

双金属复合管液压胀形工艺参数的优化设计

张 阁¹, 李兰云^{1,2,3}, 肖彦英⁴

(1. 西安石油大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 华中科技大学材料科学与工程学院材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072; 4. 中石油长庆油田分公司第十采油厂采油工艺研究所, 甘肃 庆阳 745100)

摘 要: 液压成形法生产的双金属复合管具有良好的力学性能和耐腐蚀性能, 合理设置工艺参数对获得高质量复合管具有重要意义。基于满足工程实际的有限元模型, 采用不同的胀形压力、初始间隙和衬管壁厚进行了双金属复合管液压成形过程的模拟试验。通过正交试验设计和综合优化分析得到: 影响残余接触应力的主次顺序依次为胀形压力、衬管壁厚、初始间隙; 影响回弹的主次顺序依次是胀形压力、初始间隙、衬管壁厚。综合考虑残余接触应力和回弹两个评价指标, 确定胀形压力 170 MPa、初始间隙 2 mm、衬管壁厚 3 mm 为最优工艺参数组合。

关键词: 双金属复合管; 液压胀形; 正交试验; 优化设计

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20192068

中图分类号: TG306

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)17-0099-05

Optimization Design of Hydro-bulging Process Parameters of Bimetallic Clad Pipe

ZHANG Ge¹, LI Lanyun^{1,2,3}, Xiao Yanying⁴

(1. School of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, School of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 4. Research Institute of Oil Production Technology, No.10 Oil Production Plant, CNPC Changqing Oilfield Branch, Qingyang 745100, China)

Abstract: The bimetallic clad pipe produced by hydro-bulging process has good mechanical properties and corrosion resistance, and it is of great significance to obtain high quality clad pipe by setting process parameters reasonably. Based on the finite element model satisfying the engineering practice, the simulation test of the hydro-bulging process of bimetallic clad pipe was carried out using different process parameters (bulging pressure, initial clearance and the liner pipe's thickness). Through the orthogonal experiment design and comprehensive optimization analysis, it is concluded that the primary and secondary order affecting residual contact stress is bulging pressure, lining pipe's thickness and initial clearance; the primary and secondary order affecting the springback is the bulging pressure, the initial clearance and the wall thickness of the liner pipe. Taking into account the residual contact stress and springback two evaluation indexes, the bulging pressure of 170 MPa, initial clearance of 2 mm and liner wall thickness of 3mm are determined as the optimal process parameters combination.

Key words: bimetallic clad pipe; hydro-bulging process; orthogonal test; optimization design

双金属复合管是将两种不同的金属管材通过塑性变形或其他连接技术结合的新型管材^[1], 以满足强度高和具有耐腐蚀性、耐磨损等^[2]严苛要求。液压成形制造的双金属复合管具有内表面无擦伤和破

坏、壁厚分布均匀等优点, 在石油天然气工业中得到广泛的应用^[3-4]。

近年来, 相关领域学者对双金属复合管制造工艺的参数优化进行了一定的研究。雷凌云等^[5]经基层和衬层理化分析和衬层壁厚分析后, 对热挤压工艺进行优化, 调整后双金属复合管质量提高。崔磊等^[6]采用响应面法进行双金属波纹管液压成形多目标工艺参数优化研究, 得到了最优工艺参数组合。倪兴健等^[7]设计正交试验方案, 确定试验因素对试验指标残余接触应力和壁厚分布均匀性的影响, 并得到优化的工艺参数组合。陆晓峰等^[8]通过正交试验法对

收稿日期: 2019-07-08

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划项目(2017JM5108); 西安石油大学青年科研创新团队项目(2015QNKYCXDT02); 西安石油大学《材料科学与工程》省级优势学科项目(YS37020203)

作者简介: 张阁(1993-), 女, 河北保定人, 助理工程师, 硕士, 主要从事金属塑性成形方面的研究; 电话: 029-81469750;

E-mail: 190609@xsyu.edu.cn

20/316L 双金属复合管的拉拔工艺参数进行了优化分析, 得出优化后硬质合金模具比优化前的工作寿命高。潘旭等^[9]依据建压曲线对在役双金属复合管逐步建压试压以完成试压方案的优化。

