

文章编号:1672-3961(2010)06-0067-05

基于 SPH 耦合有限元法的喷丸残余应力场数值模拟

刘飞宏,王建明*,余丰,张刚

(山东大学机械工程学院,山东 济南 250061)

摘要:针对有限元方法不能有效模拟喷丸加工过程中大量弹丸反复冲击的现状,使用光滑粒子流体动力学法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)耦合有限元法(finite element method, FEM)模拟喷丸强化过程。工件采用 FEM 建模,弹丸采用 SPH 建模,通过接触算法实现 SPH 和 FEM 的耦合以模拟弹丸对工件的强化作用。提出弹丸流的材料模型,分析了相关参数对工件残余压应力分布和能量利用率的影响。结果表明,随着弹丸打击次数的增加,工件表面残余压应力分布逐渐趋于稳定;高覆盖率能有效改善工件表面残余压应力分布,低覆盖率则会降低喷丸效果;适当提高弹丸速度虽然可以使残余应力层深度和最大残余压应力值增加,但会降低能量利用率。通过与相关实验数据的比较,验证了仿真模型和结果的正确性。

关键字:喷丸强化; SPH 耦合有限元;弹丸流材料模型

中图分类号: O242. 21; TG668 **文献标志码:** A

Numerical simulation for compressive residual stress of shot-peening based on SPH coupled FEM

LIU Fei-hong, WANG Jian-ming*, YU Feng, ZHANG Gang

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In dealing with shot-peening simulation, FEM(finite element method) can not simulate a mass of shots impinging the target. To overcome the defect of FEM, the SPH(smoothed particle hydrodynamics) coupled FEM modeling for shot-peening was presented, in which the shots were modeled by SPH particles and the target material was modeled by FEM. The two parts interact through a contact algorithm. The material model for shot flow was established, and the relationships between compressive residual stress and peening frequencies, coverage, velocities were analyzed. Steady compressive residual stress can be obtained by repetitious peening, higher coverage can improve the distribution of compressive residual stress, higher velocities can induce higher and deeper residual stress in the target surface. The simulation results agree well with the experimental data.

Key words: shot-peening; SPH coupled FEM; material model for shot flow

0 引言

喷丸强化是一种提高工件疲劳寿命的表面强化工艺。通过压缩空气使弹丸具有 40 ~ 160 m/s 的速度高速撞击金属表面,如无数小锤对其锤击,使金属工件晶粒破碎、细化,最终在表面形成均匀的残余压应力层。残余压应力层可以抵消工件表面承受的破

坏性拉应力,减缓裂纹的扩展速度,延长零件疲劳寿命。喷丸表面强化被广泛应用于各个工业部门,如飞机制造、汽车、模具、化工、核子工业等^[1-2]。

喷丸表面强化过程机理复杂,涉及参数众多,各工艺参数选择和搭配对残余应力影响很大,且难以用精确的数学模型描述。目前主要通过测量阿尔门(Almen)试片弯曲的弧高值来度量喷丸的强弱程度,这种方法只能近似反映残余应力的大小,不能实

收稿日期:2010-07-26

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(Y2007A07)

作者简介:刘飞宏(1985-),男,山东栖霞人,硕士研究生,主要研究方向为无网格法、喷丸强化技术。E-mail:icefires2000@yahoo.com.cn

* 通讯作者:王建明(1962-),男,湖北武汉人,教授,主要研究方向为计算力学、多体动力学、喷丸强化技术。E-mail:wangjianming@sdu.edu.cn

现精确测量,如无法描述残余压应力的分布,无法推测残余压应力层深度,而这些信息正是判断提高工件疲劳强度的重要因素。取不同材料的零件进行喷丸处理,即使获得同样的弧高度,其表层的残余应力大小分布可能差得很远。

