

文章编号:1000-582X(2009)12-1369-05

# A508-3 钢奥氏体晶粒度同变形量和加热时间的关系

杨运民<sup>1</sup>, 石 静<sup>1</sup>, 程巩固<sup>2</sup>, 姜 涛<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 中国第二重型机械集团公司, 四川 德阳 618013)

**摘 要:**晶粒度控制是大型锻件宏观力学性能控制的重要手段之一,通过对 A508-3 钢进行应变速率为  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  的高温压缩实验、保温实验,测量材料的原奥氏体晶粒尺寸,分析得到该材料在 10%、20%、30%、50% 变形量下的晶粒度,以及随后保温过程中晶粒度变化的规律。结果表明,1 050 °C 时,变形量在 30% 以内,晶粒细化一级,达到 50% 变形时,晶粒细化两级;1 200 °C 时,50% 以内的变形量下,晶粒细化一级;在 1 050 °C 下,保温 2 h 以内,晶粒尺寸不会有明显变化,超过 2 h 后,晶粒长大明显,在 1 200 °C 保温 1 h 以内,晶粒尺寸不会有明显变化。

**关键词:**高温压缩;加热;晶粒度;奥氏体

中图分类号: TG115. 21

文献标志码: A

## Influence of deformation and heating time on the austenite grain size of A508-3 steel

YANG Yun-ming<sup>1</sup>, SHI Jing<sup>1</sup>, CHENG Gong-gu<sup>2</sup>, JIANG Tao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;  
2. China National Erzhong Group Co, Deyang 618013, Sichuan, P. R. China)

**Abstract:** In order to control the mechanical properties of heavy forgings, it is important to control the grain size of material. The characteristics of the austenite grain size of A508-3 steel under different deformation conditions, at different temperature and holding time are studied by high temperature compression experiments and heating & holding experiments. The compression experiments are carried out at 1 050 °C and 1 200 °C to a strain of 10%, 20%, 30%, 50%, at the same strain rate of  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . The compression experiments results show that the grain size grade (GB6394-1986) increases by one level when the deformation is less than 30%, and increases by two levels when the deformation is more than 50% at the temperature of 1 050 °C. The grain size grade increases by one level when the deformation is less than 50% at 1 200 °C. The heating & holding experiments results showe that the grain size will not change significantly by two hours' holding at 1 050 °C, and changed little by one hour's holding at 1 200 °C.

**Key words:** compression test; heating; grain size; Austenite

A508-3 钢是制造核电设备的理想钢种,上世纪 80 年代末到 90 年代,国外对 A508-3 钢的力学性能、组织性能进行了深入的研究<sup>[1-8]</sup>,并掌握了先进

的核电设备制造技术;随着核电技术的发展,带整体密封法兰的反应堆压力容器顶盖逐渐取代传统的顶盖和法兰焊接而成的封头,既消除了焊缝,使封头的

收稿日期:2009-07-09

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留(2005)546-3)

作者简介:杨运民(1967-),男,重庆大学教授,主要从事金属材料塑性加工、分子动力学的研究,(E-mail)yunminathome@hotmail.com。

可靠性更高,又减少了设备无损检测的范围,虽然国内也对 A508-3 材料进行了大量的研究<sup>[9-15]</sup>,但尚未完全掌握整体封头的锻造技术。笔者近年来一直从事核电关键设备成形工艺的研究,并通过了 1:5 比例核反应堆压力容器整体封头的实验验证<sup>[16]</sup>(见图 1)。在 1:1 比例的核反应堆压力容器整体封头的成形工艺设计中,封头法兰处晶粒度的控制是关键,该成形工艺由一系列锻造工序组成,进行最后一步锻造工序之前需要将封头加热到 1 050 °C,并保温,在此之前,通过变形量的累积,晶粒已经充分细化;在保温过程中,晶粒可能会长大,而在保温之后的锻造工序中,封头法兰部位不会产生变形,无法将长大的晶粒再次细化。



