

DOI: 10.11973/jxgccl202002003

服役脆化态 HR3C 钢管的缺口敏感性

宋 利

(中国大唐集团科学技术研究院有限公司华中电力试验研究院, 郑州 450001)

摘 要: 在取自未服役与服役 5 万 h HR3C 钢管的拉伸试样上预制不同类型(V 型、U 型)、不同底部曲率半径(0.10, 0.13, 0.25, 0.85 mm)和不同长度(0.25, 0.50, 0.75, 1.00 mm)的缺口, 通过拉伸试验研究了钢管的缺口敏感性。结果表明: 未服役 HR3C 钢管无缺口敏感性, 服役后钢管发生脆化, 对缺口较为敏感; 脆化态钢管对 V 型缺口的敏感性大于对 U 型缺口的, 特别是对角度较大、底部曲率半径较小(0.10~0.25 mm)、长度较长(0.50~1.00 mm)的 V 型缺口较为敏感; 当缺口应力集中系数大于 3.5 时, 脆化态 HR3C 钢管的缺口敏感性较大。

关键词: HR3C 钢管; 脆化; 拉伸性能; 缺口敏感性; 应力集中系数

中图分类号: TB302.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)02-0013-05

Notch Sensitivity of Embrittled HR3C Steel Tube after Service

SONG Li

(Huazhong Electric Power Test Research Institute, China Datang Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Notches with different types (V, U), different root curvature radii (0.10, 0.13, 0.25, 0.85 mm) and different length (0.25, 0.50, 0.75, 1.00 mm) were pre-made in tensile samples from HR3C steel tube before and after service for 50 000 h, and then the notch sensitivity of the steel tube was studied by tensile tests. The results show that the unserviced HR3C steel tube had no notch sensitivity. After service, the steel tube was embrittled, and therefore became sensitive to notches. The embrittled steel tube had higher sensitivity to the V-notch than to the U-notch, especially being sensitive to the V-notches with a relatively large angle, relatively small root curvature radii (0.10—0.25 mm) and relatively long length (0.50—1.00 mm). When the stress concentration factor was greater than 3.5, the notch sensitivity of embrittled HR3C steel tube was high.

Key words: HR3C steel tube; embrittlement; tensile property; notch sensitivity; stress concentration factor

0 引 言

节约能源、减少污染物排放是目前火电机组发展的主流方向, 高蒸汽参数的超临界和超超临界机组因具有运行可靠性好、热效率高等优点正逐渐在全世界得到推广^[1-2]。传统 18-8 型奥氏体耐热钢因抗蒸汽氧化性能和耐烟气腐蚀性能较差而难以满足高蒸汽参数火电机组发展的需要。在其基础上, 日本住友公司开发了 25Cr-20Ni 型 HR3C 耐热钢^[3]。HR3C 钢中的镍含量(质量分数, 下同)为 20%, 可有效提高钢的抗烟气腐蚀性能; 铬含量为 25%, 一方面可提高钢的抗蒸汽氧化性能, 另一方面可使氮达到最

大溶解度, 促使钢中析出细小弥散的 NbCrN 强化相, 从而提高其高温蠕变强度^[4-7]。

HR3C 钢目前主要应用于我国 600/605 °C 主蒸汽机组受热面管的高温段, 在实际运行过程中, 其管壁温度可达 700 °C。HR3C 钢管长时间在高温高压条件下服役后, 组织中的碳化物会在晶界析出并聚集长大成颗粒状、棒状等, 进而影响其力学性能, 尤其是抗冲击性能^[8-12]。罗坤杰等^[9]研究表明, 服役 4 万 h 的 HR3C 钢受热面管的冲击韧度仅为 6 J·cm⁻², 相比于供货态的下降了 97%; 郑子杰^[10]研究发现在 700 °C 下时效 1 000 h 后, HR3C 钢的冲击功由供货态的 95.3 J 降为 9.3 J, 下降约 90.2%, 时效 10 000 h 后的冲击功仅为 2.3 J, 下降达 97.6%。