为揭示喷丸强化过程的机理,许多学者进行了不懈的努力。Khabou、Li AK 等建立准静态模型对喷丸过程进行数值模拟^[3-4];Watanabe、Kobayashi 等对单丸粒弹丸进行冲击和静压实验,发现二者在靶材料上的残余应力分布并不相同^[5-6]。Edberg 等使用不同类型靶材料对比最大应力分布状况^[7];Meguid 建立单/多丸粒冲击模型研究靶材残余应力大小与应力层深度的关系^[8]。这些数值模拟多因为有限元法的局限性,只能在模拟中考虑单颗或几颗弹丸的撞击作用,故模拟模型与实际工程应用有很大差异。

本文首次采用 SPH 耦合 FEM 方法建立喷丸强化过程的数值模拟模型,其中采用 Lagrange 网格对金属工件建模,采用 SPH 粒子对弹丸流建模,通过状态方程考虑了空气和弹丸的混合作用。通过接触算法实现 SPH 和 FEM 的耦合以模拟弹丸对工件的冲击强化作用。分别分析了弹丸打击次数、覆盖率、弹丸速度对工件残余压应力的影响,并从能量角度,讨论了初始速度与能量利用率的关系。通过仿真结果与实验数据的对比分析验证了仿真模型及结果的正确性。

1 SPH 方法理论基础

1.1 SPH 方法简介

SPH 方法是最近 20 多年来发展起来的一种新的无网格 Lagrange 型粒子方法,其基础理论是采用核近似方法将偏微分方程转换成积分方程,然后用粒子近似方法将连续形式的积分方程转换成离散形式的方程^[9]。

SPH 方法计算精度不受物质变形程度大小的影响,能够处理随时间变化的不连续性和大变形以及高应变率问题,且无需网格重构,并能保证计算精度不受损。因此 SPH 数值仿真算法非常适宜于高速或超高速碰撞等冲击动力学问题的数值仿真,适用于喷丸这样的离散动力学系统的仿真建模及数值模拟。

1.2 核近似

函数 $f(\mathbf{x})$ 可由如下等式表示:

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') d\mathbf{x}', \quad (1)$$

式中, $f(\mathbf{x})$ 为三维坐标向量 \mathbf{x} 的函数, Ω 为点 \mathbf{x} 的支持域, $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$ 为狄拉克 δ 函数,

$$\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') = \begin{cases} \infty, & \mathbf{x} = \mathbf{x}', \\ 0, & \mathbf{x} \neq \mathbf{x}'. \end{cases} \quad (2)$$

如果狄拉克 δ 函数被核函数 $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h)$ 所代替, $f(\mathbf{x})$ 又可表示为

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}', \quad (3)$$

式中 h 为光滑长度。

1.3 粒子近似

将式(3)的积分形式转化为支持域内所有粒子叠加求和的离散化形式:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(\mathbf{x}_j) W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h), \quad (4)$$

式中, ρ_j 为粒子 j 的密度, m_j 为位于 j 处的粒子质量。

由于 SPH 属于无网格 Lagrange 型粒子方法,用其进行喷丸强化建模时,既能适应喷丸流的高速运动,避免采用有限元法造成的网格畸变,又可以很好地模拟粒子流这种离散型介质,实现有限元法无法实现的针对大量弹丸的建模及仿真。故可认为采用 SPH 法对喷丸强化进行建模及仿真有望达到更符合实际工况的仿真结果,是一种值得探索的新方法。

2 数值仿真模型

根据文献[10]中的实验参数,利用 LS-DYNA 软件建立喷丸强化仿真模型,其中工件材料使用 Johnson_cook 材料模型。弹丸和空气的混合材料模型采用状态方程表示,建立其压力和密度变化的关系。由于状态方程形式多样,一般采用半经验半理论公式,方程中的主要参数由试验确定。

2.1 工件材料的本构方程

工件材料为 AISI-304 奥氏体不锈钢,由于工件表面发生高速塑性变形,应变率高,材料本构关系模型采用 Johnson_cook 材料模型。该模型动态屈服应力为

$$\sigma_y = (A + B \overline{\varepsilon}^{p_n}) (1 + c \ln \varepsilon') (1 - T^m), \quad (5)$$

式中, $\overline{\varepsilon}^{p_n}$ 表示等效塑性应变, ε' 为等效塑性应变速率,其它力学参数如表 1 所示。

表 1 AISI-304 钢的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of steel AISI-304

