

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.04.011

300M 钢喷丸强化残余应力场的数值模拟

卢国鑫^a, 宋颖刚^a, 王仁智^b, 王强^a, 王欣^a

(北京航空材料研究院 a. 金属腐蚀与防护研究室 b. 金属物理研究室, 北京 100095)

摘要: 利用有限元分析软件 ABAQUS 6.12, 建立了 300M 钢喷丸强化有限元模型, 利用单弹丸多次冲击靶材的方式模拟喷丸过程中靶材表面发生的循环塑性变形。在控制相同动能输入的条件下, 分别选取 3 种喷丸工艺, 对不同喷丸工艺处理后的残余应力场进行有限元模拟并加以比较。结果表明: 控制动能输入而改变弹丸尺寸与速度的 3 种工艺中, 弹丸尺寸与速度分别为 0.8 mm 与 37 m/s 时, 靶材获得“饱和”残余压应力场所需冲击次数最少, “饱和”残余应力场的分布也各不相同, 残余压应力场强度是多个工艺参数的函数。

关键词: 有限元模拟; 喷丸; 冲击次数; 残余压应力场

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)04-0072-05

Numerical Simulation of 300M Steel Residual Stress Field Caused by Shot-peening

LU Guo-xin^a, SONG Ying-gang^a, WANG Ren-zhi^b, WANG Qiang^a, WANG Xin^a

(a. Metal Corrosion and Protection Laboratory, b. Metal Physics Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Abstract: The model of 300M steel shot-peening process is built using finite element analysis software ABAQUS 6.12. The cycle plastic deformation of the target material is simulated by the way of several attacks on targets with one shot. Three shot-peening processes with the same kinetic energy input are selected to compare the residual stress field after shot-peening. Simulation results show that among the three processes which kinetic energy input is constant but the shot size and velocity change, when the shot diameter and velocity are 0.8 mm and 37 m/s respectively, the impact times required to obtain a stable residual stress field is the least, the obtained stable residual stress field is different, and the intensity of compressive stress field changes with multiple process parameters.

Key words: finite element simulation; shot-peening; impact times; compressive stress field

0 引言

飞机起落架等主承力构件从发展趋势看, 其要求越来越高, 长寿命、高可靠成为基本要求, 同时对制造工艺也提出了更高的要求^[1]。300M 钢是目前飞机起落架的主要用钢^[2]。

喷丸是一个复杂的循环动态碰撞接触过程, 影响因素众多。目前喷丸工艺参数的选择主要依靠试验或经验, 而试验研究具有很大的局限性, 严重制约了喷丸强化技术的发展。基于这个原因, 借助于飞速发展的计算机和有限元数值分析方法

来计算喷丸过程中涉及到的多种非线性的耦合以达到分析喷丸引入靶材内部的残余应力分布的效果, 显得十分必要。近年来, 国内外学者为了揭示喷丸参数和喷丸工艺效果之间的关系做出了一定的预测。Al-Hassani 等人^[3]、凌祥等人^[4]、李雁淮等人^[5]均采用单个弹丸冲击靶材的简化模型对喷丸过程进行了有限元模拟, 在弹丸以及目标物体材料属性、弹丸喷射角度、冲击次数等对喷丸后残余应力场的影响方面做过一定的研究; 汤英等人^[6]对单边缺口拉伸试样进行喷丸强化工艺的数

收稿日期: 2013-03-08; 修回日期: 2013-06-25

作者简介: 卢国鑫(1988-), 男(汉), 山东滨州人, 硕士生; 研究方向: 表面强化及改性

网络出版日期: 2013-07-01 13:22; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130701.1322.011.html>

引文格式: 卢国鑫, 宋颖刚, 王仁智, 等. 300M 钢喷丸强化残余应力场的数值模拟 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(4): 72-76.