图 1 二重制造的 1:5 整体封头

为了将加热前得到的细化晶粒保留下来,既需要了解在加热前,法兰部位晶粒尺寸分布,以便对锻后法兰部位的晶粒尺寸进行预估,也需要确定合理的保温时间,防止晶粒增长过大。再结晶理论近年来有很大发展,并集成到商业软件中,对再结晶过程进行数值模拟计算<sup>[17]</sup>,但由于整体封头锻造过程复杂,无法完全依赖计算得到结果,必须通过实验对相关工艺进行验证,以保证工艺的可靠性。由于再结晶后晶粒的尺寸取决于温度、变形量、变形速率和材料本身的性质,通过对 A508-3 钢在相同条件下进行再结晶过程的实验,得到奥氏体晶粒度的变化规律,结合工厂实际经验,为工艺的制定提供可靠的依据。通过数值模拟计算<sup>[17]</sup>,得到加热前法兰处的等

效应分布如图 2 所示,可以看到,法兰外缘的等效应变最小,在 22.2% 以内,靠近法兰底部,应变增加到 55.6%,锻造过程中,应变速率在  $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  到  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  之间;封头其它锻造工序的始锻温度是 1 200 °C。因此设计实验进行 2 个方面的研究:研究 1 050 °C 和 1 200 °C 下,晶粒度随保温时间变化的规律;研究 1 050 °C 和 1 200 °C 下,变形量分别为 10%、20%、30%、50%,应变速率为  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  情况下晶粒长大的规律。

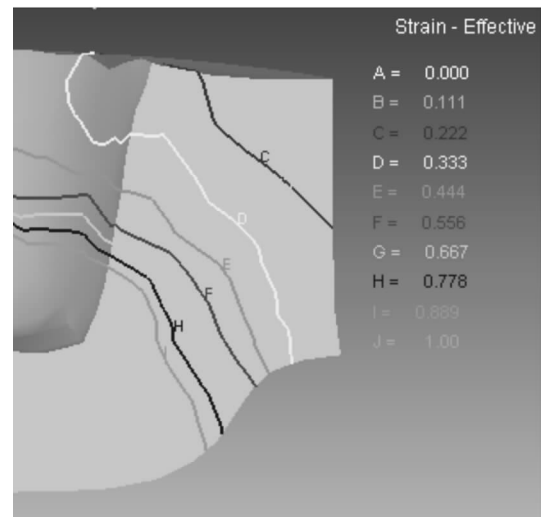


图 2 1:1 比例整体封头法兰部位的等效应变分布

## 1 实验材料及方法

实验材料采用中国第二重型机械集团公司提供的 A508-3 钢,其化学成分见表 1。试样被加工成直径 8 mm×12 mm 的小圆柱,根据实验分类,对试样进行编号, No. 1~No. 8 用来研究奥氏体晶粒在 10%~50% 变形量下的变化规律;为了获得较细晶粒的试样,以便在加热试验中进行对比,将原始试样进行了晶粒细化处理,方法是 1 100 °C 下以  $0.1 \text{ s}^{-1}$  的应变速率压缩 50%,使试样晶粒度达到 4 级,然后将经过晶粒细化处理后的 3 个试样进行线切割,每个平均切成 4 块,其中 10 块分别编号 No. 9~No. 18,研究晶粒度随保温时间的变化规律(试样的编号及实验内容见表 2 和表 3)。

表 1 A508-3 钢化学成分表

Element	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V
Amount/wt%	≤0.25	0.16~0.65	0.20~1.50	≤0.025	≤0.25	0.40~1.00	≤0.10	0.45~0.50	≤0.05

表 2 高温压缩实验的试样编号

编号	$T/^\circ\text{C}$	变形量
1	1 050	0.1
2	1 050	0.2
3	1 050	0.3
4	1 050	0.5
5	1 200	0.1
6	1 200	0.2
7	1 200	0.3
8	1 200	0.5

表 3 保温实验的试样编号

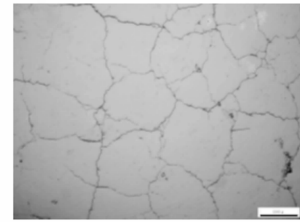
编号	加热温度/ $^\circ\text{C}$	保温时间/min
9	1 050	30
10	1 050	60
11	1 050	90
12	1 050	120
13	1 050	180
14	1 200	20
15	1 200	40
16	1 200	60
17	1 200	80
18	1 200	100

