

服役经历对 7N01 铝合金断裂力学性能的影响

张啸尘^{1,2}, 谢里阳¹, 胡杰鑫¹, 张诗健¹
(1. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳建筑大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 材料在服役过程中的可靠性和耐久性是结构安全评估的基础, 针对某型高速列车上服役多年的 7N01 铝合金材料, 进行实验室空气环境下断裂力学性能参数测试, 并分析服役前后疲劳裂纹扩展行为差异。结果表明: 服役经历促使材料的各项断裂力学性能退化, 呈规律性下降趋势; 服役材料稳态疲劳裂纹扩展阶段 $da/dN - \Delta K$ 关系曲线呈折线现象, 分段拟合方法能够精确描述其疲劳裂纹扩展行为。微观形貌的结果显示: 服役后 7N01 铝合金的疲劳裂纹早期扩展区、稳定扩展区和快速断裂区的断裂表面依次为脆性断裂特征、塑性疲劳条带和脆性疲劳条带混合模式及沿晶和穿晶的混合断裂形貌。

关 键 词: 7N01 铝合金; 断裂力学; 疲劳裂纹扩展; 折线现象; 断口形貌

中图分类号: U 270.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)10-1442-05

Effect of Service on Fracture Mechanical Properties of 7N01 Aluminum Alloy

ZHANG Xiao-chen^{1,2}, XIE Li-yang¹, HU Jie-xin¹, ZHANG Shi-jian¹
(1. Key Laboratory of Aero Power Equipment Vibration and Control, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China. Corresponding author: ZHANG Xiao-chen, E-mail: zxc_neu@163.com)

Abstract: The reliability and durability of materials in service are the assessment foundation of the structural safety. Aimed at the 7N01 aluminum alloy experienced a long term service in high speed trains, the fatigue mechanical properties were investigated in laboratorial atmosphere, and the fatigue cracks propagation (FCP) behaviors of materials with/without service were analyzed. The results showed that the experience of service deteriorates the mechanical properties, showing a regular decline trend. The $da/dN - \Delta K$ curve in the FCP zone after service showed a turning phenomenon, and a piecewise Paris' curve fitting method was used to describe the FCP behavior. The results of the fracture surface morphologies showed that the are crack initiation zone, steady growth zone and rapid growth zone of 7N01 alloy after service corresponding to cleavage fracture mode, mixed plastic and cleavage fatigue striation, and mixed intergranular and transgranular fracture, respectively.

Key words: 7N01 aluminum alloy; fracture mechanics; fatigue crack propagation; turning phenomenon; fracture morphology

疲劳断裂是引发高速列车发生事故最常见的原因之一, 约占事故发生率的 70% ~ 80%^[1-2]。随着高速列车领域的快速发展, 为了确保承载结构安全可靠, 研究人员广泛采用断裂力学理论估算高速列车各功能构件的力学性能和使用寿命, 确保其服役周期内的结构完整性和运行安全性^[3-4]。构件服役过程中, 经历复杂环境因素的影响, 同时承受随机循环载荷的作用, 促使材料性能产生退化。因此, 对具有多年服役经历的高速列车车体关键功能构件的断裂力学性能进行深入研究

十分必要。

针对高速列车的服役安全课题,西欧、美国和日本等学者采用损伤容限技术对高速列车结构疲劳、服役安全控制等问题进行了大量研究,研究对象主要集中在车轴、车轮、轮轨及构架等关键构件上^[5-8]。Gravier 等^[9]研究了在复杂的服役环境下,高速列车车轮表面局部损伤造成的非常规腐蚀损伤对服役寿命的影响。O’donnell^[10]从短裂纹行为理论出发,提出车体构件的裂纹萌生和短裂纹扩展阶段不仅与应力水平有关,还与材料微观组织结构抵抗裂纹扩展的能力有关。NASGRO^[11]基于断裂力学损伤容限理论,估算结构零部件的临界安全指标并建立裂纹扩展模型。在国内,文献[12-13]针对高速列车空心轴的平面疲劳裂纹扩展规律进行了研究,并应用超长寿命疲劳可靠性方法和长裂纹扩展模型,预估了车轴的超长服役寿命和临界安全裂纹尺寸。目前,有关高速列车领域结构断裂力学及损伤容限技术的相关研究与应用十分有限,尤其是针对服役车体关键功能构件的断裂力学理论和试验研究相对薄弱,基础支撑模型和数据也相当缺乏,迫切需要结合工程实际开展系统性、综合性研究。同时积累相关技术方法、数据和实际应用经验,为高速列车的安全可靠运营和经济性检修维护提供坚实的技术支撑。