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	A / MPa	B / MPa	n	c
7.8	96	1 127	0.5	0.067

注: ρ 为材料密度; A 、 B 、 n 、 c 为 Johnson_cook 材料模型参数^[10]。

2.2 弹丸流的材料模式

弹丸为铸铁丸,使用 SPH 粒子建模,在 LS-DYNA 中弹丸流材料本构关系模型使用 Null 材料模型。由于在实际喷丸过程中,弹丸夹杂着大量空气形成弹丸流,故在建立弹丸状态方程时需考虑空气的作用^[11]。

弹丸流压力 P 与密度 ρ 的关系式为

$$P = C_0^2(\rho - \rho_{mix}), \quad (6)$$

式中, C_0 为铸铁弹丸材料声速, ρ_{mix} 为弹丸和气体的初始混合密度,

$$\rho_{mix} = (1 - \alpha_0)\rho_{shot} + \alpha_0\rho_{air}, \quad (7)$$

ρ_{shot} 为固体弹丸的密度, ρ_{air} 为空气的密度, α_0 为弹丸流中空气的体积百分比,可根据弹丸流量算出。

将式(6)转化成多项式形式:

$$P = a_1\mu + a_2\mu^2 + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu + b_1\mu^2)E. \quad (8)$$

弹丸流材料的密度变化率为

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_{mix}} - 1. \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得出弹丸流的线性多项式形式的状态方程为

$$P = C_0^2 \rho_{mix} \mu, \quad (10)$$

其中 $C_0 = 5.2 \text{ km/s}$ 。

2.3 模型描述

喷丸模型如图 1 所示,根据文献[10]实验条件建模, A 为工件,材料为 AISI-304 奥氏体不锈钢,采用 Lagrange 网格划分,为提高计算效率,工件尺寸为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$; B 为铸铁弹丸流,采用 SPH 粒子建模。通过定义关键字 CONTACT_ATUOMATIC_NODES_TO_SURFACE 实现接触算法,模拟弹丸与工件的相互作用。工件 A 的底面为固定位移边界,其 4 个侧面采用非反射边界以避免应力波在边界上的反射。

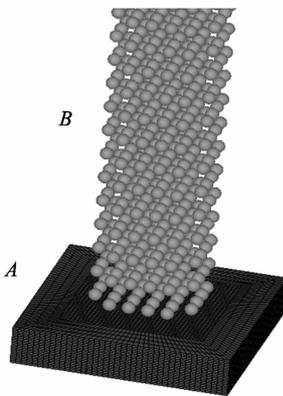


图 1 喷丸强化数值模拟模型

Fig. 1 The model of shot-peening numeral simulation

3 数值结果分析

采用上述模型对喷丸全过程进行数值仿真分析。某两时刻弹丸的打击效果如图 2 所示。

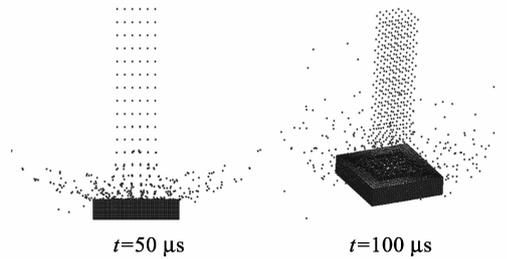


图 2 弹丸打击工件图

Fig. 2 Shots impacting work piece

为便于同文献[10]的实验结果进行对比,在工件平面上取 3 个不同的区域进行残余应力测试,如图 3 所示。撞击前, A 区域处于 4 个弹丸的中心,在整个过程中始终没有被弹丸直接打击; B 区域处于两个丸粒之间; C 区域处于弹丸冲击的影响区域内。通过对不同区域残余压应力分布的测试,模拟得出了相关工艺参数对工件残余压应力分布的影响规律,并从能量的角度,分析了整个喷丸过程中的能量利用率。