### 1.1 高温压缩实验

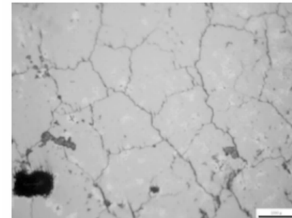
实验在 Gleeble-1500 热力模拟实验机上完成, 试样 No. 1~No. 8 以  $5^\circ\text{C}/\text{s}$  的速率加热到实验温度, 保温 180 s, 再以  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  的应变速率分别压缩 10%、20%、30%、50%, 淬火冷却。

### 1.2 保温实验

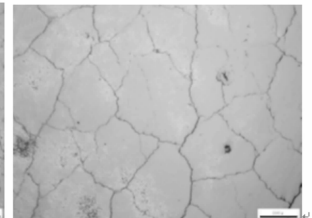
实验采用箱式电阻炉进行加热保温。编号为 No. 9~No. 18 的试样分别加热到实验温度, 并保温, 取出后迅速放入水中淬火冷却。将完成高温压缩和保温实验的试样进行金相观测, 测量其奥氏体晶粒度。奥氏体晶粒度的测定方法如下: 对试样进行磨样、抛光, 抛光面向上放入加热炉内, 在  $880 \pm 10^\circ\text{C}$  下保温 30 min, 取出后在水中淬火, 再放入配置好的过饱和苦味酸溶液中, 在  $50 \pm 20^\circ\text{C}$  下保温 10~15 min, 取出用清水冲掉腐蚀液, 再轻度抛光即可清晰观测到奥氏体晶界。晶粒度级别按照与 GB6394-1986 中标准评级图进行比较的方法测定 (图 3~4 中标注的尺寸均为  $100 \mu\text{m}$ )。



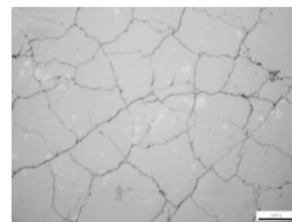
(a)原始试样



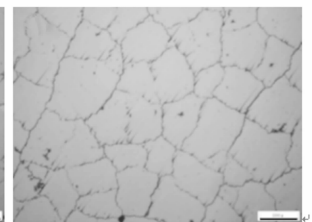
(b)压缩10%



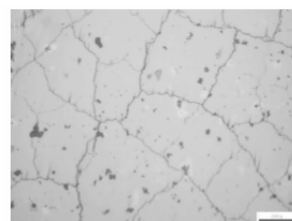
(c)压缩20%



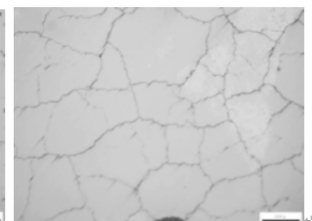
(d)压缩30%



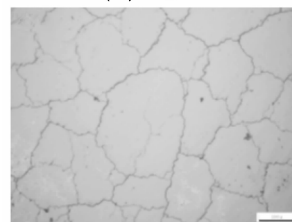
(e)压缩50%

图 3 1 050  $^\circ\text{C}$  下高温压缩后试样的晶粒尺寸

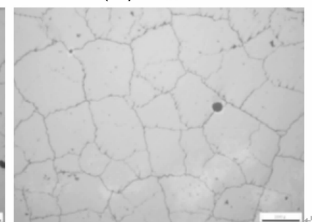
(a)压缩10%



(b)压缩20%



(c)压缩30%



(d)压缩50%

图 4 1 200  $^\circ\text{C}$  下高温压缩后试样的晶粒尺寸

## 2 实验结果和分析

### 2.1 变形量与奥氏体晶粒尺寸

图 3 显示出试样压缩前的晶粒大小同压缩后的比较。比较可以看出, 晶粒尺寸随变形增大而减小, 从图 5 看出, 试样压缩前, 初始晶粒度为 0 级, 高温压缩后, 晶粒尺寸逐渐减小, 当变形量在 10% 到 30%, 晶粒尺寸变化并不明显, 晶粒度为 1 级, 当变形量达到 50%, 由于动态再结晶机制的作用, 晶粒明显细化, 达到 2 级。

