

石油膨胀套管的力学性能及膨胀后的残余应力

唐明¹, 王璐璐², 马建忠¹, 宁学涛¹, 马新沛²

(1. 胜利石油管理局钻井工艺研究院, 257017, 山东东营; 2. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对选用的 X52 石油膨胀套管, 通过不同的热处理工艺进一步改善其膨胀性能, 研究了膨胀加工前后材料性能的变化规律. 对于经扩径膨胀率达 20% 的管材, 使用应力释放法测量了膨胀前后内外壁及焊缝熔合区、热影响区的轴向和环向残余应力. 结果表明: 经扩径膨胀后, 管外壁的轴向和环向残余应力均为残余压应力, 焊缝熔合区和热影响区的残余应力由拉应力向压应力转化, 其中轴向残余应力变化幅度较大; 管内壁膨胀后轴向与环向的残余应力均为残余拉应力. 另外, 对于不同膨胀率下力学性能与残余应力之间的关系中呈现的异常现象也进行了分析.

关键词: 膨胀套管; 力学性能; 残余应力; 热处理

中图分类号: TG142 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0090-05

Mechanical Properties of Expansion Casing and Residual Stress after Expansion

TANG Ming¹, WANG Lulu², MA Jianzhong¹, NING Xuetao¹, MA Xinpei²

(1. Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong 257017, China;

2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The expansion properties of X52 pipe were improved by heat treatment process, and the performance difference before and after expansion was investigated. For pipes with diameter expansion up to 20%, the axial and circumferential residual stresses on inside and outside walls, weld fusion zone and heat-affected zone were measured by the stress releasing method. The results show that both the axial and circumferential residual stresses on the outside wall of the pipe are compressive after expansion, and in the weld fusion zone and weld heat affected zone the residual stress varies from tensile to compressive, especially for the axial residual stress. On the inside wall, residual tensile stress appears in both directions after expansion. In addition, the abnormal relationship of the mechanical properties and residual stress under different expansion is analyzed.

Keywords: expansion casing; mechanical property; residual stress; heat treatment

膨胀套管技术是石油工业中发展迅速的一项可明显降低钻井完井成本的新技术. 膨胀套管用于井身结构优化, 可以减小井眼锥度, 提高建井效率, 降低成本; 利用膨胀套管可以封堵复杂地层和进行套管补贴^[1]. 国外近年来积累了多次成功使用膨胀套管技术的经验, 取得了显著的经济效益, 而我国对膨胀套管技术的研究还处于起步阶段, 有许多技术问

题有待解决, 其中对膨胀套管材料的研究更是一个急迫的关键技术问题. 为满足大变形的工程需要, 膨胀套管材料应具备强度和塑性的良好配合, 但是一般的石油管材难以达到这样的要求, 成为制约膨胀套管技术工程应用的重要因素.

膨胀套管的残余应力问题也受到人们的很大关注. 膨胀套管在制造和扩径膨胀中都会产生残余应

力. 套管下入井眼后进行的膨胀是一个缓慢的冷塑性变形过程,会在套管内形成较大的残余应力,这对膨胀套管的使用性能及正常服役将产生很大影响,环向上的残余压应力会导致套管在膨胀后抗挤强度下降,从而降低套管的承载能力. 对膨胀套管残余应力的研究已有一些报道,例如:张建兵等^[2]采用切环法将扩径膨胀后的管材沿纵向切开,任其自由收缩,再测量其直径,之后按照相关公式计算试样中的平均环向残余应力,试验管材的扩径膨胀率为 5.0%~6.2%;练章华等^[3]根据弹塑性力学有限元法,分析了膨胀套管内残余应力的分布;唐明等^[4]将切环法与电测法相结合,测试分析了膨胀套管环向残余应力沿壁厚的分布. 残余应力的分布及大小与变形量密切相关,然而对于高扩径膨胀量下的情况,至今尚未见报道.

本文以膨胀套管材料为研究目标,选择 API 标准中的 X52 管材作为研究对象,进行了高达 20% 的实际扩径膨胀,探索了不同热处理工艺对改善管材膨胀性能的影响,并研究了膨胀前后管材的力学性能及残余应力的变化.

