形工艺(简称橡皮成形)数值模型建立的方法。基于对橡皮的不同处理方法,提出橡皮成形工艺的三种有限元模型,并应用到直弯边成形的分析中。讨论了橡皮对板料变形流动的影响,认为橡皮垫在成形过程中能起到减小回弹的作用。利用不同弯曲半径的直弯边回弹实验数据,比较了几种简化方式在回弹预测上的准确性,发现采用壳单元描述橡皮垫的模型的回弹预测结果与实验结果相比,误差较小,同时计算效率高。

关键词:橡皮成形;数值模拟;回弹预测;弯边

中图分类号:TG386

文章编号:1004—132X(2009)19—2382—05

Simplified Numerical Analysis Model of Rubber Forming Process for Aluminium Alloy Sheet

Yang Weijun Li Dongsheng Li Xiaoqiang

Beihang University, Beijing, 100191

Abstract: This paper is focused on the finite element model for rubber forming process. Based on different descriptions of the rubber pad, three kinds of numerical models were put forward for rubber forming and applied in the analysis of straight flanging process. Through the discussion about effect of rubber pad on the sheet deformation, it is concluded that rubber pad plays as a significant part in decreasing springback. Accuracy of the three models was compared, using experimental and predicted springback data of different bending radius. It is found that the method that describes rubber pad as shell elements can bring the springback analysis less errors and higher efficiency.

Key words: rubber forming; numerical analysis; springback prediction; flanging

0 引言

液压橡皮囊成形工艺(简称橡皮成形)是一种适用于小批量多品种产品生产的成形技术,凭借其效率高、成本低、成形质量好等优点,已成为航空制造领域中的主流钣金工艺之一^[1]。随着计算机性能的提高和有限元技术的成熟,采用数值模拟方法进行工艺分析已成为橡皮成形研究的新手段^[2]。

橡皮成形的数值模拟与其他板料成形工艺相比,最主要的差别是考虑了橡胶层的影响。国内外已有的橡皮成形数值模拟方面的研究中,大多采用体单元描述橡皮垫。这种方法比较符合实际,但在实际分析中效果并不理想,不仅模型巨大,耗时极长,而且容易出现沙漏和穿透等问题^[2-3]。也有研究人员考虑了其他的简化建模方法,如不考虑橡皮的影响^[4]或使用壳单元模拟橡皮^[5],但这两种简化建模的方法未进行回弹预测精度的分析与检验。

成形过程模拟和回弹预测的精度,与建立的有限元模型有很大关系,但目前尚无文献表明对橡皮成形数值模拟中的这一问题进行过研究。本

文对橡皮成形工艺的建模方法进行研究,以获得在计算效率和精度上最合理的有限元模型。

1 液压橡皮囊成形工艺

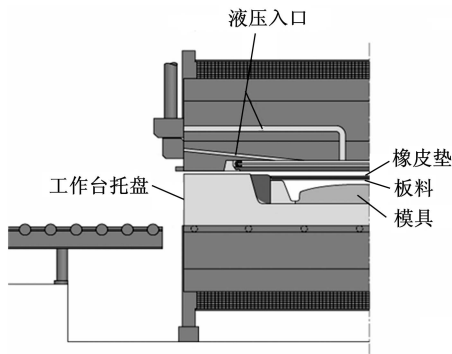
橡皮成形是飞机钣金零件制造的主要方法之一。常用的橡皮成形方法有两种^[1]:橡皮垫成形和液压橡皮囊成形。在橡皮垫成形工艺中,充满厚橡皮垫的容框与压型模发生相对运动,橡皮垫受压产生弹性变形,将模具上的板料包在模面上,压制出零件。橡皮囊成形工艺是通过将橡皮垫成形工艺进行改进实现的:将橡皮垫容框改为橡皮囊;将凸模(或容框)运动挤压橡皮产生成形力,改为橡皮囊充入高压液体后膨胀产生成形力,使板料贴模。具体原理及设备见图1。随着飞机设计水平与制造要求的提高,橡皮成形工艺需要满足更大零件尺寸、更高成形力的要求,因此当前钣金生产中大多采用先进的橡皮囊液压成形工艺。