本文通过对具有多年服役经历的高速列车枕梁重要功能构件材料进行各项断裂力学性能参数测试及疲劳裂纹扩展行为分析,对服役材料的性能退化情况进行比较研究,并根据其疲劳裂纹扩展行为规律的特殊性,提出合理的拟合方法。应用扫描电子显微镜对疲劳裂纹扩展试样断口进行形貌观测,分析服役环境对微观组织结构的影响,从而全面评估服役经历对材料断裂力学性能的影响。

1 材料和试验

1.1 材料

将具有多年服役经历的高速列车车体枕梁作为研究对象。截取枕梁 2 个关键功能构件,即板材和抗蛇形减震器座,其构造材料为 7N01 铝合金。7N01 铝合金的化学成分(质量分数,%)为 Zn 4.5~5.0, Mg 1.0~2.0, Cu <0.20, Mn 0.2~0.7, Cr <0.30, Fe <0.35, Si <0.30, Al 其余。

1.2 试验

在实验室空气环境下,使用 Instron8800 型电

液伺服疲劳试验机对经历服役的 7N01 铝合金材料和相应的原始材料进行疲劳裂纹扩展门槛值、疲劳裂纹扩展速率及平面应变断裂韧度试验。采用 GB/T6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》和 GB/T4161—2007《金属材料平面应变断裂韧度 K_{IC} 试验方法》中推荐的标准三点弯曲 SE(B)试样,利用线切割方法预制试样裂纹前缘 V 型缺口。缺口深度为 7.0 mm,试样长度为 140.0 mm,跨距为 120.0 mm,宽度为 30.0 mm,厚度为 10.0 mm。疲劳裂纹扩展试验采用正弦波加载方式, f 为 10 Hz,试验过程中始终保持恒定载荷范围 ΔP ,恒应力比 R 为 0.1。采用夹式引伸计对裂纹尖端进行实时跟踪测量。裂纹扩展长度的计算方法采用 7 点递增多项式法,拟合测得裂纹长度和循环周次,进而求导得到疲劳裂纹扩展速率。采用降 K 法测试疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 。由于枕梁结构材料厚度所限,平面应变断裂韧度试验测试结果为条件断裂韧度 K_Q ,可作为材料断裂韧度 K_{IC} 的参考值。

冲击试验在吴忠材料试验机厂生产的 49 J 摆锤冲击试验机上进行,根据 GB/T229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》中规定,试样采用冲击缺口为标准夏比 V 形缺口,缺口深度为 2.0 mm,试样长度为 55.0 mm,宽度为 10.0 mm,厚度为 10.0 mm。

2 断裂力学性能参数

对车体枕梁 2 个关键功能构件及原始材料进行实验室空气环境下试验测试。采集的试验数据包括疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 、条件断裂韧度 K_Q 及冲击韧度 α_k 。

图 1 为断裂力学性能参数测试结果的直方图。可知,服役材料的断裂力学性能参数相对于原始材料均有不同程度的降低,不同功能构件的测试结果呈规律性的下降趋势。其中,疲劳裂纹扩展门槛值和冲击韧性退化程度较高,相对于原始材料,其退化范围分别为 15.6%~20.9% 和 10.2%~28.4%。服役材料的条件断裂韧度相对于原始材料退化程度较低,不超过原始材料的 10%。力学性能参数的退化现象表明,由于功能构件在服役期内所经历的外部环境介质和受载情况的不同,其力学性能出现了不同程度的分化,服役经历促使材料抵抗裂纹萌生和扩展的能力降低,脆性倾向明显,对外来冲击负荷的抵抗能力降低。