传统的通过多次试制复合管的方法会增长优化改进的周期, 耗费更多的人力、物力、财力, 生产成本高。正交试验设计是一种用于研究多因素不同水平的试验设计方法, 能够科学地对试验进行整体设计、综合比较、统计分析。本文对胀形压力、初始间隙、衬管壁厚这三个重要的工艺参数进行正交试验设计与综合优化分析, 从而得到最优参数组合, 以用于指导液压成形法制造复合管的实际生产。

1 液压成形有限元模型的建立

液压成形过程中, 衬管与基管几何形状和胀形压力中心轴对称, 并且沿轴线方向也是对称的, 因此有限元建模时, 简化为二维轴对称问题; 在轴向上也只模拟一半, 在轴向对称位置设置对称约束, 以节约计算时间; 衬管网格密度相对较为密集, 基管网格密度较为稀疏, 这样可以兼顾计算精度和计算效率; 衬管和基管均采用双线性减缩积分轴对称四边形单元 (CAX4R)。采用库伦摩擦模型描述基管内壁和衬管外壁之间的摩擦行为; 采用静态隐式算法以便精确地计算卸载后管坯的回弹。建立的有限元模型如图 1 所示。

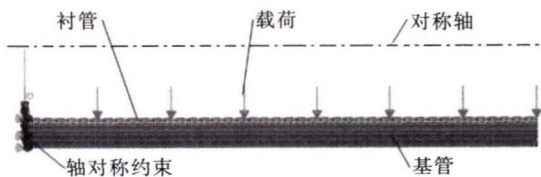


图 1 有限元模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of finite element model

将有限元模拟结果与试验值^[10]进行对比, 以验证本文模型的有效性。衬管为 $\phi 148 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 的 316L 不锈钢管, 基管为 $\phi 200 \text{ mm} \times 24 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 的 X70 钢管, 衬管与基管之间的初始间隙为 2 mm。管材的力学性能见表 1。胀形过程中, 胀形压力的加载路径如图 2 所示。其中保压阶段的压力为胀形过程中的最大压力, 衬管内壁在某一时刻承受的实际胀形压力为该时刻的幅值与最大压力的乘积。在试验过程中的最大胀形压力为 120 MPa。

图 3 为在上述胀形条件下获得的基管外壁周向应变在加载过程中的变化曲线。显然, 有限元模拟值

表 1 316L 和 X70 管的性能参数
Tab.1 Performance parameters of 316L and X70 pipes

材料	密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
316L	7980	297.92	639.28	195	0.26
X70	7800	532.2	626.8	207	0.3

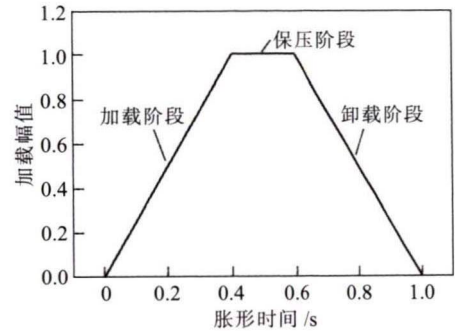


图 2 胀形压力的加载路径

Fig.2 Loading path of bulging pressure

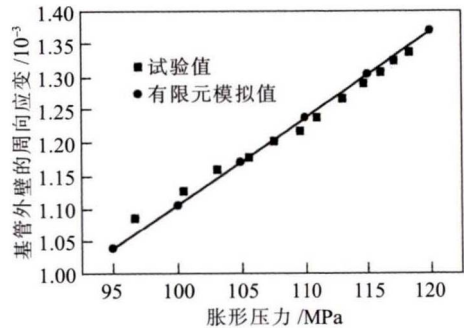


图 3 加载过程中基管外壁的周向应变

Fig.3 Circumferential strain of the outer wall of the base pipe during the loading process