值模拟,研究各工艺参数与靶材残余应力场的关系,并分析了各工艺参数对残余压缩应力强度因子 K_{res} 的影响;须庆等人^[7]对 DD3 单晶高温合金喷丸后的残余应力场进行了数值模拟和试验验证,得出各向异性合金残余应力场的分布规律。

这些学者在研究喷丸工艺参数对残余应力场影响时,都是采取控制变量的方法,仅仅探讨某一个参数对喷丸效果的影响,未曾对喷丸过程中的能量变化进行仿真模拟,研究仍显片面。文中针对 300M 钢通过有限元软件进行喷丸强化过程数值模拟,在考虑不设置弹丸为刚体的条件下,对相同动能输入条件下的不同喷丸工艺下靶材所形成的残余应力场进行分析和比较。

1 模型建立

1.1 模型建立

利用 ABAQUS 软件的动力学分析模块建立喷丸模型。三维有限元模型如图 1 所示。

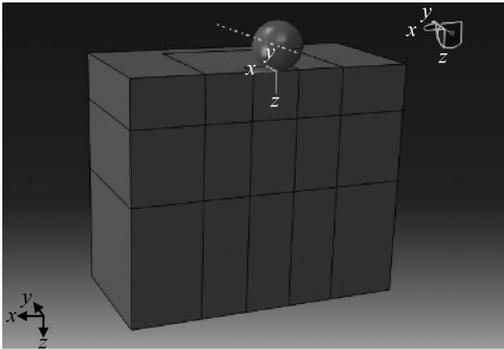


图 1 单弹丸喷丸三维有限元模型

Fig. 1 The dimensional finite element shot-peening model of single shot impact

考虑到靶材的对称性,选取 1/2 模型,上方为单弹丸,下方为靶材;模型尺寸选取 $12 R \times 6 R \times (10 R + 0.1 \text{ mm})$, R 为铸钢弹丸的半径;靶材为 300M 钢,300M 钢和铸钢弹丸的材料属性在表 1 中示出,输入定义材料塑性性能的真实应力应变数据点来逼近靶材 300M 钢实际的材料性质;由于弹丸与靶材相比,强度没有大的差别,考虑到弹丸强度对整个模型结果的影响,与其它文献^[3,8-10]不同,不将弹丸设为刚体;为获得稳定的残余应力场并节约成本,取计算时间 $6 \times 10^{-4} \text{ s}$,通过计算验证,计算结束时冲击过程已经结束,模型动能、弹丸动能等各种能量以及动态应力状态均趋于稳定^[8];弹丸和靶材的接触采用面-面接触,法向设

置为默认的硬接触,切向接触假设为无摩擦;载荷的施加采取设定弹丸初始速度的方式来实现;在此模型靶材的对称面及底面施加无反射边界条件,防止应力波在边界处发生反射;靶材的网格划分选用 C3D8R 单元,弹丸选用 C3D4 单元^[9],对靶材减缩积分单元引入少量的人工“沙漏刚度”以限制沙漏模式的扩展,靶材碰撞区域的网格单元尺寸适当减小,但为提高计算效率,在模型边界和下半部分网格单元尺寸逐渐增大。

表 1 靶材与弹丸的材料属性^[1-2]

Table 1 Material properties of the target and shot^[1-2]

Material	$\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$E /$ GPa	Poisson's ratio	$\sigma_{0.2} /$ MPa	$G /$ GPa
Target	7 800	200	0.3	1 630	80
Shot	7 800	210	0.3		

1.2 参数确定

在前人已做的众多数值模拟结果^[3-10]基础上,通过对弹丸尺寸和冲击速度等参数进行控制,在保证输入动能相同的条件下,探讨不同工艺参数对喷丸材料残余应力场的影响。针对单弹丸模型,只考虑对单弹丸弹坑中心区域的影响。

考虑到喷丸是靶材发生循环塑性变形的过程,此模型中 p 弹丸直径 d 与冲击速度 v 分别为 0.3 mm 和 160 m/s,采用弹丸叠加依次冲击的方式模拟单弹丸不同冲击次数的喷丸过程且认为单弹丸 1 次冲击同一位置获得 100% 的表面覆盖率,即可得到喷丸过程中随喷丸时间增长而获得的不同覆盖率条件下靶材残余应力场的分布。