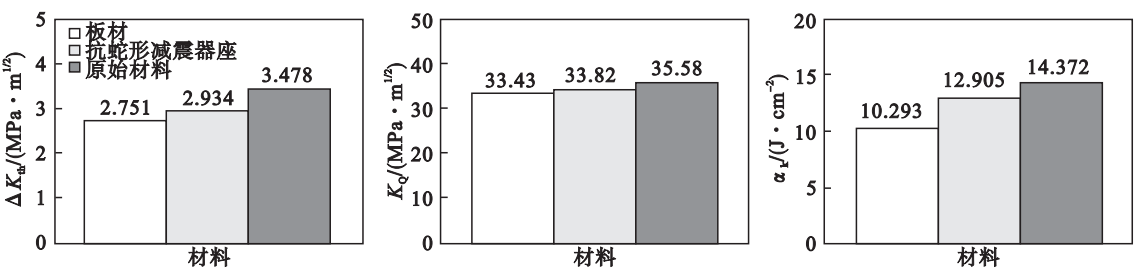


图 1 断裂力学性能参数测试结果

Fig. 1 Test results of fracture mechanical properties

3 疲劳裂纹扩展行为

针对不同功能构件的 7N01 铝合金 SE(B) 试样,进行实验室空气环境下的疲劳裂纹扩展试验.研究材料在经历复杂服役环境因素影响后疲劳裂纹扩展行为的变化规律.

应用 Paris 公式描述稳态疲劳裂纹扩展阶段裂纹扩展速率 (da/dN) 与应力强度因子 (ΔK) 的关系曲线^[14],其表达式为

$$da/dN = C(\Delta K)^m. \tag{1}$$

式中: a 为裂纹扩展长度; N 为循环周次; C 和 m 为材料常数.

SE(B) 试样的应力强度因子 ΔK 的表达式为

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{BW^{1/2}} \left[\frac{6\alpha^{1/2}}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}} \right] F(\alpha). \tag{2}$$

式中: B 为试样厚度; W 为试样宽度; ΔP 为载荷范围; α 为裂纹扩展长度与试样宽度的比值,即 $\alpha = a/W$; $F(\alpha) = 1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)$.

建立 da/dN 与 ΔK 关系的对数坐标系,将式 (1) 两边分别取对数:

$$\lg(da/dN) = \lg C + m \lg \Delta K. \tag{4}$$

由式(4)可知, da/dN 与 ΔK 在对数坐标系下呈线性关系,其中 m 和 $\lg C$ 分别为描述 $da/dN - \Delta K$ 关系曲线的斜率和截距,如图 2 所示.

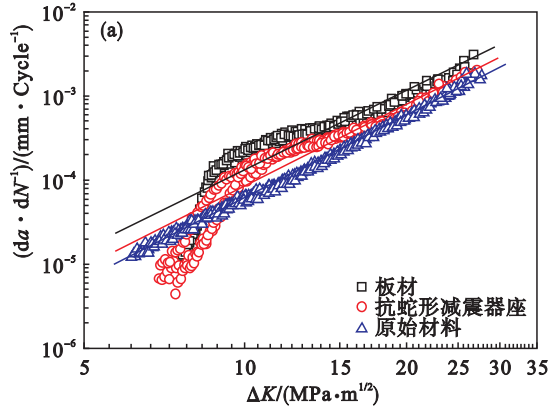


图 2 稳态疲劳裂纹扩展阶段 $da/dN - \Delta K$ 关系曲线

Fig. 2 Crack propagation rates versus stress intensity factor ($da/dN - \Delta K$) in steady growth zone