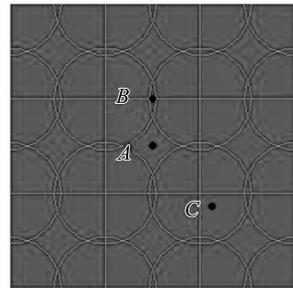


图 3 撞击前弹丸在工件表面分布图

Fig. 3 The distribution of shots on the work piece before impacting

3.1 打击次数与残余应力分布的关系

打击次数对不同区域应力分布的影响如图 4 ~ 图 6 所示,模拟弹丸直径为 0.8 mm ,丸速 45 m/s ,覆盖率为 120% 。图中同时给出了来自于文献[10]的实验结果以便于比较。由图 4 ~ 图 6 可以看出,在打击速度一定的条件下,随着打击次数的增加, A 区域残余压应力值增大; B 区域残余压应力值略有增大,最大残余压应力大小基本不变; C 区域残余压应力值则明显减小。图中还可以看出,虽然在第一次打击时各区域的残余压应力分布相差很大,但是随着打击次数的增加,工件表面的残余压应力分布逐渐趋于一致。

图 7 为在 10 次打击之后, 3 个区域的残余压应力分布与实验结果的对比图,如图所示残余压应力

值均趋于稳定,并与实验结果相吻合。

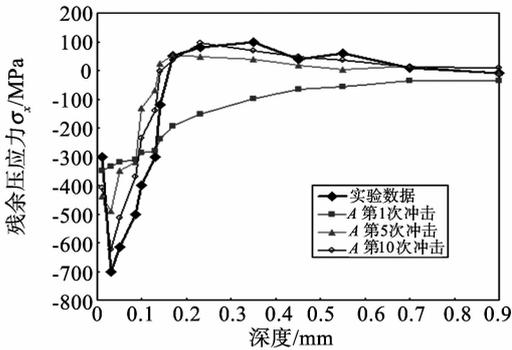


图4 A区域打击次数与残余压应力分布

Fig. 4 Residual stress profiles at area A for different frequencies of impingements

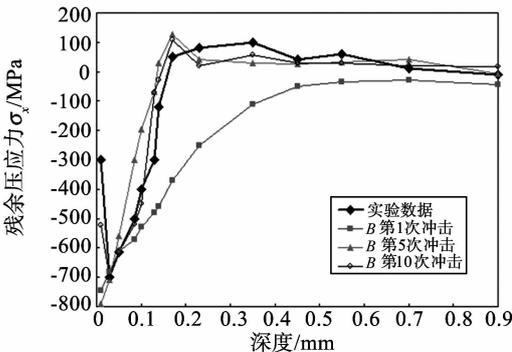


图5 B区域打击次数与残余压应力分布

Fig. 5 Residual stress profiles at area B for different frequencies of impingements

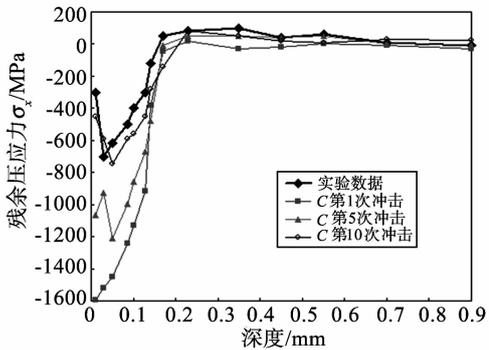


图6 C区域打击次数与残余压应力分布

Fig. 6 Residual stress profiles at area C for different frequencies of impingements

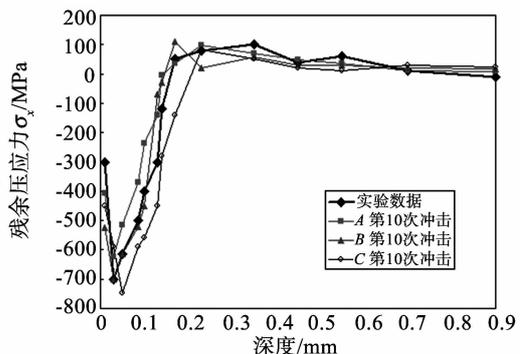


图7 10次打击后3个区域压应力分布

Fig. 7 Residual stress profiles at area A, B, C for the 10th impingements

3.2 覆盖率与残余压应力分布的关系

图8表示了高覆盖率(120%)和低覆盖率(75%)弹丸在工件表面的覆盖情况。分别模拟弹丸直径0.8 mm,丸速45 m/s,两种覆盖率喷丸情况,当二者工件表面残余压应力分布趋于稳定时,将它们3个区域的应力结果进行平均,图9为高、低覆盖率残余压应力分布曲线。