1 试验方法

本试验所用管材为 X52 直缝焊管,包括未膨胀和膨胀率 e (内径扩大率)分别为约 10% 和 20% 的管材,其化学成分质量分数为: C 0.12%, Si 0.28%, Mn 1.25%, P 0.02%, S 0.01%, V+Ti 0.08%. 管材的几何尺寸见表 1.

表 1 X52 管材膨胀前后的尺寸

膨胀率/%	壁厚/mm	外径/mm	内径/mm
	8.88	220.7	202.9
9.9	8.40	240.4	223.0
20.7	7.73	262.5	245.0

在 API 标准中,对 X52 管材的力学性能要求为:屈服强度 $\sigma_y=359\sim 531$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b=455\sim 758$ MPa,延伸率 $\delta\geq 18\%$ (拉伸试样面积 $S<60$ mm²). 在对膨胀套管力学性能的要求中,塑性可以说是最重要的性能指标,塑性越高安全性就越强,可使膨胀套管承受较大变形量而不破裂. 为提高塑性,采用了几种不同的热处理工艺,包括可以使钢铁材料获得良好综合力学性能的调质处理,以及可以提高塑性的亚温淬火、高温回火及退火处理. 根据 X52 钢的相变临界点 (A_{c1} 、 A_{c3} 点的温度分别为 740 和

880 ℃),所选取的具体工艺如下.

(1)调质处理:900 ℃淬火+650 ℃回火.

(2)亚温淬火+高温回火:790 ℃淬火+650 ℃回火.

(3)高温回火:650 ℃回火.

(4)退火:900 ℃加热后炉冷至 600 ℃空冷.

力学性能测试在 Instron 1195 电子拉伸试验机上进行,拉伸速度为 2 mm/min. 采用机械切割应力释放法,以电测方式对膨胀前后的 X52 管材进行内外壁及焊缝熔合区、热影响区的轴向和环向残余应力测试,测试仪器为 SDY220S 型程控静态电阻应变仪.

2 试验结果与分析

2.1 扩径膨胀前后的力学性能测试结果

对未膨胀及不同膨胀率的管材试样进行了力学性能测试,结果见表 2.

表 2 X52 管材扩径膨胀前后的力学性能

$e/\%$	σ_y/MPa	σ_b/MPa	$\delta/\%$
	456	540	30.1
9.9	574	647	20.6
20.7	580	652	15.7

由表 2 可知,由于扩径膨胀是材料的冷变形过程,因此形变强化的作用导致扩径膨胀后材料的屈服强度和抗拉强度都得到了提高,而材料的延伸率则大幅降低. 在膨胀率约为 10% 时,屈服强度提高了 118 MPa,延伸率由 30% 降至 20%;当膨胀率增加至约 20% 时,延伸率仍有下降,不过下降幅度较小,而材料的强度仅略有提高. 这是值得注意的现象,后面将对此进行讨论.

2.2 热处理后的力学性能测试结果及分析

对经不同工艺热处理后的 X52 管材试样进行了力学性能测试,结果见表 3.

表 3 各种工艺热处理后的力学性能

热处理工艺	σ_y/MPa	σ_b/MPa	$\delta_{l_0=50\text{ mm}}/\%$
原始态	456	540	30.1
调质处理	427	513	33.7
亚温淬火+高温回火	435	516	35.4
高温回火	426	529	32.9
退火	320	465	35.3

由表 3 可知,经不同工艺热处理后,材料的塑性均有不同程度的提高,其中亚温淬火+高温回火对延伸率的改善效果最好,可使延伸率达到 35.4%.退火处理虽然也可使延伸率达到 35.3%,但是热处理周期长,生产成本低,实际生产中不宜采用.

许多资料表明,亚温淬火能够降低材料的强度,提高材料的塑性和韧性^[5-6].这是因为亚温淬火时,淬火温度处于 $A_{cl} \sim A_{c3}$ 的两相区,奥氏体转变不完全,留有较多的塑性较好的未溶铁素体,而且由于亚温淬火加热温度低,晶粒细小,所以使材料具有较高的塑韧性.以上试验数据也表明,亚温淬火对于改善 X52 的塑性是有良好作用的,而且该工艺切实可行.