图 2 为服役材料与原始材料稳态疲劳裂纹扩展阶段 $da/dN - \Delta K$ 关系曲线.疲劳裂纹扩展试验数据和理论 Paris 公式拟合结果表明, da/dN 随 ΔK 的增大而增大.服役材料的 $da/dN - \Delta K$ 关系曲线总体高于原始材料,长期的服役经历使得材料性能有所下降,疲劳裂纹扩展速率提高.原始材料的 $da/dN - \Delta K$ 关系曲线近似成线性关系,与理论 Paris 曲线(图 2 中实线)能够较好吻合.服役材料的 $da/dN - \Delta K$ 关系曲线在稳态扩展阶段发生了折线现象,前部分曲线的 da/dN 对 ΔK 敏感,在较小的应力强度因子范围内疲劳裂纹扩展速率呈现快速上升的趋势.在此范围,服役材料部分疲劳裂纹扩展速率数据点低于原始材料.

鉴于服役材料稳态扩展阶段 $da/dN - \Delta K$ 关系曲线的折线现象,理论 Paris 曲线与试验数据点并不吻合,Paris 公式无法准确描述服役材料的疲劳裂纹扩展行为.因此,以折线现象转折点作为整体曲线的分隔点,采用分阶段考虑的方式对服役材料 $da/dN - \Delta K$ 关系曲线进行拟合分析.为了清晰呈现分段拟合方法,以板材试样和原始材料试样的试验数据为例,分段拟合示意图如图 3 所示.结合表 1 给出的分段拟合参数结果可以发现,由于原始材料在稳态扩展阶段没有发生折线现象,整体曲线呈线性关系,近似考虑其分段前后的材料常数值一致.服役材料分段前后的材料常

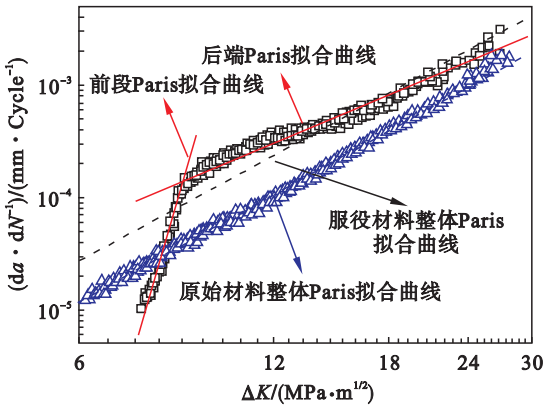


图 3 分段拟合示意图

Fig. 3 Schematic diagram of piecewise fitting

数相差较大,分段拟合(前段 Paris 拟合曲线)中截距 $\lg C$ 减小与斜率 m 增大的程度较大. 分段拟合(后段 Paris 拟合曲线)中,服役材料的拟合参数与原始材料相差较小, $da/dN - \Delta K$ 关系曲线变化规律一致. 由于各功能构件材料的服役环境有

所不同,其折线现象的转折点所对应的应力强度因子值也有所不同. 根据曲线的线性关系确定折线现象转折点分别为 $\Delta K = 8.752 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $\Delta K = 10.209 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

表 1 Paris 公式分段拟合参数
Table 1 Piecewise fitting parameters of Paris formula

材料	转折点处 ΔK ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	分段拟合(曲线 1)		分段拟合(曲线 2)	
		$\lg C$	m	$\lg C$	m
原始材料(7N01 - T4)	—	-7.465 09	3.235 47	-7.465 09	3.235 47
枕梁板材	$\Delta K = 8.752$	-20.776 09	17.932 73	-5.932 08	2.252 15
抗蛇形减震器座	$\Delta K = 10.209$	-12.359 8	8.453 38	-6.206 12	2.343 54

