

CP3 薄壁焊管数控弯曲成形有限元分析*

FE Analysis of NC Bending of Thin-Walled CP3 Welded Tubes

西北工业大学材料学院 李毅 詹梅 王建光 任宁 杨合

[摘要] 根据焊接管材的特点,通过母材试样和包含焊缝及焊缝热影响区的混合试样的单向拉伸试验以及混合试样横截面的显微硬度测试,基于拉伸过程的等应变假设和混合法则,得到了 CP3 焊管母材、焊缝以及焊缝热影响区的材料拉伸应力应变关系。进而建立了薄壁 CP3 钛管数控弯曲有限元模型,分析了弯曲参数对焊管弯曲结果的影响,比较了均质管模型和焊管模型下,3 个弯曲横截面上的壁厚分布,得到了焊缝对焊管弯曲的影响规律。

关键词: CP3 薄壁焊管 弯曲成形 有限元分析

[ABSTRACT] According to features of CP3 welded tubes, the tensile tests for parent metal and mixed metal including weld beam and heat-affected zone (HAZ) metal were carried out, and cross-sectional sample of mixed metal are used for measuring microhardness throughout weld zone and HAZ. Then on the basis of the iso-strain assumption and mixture laws, stress-strain relationships of parent metal, weld beam metal and heat-affected zone metal were obtained. Moreover, FE models for NC bending of welded tubes were established. Finally, laws of parameters on the bending of welded tubes were analyzed, and wall thickness distributions of three cross sections of deformed welded and seamless tubes were compared, then effects of weld beam on bending process of welded tubes were obtained.

Keywords: CP3 thin-wall welded tubes Bend forming Finite element analysis

钛作为一种性能良好的材料,由于具有密度小、强度高、高低温性能好、耐腐蚀性能好等优点越来越受到青睐,广泛应用于航空航天和汽车等行业^[1-2]。

目前,由于制管工艺的快速进步,已经生产出可以满足要求的薄壁焊接管。与无缝均质圆管成形相比,焊接管的成形工艺简单,管材的整体质量易于控制,而且具有生产时间短,管材的壁厚波动小,管材的几何形状规则等优点。

但是,焊接使得管材沿着横截面的圆周方向材料性能有较大差异而不均匀。一般将焊管沿周向分为 3 个部分,分别为母材区、焊缝区和焊缝热影响区。一般来

说,焊缝材料的强度较高,延伸性较差,而母材材料的强度较低,延伸性较高。因此,对于焊接管材弯曲过程的研究,就不能沿用以前的均质管材的材料模型,而需要将焊缝带来的影响考虑进去。

目前在焊管成形的研究中多忽略焊缝的影响,采用均质管模型。考虑焊缝影响的研究多见于液压胀形等工艺研究中^[3-4]。

基于以上的分析,建立了考虑焊缝影响的 CP3 薄壁钛管的数控弯曲模型,对数控弯曲过程进行了有限元模拟,分析了管材与芯棒之间的间隙和芯棒伸出量对弯曲结果的影响,比较了不同模型下周向截面上的壁厚分布情况。

1 模型的建立

1.1 材料

本文采用的 CP3 薄壁纯钛管材的外径为 2.5 英寸(63.5mm),壁厚为 0.042 英寸(1.07mm)。

在 CMT5205 电子万能试验机(如图 1 所示)上进行单向拉伸实验,得到了 CP3 钛材的母材试样材料和混合试样材料的应力应变参数,如表 1 所示。

为了更准确地模拟实际材料的弯曲过程,需要得到焊缝和焊缝热影响区的材料性能。由于一般情况下,焊缝宽度尺寸较小,很难得到材料性能。此外,由于切割得到的拉伸试样不可避免地包含了一部分母材金属。综合考虑以上因素,采用包含焊缝和焊缝热影响区的混合试样进行拉伸实验。由于焊缝、热影响区和母材的显微硬度不同,通过显微硬度仪测试硬度,区分焊缝区、热影响区和母材区。



图1 CMT5205电子万能试验机

Fig.1 CMT5205 electronic universal materials testing machine

* 国家自然科学基金项目(50875216)资助。

表1 母材试样和混合试样材料性能参数*

参数名称	母材试样	混合试样
弹性模量/psi	1.34×10^7	1.36×10^7
屈服强度/psi	47632.1	48746.1
抗拉强度/psi	62420.1	70460.1
延伸率/%	30.6	25.3
厚向异性指数	1.25	1.46