2 橡皮成形数值模型简化

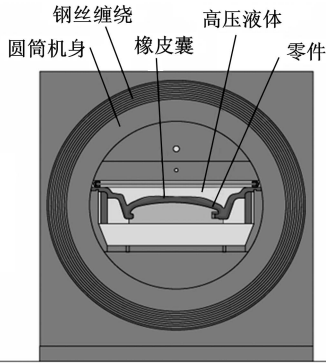
板料成形工艺在进行数值模拟前,必须进行一定的简化。橡皮成形工艺中,零件上表面覆盖了一层或多层橡胶垫(图1),忽略橡皮囊的影响,假设压力是直接作用在橡皮垫上(在分析中只针

收稿日期:2008—12—17

基金项目:国家“十一五”国防科技预研重点项目
(51318010601)



(a)成形前



(b)成形后

图1 圆筒式橡皮囊液压机结构

对一层橡皮垫),根据对单层橡皮垫的处理,数值模型有以下几种简化方式:

(1)忽略橡皮垫的影响,液压力直接加载在板料上,工艺简化成近似液压成形。这使得模型大大简化,计算效率十分高,缺点是无法模拟橡皮对板料的摩擦。

(2)橡皮垫用体单元描述,并沿厚度方向分为若干层(简称体单元模型)。这种划分方法可以较准确地模拟橡皮受压、受拉及流动变形情况,缺点是整个分析模型网格数量十分庞大。

(3)橡皮垫简化为壳单元(简称壳单元模型)。壳单元模型网格数量少,计算效率高,但壳单元平面应力假设并不适用于模拟橡皮的变形和流动,因此这种假设带来的误差有待分析和检验。

3 直弯边实验及数值模型

3.1 直弯边实验

直弯边实验模具如图2所示,弯边半径 R 分别取4mm、6mm、8mm和10mm。

实验中使用的材料是2024-O铝合金板,厚度为2mm。材料性能参数见表1。实验中使用的橡胶垫为肖氏硬度为70左右的橡胶。图3为橡胶材料单拉曲线。在数值模拟中使用Mooney-Rivlin模型描述橡胶的超弹性行为,由实验数据处理得到参数 $C_{10}=0.71, C_{01}=0.52$ 。

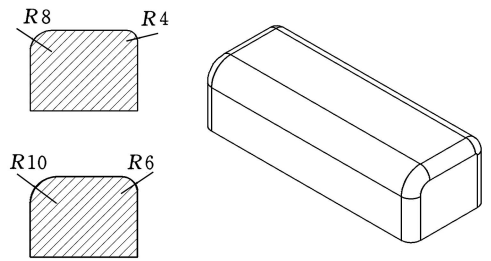


图2 直弯边模具

表1 2024-O材料性能参数

厚度 (mm)	屈服应力 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	弹性模量 E (MPa)	泊松比 ν	强化系数 K (MPa)	硬化指数 n	厚向异性指数 r
2	88.3	72 650	0.3	341.7	0.233	0.9

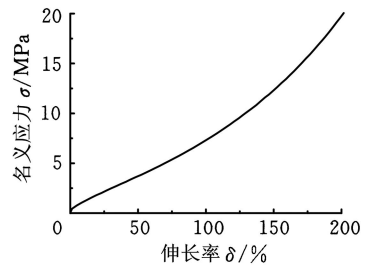
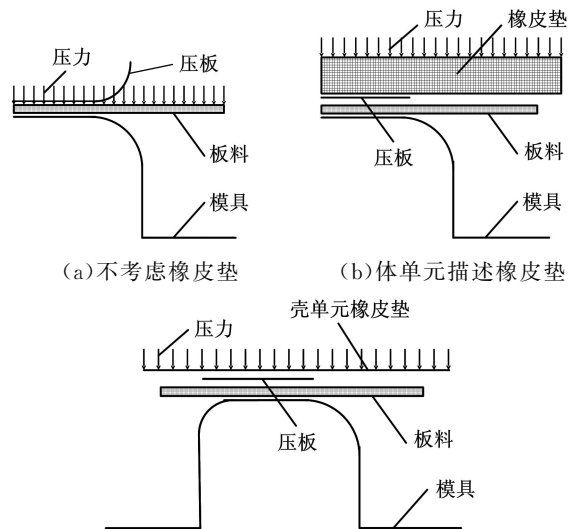


