

初始间隙对双金属复合管液压成形的影响研究

李兰云^{1,2,3}, 张 阁¹, 刘 静^{1,3}, 李 霄^{1,2}

(1. 西安石油大学材料科学与工程学院材料加工工程重点实验室, 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)

摘 要:在双金属复合管液压成形中,基管与衬管之间的初始间隙是影响双金属复合管成形质量的关键因素之一。本文建立了双金属复合管液压成形过程的有限元模型。基于该模型,系统深入地研究了初始间隙对成形过程的影响。结果表明:随着初始间隙增大,在基管弹性回复的作用下,衬管中产生的压缩弹性变形减小,基管内壁的回弹量稍有下降,而衬管外壁的回弹量则逐渐上升,基管和衬管之间的残余接触应力逐渐下降。

关键词:双金属复合管; 液压成形; 初始间隙; 弹性回复; 残余接触应力

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.05.034

中图分类号: TG386.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2019)05-0136-05

Effect of Initial Clearance on Hydroforming of Bimetallic Clad Pipe

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

(1. Key Laboratory of Materials Processing Engineering, 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)

Abstract: In hydroforming of bimetallic clad pipe, the initial clearance between base pipe and liner pipe is one of the key factors affecting the forming quality of bimetallic clad pipe. The finite element model of the hydroforming process of bimetallic clad pipe was established. Based on the model, the effect of initial clearance on the forming process was studied systematically and deeply. The results show that with the increase of the initial clearance, the compression elastic deformation of the liner pipe decreases under the action of elastic recovery of the base pipe, the springback amount of the inner wall of the base pipe decreases slightly, the springback amount of the outer wall of the liner pipe increases gradually, and the residual contact stress between the base tube and the liner pipe decreases gradually.

Key words: bimetallic clad pipe; hydro forming; initial clearance; elastic recovery; residual contact stress

运输介质的多样化和运输环境的复杂性对管道的强度、耐腐蚀和耐高温等性能提出了更高的要求。而双金属复合管是将两种不同的金属管材通过塑性变形或者一定的连接技术结合在一起的新型管

材^[1],其基管用于强度支撑,衬管用于抵抗腐蚀或磨损,兼具基管和衬管两种材料的优势,在石油天然气工业中得到了广泛的应用^[2]。液压成形技术生产的复合管具有绿色环保、内表面无擦伤和破坏、壁厚分布均匀等优点,因此对其的需求量日益增长^[3-4]。

双金属复合管液压成形,通过高压液体对衬管内壁施加胀形压力,使衬管产生胀形后与基管紧密贴合,基管在衬管的胀形压力作用下产生弹性甚至微小的塑性变形。当胀形压力达到一定值后开始卸压。由于基管回弹量大于衬管回弹量,最终基管紧紧抱住衬管,从而获得两管紧密结合的复合管。

近年来,国内外学者对双金属复合管液压成形工艺进行了大量研究。王学生等^[5]利用衬管外壁与基管内壁周向应变回复量相同作为变形协调条件,得到残余接触应力与胀形压力之间的关系式。马海

收稿日期:2018-10-24

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2017JM5108);华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室开放基金项目(P2018-001);西北工业大学凝固技术国家重点实验室开放基金项目(SKLS201622);陕西省留学人员科技活动择优资助项目(2017026);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);西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目(YCS17211034)

作者简介:李兰云(1978-),女,湖南武冈人,教授,博士,硕士,主要从事精确塑性成形方面的研究;电话:029-88382607;

E-mail:lanyunli@xsyu.edu.cn

宽^[6]给出了判断基管和衬管能否复合的标准。徐学利等^[7]通过对 L360QS/Incoloy825 镍基合金管进行液压胀合试验,得到了胀形压力的选取范围与残余接触应力的大小。随着有限元数值模拟方法的兴起和日趋成熟,国内外很多学者也采用该方法对液压成形工艺进行研究。A G Olabi 等^[8]基于 ANSYS 软件,研究了胀形过程的两种失效模式,通过比较不同加载路径下的成形性能,获得最优的加载路径。AR Akisanya 等^[9]建立了双金属管液压胀形的非线性有限元模型,并提出利用基管和衬管径向位移回复量相等,即位移协调条件来描述实际卸载过程。孙显俊等^[10]利用 Marc 有限元软件,研究发现通过调节摩擦系数和胀形压力大小可以控制 Fe/Al 双金属复合管的成形质量。唐越等^[11]应用数值模拟方法验证了引入当量屈服强度可以有效地考虑材料应变强化的因素,但未分析基管发生微量塑性变形的情况。