注:1psi=1/145MPa。

本试验采用使用上海泰明光学仪器有限公司生产的HX-1000显微硬度仪检测显微硬度,得到混合试样的显微硬度结果,如图2所示。

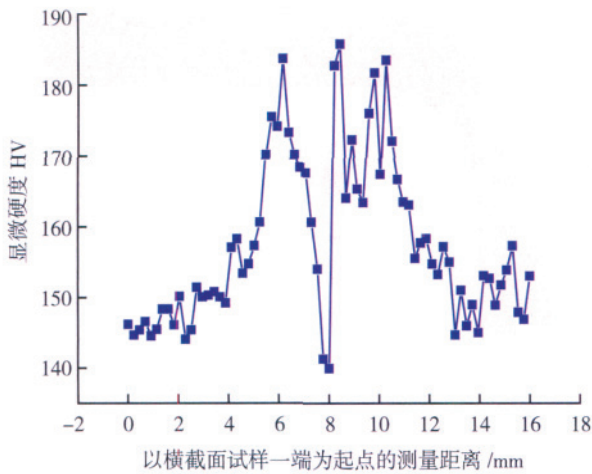


图2 混合试样横截面的显微硬度

Fig.2 Microhardness of cross section of mixed material specimen

从图2中可以看出,焊缝区的宽度大约为4mm,焊缝热影响区的总宽度大约为8mm,并且大致呈对称分布,从图中可以发现热影响区硬度梯度较大,这里将热影响区分为4个小区域,每个小区域宽度取1mm。

根据文献[5]介绍,对母材试样和包含焊缝、热影响区的母材的混合试样的拉伸试验结果,基于等应变假设的混合法则计算公式,得到母材、焊缝和热影响区的材料应力应变关系曲线如图3所示(注:1psi=1/145MPa)。

从图3中可以看出,焊缝金属的材料性能和母材金属的材料性能有较大不同,因此需要对焊管的弯曲材料模型进行分区处理,以便更好地符合实际情况。况且,从实际的焊接构件的应用来看,焊缝的存在对构件的材料力学性能等有重要影响^[6-8]。

1.2 模型几何尺寸

模拟中使用的模具尺寸如表2所示。

另外,弯曲半径为2倍的管材外径,即5英寸。在这一弯曲半径下,可以较好地说明管材的弯曲性能,如

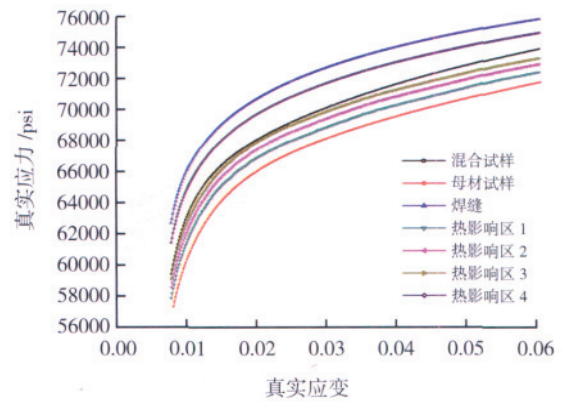


图3 各部分材料应力应变曲线

Fig.3 Relationship between true stress and strain for each part of welded tubes

表2 模拟中使用的模具尺寸

名称	参数值	名称	参数值
导管直径/英寸	2.5	防皱块长度/英寸	12
导管壁厚/英寸	0.042	芯棒长度/英寸	12.1
导管长度/英寸	30	芯棒倒角长度/英寸	0.08
夹块长度/英寸	5.8	球头数量/个	6
夹块半径/英寸	1.25	球头厚度/英寸	0.45
弯曲模直线段长度/英寸	5.8	球头间距/英寸	0.08
弯曲半径/英寸	5	压块半径/英寸	1.25
弯曲模半径/英寸	1.25	压块长度/英寸	17
防皱块半径/英寸	1.25		