图3 橡胶材料单拉曲线

3.2 有限元模型建立

根据图2所示的模具,建立直弯边工艺的有限元分析模型。

有限元模型见图4,相关分析参数见表2。建立二维模型,用于详细比较橡胶材料参与成形对板料变形的影响。建模时取一半模具(图4a、图4b),分别对不同弯边半径下的回弹进行分析。假设成形是宽板变形,单元均选用平面应变单元。建立三维模型,用于比较不同模型在回弹预测上的准确性和效率。图4c为用壳单元模型模拟橡皮垫的数值模型截面图。



(c)壳单元描述橡皮垫

图4 数值模型

表 2 数值模型参数

数值模型	二维模型		三维模型		
	不考虑橡皮垫的模型	体单元模型	不考虑橡皮垫的模型	壳单元模型	体单元模型
橡皮单元	—	平面应变单元	—	四节点壳单元	八节点体单元
橡皮单元尺寸	—	沿厚度方向均布 8 层, 最小厚度为 0.5mm	—	1mm	沿厚度方向均布 8 层, 单元尺寸为 1.5mm
板料单元	平面应变单元		B-T 壳单元		
板料单元尺寸	沿厚度方向 8 层, 最小 0.25mm		最小 0.5mm		
摩擦因数	金属(板料与工装)表面之间 0.15, 橡胶与金属表面之间 0.3				
最大压力 (MPa)	20				
成形计算	ABAQUS/Standard	ABAQUS/Explicit	ABAQUS/Explicit		
回弹计算	ABAQUS/Standard		ABAQUS/Standard		

4 计算结果及讨论

4.1 二维模型成形计算与回弹预测

二维模型的计算用于讨论橡胶材料对弯边成形的影响,特别是对回弹量的影响。

板料成形理论^[6]认为弯曲回弹是由于正交于厚向的应力不均匀引起的。不均匀的应力对材料中性层产生弯曲力矩,材料卸载后回复力矩将与该力矩平衡,产生回弹。弯曲力矩越大,回弹越大。

数值分析结果中很难用一个简单的变量来表示弯曲力矩,这里考虑用沿厚向分布的应力来表征弯曲力矩,即用沿厚向分布的不同节点的切向应力,按节点位置作出弯曲力矩的示意图。在纯弯曲中,可以认为板料外层的最大主应力 σ_{max} 和内层的最小主应力 σ_{min} 都是沿切向的应力(图 5a),图 5b 为回弹角 α 的示意图。

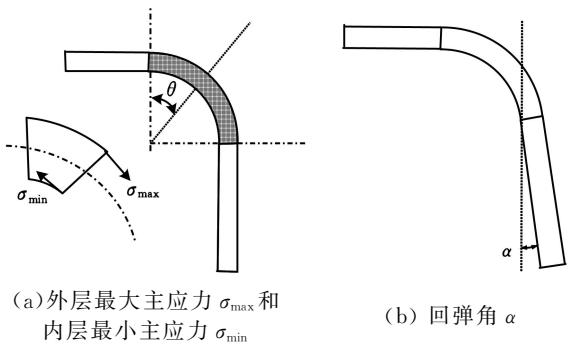


图 5 相关变量示意图

图 6 是圆角半径 $R=6mm, 10mm$ 时, σ_{max} 和 σ_{min} 沿弯曲周向($0^\circ \sim 90^\circ$)的分布曲线。由于在考虑橡皮垫的模型中应力分布波动较大,考虑取 $\theta=$

80° 和 $\theta=45^\circ$ (图 6a)时,两个截面处的弯曲力矩示意图,其中 $\theta=80^\circ$ 处为 σ_{max} 和 σ_{min} 应力差值最大的区域。