图 4 是 1 200  $^\circ\text{C}$  下, 高温压缩后试样的晶粒尺

寸图,图中显示的变化规律同 1 050 ℃时相似,图 6 是 1 200 ℃下晶粒度与变形量的关系曲线,变形量在 10%时,晶粒大小没有明显变化,晶粒度仍为 0 级,说明高温下软化机制作用到了限制。随着变形量的增大,晶粒尺寸逐渐减小,变形量在 20%~50%左右,晶粒度都为 1 级。

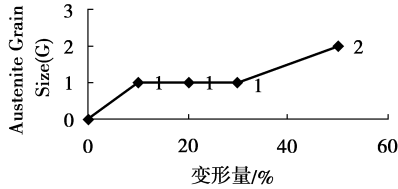


图 5 1 050 ℃下晶粒度与变形量的关系曲线

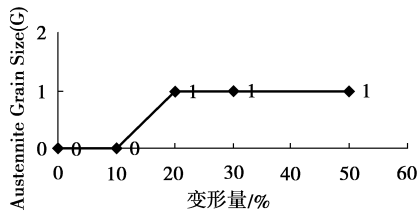


图 6 1 200 ℃下晶粒度与变形量的关系曲线

### 2.2 保温时间与奥氏体晶粒尺寸

从图 7 可以看到,在 1 050 ℃下,加热 30 min 后的晶粒尺寸同加热 90 min 的晶粒尺寸没有明显差异,当加热时间在 2 h 内,晶粒尺寸没有明显改变,加热 3 h 后晶粒尺寸开始变化。图 9 可以看出,1 050 ℃下,加热 60 min 后,晶粒度为从 4 级增大到 3 级,延长加热时间,在 120 min 内晶粒尺寸基本不变。

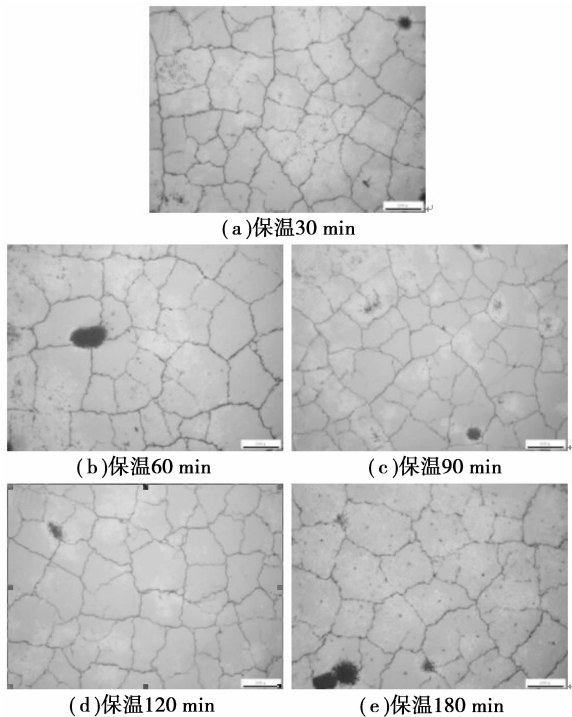


图 7 1 050 ℃下保温不同时间后试样的晶粒尺寸

图 8 显示了 1 200 ℃下晶粒度与保温时间之间的关系。在该温度下,保温 1 h 左右,晶粒尺寸没有显著变化,晶粒度从 4 级增加到 3 级,超过 1 h 后,晶粒尺寸迅速长大,图 10 显示,加热 80 min 左右,晶粒度已经由 4 级增加到 2 级。结果表明,整体封头在加热之前,法兰部位晶粒度细化了 1 到 2 级,为了将锻造后得到的细化晶粒保持下来,1 050 ℃下的加热时间必须控制在 2 h 以内,其它锻造过程中,控制 1 200 ℃下的加热时间非常关键。实验对实际工艺过程进行了简化,但对于大型锻件而言,这样的简化是可行的,实验得到的结论可以为实际工艺的制定提供参考。