综上所述,对双金属复合管液压成形的研究有了一定的进展,但是关于基管与衬管之间的初始间隙这一关键参数对复合管成形的影响鲜见报道。因此,本文基于 ABAQUS 有限元软件,建立了双金属复合管液压成形过程的有限元模型,研究并揭示了初始间隙对双金属复合管的变形、残余接触应力和回弹的影响规律,以期对合理匹配初始间隙,提高双金属复合管的质量提供理论依据。

1 双金属复合管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对称于中心轴,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 1/2,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。

将有限元模拟结果与试验值^[11]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

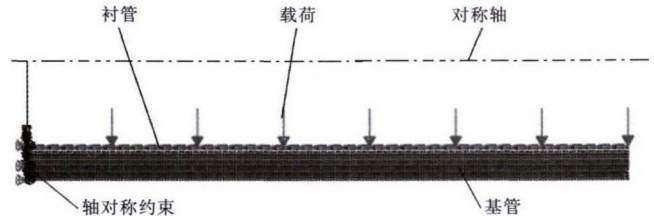


图 1 有限元模型示意图

Fig.1 Schematic diagram finite element model

为 2mm。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加载幅值与最大压力的乘积。在文献[11]中试验过程的最大胀形压力为 120MPa。

表 1 金属管的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of the 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	297.9	639.3	195	0.26
X70	7800	532.2	626.8	207	0.30

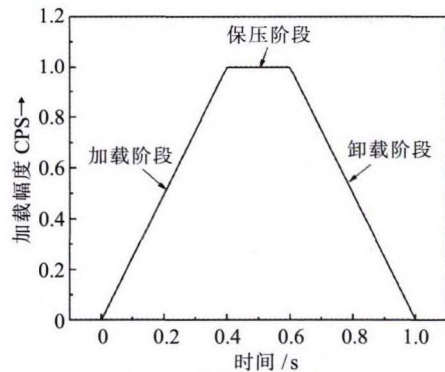


图 2 胀形压力的加载路径

Fig.2 Loading path of bulging pressure

图 3 为基管外壁周向应变在加载过程中的变化曲线。显然,有限元模拟值与试验值十分接近,最大

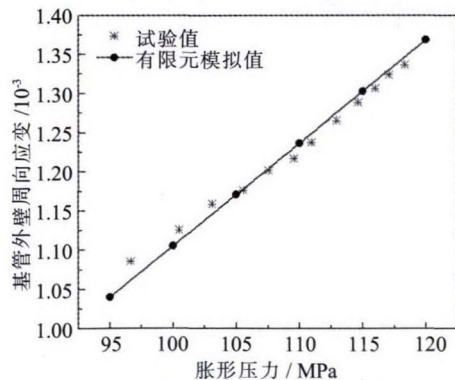


图 3 加载过程中基管外壁周向应变变化

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

相对误差近为 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 初始间隙对复合管成型的影响

研究初始间隙对双金属复合管液压胀形过程的影响时, 选取验证试验中的加载路径如图 2 所示。分析不同最大胀形压力下复合管的成形过程, 发现当最大胀形压力选取 160 MPa 左右时, 基管内壁产生微量的塑性变形, 但是外壁仍然保持弹性变形, 此时复合管形状不受影响, 且基管和衬管之间的结合强度达到最佳, 因此, 胀形过程中的最大胀形压力选取 160 MPa。根据实际生产中常用双金属复合管匹配规格, 基管与衬管的初始间隙选取 1、1.5、2、2.5、3、3.5、4 mm 七组值, 通过改变衬管口径来改变管层初始间隙。其他模型参数均与上述试验的数据相同。

2.1 管层初始间隙对复合管变形的影响

图 4 为初始间隙对复合管应变分量的影响曲线。图中 LE 为对数应变, 11、22、33 分别为复合管的径向、轴向和周向, LI 为衬管内壁, LO 为衬管外壁, BI 为基管内壁, BO 为基管外壁。由图 4(a)可知, 胀形结束后衬管发生较大的塑性变形, 衬管周向