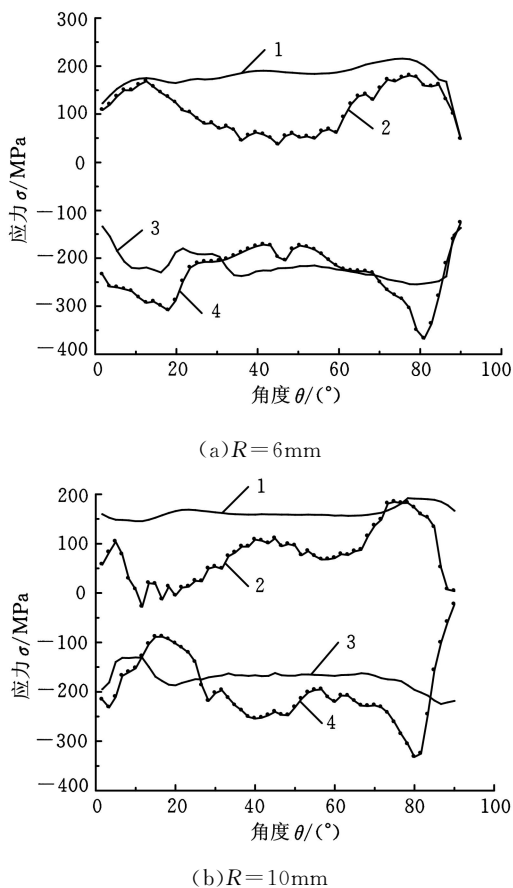


图 6 不同简化模型内外层主应力对比

从图 7a、图 7b 和图 7d 可以看出,体单元描述橡皮的模型应力曲线普遍较为偏左(以 $\sigma=0$ 为基准线)。这是由于橡皮垫与板料的摩擦阻碍了材料的流动,使材料多了一个受压的趋势。且不考虑橡皮垫的模型原本偏向受压,再增加的压力在一定程度上减小了不均匀应力的分布。而图 7c 中体单元模型的弯曲力矩明显要小,这是由体单元模型的应力分布波动较大造成的。