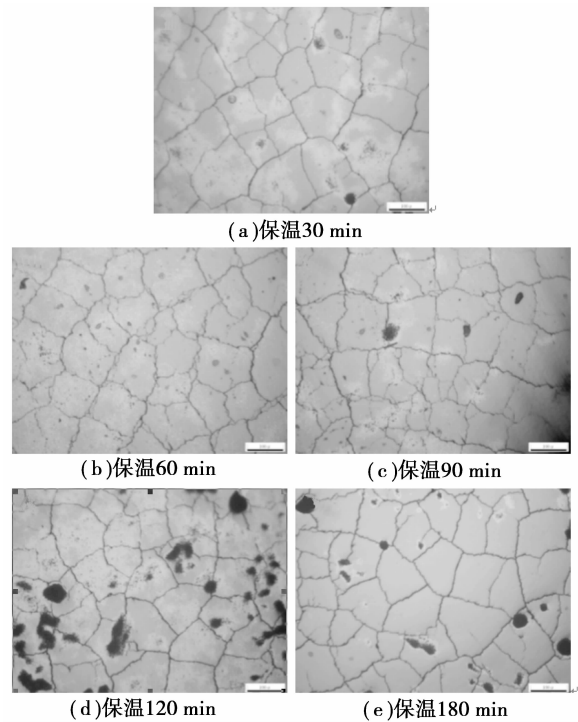


图 8 1 200 ℃下保温不同时间后试样的晶粒尺寸

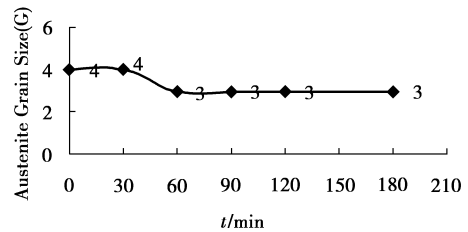


图 9 1 050 ℃下晶粒度与保温时间的关系曲线

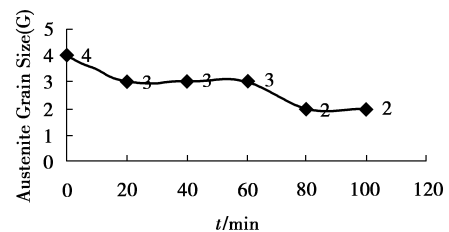


图 10 1 200 ℃下晶粒度与保温时间的关系曲线

### 3 结 论

1) A508-3钢在热加工过程中,温度为1 050℃,当变形量在30%以内,晶粒细化一级,达到50%变形时,晶粒细化2级;1 200℃时,50%以内的变形,晶粒细化一级;

2) 在1 050℃下,保温2 h左右,晶粒尺寸不会有明显变化,超过2 h后,晶粒长大明显,在1 200℃保温1 h左右,晶粒尺寸不会有明显变化。热加工过程中,为了防止晶粒粗大,控制1 200℃下的加热时间很关键。