与试验值十分接近, 最大相对误差仅为 1.77%。可见本文建立的双金属管液压胀形有限元模型是有效的, 完全满足工程应用的需要。

2 确定正交试验方案

一次试验是指在初始间隙、胀形压力和衬管壁厚三个参数给定情况下所开展的有限元模拟。确保只有上述参数不同, 控制保压时间、边界条件、接触属性、摩擦系数与网格划分等其他计算设置一致。其中, 保压时间为 0.2 s。由于管坯和胀形压力沿轴线方向是对称的, 因此在轴向上只模拟一半, 在轴向对称位置设置对称约束。基管内壁和衬管外壁之间采用库伦摩擦模型描述两表面之间的摩擦行为, 摩擦系数为 0.3。衬管网格密度相对较为密集, 基管网格密度较为稀疏, 这样可以兼顾计算精度和计算效率, 衬管和基管均采用双线性减缩积分轴对称四边形单元 (CAX4R)。

2.1 试验指标

残余接触应力：双金属复合管成形后衬管外壁和基管内壁间的残余接触应力(结合力)是衡量复合管力学特性的重要指标，也是影响双金属复合管复合质量的关键因素，较高的残余接触应力使得胀后两管之间具有足够的密封性能和抗拉脱能力。

回弹：基管内壁和衬管外壁的周向弹性回复量的差值越大，基管和衬管的抱紧力越强。文中回弹量用卸载前和卸载后的应变差表示。

2.2 试验因素水平及方案设计

选取胀形压力、初始间隙、衬管壁厚三个参数作为试验因素。给每个试验因素确定三种水平，见表2。

表2 因素水平表
Tab.2 Table of factors and levels

水平	A 胀形压力 / MPa	B 初始间隙 / mm	C 衬管壁厚 / mm
1	150	2	2.5
2	160	2.5	3
3	170	3	3.5

本文不考虑试验因素间可能存在的交互影响，认为各个试验因素相互独立，采用 $L_9(3^4)$ 正交试验表。

3 正交试验设计

解决多指标试验问题的方法主要分为综合平衡法与综合评分法。本文选用综合平衡法。这种方法的分析思路是先单独观察单个因素对各指标的影响，利用极差法选取各指标最优参数。最后，综合权衡各指标的最优参数，进而获取各指标最优的因素、水平组合。正交试验方案及结果如表3所示。

表3 正交试验方案及结果
Tab.3 Orthogonal test scheme and results

试验号	因素			试验结果	
	A	B	C	残余接触应力 / MPa	回弹 / 10^{-4}
1	1	1	1	5.21240	6.82898
2	1	2	2	5.78813	6.67539
3	1	3	3	5.83916	5.98982
4	2	1	3	8.34681	7.57843
5	2	2	1	6.47196	7.44004
6	2	3	2	6.91223	6.76839
7	3	1	2	9.15080	8.44596
8	3	2	3	9.63956	7.73692
9	3	3	1	7.43288	7.76188

由表中数据可知，第8组试验数据获得的衬管和基管之间的残余接触应力最大，该组数据的因素水平组合为 $A_3B_2C_3$ ；第7组试验数据获得的回弹最

大，其因素水平组合为 $A_3B_1C_2$ 。

4 分析与讨论

4.1 正交试验极差分析

正交试验数据的分析结果如表4所示。为了更直观地看到变化趋势，根据表4中的数据得到因素指标图(图4)。极差 R 的大小直接反映出试验中各因素的影响程度， R 越大，该因素对试验指标的影响越大，由此可确定主次因素。结合表4和图4，对于残余接触应力这一指标来讲，影响因素的主次顺序为 $A>C>B$ ；对于回弹这一指标，影响因素的主次顺序是 $A>B>C$ 。试验数据显示，对复合管成形质量影响最显著的因素是胀形压力，随胀形压力的增大，两项试验指标均被优化，因此在满足安全和尺寸精度要求的前提下（即保证双金属复合管不会胀裂或鼓包），保证基管外壁不发生塑性变形的情况下，应尽量选取较大的胀形压力。残余接触应力这一指标越大越好，因此，选取的最优水平组合是 $A_3B_1C_3$ ；回弹这一指标也是越大越好，因此选取的最优水平组合是 $A_3B_1C_1$ 。方差分析计算公式为： $K = \sum_{i=1}^9 Y_i, P = \frac{1}{n} K^2,$