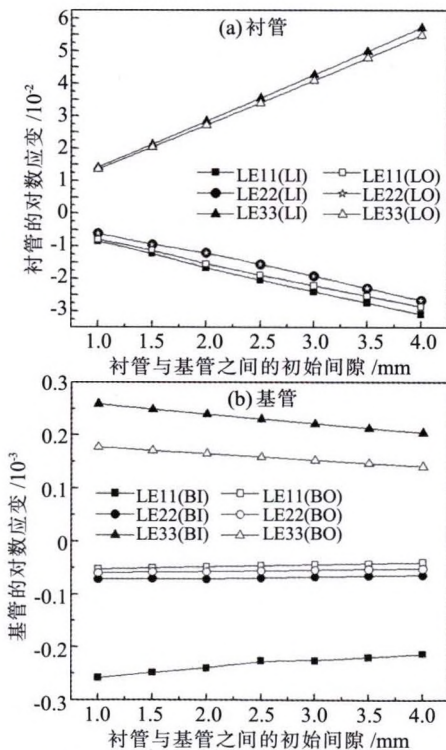


图 4 初始间隙对复合管应变的影响规律
Fig.4 Influence of initial clearance on strain of the clad pipe

(LE33)有较大程度的胀大, 而轴向缩短, 径向减薄, 并且衬管内壁的周向和径向应变的绝对值大于衬管外壁的周向和径向应变的绝对值, 而轴向应变基本相同。随着初始间隙的增大, 衬管的三个应变分量的绝对值逐渐增大。由图 4(b)可知, 随着初始间隙的增大, 基管应变分量的绝对值有所下降, 与基管外壁相比, 基管内壁的应变下降速度稍大。可见, 随着初始间隙的增大, 衬管的变形程度逐渐增大, 而基管的变形程度有所下降。

2.2 初始间隙对复合管残余接触应力的影响

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。

图 5 为基管内壁和衬管外壁接触应力随初始间隙的变化曲线, 图中虚线表示卸载后的接触应力即残余接触应力, 可见残余接触应力随初始间隙的增大逐渐减小, 基管与衬管之间的抱紧力逐渐下降。因此在满足装配的前提下, 应尽量减小管层之间的初始间隙。从图 5 还可以看出, 在保压阶段, 两管之间的接触压力随着初始间隙的增大也呈下降趋势, 但是其下降速度稍大于残余接触应力的下降速度。

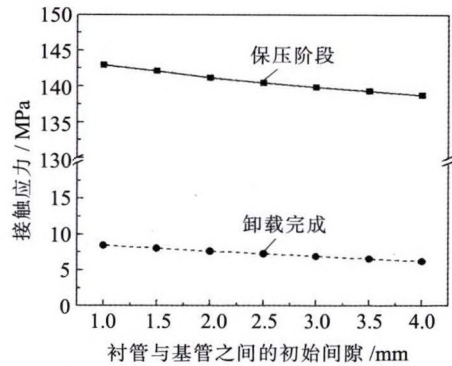


图 5 接触应力随初始间隙的变化
Fig.5 Variation of contact stress with initial clearance

2.3 初始间隙对复合管回弹的影响

图 6 为不同初始间隙下基管内壁周向应变随卸载压力的变化规律。由图可知, 随着初始间隙的增大, 基管内壁的周向对数应变和塑性应变(PE)均随之降低; 随着卸载过程的进行, 周向对数应变都呈线性下降。当卸载到 7 MPa 左右时, 对数应变与塑性应变相交, 表示此时基管内壁的弹性变形完全回复, 继续卸载, 基管内壁在外壁弹性回复的作用下产生周

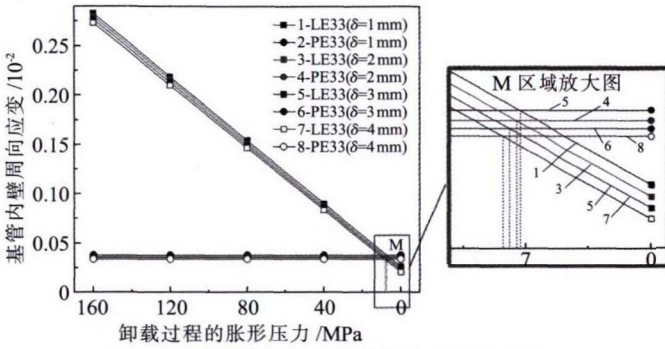


图6 不同初始间隙 δ 下基管内壁周向应变随卸载压力的变化规律

Fig.6 Variation of circumferential strain of inner wall of base tube at different initial clearance with unloading pressure