#### 参考文献

- [1] KIM I S, KANG S S. Dynamic strain aging in SA508-3 pressure vessel steel [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1995, 62(2):123-129.
- [2] KIM I S, LEE B H. Dynamic strain aging in the high-temperature low-cycle fatigue of SA508 Cl 3 forging steel [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1995, 226 (1/2): 216-225.
- [3] FUKUOKA C, NAKAGAWA Y G. Microstructural evaluation of cumulative fatigue damage below the fatigue limit [J]. *Scripta Materialia*, 1996, 34 (9): 1497-1502.
- [4] BYUN T S, HONG J H, HAGGAG F M, et al. Measurement of through-the-thickness variations of mechanical properties in SA508Gr. 3 pressure vessel steels using ball indentation test technique [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1997, 74:231-238.
- [5] PARK D G, KIM C G, HONG J H. Microstructural dependence of Barkhausen noise and magnetic relaxation in the weld HAZ of an RPV steel [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, 215(1):765-768.
- [6] WU X Q, KIM I S. Effects of strain rate and temperature on tensile behavior of hydrogen-charged SA508 Cl. 3 pressure vessel steel [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, 348(1/2):309-318.
- [7] LEE S G, KIM I S. Effect of pre-charged hydrogen on fatigue crack growth of low alloy steel at 288℃ [J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, 420 (1/2): 279-285.
- [8] AHN Y S, KIM H D, BYUN T S, et al. Application of intercritical heat treatment to improve toughness of SA508 Cl. 3 reactor pressure vessel steel[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1999, 194(2/3):161-177.
- [9] 胡本芙, 卜勇, 吴承建, 等. N/Al 比值对 A508-3 钢的组织 and 性能的影响[J]. *钢铁*, 1999, 34(1):39-43.
- HU BEN-FU, PU YONG, WU CHENG-JIAN, et al. Effect of N/Al ratio on microstructure and properties of a508-3 steel for nuclear reactor pressure vessel[J]. *Iron and Steel*, 1999, 34(1): 39-43.
- [10] 郑隆滨, 陈家伦, 龚正春, 等. 核电设备用 SA508-3 钢的研究[J]. *锅炉制造*, 1999(3): 43-49.
- ZHENG LONG-BING, CHEN JIA-LUN, GONG ZHENG-CHUN, et al. Research of SA508-3 steel for nuclear power plant equipment [J]. *Boiler Manufacturing*, 1999, 3: 43-49.
- [11] 陈红宇, 杜军毅, 邓林涛, 等. 合金元素对 A508-3 钢平衡相转变析出的影响[J]. *大型铸锻件*, 2008(3):4-7.
- CHEN HONG-YU, DU JUN-YI, DENG LING-TAO, et al. Effects of alloy elements on phases precipitating during equilibrium phases transformation of A508-3 steel[J]. *Heavy Casting and Forging*, 2008(3): 4-7.
- [12] 凌进, 韩兆隆, 李爱平, 等. 反应堆压力容器模拟锻件用 SA508-3CL 钢性能研究[J]. *金属热处理*, 2006, 31(9): 14-16.
- LING JIN, HAN ZHAO-LONG, LI AI-PING, et al. Properties of SA508-3CL steel forgings for the reactor pressure vessel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, 31(9): 14-16.
- [13] 邵江, 崔岚, 张庄, 等. 核压力容器钢和焊缝的力学性能研究[J]. *钢铁*, 2003, 38(9):51-55.
- TAI JIANG, CUI LAN, ZHANG ZHUANG, et al. Mechanical properties of nuclear pressure vessel steel and its welds[J]. *Iron and Steel*, 2003, 38(9): 51-55.
- [14] 荆洪阳, 朱政强, 霍立兴, 等. 强度匹配对核容器用钢 A508-III 焊接接头断裂行为的影响[J]. *焊接学报*, 2002, 23(5): 35-37.
- JING HONG-YANG, ZHU ZHENG-QIANG, HUO LI-XING, et al. Effect of Strength Mis-Matching on Fracture Behavior for Nuclear Pressure Vessel Steel A508-III Welded Joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, 23(5): 35-37.
- [15] 朱峰, 曹起骧, 徐秉业. ASME SA508-3 钢的再结晶晶粒细化规律[J]. *塑性工程学报*, 2000, 7(1):1-3.
- ZHU FENG, CAO QI-XIANG, XU BING-YE. The regulation of recrystallization softening steel of ASME SA508-3 [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2000, 7(1):1-3.
- [16] 陈庆军, 康永林, 张艳, 等. Q345 钢热变形奥氏体晶粒尺寸的数值模拟[J]. *机械工程材料*, 2006, 30(11): 85-87.
- CHEN QING-JUN, KANG YONG-LIN, ZHANG YAN, et al. Numerical simulation of austenite grain size during hot deformation of Q345 steel[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2006, 30(11):85-87.
- [17] 杨运民. 核电大型厚壁容器锻造工艺和热处理工艺的数值模拟[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院, 2008.

(编辑 陈移峰)