2.3 残余应力测试结果及分析

本文首次针对经实际扩径、膨胀率高达 20%的膨胀套管,使用机械切割应力释放法测量了膨胀前后管材内外壁表面及焊缝熔合区、热影响区的轴向和环向残余应力.测量方法是将电阻应变片黏贴在膨胀套管的内、外壁表面,用钻头在围绕应变片约 40 mm×40 mm 的方块上连续钻孔,使被测点与管体完全分割开.由于释放应变处与被测残余应力处在同一位置上,且应力充分释放,因而该法比较直接,精度也比较高.通过电阻应变片测得套管的微应变数据,利用平面广义虎克定律将测得的微应变换算为应力,公式如下^[7]

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_1 + \mu\epsilon_2)$$
(1)

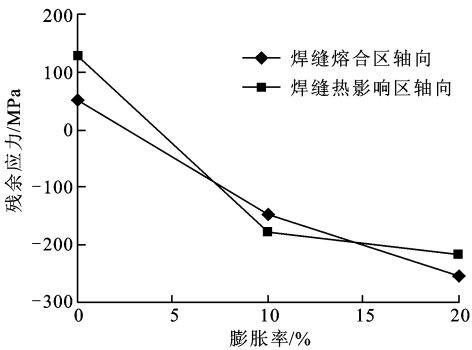
$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_2 + \mu\epsilon_1)$$
(2)

式中: σ_1 为轴向应力; σ_2 为环向应力; ϵ_1 为轴向应变; ϵ_2 为环向应变; E 为弹性模量,本文取为 210 GPa; μ 为泊松比,本文取为 0.3.

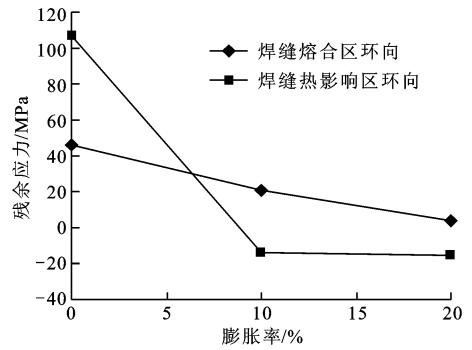
测试采用的应力释放法等效于反向加载,故所得数据反向(乘以-1)之后即为膨胀套管轴向和环向的残余应力.

由图 1 可知,对于远离焊缝的基体部位来说,膨胀后套管外壁的轴向及环向残余应力均为残余压应力,而内壁的轴向及环向残余应力均为残余拉应力.

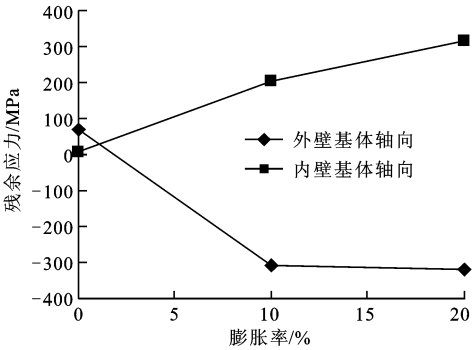
从图 1a、图 1b 可以看到,对于焊缝熔合区和热影响区来说,当套管进行约 10%的膨胀后,外壁的残余拉应力迅速向残余压应力方向转变,并且变化幅度相当大,尤其是轴向应力,变化幅度高达 200~300 MPa,而环向应力的变化幅度相对较小.当膨胀率继续增大至约 20%时,残余应力的变化幅度都急