采用模拟结果中靶材表面应力场达到稳定状态时弹丸冲击次数的模型,利用式(1),调节弹丸尺寸和冲击速度,得到同样的动能输入量。根据工程中最常用的 3 种铸钢弹丸 S110、S230 和 S330 的尺寸选取 3 种不同工艺参数,如表 2 所示。

$$\begin{cases} \frac{1}{2} m_a v_a^2 = \frac{1}{2} m_b v_b^2 \\ m = \rho V = \rho \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \end{cases} \quad (1)$$

表 2 不同工艺条件下的工艺参数

Table 2 Process parameters under different conditions

shot-peening process	Diameter of shot d / mm	Impact velocity $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
SP1	0.3	160
SP2	0.6	57
SP3	0.8	37

2 模拟结果分析

2.1 喷丸残余应力场分析

喷丸后,残余压应力场强度 ICRSF(Intensity of Compressive Stress Field)表征靶材内部形成残余压应力场的特征参量^[11]之一,它体现了弹丸动能转化为储存在靶材内部弹性变形能量的大小。在服役过程中,平行于工件表面方向的残余应力在阻碍疲劳裂纹生成和扩展过程中起主要作用^[12],文中研究平行于靶材对称面的横向残余应力 S11。

取弹丸冲击靶材 4 次,确定喷丸工艺参数:弹丸直径与冲击速度分别为 $d=0.3\text{ mm}$, $v=160\text{ m/s}$ 的条件下,形成的残余应力场状态如图 2(图中“SPX-Y”中“X”代表喷丸工艺,“Y”代表冲击次数,下同)所示。可以看出,经弹丸冲击后,沿靶材深度方向形成了残余压应力场,表面残余压应力、最大残余压应力、最大残余压应力深度、压应力场深度分别约为 800 MPa、2 300 MPa、0.09 mm、0.25 mm,由于数值模拟过程中的靶材为具有应变硬化性质的理想材料,喷丸过程为单弹丸冲击靶材同一位置且无实际喷丸过程中邻近丸粒的影

响,所以靶材产生的最大残余压应力值达到初始屈服强度的约 1.5 倍。

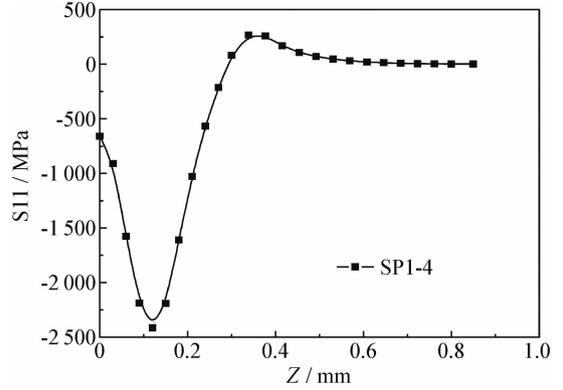


图 2 单弹丸冲击靶材 4 次形成的残余压应力场
Fig. 2 Residual compressive stress field caused by shot-peening after 4 times impact

2.2 冲击次数对残余应力场的影响

建立前文所述 3 种工艺条件下不同冲击次数的喷丸模型。通过建立模型得出单弹丸对靶材不同冲击次数,靶材在 3 种不同工艺下喷丸循环塑性形变过程中对称面残余应力(S11-Z)沿深度的变化曲线如图 3。