向压缩弹性变形。

图7为不同初始间隙下, 衬管外壁的周向对数应变与塑性应变随卸载压力的变化曲线。由图可知, 在卸载过程中, 周向对数应变曲线与塑性应变曲线相交, 此时衬管在加载时产生的弹性应变已经完全恢复; 继续卸载, 衬管在基管弹性回复的作用下产生压缩的弹性变形, 从而使得衬管周向的对数应变低于塑性应变。

从图6中M区域的放大图和图7还可发现, 增大初始间隙, 基管内壁周向弹性变形完全回复得稍早; 而衬管外壁周向弹性变形完全回复得稍晚, 可见在基管的作用下, 随初始间隙增大, 衬管产生的压缩弹性变形越小。

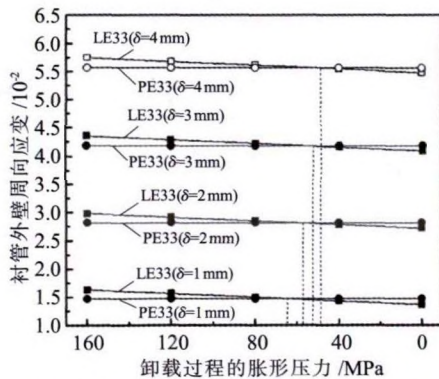


图7 不同初始间隙 δ 下衬管外壁周向应变随卸载压力的变化规律

Fig.7 Variation of circumferential strain of outer wall of liner pipe at different initial clearance with unloading pressure

不同初始间隙下, 基管内壁和衬管外壁的弹性变形在卸载中途得到完全回复, 并且在后续卸载过程中在基管外壁的作用下衬管外壁和基管内壁产生了压缩弹性变形(图6,7), 因此它们的回弹量均采用卸载前的对数应变与卸载后的塑性应变之差来表示。

图8为基管内壁和衬管外壁的周向回弹量随初始间隙的变化曲线。从图可知, 基管内壁的周向弹性回复量始终大于衬管外壁的周向弹性回复量, 并且随着初始间隙的增大, 基管内壁的弹性回复量稍有下降, 而衬管外壁的弹性回复量则逐渐上升, 两者的弹性回复量之差逐渐减小, 这也正是卸载后两管之间残余接触应力下降的根本原因。

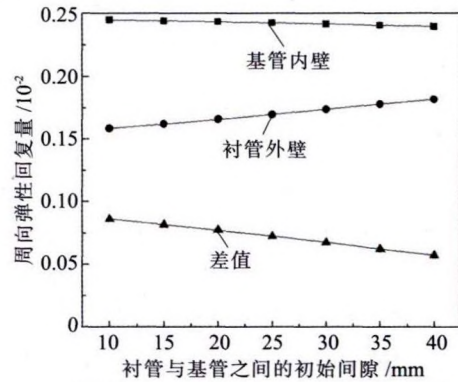


图8 初始间隙对复合管回弹的影响

Fig.8 Effect of initial clearance on springback of the clad pipe

3 结论

基于有限元模拟分析, 系统深入研究了基管与衬管之间的初始间隙对双金属复合管液压成形中的变形、残余接触应力以及回弹的影响。主要的结论如下:

- (1) 随着初始间隙的增大, 衬管变形量呈上升的趋势, 基管的变形量则呈下降趋势。
- (2) 基管内壁和衬管外壁之间的残余接触应力随初始间隙的增大而逐渐下降, 基管与衬管之间的抱紧力逐渐下降。因此在满足装配方便的前提下应尽量减小管层之间的初始间隙。
- (3) 随着初始间隙的增大, 基管内壁周向回弹量稍有下降, 而衬管外壁的周向回弹量则逐渐上升, 基管内壁和衬管外壁的回弹量之差逐渐减小。


参考文献:

[1] 凌星中. 内复合双金属管制造技术 [J]. 焊管, 2001, 24(2): 43-46.
 [2] Rommerskirchen I. New progress caps 10 years of work with BuBi pipes [J]. World Oil, 2005, 226(7): 69-70.
 [3] Wang MZ, Zhang XR, Fan XJ, et al. Study on forming process of copper/steel bimetal composite 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] 王学生,王如竹,李培宁,等. 复合管液压成形装置及残余接触压力预测[J]. 中国机械工程, 2004, 15(8): 662-666.
- [6] 马海宽,李培力,隋健,等. 双金属复合管液胀成形选材标准理论分析探讨[J]. 化工设备与管道, 2015(3): 73-75.
- [7] 徐学利,王纯,毕宗岳,等. L360QS/Incoloy825 镍基合金复合管的液胀胀合工艺[J]. 热加工工艺, 2015, 44(17): 95-98.
- [8] Olabi A G, Alaswad A. Experimental and finite element investigation of formability and failures in bi-layered tube

hydroforming [J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42: 815-820.