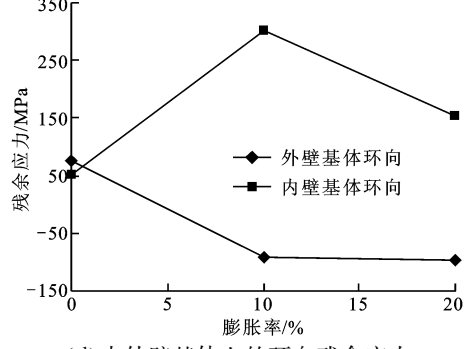
(a)外壁焊缝熔合区和热影响区的轴向残余应力



(b)外壁焊缝熔合区和热影响区的环向残余应力



(c)内外壁基体上的轴向残余应力



(d)内外壁基体上的环向残余应力

图 1 膨胀前后残余应力的变化趋势

剧减小,其中焊缝热影响区的环向应力基本无变化.由图 1c、图 1d 可知,套管膨胀前内外壁的基体

表面均为残余拉应力,根据应力平衡原理可以判定,内外壁之间必有残余压应力区域存在。

由图 1c 可知,当套管进行约 10% 的膨胀后,外壁基体上的表面轴向残余应力由较小的残余拉应力转变为很大的残余压应力,变化幅度高达 370 MPa,而内壁基体上的轴向残余应力则向拉应力方向增大,转变为较大的残余拉应力。当膨胀率继续增大至 20% 时,内壁基体上的轴向残余应力继续向拉应力方向增大,而外壁基体上的轴向残余应力变化很小。

由图 1d 可知,当套管的膨胀率为 10% 时,外壁基体上的环向残余应力向反方向转变,由残余拉应力转变为残余压应力,变化幅度约为 160 MPa,而内壁基体上的环向残余应力则向拉应力方向急剧增大,高达 300 MPa 以上。当膨胀率继续增大至 20% 时,内壁基体上的环向残余应力反而急剧减小,降低为 153 MPa,而外壁基体上的环向残余应力基本无变化。

以上数据及分析展现了一个奇异现象,即当膨胀率高达 20% 时,残余应力的变化幅度明显减小,其数值基本不变化甚至更小(如内壁基体上的环向残余应力),只有内壁基体上的轴向残余应力变化是例外。

与表 2 相对比可以发现,当膨胀率为 10% 时,材料的强度大幅提高,塑性明显下降,而当膨胀率增大到 20% 时,强度基本没有进一步提高,塑性下降的幅度也明显减小。这种情况与残余应力的变化有相似之处,但与一般冷变形强化的规律不符。一般来说,冷变形量越大,则形变强化的效果越好,使强度提高,塑性下降,这是一个普遍规律。但是,本试验所出现的现象却并非如此,这很值得探讨,而且随膨胀率的增加,强度的变化规律与残余应力的变化规律相吻合,说明这两者之间是相关联的,与材料在冷变形过程中微观结构的演变必然有内在联系。

文献[8]认为,冷变形金属内部存在大量的点缺陷——空位和间隙原子,储存了较高的弹性畸变能,具有通过发生回复与再结晶降低能量的倾向。回复现象很复杂,影响因素很多。在低温时,回复主要与点缺陷的运动有关,因为点缺陷运动所需的热激活能较低,因而在室温或 0 °C 以下就可以进行。单个的点缺陷运动到界面处(小角度界面或大角度界面)会消失,单个的空位也可以结合成空位对。随着这种回复现象的发生,强化效果减弱。

文献[9]的研究发现,金属在外部压力作用下产生变形时,原晶粒内部被很多变形带和切变带分割

成许多白亮的小块,经分析认为,这是由于切变带与变形带位错密集处发生回复过程产生了无畸变区所致。变形时外部施加的能量易在位错缠结切变带和形变带处产生应力集中,从而使碳原子从柯氏气团中释放、激活而发生应力时效,加之滑移面间 P-N 力和杂质引起的附加应力、割阶林位错等造成的摩擦热以及释放出的储存能,使位错缠结处局部温度升高,导致发生回复现象,而经历大变形量的试样所测得的形成稳定再结晶晶核的激活能为 70 kJ/mol,小于 α -Fe 的晶界扩散激活能 133 kJ/mol。这些结论说明,变形试样在未加热保温时已存在回复现象。

以上观点可以在一定程度上解释本文中的反常现象。在一定的冷变形范围内,金属随变形量增加在其晶体内部会产生大量缺陷,包括点缺陷(空位和间隙原子)、线缺陷(位错)和面缺陷(亚晶界),畸变能逐渐增加,因而产生形变强化,变形量越大,缺陷密度越高,强化效果也越好,而变形量越大,储存的能量就越高,发生回复再结晶的驱动力也越大。一般采用加热到一定温度、使冷变形金属在有限时间内充分进行回复与再结晶的方法,以达到消除冷变形产生的缺陷和残余应力、降低强度、恢复塑性的目的。如果在较高温度下进行热机械变形,则在变形的同时就会发生动态回复与再结晶,导致金属软化,因而热变形不能产生形变强化的效果^[10-11]。