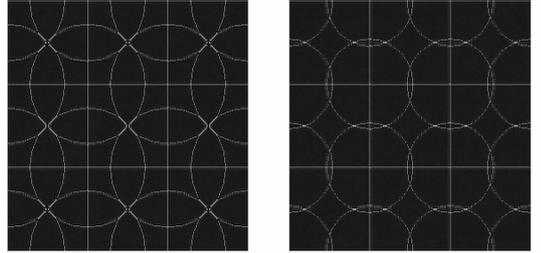


图8 高、低覆盖率在工件表面的排布

Fig. 8 The work piece surfaces with different peening coverage

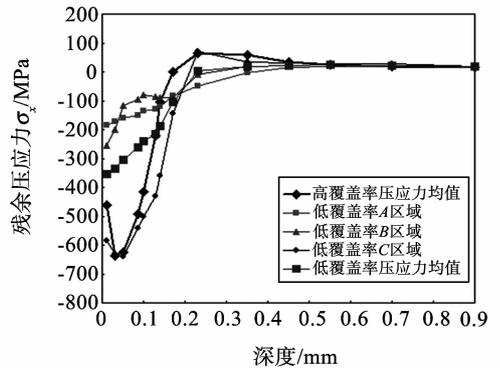


图9 不同覆盖率残余压应力分布

Fig. 9 Residual stress profiles for different peening coverage

由图9可见,在低覆盖率情况下,由于C区域仍处于弹丸影响区域内,所以只有C区域的压应力分布与实际相符合,A、B区域则由于弹丸间距的增大导致残余压应力锐减。这说明不完全覆盖率将在工件表明形成不一致的压应力分布,影响喷丸强化效果。

3.3 打击速度与残余压应力分布的关系

图10为弹丸直径0.8 mm,覆盖率100%,打击速度35 m/s、45 m/s和55 m/s时的均布残余压应力曲线。随着丸速的增加,残余压应力层的深度和最大值都有所增加。这表明在适当范围内提高喷丸速度能够增强喷丸效果,使工件疲劳强度增加。

3.4 打击速度与能量利用率的关系

用SPH粒子法可以有效跟踪弹丸粒子在撞击过程中的速度变化,本文统计了在垂直打击工件时,其覆盖率为100%,800个粒子的撞击速度,如图11所示,分析不同初始速度对喷丸强化效果的影响。

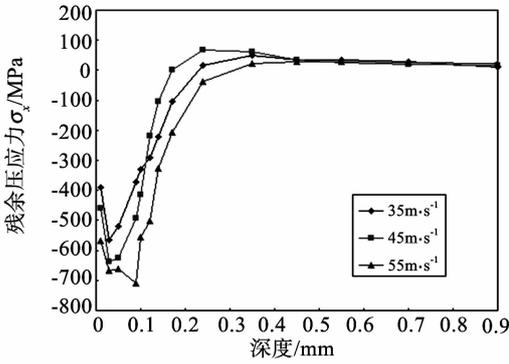


图10 不同打击速度残余压应力分布
Fig. 10 Residual stress profiles for different peening velocities