在长时间时效后, HR3C 钢管的冲击功极低, 表明其已处于明显的脆化状态。材料脆化必然伴随着

收稿日期: 2019-02-20; 修订日期: 2020-01-06

作者简介: 宋利(1963—), 男, 河南郑州人, 高级工程师, 学士

缺口敏感性的提高,进而增大设备安全风险,引发安全事故。在超超临界锅炉运行中,脆化后的 HR3C 钢管很容易发生脆性断裂。并且,在停机检修过程中,当 HR3C 钢受热面管受到碰撞或者其他冲击载荷作用时,其表面极易产生凹坑、裂纹等缺陷,机组重新启动后这些缺陷容易扩展并引起爆管^[13]。然而,目前鲜有关于裂纹长度和尖端角度对脆化态 HR3C 钢管性能影响的相关研究,因此作者在取自未服役和服役 5 万 h 脆化态 HR3C 钢管的拉伸试样上预制了不同尺寸的 V 型和 U 型缺口,通过拉伸试验研究了 HR3C 钢管的缺口敏感性。

1 试样制备与试验方法

试验材料取自某电厂超超临界机组高温再热器 HR3C 钢受热面管出口段,出口处温度为 605 ℃,压力为 4.67 MPa,钢管规格为 $\phi 57 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。至取样时,机组已累计运行约 5 万 h。同时,取供货态未服役的 HR3C 钢管进行对比试验。

在未服役和服役 5 万 h 后的钢管上截取试样,用三氯化铁盐酸水溶液(50 g $\text{FeCl}_3 + 30 \text{ mL HCl} + 70 \text{ mL H}_2\text{O}$)浸蚀,使用 Leica DMI8 C 型光学显微镜(OM)和 JSM-7001F 型扫描电子显微镜(SEM)观察显微组织。按照 GB/T 229—2007 加工出尺寸为 $55 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的 V 型冲击试样,使用 XJJD-5 型摆锤冲击试验机测试冲击性能。根据 GB/T 228.1—2010,采用全壁厚试样进行拉伸试验。试样形状和尺寸如图 1 所示,平行段宽 15 mm,中部两侧开 V 型或 U 型缺口,缺口尺寸见表 1。使用 UTM5105X 型电子万能试验机对未开缺口试样(光滑试样)和缺口试样进行室温拉伸试验,拉伸速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,各测 3 个平行试样。

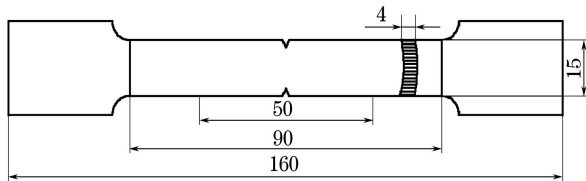


图 1 带缺口拉伸试样的形状与尺寸

Fig.1 Shape and size of notched tensile samples

材料的缺口敏感性通常用缺口敏感度来表征。拉伸缺口敏感度的计算公式为

$$N_{SR} = \sigma_{bn} / \sigma_b \quad (1)$$

式中: N_{SR} 为缺口敏感度; σ_{bn} 为缺口试样抗拉强度; σ_b 为光滑试样抗拉强度。

当 N_{SR} 大于等于 1 时,表示材料对缺口不敏感;当其明显小于 1 时,表示材料对缺口敏感^[14]。

表 1 未服役和服役钢管拉伸试样缺口的形状与尺寸

Table 1 Shape and size of notches in tensile samples from unserviced and serviced steel tube

编号	钢管状态	缺口类型/ 缺口角度/(°)	缺口长度/ mm	缺口底部曲率 半径/mm
1	未服役	V/60	1.00	0.10, 0.13, 0.25, 0.85
2		V/60	1.00	0.10, 0.13, 0.25, 0.85
3	服役后	V/45	0.25, 0.50, 0.75, 1.00	0.25
4		U	0.25, 0.50, 0.75, 1.00	1.00

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织和抗冲击性能

由图 2 可知,供货态未服役 HR3C 钢管组织中除含有少量未溶第二相外,晶界与晶内均无明显碳化物聚集,而服役后钢管中的碳化物在晶界与晶内大量析出。测试得到未服役钢管的冲击功为 95 J,服役后钢管的冲击功为 3.5 J,服役后的抗冲击性能大幅度降低。由此可见,服役 5 万 h 后 HR3C 钢管发生脆化。