注:1英寸=25.4mm。

减薄破裂、内侧起皱等弯曲过程中的常见问题。在模拟中弯曲角度为90°,球头半径的值取为比芯棒半径小0.002英寸。

1.3 摩擦条件

通过摩擦试验以及考虑实际弯曲过程中的润滑条件,在模拟中选取如表3所示的摩擦系数。

通过 ABAQUS/CAE 软件建立的模型,如图4所示。

表3 模拟中使用的摩擦系数

名称	参数值
弯曲模与管材的摩擦系数	0.1
防皱块与管材的摩擦系数	0.05
压块与管材的摩擦系数	0.25
芯棒与管材的摩擦系数	0.05
芯球与管材的摩擦系数	0.05

2 模拟方案

采用单因数法进行模拟试验。由于焊缝的摆放位

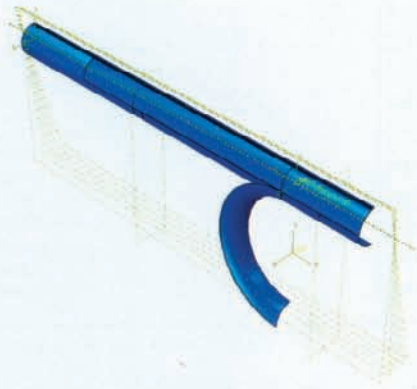


图4 焊管的有限元模型

Fig.4 FE bend forming model of welded tubes

置不同,结果将不同。这里将焊缝放在弯管的最外侧,即距离弯曲中心最远的地方。在上述模型尺寸不变的情况下,单独改变芯棒半径或者单独改变芯棒伸出量,进行芯棒与管材之间间隙以及芯棒伸出量对弯曲结果影响的模拟。

根据公式(1)^[9],确定芯棒伸出量的最大值:

$$e_{\max} = \sqrt{(R + D/2 - t)^2 - (R + d/2)^2} + r \quad (1)$$

其中, r 为芯棒圆角半径, d 为芯棒直径, R 为弯曲中心半径, t 为管材壁厚, D 为管材外径。

根据表2中的模具尺寸,采用公式(1)计算得到芯棒伸出量最大值约为2英寸。因此选取芯棒半径和芯棒伸出量的取值如表4所示。

表4 模拟中芯棒半径的取值

变量名称	参数值1	参数值2	参数值3	参数值4	参数值5	参数值6
芯棒半径 R_1 /英寸	1.181	1.185	1.189	1.193	1.197	1.201
芯棒伸出量 e /英寸	0.06	0.07	0.08	0.10	0.12	0.15

3 结果和讨论

3.1 管材与芯棒间隙

从图5中可以看出,在芯棒半径1.181~1.201英寸范围内,随着芯棒半径的增加,管材外侧的壁厚减薄率呈增加趋势,即最外侧的壁厚减薄量越来越大。在弯曲角度为20°~70°的范围内,存在弯曲平台现象,这是由于在这一弯曲范围内,整个弯曲过程趋于稳定,管材的塑性变形比较均匀。