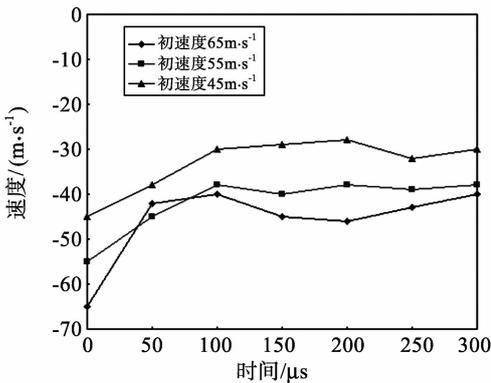


图11 不同时间弹丸撞击速度

Fig. 11 Profiles of impingement velocities at different time

由图中可以看出,弹丸撞击速度低于初始速度,这体现了弹丸反射流和入射流之间的相互影响。当弹丸初速度为 65 m/s 时,平均撞击速度为 42 m/s,能量损失为 58%;初速度为 55 m/s 时,平均撞击速度为 39 m/s,能量损失为 49%;而当初速度为 45 m/s 时,平均撞击速度为 31 m/s,能量损失为 52%。这说明由于弹丸间的相互碰撞,在特定的速度范围内存在能量利用率的最佳值。

4 总结

本文使用SPH耦合FEM方法建模,推导了弹丸流的材料模型,对喷丸强化全过程进行了数值仿真,并与相关实验结果进行了对比分析,两者结果吻合良好,证明了所建模型和仿真结果的正确性。根据仿真结果得到如下结论:

(1) 尽管开始时,工件表面不同区域的应力状况相差较大,但随着打击次数的增加,表面残余压应力分布趋于稳定。

(2) 不完整的喷丸覆盖率将在工件表面产生不均匀的残余压应力分布,A、B区域残余压应力值远小于C区域,从而影响喷丸强化效果。

(3) 喷丸速度对喷丸强化效果有着重要的影

响。适当提高喷丸速度能够增大残余压应力值和其应力层的深度。

(4) 由于入射流和反射流的相互作用,导致弹丸间相互碰撞而造成其动能损失,在特定的速度范围内存在能量利用率的最佳值。

参考文献:

[1] OBAID Y F. Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis [J]. *Mechanics of Materials*, 1995 (19):251-260.

[2] 吴寿喜,董钢,张伟. 抛丸技术的应用[J]. *中国铸造装备与技术*, 2009(2): 5-7.
WU S X, DONG G, ZHANG W. The application of technology of cleaning by blast and peening [J]. *China Foundry Machinery & Technology*, 2009(2): 5-7.

[3] KHABOU M T, CASTEX L, INGLEBERT G. Effect of material behavior law on the theoretical shot peening results [J]. *Eur J Mech A Solids*, 1990, 9(6):537-549.

[4] LI A K, YAO M, WANG D, et al. Mechanical approach to the residual stress field induced by shot-peening [J]. *Mater Sci Eng*, 1991(147):167-173.

[5] WATANABE Y, HASEGAWA N, MATSUMURA Y. Simulation of residual stress distribution in shot peening [J]. *J Soc Mat Sci Jpn*, 1995(44):110-115.

[6] KOBAYASHI M, MATSUI T, MURAKAMI Y. Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening [J]. *Int J Fatigue*, 1998(20):351-357.

[7] EDBERG J, LINDGREN L, MORI K. Shot peening simulated by two different finite element formulations[M]// Shen Shanfu, Dawson P. *Simulation of materials processing: theory, methods and applications*. Rotterdam, Netherlands: Balkema, 1995: 425-430.

[8] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(2):119-134.

[9] LIU G R, LIU M B. *Smoothed particle hydrodynamics; a mesh-free particle method* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Ltd, 2003.

[10] 李雁淮,王飞,吕坚,等. 单丸粒喷丸模型和多丸粒喷丸模型的有限元模拟[J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(3): 349-352.
LI Y H, WANG F, LÜ J, et al. Finite element analysis for shot-peening models of single shot impact and multiple impingement [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(3):349-352.

[11] 王建明,宫文军,高娜. 基于ALE法的磨料水射流加工数值模拟[J]. *山东大学学报:工学版*, 2010, 40(1): 49-52.
WANG J M, GONG W J, GAO N. Numerical simulation for abrasive water jet machining based on ALE algorithm [J]. *Journal of Shandong University:Engineering Science*, 2010, 40(1):49-52.