2.2 拉伸性能和缺口敏感性

2.2.1 缺口底部曲率半径的影响

由图 3 可知:当缺口长度均为 1.00 mm 时,脆化态钢管的缺口底部曲率半径对其抗拉强度的影响较大。当底部曲率半径小于 0.25 mm 时,脆化态缺口试样的抗拉强度较其光滑试样的下降幅度较大,当底部曲率半径增大至 0.85 mm 时,其抗拉强度与其光滑试样的基本相当。未服役钢管缺口试样的抗拉强度明显高于其光滑试样的,这是由于缺口的存在改变了缺口前方的应力状态,试样所受的应力由原来的单向拉伸变为两向或三向拉伸应力,使得试样的抗拉强度比单向拉伸时的要高,即产生了“缺口强化”效应^[15]。当缺口底部曲率半径为 0.10 mm 时,脆化态缺口试样的屈服强度较其光滑试样的大幅下降;当缺口底部曲率半径在 0.13~0.85 mm 时,其对屈服强度的影响不大。未服役钢管缺口试样的屈服强度大于其光滑试样的。缺口底部曲率半径对服役前后钢管断后伸长率的影响规律相似,且缺口的存在均显著降低了断后伸长率,这是因为当金属材料存在缺口时,在缺口尖端会产生应力集中和三向应力状态,使材料出现脆化倾向。

脆化态钢管和未服役钢管的缺口敏感度随曲率半径的变化规律与抗拉强度的一致。当缺口底部曲

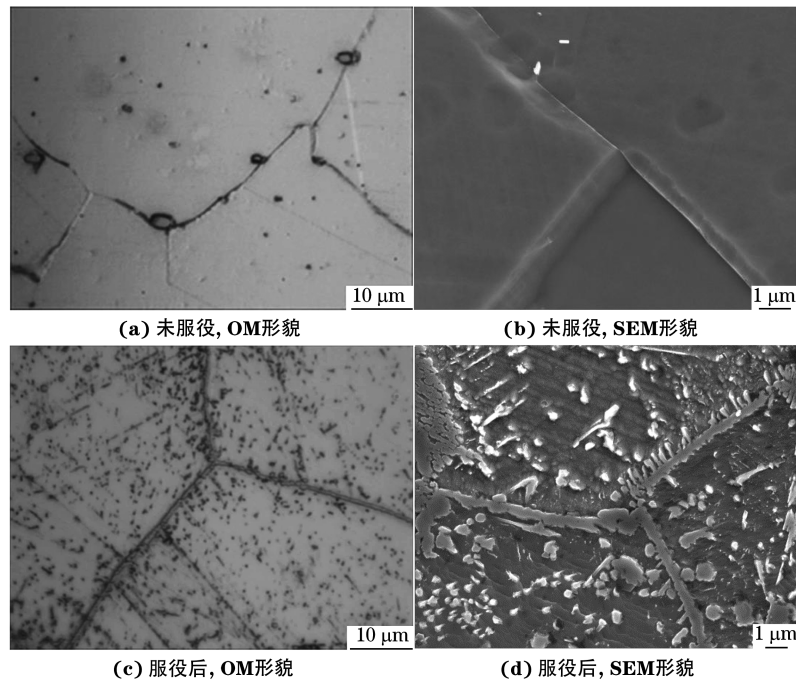
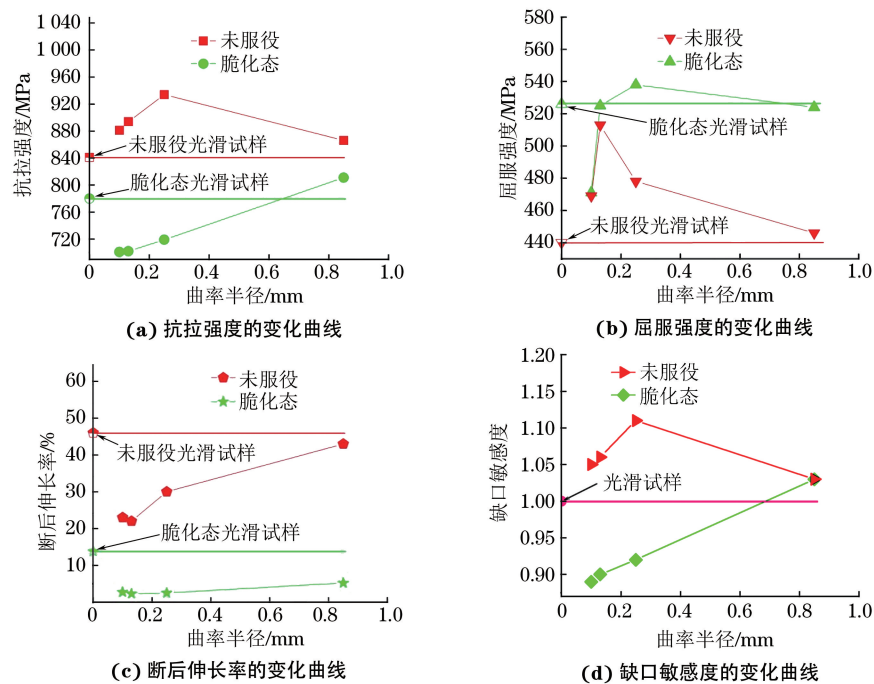