当芯棒的半径 R_1 取1.205英寸时,如图6所示。由于芯棒半径较大,芯棒与管材之间的间隙较小,管材与芯棒的接触摩擦力较大,使得管材外侧壁厚严重减薄,

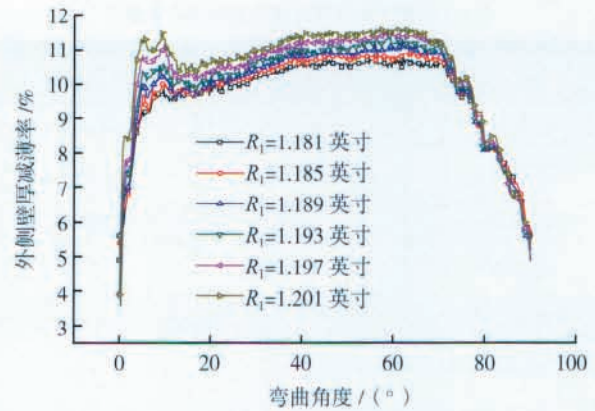


图5 芯棒半径 R_1 对外侧壁厚减薄率的影响

Fig.5 Influence of mandrel radius R_1 on outside wall thinning

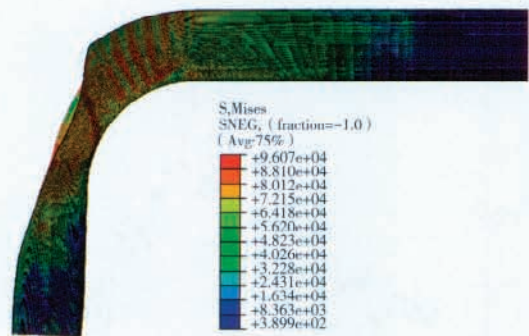


图6 芯棒半径 $R_1=1.205$ 英寸时的模拟结果

Fig.6 Simulation result when mandrel radius $R_1=1.205$ inch

管材截面扁化严重,弯曲过程没有完成。因此,芯棒与管材的间隙对弯曲过程的顺利进行有重要影响。

从图7中可以看出,随着芯棒半径的增加,即芯棒与和管材间隙的减小,管材的截面扁化率呈下降趋势。芯棒半径为1.181英寸时,最大截面扁化率大约为5%左右,芯棒半径为1.201英寸时,最大截面扁化率大约

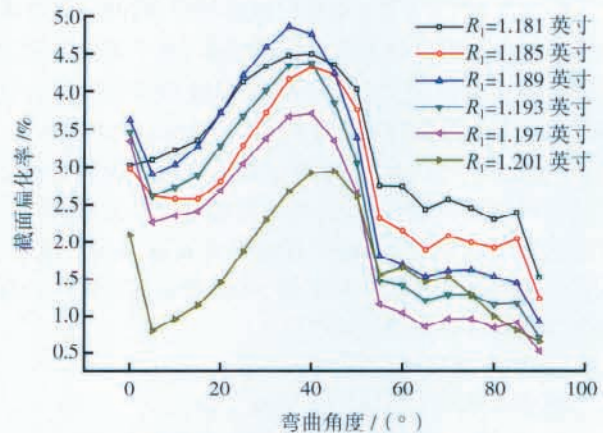


图7 芯棒半径 R_1 对截面扁化率的影响

Fig.7 Influence of mandrel radius R_1 on cross sectional flattening

为 2.8% 左右,下降近 50%。因此,增加芯棒半径,可以减小管材弯曲过程中的截面扁化率。

3.2 芯棒伸出量

从图 8 中可以看到,在模拟范围内,随着芯棒伸出量的增加,管材外侧的壁厚减薄率变化不明显,曲线基本重合。

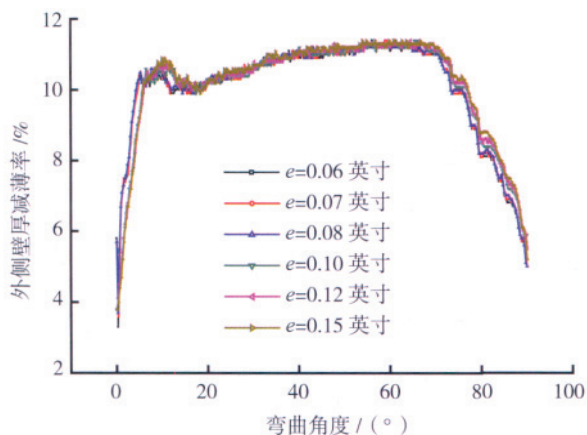


图8 芯棒伸出量 e 对外侧壁厚减薄率的影响
Fig.8 Influence of mandrel extension e on outside wall thinning

因此,改变芯棒伸出量对外侧壁厚减薄率的影响不大。从图中同样可以明显地发现平台现象。弯曲角度在 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 的范围内,壁厚减薄率增加很快;随后在小的波动后,在 $20^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 范围内出现平台现象; 70° 以后的壁厚减薄率明显下降。

从图 9 中可以看到,随着芯棒伸出量的增加,管材的截面扁化率略有下降。从总体上来看,曲线趋势基本一致。当芯棒伸出量取 0.12 英寸和 0.15 英寸时,由于芯棒伸出量的增加起到了支撑作用,截面扁化率相对于其他取值时有明显地下降。