$W = \sum_{i=1}^9 Y_i^2, U_j = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (K_i)^2, Q_j = U_j - P, Q_T = W - P, Q_E = Q_T - Q_A - Q_B - Q_C, S_j^2 = \frac{Q_j}{2}, S_E^2 = \frac{Q_E}{2}, F_j = \frac{S_j^2}{S_E^2}$ ，式中： n 为试验数； Y_i 为试验值； K 为正交试验结果总和； i 为水平； j 为因素； Q 为离差； S 为均方离差。

表4 正交试验结果分析表

Tab.4 The table of result analysis of orthogonal test

	残余接触应力 / MPa			回弹		
	A	B	C	A	B	C
K_1	16.83969	22.71001	19.11724	0.00195	0.00229	0.00220
K_2	21.73100	21.89965	21.85116	0.00218	0.00219	0.00219
K_3	26.22324	20.18427	23.82553	0.00239	0.00205	0.00213
k_1	5.61323	7.57000	6.37241	0.00065	0.00076	0.00073
k_2	7.24367	7.29988	7.28372	0.00073	0.00073	0.00073
k_3	8.74108	6.72809	7.94184	0.00080	0.00068	0.00071
极差 R	3.12785	0.84191	1.56943	0.00015	0.00008	0.00002
U	481.15661	467.58133	470.19931	4.75567×10^{-6}	4.733×10^{-6}	4.72433×10^{-6}
Q	14.68401	1.10873	3.72671	3.229×10^{-8}	9.62×10^{-9}	9.5×10^{-10}
	$K=64.79393, W=486.00774$			$K=0.00652, W=4.77113 \times 10^{-6}$		
	$P=466.47260, Q_T=19.53514$			$P=4.72338 \times 10^{-6}, Q_T=4.775 \times 10^{-8}$		

4.2 方差分析

对引起方差变化的各个因素进行比较，从而检

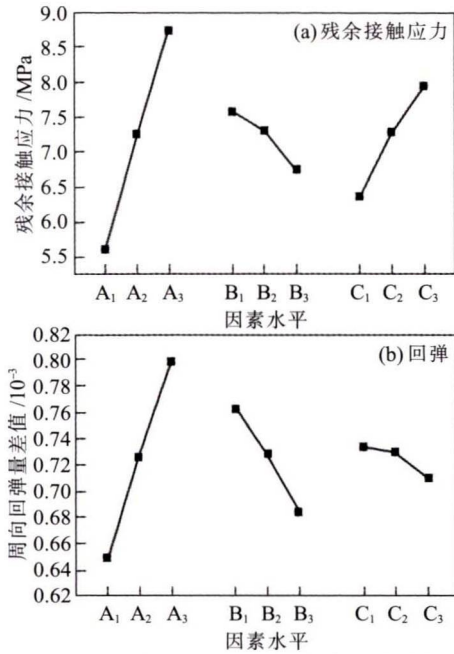


图4 不同因素水平下残余接触应力和回弹的变化
Fig.4 Variation of residual contact stress and springback at different factors and levels

表5 残余接触应力和回弹的方差分析表

Tab.5 Variance analysis of residual contact stress and springback

	来源	离差	自由度	均方离差	F值	$F_{\alpha}(n_1, n_2)$	显著性
残余接触应力	A	14.68401	2	7.342005	935.88	$F_{0.01}(2,2)=99.01$ $F_{0.05}(2,2)=19$	显著影响
	B	1.10873	2	0.554365	70.66		有一定影响
	C	3.72671	2	1.863355	237.52		显著影响
	e	0.01569	2	0.007845	-	-	-
	总和	19.53514	8	-	-	-	-
回弹	A	3.229×10^{-8}	2	1.6145×10^{-8}	2.09	$F_{0.10}(2,6)=3.46$ $F_{0.25}(2,6)=1.76$	有一定影响
	B	9.62×10^{-9}	2	4.81×10^{-9}	0.62		无显著影响
	C	9.5×10^{-10}	2	4.75×10^{-10}	0.06		无显著影响
	e	4.89×10^{-9}	2	2.445×10^{-9}	0.32	-	-
	e' B C e	1.546×10^{-8}	6	7.73×10^{-9}	-	-	-
	总和	4.775×10^{-8}	8	-	-	-	-