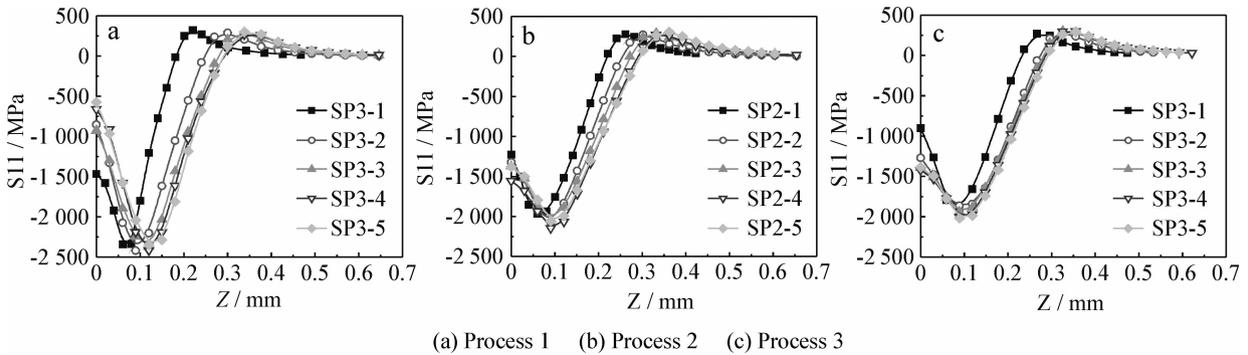


图 3 不同喷丸工艺参数下所形成的靶材对称面残余应力(S11-Z)的变化曲线

Fig. 3 Residual stress curves(S11-Z) of the target symmetry plane under different shot-peening process

由图可以看出,在一定的工艺条件下,随着冲击次数的增加,残余应力场最终都会趋于稳定状态,表征残余应力场的几个特征参量不会继续发生变化,即达到了“饱和”状态;针对同一工艺,随着弹丸冲击次数的增加,最大残余压应力深度向靶材内部产生轻微延伸,亚表层最大残余压应力值略有增加,残余压应力场强度明显呈增强的趋势,所以整体来说冲击次数的增加对喷丸产生积极的影响,直至残余压应力场趋于稳定;相对不同工艺来讲,残余应力场趋于稳定所需要的冲击次

数不同且表面残余压应力呈现不同的变化趋势。第 1、2 种工艺条件下,残余应力场基本在弹丸冲击 3 次后达到稳定状态,而第 3 种工艺则在冲击 2 次之后就趋于稳定状态,在弹丸直径与冲击速度分别为 $d=0.3\text{ mm}$, $v=160\text{ m/s}$ 的工艺条件下,残余应力场稳定之前表面残余压应力随冲击次数的增加而下降,然而,在弹丸尺寸增加、冲击速度大幅下降的后两种工艺下,表面残余压应力值则呈现增加的趋势。

在喷丸过程中,相同动能输入的情况下,“小

弹丸,大速度”的作用形式与“大弹丸,小速度”的作用形式相比,前一种工艺条件下,弹丸对靶材作用的接触面积内所施加的冲击载荷大而接触时间短,导致“小弹丸,大速度”工艺条件下靶材在接受碰撞之后的振动频率高,其达到稳定应力场要求的冲击次数增多,即所需喷丸时间变长。

通过靶材在弹丸1次冲击后的弹性储存能大小和不均匀塑性变形程度来解释 SP1 喷丸工艺下靶材表面残余压应力值随冲击次数增加反而降低的现象。图4为不同工艺条件弹丸冲击靶材1次得到的残余压应力场曲线,3种不同工艺下获得了不同的残余压应力场强度,由于不同残余压应力场强度对应着靶材内部弹性储存能的大小,由此可得,在弹丸1次冲击靶材后,“小弹丸,大速度”工艺条件下,靶材获得较大的弹性储存能。

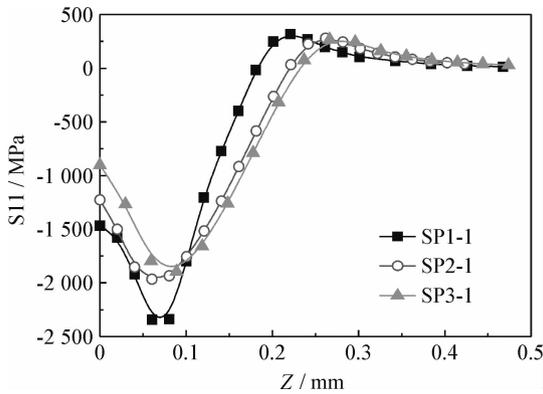


图4 不同工艺条件弹丸冲击靶材1次得到的残余压应力场
Fig. 4 Residual compressive stress field of different shot-peening process after one time impact

图5为靶材受喷表面在3种不同工艺下喷丸所形成的塑性应变分量(PE11-X)的变化曲线,由图可观察到“小弹丸,大速度”工艺条件产生的不均匀塑性变形程度明显偏高。由于靶材表面残余应力是弹丸引入压应力与后续弹丸不间断冲击产生应力松弛共同作用的结果,高弹性储存能以及明显不均匀塑性变形使靶材在接受后续弹丸多次冲击靶材时,表面的应力松弛程度增大。在 $d=0.3\text{ mm}$, $v=160\text{ m/s}$ 的喷丸工艺中,后续弹丸的多次冲击引起表面残余压应力值降低。