回弹角预测结果见表 3。与实验值相比,体单元模型模拟结果比不考虑橡皮的结果误差明显要小,预测精度也更高。不考虑橡皮的模型误差最大在 0.5° 左右。

另外可发现,体单元橡皮模拟回弹的计算值普遍比不考虑橡皮的计算值小。因此在橡皮成形分析中,特别是回弹预测上,不能忽略橡皮垫的影响。

4.2 三维模型回弹预测结果及效率比较

三维弯边模型的仿真用于讨论不同简化模型在回弹预测上的准确性和效率。

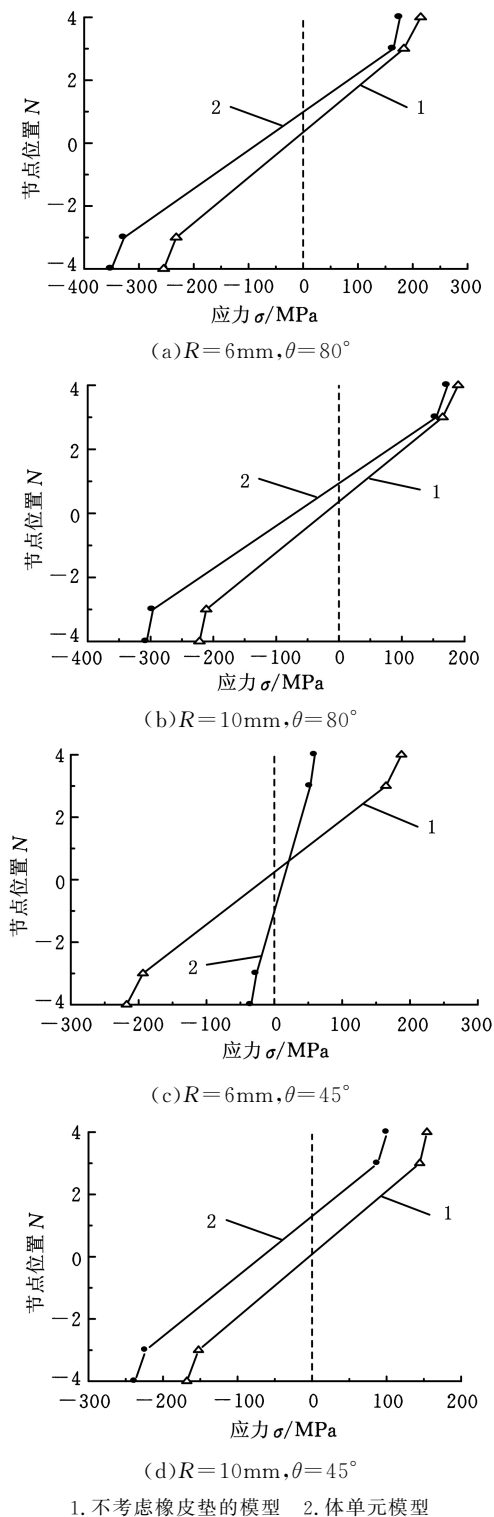


图7 不同模型弯曲力矩比较

表3 不同二维模型回弹角预测结果与实验对比

圆角半径 $R(\text{mm})$	回弹角 $\alpha(^{\circ})$		
	不考虑橡皮垫 的模型	体单元模型	实验值
4	不收敛	1.12	1.52
6	1.68	1.53	1.60
8	2.21	1.90	1.74
10	2.76	2.06	2.26

三维模型中板料使用壳单元描述,计算结果只能输出最外层和最内层的积分点应力,因此不

能作出弯曲力矩示意图。由图8所示的应力对比图可看出,用体单元和壳单元模拟的结果比较接近。

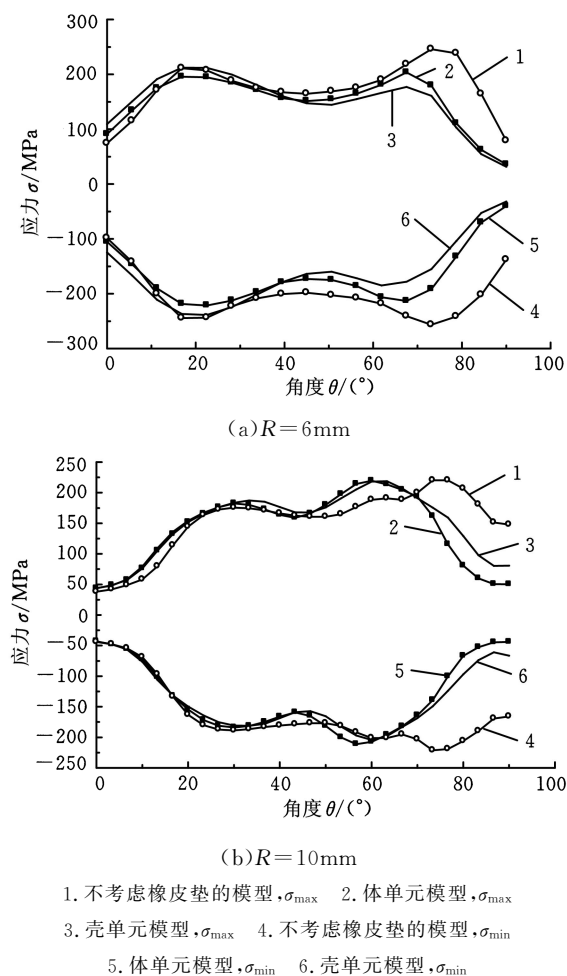


图8 不同简化模型的应力对比

回弹角预测结果见表4。三种数值模型的分析结果表明回弹角误差均较大。不考虑橡皮的模型计算结果误差最大,只有在圆角半径为4mm时,预测结果最接近实验值,而在其他弯曲半径下,回弹角误差都较大;而体单元的预测结果与实验值差别均较小,回弹角误差在 0.3° 内波动;壳单元模型的预测结果与体单元模型的预测结果比较接近,只有在圆角半径为10mm时,误差较大。

表4 不同三维模型回弹角预测结果与实验值对比

圆角半径 $R(\text{mm})$	回弹角 $\alpha(^{\circ})$			
	不考虑橡皮垫 的模型	体单元模型	壳单元模型	实验值
4	1.59	1.31	1.22	1.52
6	1.71	1.59	1.57	1.60
8	2.23	2.02	2.06	1.74
10	2.95	2.51	2.93	2.26

另外,由于考虑橡皮影响的两种模型回弹预测结果均比不考虑橡皮的小,因此可认为橡皮垫在一定程度上可以起到减小回弹的作用。

计算耗时见表5。不考虑橡皮垫的模型计算

时间最短,计算效率十分高。体单元模型的计算耗时最长,可以预见如果扩展到完整三维零件,模型网格数量将十分巨大,所需时间更为冗长。使用壳单元模型计算时间居中,能够接受。