$F_{0.10}(2,6)$ 时,影响显著;当 $F_{0.10}(2,6) > F > F_{0.25}(2,6)$ 时,有一定影响;当 $F_{0.25}(2,6) < F$ 时,无显著影响。

4.3 工艺参数优化分析

通过直观分析和方差分析对残余接触应力和回弹这两个指标进行综合考虑,胀形压力(因素A)的影响较为显著,而初始间隙(因素B)和衬管壁厚(因素C)对回弹都没有显著影响,衬管壁厚对残余接触应力的影响更为显著。因此,合理选择胀形压力、初始间隙、衬管壁厚,可以显著增大残余接触应力和回弹,从而获得高质量的双金属复合管。

因素A: 对于残余接触应力和回弹这两个指标

验出引起差异的主要原因,继而与理论F值进行对比,以判断因素间相互的差异是否显著,这一过程称为方差分析。由于极差分析只是对试验结果进行了简单的分析比较,忽略了对试验有影响的误差,降低了分析的精度,所得出工艺参数的优化结果并不能确保为最优。为了弥补极差分析的这个缺点,在双金属复合管的液压成形过程中,遵循显著变动原则,选取能够估计误差的方差分析法进行分析。

试验数据的分析结果见表4。表5是残余接触应力和回弹试验指标的方差分析,表中 $F_{\alpha}(n_1, n_2)$ 。从表中可以看出,胀形压力和衬管壁厚对残余接触应力的影响高度显著,初始间隙次之。胀形压力对回弹有一定影响,其余因素均无显著影响。表中,残余接触应力对双金属复合管质量影响的判断为:当 $F > F_{0.01}(2,2)$ 时,影响显著;当 $F_{0.01}(2,2) > F > F_{0.05}(2,2)$ 时,有一定影响;当 $F_{0.05}(2,2) < F$ 时,无显著影响。回弹对双金属复合管质量影响的判断为:当 $F >$

而言,胀形压力都是主要因素且影响显著,因此应取高水平,选取A₃。

因素B:对残余接触应力这一指标有一定影响,对回弹这一指标没有显著影响,结合图4(a)、(b)中因素B的变化趋势,应选取低水平,即选取B₁。

因素C:对于两个指标而言,因素C的影响刚好相反。若回弹过高,则会导致残余接触应力过低,而因素C对于残余接触应力这一指标为主要因素,并且节约贵重金属材料是制备双金属复合管的重要目的之一,所以综合平衡选取C₂。

综上所述,最优组合条件为:A₃B₁C₂,即胀形压

力为 170 MPa、初始间隙为 2 mm、衬管壁厚为 3 mm。此时残余接触应力为 9.15080 MPa,基管内壁和衬管外壁的周向弹性回复量的差值是 8.44596×10^{-4} 。