2.3 喷丸残余应力场分析

从能量转化的角度来说,实际喷丸过程中,影响实际喷丸效果的只有塑性变形功与弹性变形

功,塑性变形功使得靶材表面发生塑性变形,形成弹坑直接影响靶材表面粗糙度,而塑性变形功与弹性变形功共同作用使靶材发生不均匀塑性变形所产生的材料内部残余压应力则成为提高材料机械性能、抗疲劳性能等的主要因素。

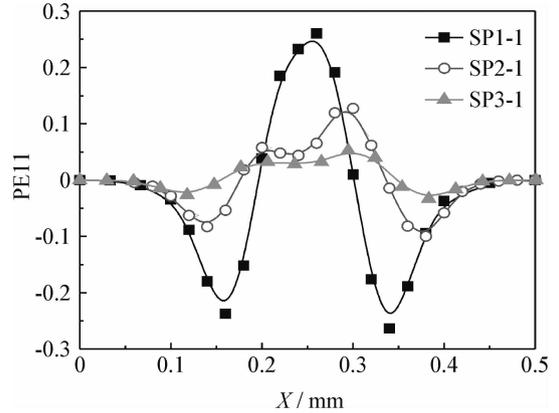


图5 不同喷丸工艺参数下所形成的靶材表面塑性应变分量(PE11-X)的变化曲线
Fig. 5 Plastic strain component curves (PE11-X) of the target symmetry plane after different shot-peening process

分别用喷丸后靶材表面发生的沿对称面深度方向的位移残余压应力场强度来定性判断相同能量输入的不同喷丸工艺后的不均匀塑性变形与靶材内部弹性储存能的大小。为更好的体现材料在喷丸过程中的循环塑性变形过程,取单弹丸冲击靶材4次得到的残余压应力场作为研究对象。图6示出了不同喷丸工艺靶材对称面深度方向的位移分量。

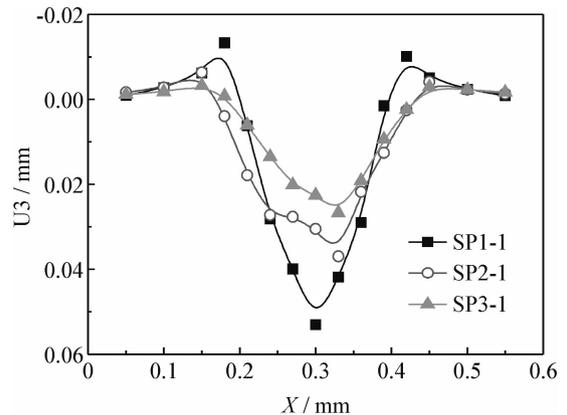


图6 不同喷丸工艺参数下所形成的靶材对称面深度方向位移分量(U3-X)的变化
Fig. 6 Displacement component (U3-X) of the target symmetry plane after different shot-peening process

可以看出:在3种不同工艺条件下,靶材表面形成的圆形弹坑的直径大致相同,但坑深出现明显差异,计算3种不同工艺形成弹坑在对称剖面的面积,得出在相同动能输入的条件下,该面积随速度增大而增大,也就说明“小弹丸、大速度”获得最大的塑性变形量,即动能转化的塑性变形功最大,这也在一定程度上代表了该工艺获得的较大表面粗糙度。

3种不同喷丸工艺弹丸冲击靶材4次,得到的残余压应力场曲线如图7。在相同动能输入的条件下,3种不同工艺得到的残余压应力场强度:SP2>SP1>SP3,弹丸直径与冲击速度为 $d=0.6\text{ mm}$, $v=57\text{ m/s}$ 的工艺条件下,塑性变形量适中,残余压应力场强度最大,即动能转化得到最高的弹性功;相比第三种工艺,第一种工艺获得了较大的残余压应力场强度,但其塑性变形量也相应提高。残余压应力场强度并不是单纯随某一工艺参数变化,而是多个工艺参数相互权衡的结果。