表5 不同三维模型计算时间

模型	不考虑橡皮垫的模型	体单元模型	壳单元模型
时间 t (h)	1/3	9	2

5 结论

(1)橡皮成形中橡胶介质的摩擦作用能一定程度减小回弹,这使得橡皮弯边过程有别于其他弯曲过程。

(2)在橡皮成形回弹预测中,使用壳单元或体单元来描述橡皮垫的变形,均能获得较准确的计算结果。不考虑橡皮垫影响的数值模型则误差较大。

(3)综合计算效率与计算精度两方面,橡皮垫简化为壳单元,是解决复杂橡皮成形件数值模拟比较理想的方法。

参考文献:

- [1] 航空制造工程手册总编委员会. 飞机钣金工艺[M]. 北京:航空工业出版社,1992.
- [2] Sala G. A Numerical and Experimental Approach to Optimise Sheet Stamping Technologies: Part II - Aluminium Alloys Rubber-forming[J]. Materials & Design, 2001, 22(4): 299-315.
- [3] Dirikolu M H, Akdemir E. Computer Aided Modelling of Flexible Forming Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(3): 376-381.
- [4] Palaniswamy H, Ngaile G, Altan T. Optimization of Blank Dimensions to Reduce Springback in the Flexforming Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146(1): 28-34.
- [5] 陈磊,白颖,邱超斌. 铝合金板料橡皮成形数值模拟研究[J]. 航空科学技术, 2007(6): 32-35.
- [6] 胡世光,陈鹤峥. 板料冷压成形的工程解析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.

(编辑 王艳丽)

(上接第2367页)

- [15] 李延来,唐加福,姚建明,等. 质量屋中工程特性改进重要度的确定方法[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(7): 1381-1387, 1394.
- [16] Karsak E E. Robot Selection Using an Integrated Approach Based on Quality Function Deployment and Fuzzy Regression [J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(3): 723-738.
- [17] 李延来,唐加福,姚建明,等. 质量功能展开中工程特性确定的粗糙集方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(2): 386-392.
- [18] Tang J F, Fung R Y K, Xu B. A New Approach to Quality Function Deployment Planning with Financial Consideration[J]. Computer and Operation Research, 2002, 29(11): 1447-1463.
- [19] 杨明顺,林志航. 具有离散和连续型技术特征的质量屋优化模型[J]. 机械工程学报, 2004, 40(3): 110-114.
- [20] 徐玖平,吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [21] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [22] Sireli Y, Kauffmann P, Ozan E. Integration of Kano's Model into QFD for Multiple Product Design [J]. IEEE Transaction on Engineering Management, 2007, 54(2): 380-390.
- [23] 李延来,唐加福,姚建明,等. 质量功能展开中选择工程特性的多目标决策方法[J]. 计算机集成制造系统 2008, 14(7): 1363-1369.
- [24] Ramanathan R, Jiang Y F. Incorporating Cost and Environmental Factors in Quality Function Deployment Using Data Envelopment Analysis[J]. Omega, 2009, 37(2): 711-723.
- [25] 古莹奎,黄洪钟,孙占全. 质量屋在产品生命周期设计中的应用[J]. 中国机械工程, 2003, 14(24): 2134-2137.
- [26] 崔勇,孙枫. 基于模糊群决策的质量屋方案选择模型[J]. 中国机械工程, 2007, 18(7): 807-811.
- [27] Zhai L Y, Khoo L P, Zhong Z W. A Rough Set Enhanced Fuzzy Approach to Quality Function Deployment [J]. International Journal of Advance Manufacturing Technology, 2008, 37(3): 613-624.

(编辑 苏卫国)

作者简介:杨伟俊,男,1983年生。北京航空航天大学机械工程及自动化学院博士研究生。主要研究方向为板材成形工艺及数值模拟。发表论文2篇。李东升,男,1965年生。北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授、博士研究生导师。李小强,男,1979年生。北京航空航天大学机械工程及自动化学院博士后研究人员。

作者简介:李延来,男,1971年生。东北大学流程工业综合自动化教育部重点实验室博士后研究人员。主要研究方向为产品研发、质量工程和运作管理等。雒兴刚,男,1971年生。东北大学流程工业综合自动化教育部重点实验室副教授。姚建明,男,1974年生。中国人民大学商学院讲师。焦明海,男,1973年生。东北大学信息科学与工程学院讲师。