本文所用的金属材料在膨胀率处于 10% ~ 20% 之间时,似乎出现了抵消进一步产生形变强化的因素,根据文献[8-9]的观点,有可能在膨胀过程中发生了回复,即类似于热机械变形的过程。如上所述,文献[9]认为回复在室温甚至 0 °C 以下就可以进行。一般冷变形速度很快,回复现象不明显,表现为以形变强化效果为主,而本文所用材料在膨胀变形时速度极慢,比一般变形速度慢几个数量级,数十小时才能完成扩径膨胀过程,这就为回复的充分进行提供了有力条件。显然,变形量越大,回复的驱动力就越大,转变过程也就越快,回复就有可能进行得较充分。表 3 的强度数据及图 1 的残余应力数据都支持了这一推论,即正是由于回复的作用,使得膨胀率由 10% 增大至 20% 时强度提高不明显,残余应力的变化也大大减小,甚至呈现反常。

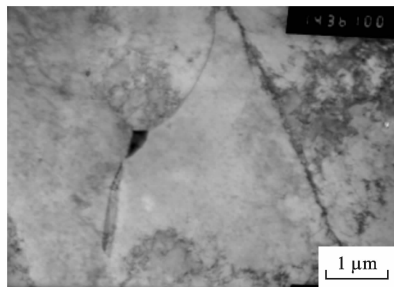
为研究是否发生了回复现象,在透射电镜下对试样的微观形貌特征进行了观察。图 2 为膨胀前后不同状态试样的高倍放大照片。

由图 2a 可见,扩径前的试样中铁素体为多边

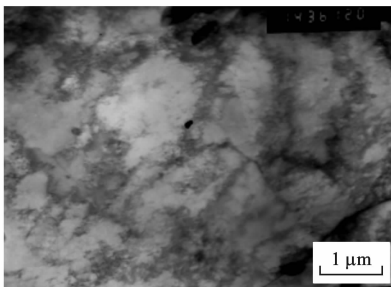
形,内部存在较低密度的位错亚结构.当经冷变形扩径使膨胀率达到9.9%后,铁素体内出现了位错胞,这是典型的冷变形的微观结构特征,见图2b.如果发生回复,会出现变形后产生的位错胞转变为亚晶的过程.在这个过程中,不规则的位错重新分布,刃型位错垂直排列成墙(这种分布可显著地降低位错的弹性畸变能),晶粒在内部被这种位错墙分割成许多小的晶体,即亚晶.电镜下观察到的亚晶和变形后产生的位错胞在形貌上是不同的.位错胞的边界由于位错的紊乱缠结,界面宽而模糊且不规整,如图2b所示.亚晶界的界面很窄,平直而明锐,与晶内有较大的反差,同时亚晶的几何形状多半是规则的.从塑性和韧性看,当形成亚晶后,材料性能有很大的改善,形变强化的效果减弱,强度下降.从图2b可以

看到,有些位错胞之间的边界已经细化,有转化为亚晶界的迹象.图2c所示为膨胀率达到20.7%时材料的微观形貌,可见亚晶界与位错胞共存的现象更清晰.这些照片可以在一定程度上证实,在这样的冷变形条件下伴随着回复现象的共生.

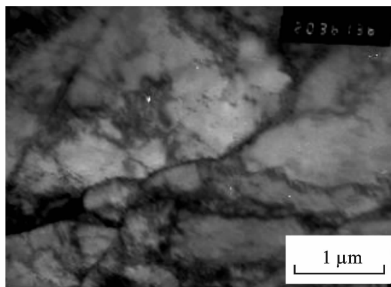
这是十分重要的探索,因为如果关于回复的结论成立,就可以减轻对于“膨胀率越大残余应力也越大”的担心.更有意义的是,若能找到产生此异常现象的原因,就可以充分加以利用,在确定扩径膨胀的工艺参数时,利用此现象尽量减小残余应力,使残余应力的有害影响得以减轻,提高膨胀套管使用的安全性.所以,这一研究具有重要的工程和理论意义,有必要在今后进一步深入.