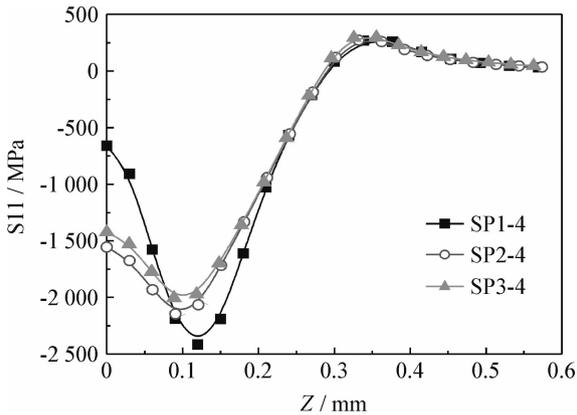


图7 不同喷丸工艺条件弹丸冲击靶材4次得到的残余压应力场

Fig. 7 Residual compressive stress field of different shot-peening process after 4 times impact

3 结论

利用有限元模拟的方法,针对300M钢,分别建立单弹丸冲击靶材不同次数的三维立体模型,得到喷丸后单弹丸对靶材不同冲击次数的残余压应力的变化曲线,并取靶材残余应力趋于稳定状态的冲击次数为条件,研究3种不同工艺在弹丸冲击靶材4次后的残余应力场,得到以下结论:

(1) 相同动能输入的不同工艺条件下,单弹丸冲击靶材所获得残余应力场渐趋稳定且所需的

冲击次数不同。

(2) 针对同一工艺,在残余应力场稳定前,随冲击次数增加,残余压应力场强度增加,冲击次数对喷丸效果有积极影响;对不同工艺,后续弹丸对经过1次冲击的靶材表面残余应力的影响不同。

(3) 相同动能输入条件下,“小弹丸、大速度”在靶材表面形成弹坑获得最大的塑形变形量,动能转化的塑形变形功最大;相同动能输入条件下,不同工艺条件获得的残余压应力场强度不同,残余压应力场强度并不是单纯随某一工艺参数变化,而是存在多个工艺参数的合理搭配区间。

参考文献

- [1] 刘天琦. 飞机起落架用材发展 [C]. 中国航空学会 2007 年学术年会论文集, 2007.
- [2] 赵振业. 航空高强度钢的理论、发展和应用 [J]. 材料工程, 1991(2): 29-31.
- [3] Hassani A, Kormi K S, Webb D. Numerical simulation of multiple shot impact [C]. Proceedings of ICSP-7, Warsaw, Poland. 1999: 217-227.
- [4] 凌祥, 彭薇薇, 倪红芳. 喷丸三维残余应力场的有限元模拟 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 182-189.
- [5] 李雁淮, 王飞, 吕坚, 等. 单粒喷丸模型和多粒喷丸模型的有限元模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 348-352.
- [6] 汤英, 张晓晶, 吴学仁. 单边缺口拉伸试样喷丸强化残余应力及其三维应力强度因子分析 [J]. 航空学报, 2012, 33(7): 1265-74.
- [7] 须庆, 蒋传海, 陈艳华. DD3 镍基单晶高温合金喷丸强化后残余应力的有限元模拟 [J]. 机械工程材料, 2012, 36(4): 80-83.
- [8] 闫五柱, 章刚, 温世峰, 等. 表面粗糙度对喷丸残余应力场的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(4): 523-527.
- [9] 华怡, 鲁世红, 高琳, 等. 单粒粒撞击金属靶材的有限元分析 [J]. 材料科学与工程学报, 2011, 29(3): 420-424, 432.
- [10] Mori K, Osakada K, Matsuoka N. Finite element analysis of peening process with plasticity deforming shot [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 45(1): 607-612.
- [11] 王仁智. 金属材料的喷丸强化原理及其强化机理综述 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 1-9.
- [12] 李源, 雷丽萍, 曾攀. 弹丸束喷丸有限元模型数值模拟及试验研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 3-48.

作者地址: 北京市海淀区温泉镇环山村
北京航空材料研究院

100095

Tel: (010) 6249 6450

E-mail: luao2010@sina.com