4 断口微观形貌分析

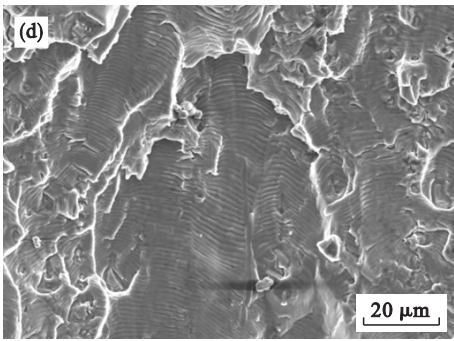
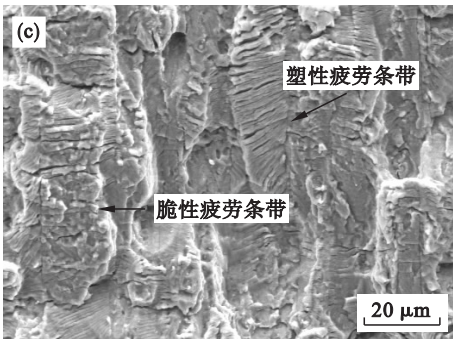
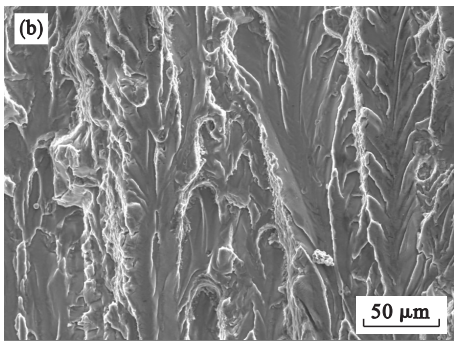
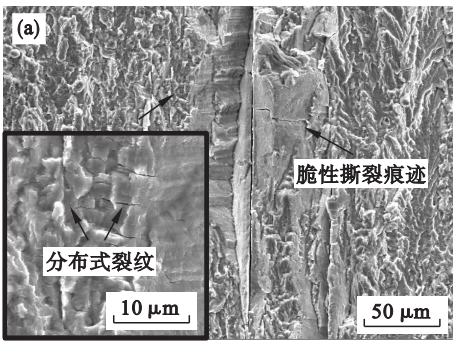
微观组织结构对材料疲劳断裂的各个阶段都有一定影响,特别对疲劳裂纹萌生和早期扩展阶段影响更为显著^[15]. 应用蔡司(ZEISS EVO)扫描电子显微镜对板材和原始材料裂纹扩展不同阶段进行微观断口形貌观测.

在图 4a 中,由于稳态扩展初始阶段,裂纹加速扩展,断口表面形貌并不平整,伴随大量撕裂棱和疲劳台阶,呈现典型的脆性断裂特征. 同时,断口出现大量微小的分布式裂纹,分布式裂纹会消耗主裂纹的扩展能量,促使疲劳裂纹扩展速率降低. 在图 4b 中,原始材料试样断口整体相对平坦,

出现了大量解理河流花样和解理台阶.

在图 4c 中,板材试样断口的疲劳条带特征主要为塑性疲劳条带和脆性疲劳条带的混合模式. 脆性疲劳条带的产生,加速疲劳裂纹的扩展,使得服役后材料在此阶段的疲劳裂纹扩展速率高于原始材料. 在图 4d 中,原始材料的疲劳条带较为光滑,主要为塑性疲劳条带特征.

在图 4e 中,由于服役期间外部环境因素与晶界相互作用造成的晶界脆化,板材试样断口的快速断裂区呈现典型的沿晶和穿晶混合断裂形貌. 在图 4f 中,原始材料试样断口的快速断裂区由大小不一的韧窝及空洞组成,韧窝内部存在已破碎的粗大第二相粒子,韧窝由撕裂棱连接,撕裂棱呈现小平面,为典型的韧性断裂形貌.