图 5 是在此组合条件下的优化结果图。由图可见,塑性变形尚未扩展到基管外壁,衬管和基管之间有均匀稳定并且足够大的残余接触应力,工艺参数得到

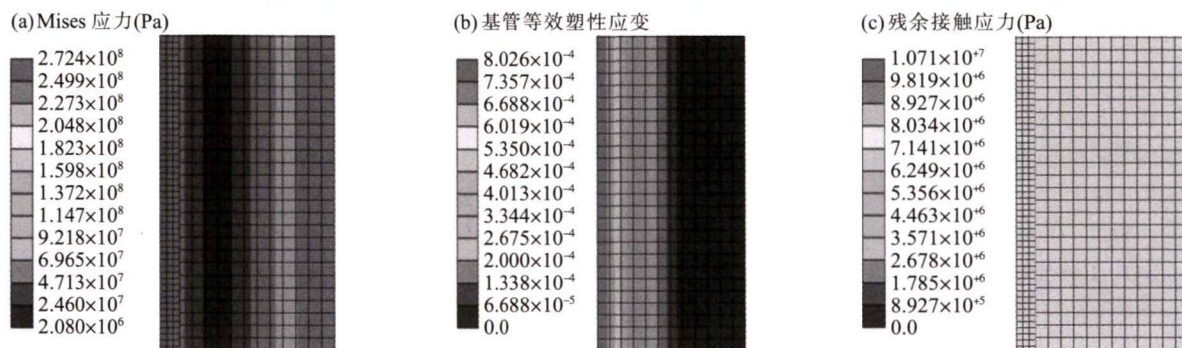


图 5 在最优参数下管的应力和应变

Fig.5 Stress and strain of the pipe under optimal parameters

了有效的优化。

5 结论

(1) 对于残余接触应力这一指标的次要因素为胀形压力、衬管壁厚、初始间隙,其中胀形压力、衬管壁厚有显著影响,而初始间隙有一定影响;影响回弹的次要因素是胀形压力、初始间隙、衬管壁厚,其中胀形压力有显著影响,初始间隙和衬管壁厚影响较小。

(2) 基于对各因素对试验指标的影响的正交试验分析,综合、平衡考虑残余接触应力和回弹,确定在本文参数设定条件下的优选工艺参数组合为:胀形压力为 170 MPa、初始间隙为 2 mm、衬管壁厚为 3 mm。

参考文献:

- [1] 李兰云,张阁,刘静,等. 初始间隙对双金属复合管液压成形的影响研究[J]. 热加工工艺,2019,48(5):136-140.
- [2] 魏巍,王学生,陈琴珠,等. 深海用 20/316L 钢双金属复合管热

液压成形过程分析[J]. 热加工工艺,2018,47(23):124-129.

- [3] Wang M Z,Zhang X R,Fan X J,et al. Study on forming process of copper/steel bimetal clad pipe [J]. Mechanical Management & Development,2012,127(3):52-53.
- [4] Jiang S,Zhang Y,Zhao Y,et al. Investigation of interface compatibility during ball spinning of compo site tube of copper and aluminum [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,88(1):683-690.
- [5] 雷凌云,吕华,王长安,等. 双金属复合管衬层裂缝缺陷浅析[J]. 热加工工艺,2016,45(15):256-258.
- [6] 崔磊,刘静,李兰云. 基于响应面法的双层 316L/Inconel625 波纹管液压胀形工艺参数优化 [J]. 兵器材料科学与工程,2018,41(6):25-32.
- [7] 倪兴健. 双金属复合管液压胀接成形弹塑性力学分析[D]. 重庆:重庆大学,2016:1-58.
- [8] 陆晓峰,郑新. 基于有限元模拟的 20/316L 双金属复合管拉拔参数的优化[J]. 中国有色金属学报,2011,21(1):205-213.
- [9] 潘旭,代平,刘志明,等. 在役双金属复合管失效后抢险试压方案优化[J]. 天然气与石油,2017(4):21-24.
- [10] 唐越,倪兴健,王勇勤. 316L/X70 双金属复合管液压胀接成形机理[J]. 锻压技术,2018,43 (1):90-96.

(上接第 98 页)模 z 向载荷在总体上呈反比关系,即模间距越大, z 向载荷越小,模间距越小, z 向载荷越大。

(4) 实际模锻成形情况与数值模拟结果一致,最终锻件具有较好的综合力学性能,与棒材坯料相比,锻件强度、硬度略降,冲击功明显提高。

参考文献:

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册:第 4

卷[M]. 第 2 版.北京:中国标准出版社,2001:74.

- [2] 黄伯云,李成功,石力开,等. 中国材料工程大典:第 4 卷(上)[M]. 北京:化学工业出版社,2005:694.
- [3] 龙丽. TA15 合金锻造过程的数值模拟[D]. 西安:西北工业大学,2005.
- [4] 夏巨谟. 中国模具工程大典:第 5 卷[M]. 北京:电子工业出版社,2007:157.
- [5] 李传民,王向丽,闫华军. 金属成形有限元分析实例指导教程[M]. 北京:机械工业出版社,2006:136.