(a)扩径前



(b)膨胀率为9.9%



(c)膨胀率为20.7%

图2 扩径前后试样的透射电镜照片

3 结论

(1)当X52管材的扩径膨胀率为10%时,材料的强度大幅提高,塑性明显下降,而当膨胀率增大到20%时,强度提高的幅度很小,塑性下降的幅度也明显减小.

(2)亚温淬火+高温回火的热处理工艺可在一定程度上改善套管的力学性能,使延伸率增大至35%.

(3)经膨胀扩管后,残余应力的分布特点为:外壁基体的轴向和环向残余应力均为残余压应力,而内壁基体的轴向和环向残余应力均为残余拉应力;外壁焊缝熔合区与热影响区的轴向及环向残余应力均由膨胀前的残余拉应力向残余压应力方向变化,其中轴向残余应力变化幅度较大.

(4)残余应力测试数据展现出一种异常现象,即除内壁基体的轴向残余应力以外,当膨胀率高达20%时,残余应力变化的幅度明显减小,甚至与膨胀率为10%时的残余应力基本相同.初步分析认为,

这有可能是由于特定变形条件下发生了回复所致.对此现象进行研究具有重要的工程和理论意义,有待进一步深入.

参考文献:

- [1] 杨传勇. 国外可膨胀套管技术的发展及应用[J]. 石油机械, 2006,34(10):74-77.
YANG Chuanyong. Development and application of expandable tubing technology of overseas[J]. China Petroleum Machinery, 2006,34(10):74-77.
- [2] 张建兵,韩建增,陈建初,等. 膨胀套管中的残余应力问题[J]. 石油钻采工艺, 2005,27(2):18-20.
ZHANG Jianbing, HAN Jianzeng, CHEN Jianchu, et al. Question of residual stress in expansion casing [J]. Oil Drilling and Production Technology, 2005,27(2):18-20.
- [3] 练章华,乐彬,张建兵,等. 带有橡胶筒的膨胀套管内残余应力分析[J]. 钻采工艺, 2007,30(5):108-110.
LIAN Zhanghua, YUE Bin, ZHANG Jianbing, et al. Analysis of residual stress in expandable casing with

rubber sleeve [J]. Drilling and Production Technology, 2007,30(5):108-110.

[4] 唐明,金有海,于桂杰,等. 膨胀管残余应力及其分布 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008,32(6): 125-128.
TANG Ming, JIN Youhai, YU Guijie, et al. Residual stress in expansion casing and its distribution [J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32 (6):125-128.

[5] ZHAO Mingchun, YANG Ke, SHAN Yiyin. Comparison on strength and toughness behaviors of microalloyed pipeline steels with acicular ferrite and ultrafine ferrite [J]. Materials Letters, 2003,57(9/10):1496-1500.

[6] 王冀恒,李惠,谢春生,等. 35CrMo 钢亚温淬火强韧化组织与性能研究 [J]. 热加工工艺, 2009(6):144-146.
WANG Jiheng, LI Hui, XIE Chunsheng, et al. Study on microstructure and properties of 35CrMo steel by modified treatment [J]. Hot Working Technology, 2009(6):144-146.

[7] 俞嘉声. 弹性力学教程 [M]. 北京:高等教育出版社, 1991:43-45.

[8] 石德珂. 材料科学基础 [M]. 2 版. 北京:机械工业出版社, 2008:356-357.

[9] 范力茄,张瑞军,刘建华,等. 强变形低碳钢的再结晶的研究[J]. 物理测试,1998(3):8-11.
FAN Liru, ZHANG Ruijun, LIU Jianhua, et al. Study on recrystallization of heavy deformed low carbon steel [J]. Physics Examination and Testing, 1998 (3):8-11.

[10] YANG Jinghong, LIU Qingyou, SUN Dongbai, et al. Recrystallization behavior of deformed austenite in high strength microalloyed pipeline steel [J]. Journal of Iron and Steel Research: International, 2009, 16 (1):75-80.

[11] EGHBALI B. Microstructural development in a low carbon Ti-microalloyed steel during deformation within the ferrite region [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008,480(1/2):84-88.

(编辑 葛赵青)