图 2 未服役和服役 5 万 h 后 HR3C 钢管的显微组织

Fig.2 Microstructures of HR3C steel tube before (a-b) and after 50 000 h service (c-d): (a, c) OM morphology and (b, d) SEM morphology

图 3 未服役与服役 5 万 h 脆化态 HR3C 钢管抗拉强度、屈服强度、断后伸长率及缺口敏感度随缺口底部曲率半径的变化曲线
(V 型缺口, 角度 60° , 长度 1.00 mm)Fig.3 Curves of tensile strength (a), yield strength (b), elongation after fracture (c) and notch sensitivity ratio (d) vs notch curvature radius of HR3C steel tube before service and in embrittlement state after 50 000 h service (V-notch, 60° angle, 1.00 mm length)

率半径不大于 0.25 mm 时,脆化态钢管的缺口敏感度远小于 1,说明其对缺口的敏感性较大;当曲率半径大于 0.7 mm 时,缺口敏感度接近甚至大于 1,说明其对缺口的敏感性减小并最终变得不敏感。未服役钢管对缺口不敏感。

2.2.2 缺口长度的影响

由图 4 可知:脆化态 V 型缺口试样的抗拉强度随着缺口长度的增大先快速降低而后变化幅度不大,当缺口长度为 0.25 mm 时,抗拉强度与其光滑试样的相近,缺口长度大于 0.5 mm 时,较其光滑试样的大幅

降低;V 型缺口试样的屈服强度随缺口长度的增加而增大。U 型缺口试样的抗拉强度和屈服强度均随着缺口长度的增加先升高后降低,其中屈服强度较其光滑试样的升高幅度较大。缺口长度对 V 型和 U 型试样断后伸长率的影响规律基本一致,即随着缺口长度的增加,断后伸长率逐渐降低,且均低于光滑试样的。