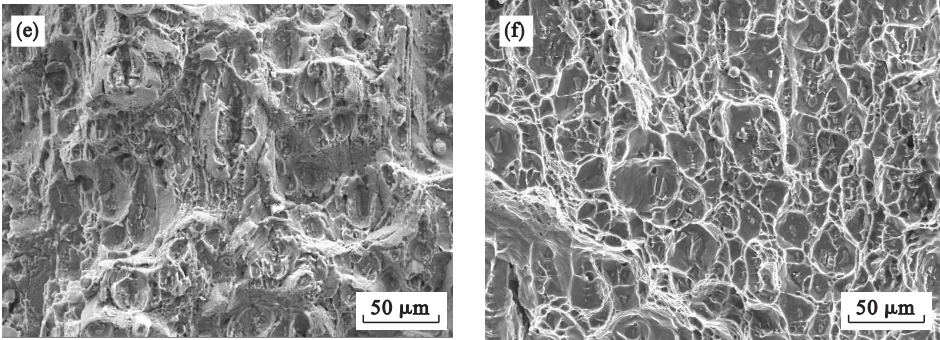


图 4 断口微观形貌照片
Fig. 4 SEM micrographs of fracture surface

(a)—板材,早期扩展区;(b)—原始材料,早期扩展区;(c)—板材,稳定扩展区;
(d)—原始材料,稳定扩展区;(e)—板材,快速断裂区;(f)—原始材料,快速断裂区。

5 结 论

1) 服役经历使得材料的力学性能产生退化,不同功能构件材料的试验结果呈规律性下降趋势。

2) 服役材料稳态阶段 $da/dN - \Delta K$ 关系曲线呈折线现象,采用 Paris 公式分段拟合的方法能够精确描述其疲劳裂纹扩展行为。

3) 服役材料断口的微观形貌分析表明:在疲劳裂纹早期扩展区,断裂表面呈现脆性断裂特征;在稳定扩展区,断裂特征呈现塑性疲劳条带和脆性疲劳条带的混合模式;在快速断裂区,断口为典型的沿晶和穿晶混合形貌。

参考文献:

[1] You S S, Fricke D. Advances of virtual testing and hybrid simulation in automotive performance and durability evaluation[J]. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2011, 4(1): 98 – 110.

[2] Shao Y M, Liu J, Mechefske C K. Driving axle housing failure analysis of a mining dump truck based on the load spectrum[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(3): 1049 – 1057.

[3] Ghidini T, Donne C D. Fatigue life predictions using fracture mechanics methods [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76(1): 134 – 148.

[4] Hasunuma S, Ogawa T, Kikuchi M. Fracture mechanics approach to small fatigue crack growth and coalescence under low cycle fatigue [J]. *Journal of the Society of Materials Science Japan*, 2011, 60(12): 1060 – 1065.

[5] Schijve J. Fatigue damage in aircraft structures, not wanted, but tolerated? [J]. *International Journal of Fatigue*, 2009,

31(6): 998 – 1011.

[6] Beretta S, Ghidini A, Lombardo F. Fracture mechanics and scale effects in the fatigue of railway axles [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, 72(2): 195 – 208.

[7] Zerbst U, Vormwald M, Andersch C, et al. The development of a damage tolerance concept for railway components and its demonstration for a railway axle [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, 72(2): 209 – 239.

[8] Madia M, Beretta S, Zerbst U. An investigation on the influence of rotary bending and press fitting on stress intensity factors and fatigue crack growth in railway axles [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(8): 1906 – 1920.

[9] Gravier N, Viet J J, Leluan A. Predicting the life cycle of railway axles [J]. *Revue Générale Des Chemins De Fer*, 1999, 118(3): 33 – 40, 62.

[10] O’ donnell M. The fatigue limit and its elimination [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1999, 22(7): 545 – 557.

[11] NASGRO. Fatigue crack growth computer program version 3.0—reference manual [S]. Houston: L. B. Johnson Space Center, 2000.

[12] Zhou S X, Xie J L, Yang G X, et al. Damage tolerance analysis on hollow axles of high speed motor trains [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 21(5): 8 – 12.

[13] 周素霞, 谢基龙. 高速客车空心车轴裂纹扩展特性研究 [J]. *工程力学*, 2009, 26(7): 232 – 237.

(Zhou Su-xia, Xie Ji-long. Research of the fatigue crack propagation characteristic on railway hollow axles [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(7): 232 – 237.)

[14] Paris P C. A rational analytic theory of fatigue [J]. *Trend in Engineering*, 1961, 40: 1 – 10.

[15] 钟群鹏, 赵子华. 断口学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 261 – 270.

(Zhong Qun-peng, Zhao Zi-hua. *Fractography* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 261 – 270.)