3.3 焊缝对壁厚的影响

图 10 中的 0° 、 45° 和 90° 横截面是指弯曲角度分别为 0° 、 45° 和 90° 时过弯曲中心的径向平面与弯曲件相交的横截面。

图 10 是焊管模型和均质管模型弯曲过程中的壁厚变化,其中芯棒半径为 1.201 英寸。这里取了包含焊缝和焊缝热影响区材料在内的一部分截面区域进行研究,以反映焊缝对薄厚的影响,如图所示区域长度即圆弧截面在截面直径上的投影长度为 1 英寸。从图 10 中可以看出,管材从外侧到内侧的壁厚变化均呈上升趋势。结合图 5 和图 10,可以看到焊缝的存在对管材弯曲过程中壁厚的影响。变形程度较大的区域减薄率大,如 45° 横截面处,焊缝对壁厚的影响较小;靠近管材夹持端的区域如 0° 截面处,壁厚减薄率小并且减薄率梯度大,加上固定的夹持端的影响,使得壁厚波动较大,焊缝对壁厚

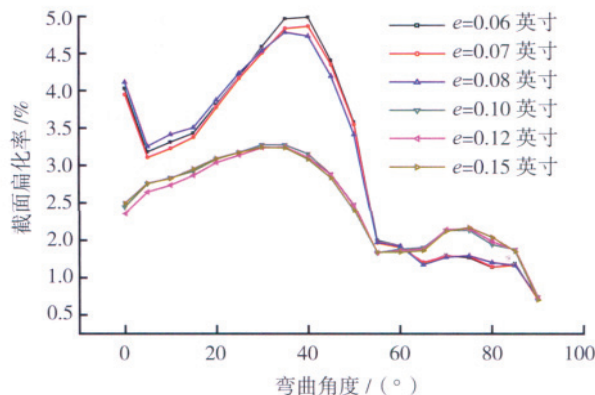


图9 芯棒伸出量 e 对截面扁化率的影响
Fig.9 Influence of mandrel extension e on cross sectional flattening

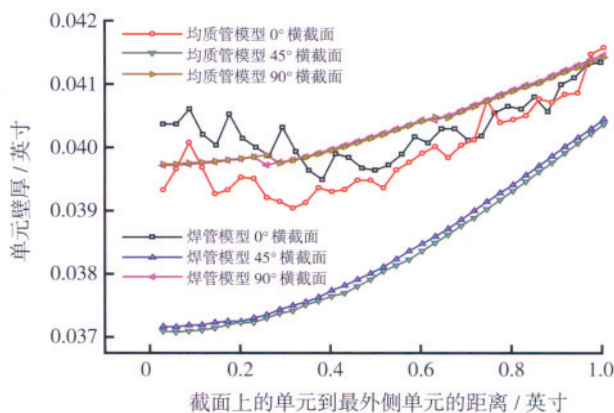


图10 焊管和均质管的横截面壁厚分布比较
Fig.10 Comparison of thickness distributions on different cross sections of welded tube and seamless tube

的影响较大;弯曲切点处的 90° 横截面,由于管材刚开始变形,两种模型的计算结果重合。

4 结论

采用考虑焊缝、热影响区性能差异建立的 CP3 焊管数控弯曲三维有限元模型,分析了芯棒半径和芯棒伸出量对壁厚减薄和截面扁化的影响规律,主要结论如下:

(1) 对于薄壁 CP3 焊管,在最大壁厚减薄率和最大截面扁化率满足要求的情况下,芯棒伸出量的影响不大,芯棒半径的影响较大。随着芯棒半径的增加,管材的最大壁厚减薄率增加,截面扁化率减小。并且,截面扁化率的减小程度较大。

(2) 焊缝对弯曲过程中的壁厚变化有影响。在接近管材夹持端处,焊缝对壁厚减小有较大影响,焊缝区域的壁厚减薄量比没有焊缝的情况下要小;随着弯曲角度的增加,变形量的增加,焊缝对壁厚的影响逐渐减小。

(下转第 93 页)