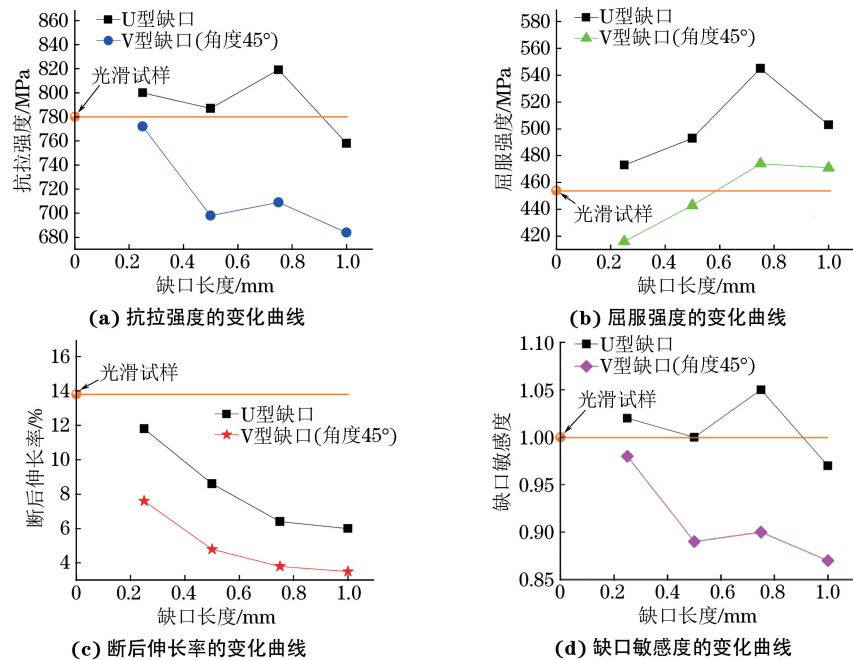


图 4 不同缺口类型下脆化态 HR3C 钢管的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率及缺口敏感度随缺口长度的变化曲线

Fig.4 Curves of tensile strength (a), yield strength (b), elongation after fracture (c) and notch sensitivity ratio (d) vs notch length of HR3C steel tube in embrittlement state with different notch types

3 缺口敏感度与应力集中的关系

材料的缺口敏感度随着应力集中系数的增加而降低^[15]。应力集中系数 K_t 的计算公式^[16]为

$$K_t = 1 + 2\sqrt{l/\rho} \quad (2)$$

式中: l 为缺口长度; ρ 为缺口底部曲率半径。

对 3 组脆化态钢管的试验数据进行统计分析, 计算得出其对应的应力集中系数, 见表 2。由图 5

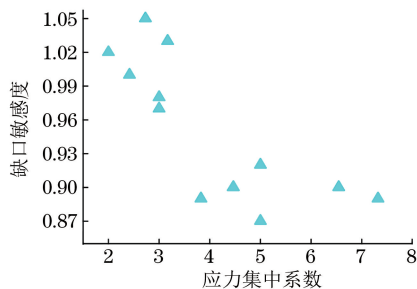


图 5 脆化态 HR3C 钢管缺口敏感度与应力集中系数的关系

Fig.5 Relationship between notch sensitivity and stress concentration factor of HR3C steel tube in embrittlement state

表 2 不同缺口类型下脆化态 HR3C 钢管的应力集中系数

Table 2 Stress concentration coefficients of HR3C steel tube in embrittlement state with different notch types

缺口类型	缺口角度/(°)	缺口底部曲率半径/mm	缺口长度/mm	应力集中系数
V	60	0.10	1.00	7.32
		0.13	1.00	6.55
		0.25	1.00	5.00
		0.85	1.00	3.17
V	45	0.25	0.25	3.00
		0.25	0.50	3.83
		0.25	0.75	4.46
		0.25	1.00	5.00
U	—	1.00	0.25	2.00
		1.00	0.50	2.41
		1.00	0.75	2.73
		1.00	0.10	3.00

可知:脆化态 HR3C 钢管的缺口敏感度随应力集中系数呈单调非线性变化;当应力集中系数大于 3.5 时,脆化态钢管的缺口敏感度低于 1,说明材料对缺口较为敏感。

4 结 论

(1) 供货态未服役 HR3C 钢管无缺口敏感性,服役 5 万 h 后钢管发生脆化,对 V 型缺口的敏感性变大。

(2) 脆化态 HR3C 钢管对 V 型缺口的敏感性大于对 U 型缺口的;对于角度 60°、长度 1.00 mm、底部曲率半径 0.10~0.25 mm 或角度 45°、长度 0.50~1.00 mm、底部曲率半径 0.25 mm 的 V 型缺口,脆化态 HR3C 钢管较为敏感。

(3) 当缺口应力集中系数大于 3.5 时,脆化态 HR3C 钢管对缺口较为敏感。

参考文献:

- [1] 牟春华,杨征,赵新宝,等.超超临界锅炉用 HR3C 耐热钢的研究进展[J].热加工工艺,2018,47(2):23-27.
- [2] ZIELIŃSKI A, SROKA M, HERNAS A, et al. The effect of long-term impact of elevated temperature on changes in microstructure and mechanical properties of HR3C steel[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2016, 61(2):761-766.
- [3] 于鸿垚,董建新,谢锡善.新型奥氏体耐热钢 HR3C 的研究进展[J].世界钢铁,2010,10(2):42-49.
- [4] 李明,强文江,郑强,等.奥氏体钢氧化层影响因素及检测技术[C]//电力系统第十届无损检测学术会议论文集.长沙:中国电机工程学会,2005.
- [5] 王慧. HR3C 钢中 σ 相析出动力学研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
- [6] 赵军,刘亚芬,朱立新,等. HR3C 超级不锈钢焊接工艺试验研究及应用[C]//2011 年安徽省科协年会——机械工程分会论文集.合肥:安徽省机械工程学会,2011.
- [7] 吴刚.超超临界火电用新型奥氏体耐热钢高温氧化性能研究[D].镇江:江苏大学,2016.
- [8] 杜宝帅,魏玉忠,张忠文,等.高温服役 4.2 万小时超超临界机组用 HR3C 钢组织与性能[J].材料热处理学报,2014,35(12):84-89.
- [9] 罗坤杰,赵彦芬,张路,等.超超临界锅炉用奥氏体耐热钢 HR3C 的脆化机理[J].材料热处理学报,2017,38(7):79-86.
- [10] 郑子杰. HR3C 钢管时效冲击韧性大幅降低的原因分析[J].锅炉技术,2011,42(4):46-48.
- [11] 陈国宏,潘家栋,王家庆,等.650℃时效 HR3C 耐热钢的显微组织与高温拉伸性能[J].材料热处理学报,2014,35(2):104-109.
- [12] ISEDA A, OKADA H, SEMBA H, et al. Long term creep properties and microstructure of SUPER304H, TP347HFG and HR3C for A-USC boilers[J]. Energy Materials, 2007, 2(4):199-206.
- [13] 刘世刚,黄桥生,陈琨.1000 MW 超超临界机组高温再热器管弯头失效分析[J].电力科技与环保,2017,33(2):60-62.
- [14] 刘海军,曹睿,何洪,等. K418 合金缺口敏感性研究[J].稀有金属,2010,34(5):699-704.
- [15] 静永娟,高帆,付明杰,等.单一取向层片组织 TiAl 合金缺口敏感性的研究[J].物理测试,2010,28(2):24-27.
- [16] 李昂,张毅,高蔚,等.缺口效应对 7178 铝合金拉伸性能及断口形貌的影响[C]//中国核学会 2017 年学术年会论文集第 5 册(核材料分卷、辐射防护分卷).威海:中国核协会,2017.
- [6] HAGA T, SUZUKI S. Study on high-speed twin-roll caster for aluminum alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 143/144: 895-900.
- [7] 陈自伟,吴立鸿,卢广玺,等. AA8011 铝合金高通量连铸连轧铸嘴堵塞的原因[J].轻合金加工技术,2017,45(7):32-36.
- [8] 卢广玺,王鹏,关绍康.哈兹列特连铸连轧 AA5052 铝合金铸嘴挂渣成分及形成机理研究[J].郑州大学学报(工学版),2014,35(5):112-115.
- [9] 康志成,毛大垣,邓圭玲.铝熔体粘度测量的研究[J].湖南有色金属,2001,17(2):18-20.
- [10] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT: 流体工程仿真计算实例与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2004:9-10.
- [11] 刘慎,王西科,关绍康.铝连续铸轧铸嘴型腔的数值模拟及其结构优化[J].有色金属加工,2013,42(4):44-46.
- [12] 郭彦宏,王金辉,李戡.铝合金双辊铸轧铸嘴内部熔体流动数值模拟及对表面质量的影响[J].赤峰学院学报(自然科学版),2012(16):60-61.
- [13] 谭宏斌.连续莫来石纤维应用与制备[J].玻璃钢/复合材料,2009(3):71-75.
- [14] 叶大伦,胡建华.实用无机物热力学数据手册(第二版)[M].北京:冶金工业出版社,2002:987-992.
- [15] 黄希祐.钢铁冶金原理[M].北京:冶金工业出版社,2013.
- [16] DENG T F, FANG J Y, LAN S. The relation of pyroplastic deformation and liquid viscosity in vitreous ceramics [J]. Journal of the Australian Ceramic Society, 2017, 53(2): 635-643.

(上接第 12 页)