- [9] Akisanya A R, Khan F U, Deans W F, et al. Cold hydraulic expansion of oil well tubulars [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2011, 88: 465-472.
- [10] 孙显俊,陶杰,郭训忠,等. Fe/Al 复合管液胀成形数值模拟及试验研究[J]. 锻压技术, 2010(3): 66-70.
- [11] 唐越,倪兴健,王勇勤. 316L/X70 双金属复合管液胀接成形机理[J]. 锻压技术, 2018(1): 90-96. 


(上接第 130 页)金的抗拉强度和屈服强度分别增大了 35 MPa 和 18 MPa, 平均晶粒尺寸减小了 55 μm , 晶粒得到了极大细化, 内部组织更为均匀、整齐。

(3) 为了优化 Mg-6Al-2Sn 铸态镁合金的组织 and 力学性能, Mg-6Al-2Sn 铸态镁合金的静置温度优选为 710 $^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献:


- [1] 孙翠翠,周吉学,赵东清,等. Sn 对镁及镁合金显微组织和性能影响的研究现状及展望[J]. 材料导报, 2017(19): 60-65.
- [2] 乐启焮,欧鹏,崔建忠,等. 镁合金半固态制浆新工艺[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002(4): 371-374.
- [3] 赵伦,刘建睿,黄卫东. 粗镁直接熔制高品质 AZ91D 镁合金

研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2009(4): 317-319.

- [4] 任峻,马颖. 熔体静置处理对 Al-Ti-B-RE 细化剂组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2009(12): 1556-1558.
- [5] 刘奎立,张治民,杨宝付,等. 镁合金的成形技术及其应用研究[J]. 锻压技术, 2004, 29(5): 5-8.
- [6] 叶俊华,汤爱涛,马仕达,等. 搅拌摩擦焊接 Mg-6Al-1Sn 合金组织与性能研究[J]. 材料导报, 2017(22): 79-84.
- [7] 穆桐,孙镇,邓子玉,等. Mn 对 Mg-5Sn-2Al-Zn 合金组织及力学性能的影响[J]. 沈阳理工大学学报, 2017(3): 27-31.
- [8] 范晓伟,张丁非,冯靖凯,等. 挤压温度对 AZT802 镁合金组织和性能的影响[J]. 材料导报, 2017(22): 95-99.
- [9] 姚志英. AZ31B 镁合金半固态挤压试验研究 [J]. 热加工工艺, 2012, 41(23): 52-54.
- [10] 张莹,耿茂鹏,饶磊,等. 镁合金半固态双辊板带流变成形研究[J]. 铸造技术, 2005(8): 706-708. 

(上接第 135 页)

- [4] 殷亚军,涂志新,田桥,等. 基于反热传导法的消失模铸件 / 铸型界面传热系数研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(4): 391-394.
- [5] 随大山. 铸造凝固过程热传导方向问题参数辨识技术研[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- [6] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [7] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [8] 巫江,宋宏春,李小联,等. 基于 DOE 的注塑成型周期工艺参数优化[J]. 机械工程师, 2011, 33(1): 86-88.

- [9] 段家现. 基于 CAE 的电池后盖注塑成型工艺优化[J]. 塑料, 2015, 44(5): 39-42.
- [10] 马幼平,许云华. 金属凝固原理及技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2008.
- [11] 闫新飞,李少雨,马文治,等. 砂型铸造用型砂热物性参数的研究[J]. 铸造, 2015, 64(11): 1113-1115.
- [12] 郭志鹏,熊守美,曹尚铨,等. 合金材料以及工艺参数对压铸过程中铸件 / 铸型界面换热系数的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(4): 433-439. 

欢迎点击本刊网页
<http://www.rjggy.com>
<http://www.rjggy.net>