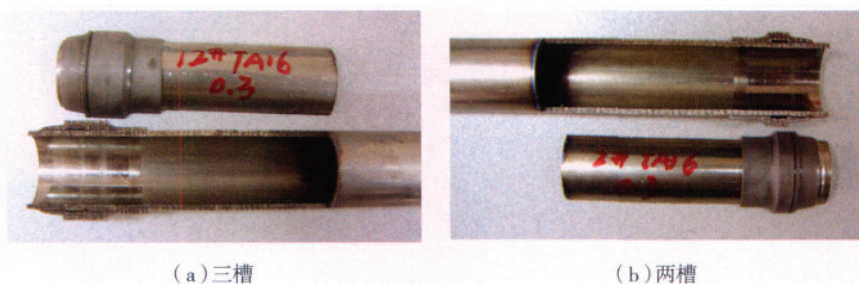


图10 不同管套结构连接件剖视图

Fig.10 Cross-sectional view of connector about different sleeve structures

管材料轴向流动更明显,从而使径向流动量减少,成形深度降低。因此,滚柱长度一定要小于管套长度。

4 验证试验

为了研究不同材料导管滚压连接件的密封性能,对表1中两种材料的导管连接件分别进行耐压试验验证,试验件见图11。试验时连接件一端与堵头连接,堵头与管套圆弧面线接触达到密封效果,另一端与耐压试验台连接。连接件内部充高压水,直到泄露、导管拉断或管套拉脱为止。试验结果见表4。



图11 耐压试验件

Fig.11 Parts of experiment of compression resistance

表4 耐压试验结果

导管材料	导管规格/mm	最终压力/MPa	试验结果
TA16	$\phi 16 \times 1$	98	导管破裂
TA18	$\phi 14 \times 1.35$	149	管套拉脱

从试验结果分析,导管内径滚压连接结构可以承受较高内压,具有很好密封性能。连接件密封性能高低主要取决于导管材料承压能力,TA18导管性能优于TA16导管。

5 结论

(1) 导管内径滚压连接机理: 导管材料在最小成形

阻力作用下填充到管套凹槽,形成拉脱阻力,由于管套卸载后回弹量大于导管,从而使管套紧紧包住导管,最终两着间保留残余接触力,从而使两者紧密连接在一起;

(2) 从装配精度角度考虑,导管下料时要对端部内侧进行倒角;

(3) 导管材料塑性越好,屈服强度越低,管套凹槽填充效果越好;

(4) 滚柱长度一定要小于管套

长度;

(5) 导管内径滚压连接结构可以承受较高内压,具有很好密封性能。

参考文献

- [1] 王同海. 管材塑性加工技术. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 曾元松, 李志强. 连接管件的先进塑性成形技术试验研究. 金属成形工艺. 2003, 21(3): 4-7.
- [3] 吕昕宇, 张士宏, 曾元松, 等. 连接管内径滚压成形有限元模型的建立及分析. 塑性工程学报, 2005(2): 85-88.
- [4] Yuansong Zenga. Finite element simulation and experimental research on the internal rolling connection for titanium alloy tubes. Materials Science Forum, 2005, 475-479: 3287-3200.
- [5] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册(飞机钣金工艺). 北京: 航空工业出版社, 1992. 552-555.

(责编 晓立)

(上接第89页)

参考文献

- [1] 李梁, 孙健科, 孟祥军, 等. 钛合金的应用现状及发展前景. 钛工业进展, 2004, 21(5): 19-24.
- [2] 毛军锋, 张冶. 宇航钛管弯曲成形技术. 情报与信息, 2000(2): 49-52.
- [3] Kim J, Kim Y W, Kang B S, et al. Finite element analysis for bursting failure prediction in bulge forming of a seamed tube. Finite Element in Analysis and Design, 2004(40): 953-966.
- [4] 张士宏. 拼焊板方盒件拉深非均匀变形的计算机模拟研究. 塑性工程学报, 2001, 8(2): 49-51.
- [5] Zhan M, Du H F, Liu J, et al. A method for establishing the plastic constitutive relationship of the weld bead and heat-affected zone of welded tubes based on the rule of mixtures and a microhardness test. Materials Science and Engineering A, 2010(527): 2864-2874.
- [6] 孙克锐, 杨连发. 焊缝管液压成形技术及热影响区对成形的影响. 桂林电子科技大学学报, 2006, 26(5): 380-384.
- [7] 孙克锐, 杨连发. 无缝管与有缝管液压成形性比较. 中国机械工程, 2006, 17: 27-31.
- [8] 张立玲. 拼焊板焊缝力学性能实验研究. 机械设计与制造, 2006, 8: 113-115.
- [9] 王光祥. 工艺参数对薄壁管数控弯曲成形质量影响的实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.

(责编 晓立)