

## 稀土对 BNb 钢轨踏面区内耗谱的影响 \*

戴景文 于宁 孙振岩  
(东北大学理学院, 沈阳 110004)

任新建 王云盛  
(包头钢铁公司钢铁研究院, 包头 014010)

**摘要** 测量了放置 1 年 (1 a) 的 BNbRE 和 BNb 钢供货 (即热轧) 态重轨踏面区样品及其 700 °C, 30 min, 水冷 (W.C.) 室温变形样品的内耗. 结果表明, 两种钢的热轧态样品均有 Snoek-Kê-Köster (SKK) 峰, 但内耗有较明显的差异: BNb 钢轨的 SKK 峰明显高于、也宽于 BNbRE 钢的 SKK 峰, 前者的峰温较后者约高 20 °C; 但前者没有 Snoek 峰, 后者则有该峰. 两种钢变形样品的 SKK 峰大体相同. 同时, 测量了放置 2 年 (2 a) 的两种钢轨的供货样品和变形样品的内耗, 结果与放置 1 a 的样品有明显不同.

**关键词** 稀土, 钢, 重轨, 内耗

**中图分类号** TG115.24, TG142

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(2003)11-1219-04

## EFFECT OF RARE EARTH ON THE INTERNAL FRICTION SPECTRUM OF THE TREAD AREA OF THE BNb RAIL STEEL

JI Jingwen, YU Ning, SUN Zhenyan

College of Science, Northeastern University, Shenyang 110004

REN Xinjian, WANG Yunsheng

Research Institute of Iron and Steel, Baotou Iron and Steel Co., Baotou 014010

Correspondent: JI Jingwen, professor, Tel: (024)83685995, E-mail: jjw@yahoo.com.cn

Supported by National Ministry of Science and Technology of China (No.2002BA315A-5-2-1)

Manuscript received 2003-07-09

**ABSTRACT** The internal friction of the specimens from the tread area of BNb and BNbRE rail steels were measured, which are laid over one year after heat rolling, and RT deformed after treatment at 700 °C, 30 min, W.C. It is found that exist Snoek-Kê-Köster (SKK) peaks for the tested specimens, however, their patterns are difference: the peak of the BNb rail steel is higher and wider than that of the BNbRE steel rail, and the peak temperature of the former is about 20 °C higher than one of the latter; in addition, a Snoek peak exists in the latter, but no this peak in the former. The SKK peaks of the deformed specimens of both the steels are similar. The internal frictions of the specimens from rolling steel laid over two years and deformed rail were also measured, which shows obvious difference from that laid over one year.

**KEY WORDS** rare earth, steel, rail, internal friction

BNbRE 钢重轨, 是一种换代钢轨. 研究表明, 加稀土 (RE) 后钢的非金属夹杂得到改善, 钢的组织得到细化, 明显提高了钢的塑性、韧性及耐磨性, 延长了重轨的使用寿命. 文献 [1] 从稀土同氧、硫的强相互作用阐述了稀土变性夹杂的机理, 也分析了稀土与钢中磷的作用等.

重轨钢在使用过程中会形成驻留滑移带, 它的发展将

导致疲劳开裂, 重轨内部会生成核伤. 无论是在线轨的腰伤、还是重轨踏面的剥落掉块直至失效等, 都是由裂纹的局域形核及其随后的扩展引起的, 都是重轨内部位错等微结构运动及其状态变化的累积过程与效应. 因此, 认识稀土影响重轨钢上述性能的机制, 必须研究钢轨内点、线、面等缺陷的结构及其交互作用. 内耗是探测钢铁等金属材料微结构最有效的手段之一 [2], 可以揭示钢铁中稀土的固溶和合金化 [3], 以及烘烤硬化 (BH) 钢的 BH 机理和传统的应变时效机理 [4]. 本研究测量了 BNb 钢和 BNbRE 钢的内耗谱, 以探察 BNbRE 钢重轨中有关稀土作用的微观机理.

\* 国家 10.5 重点科技攻关项目 2002BA315A-5-2-1 资助

收到初稿日期: 2003-07-09

作者简介: 戴景文, 男, 1938 年生, 教授

## 1 实验方法

研究使用的试料为包头钢铁公司生产的 BNbRE 和 BNb 钢成品重轨, 由截面为 280 mm×380 mm 的连铸方坯热轧制出, 其终轧温度大于 950 °C. 转炉冶炼的 BNb 钢, 经过炉后 VD 处理和精炼, 再注入容量为 20 t 的中间包, 分四流连铸, 选择其中的第二流在结晶器喂丝加稀土; 纯度达 99.5% 的混合稀土 (mischmetal) 丝直径为 2 mm, 喂丝速度为 5.6—5.7 m/min. 连铸机的拉坯速度为 0.68 m/min. 开浇时钢水的过热度为 27 °C, 浇铸 (钢水从钢包到中间包再到结晶器) 是在 Ar 气保护下进行的. BNb 钢的成分 (质量分数, %) 为: C 0.76, Si 0.75, Mn 1.12, P 0.011, S 0.015, Nb 0.029, 余为 Fe. BNbRE 钢的成分除 RE 为 0.020 (亦为质量分数, %) 外, 余同 BNb 钢. 此外, 气体含量如下: 中间包内, N 为  $41.8 \times 10^{-6}$ , O 为  $23.7 \times 10^{-6}$ ; 结晶器内, H 为  $2.2 \times 10^{-6}$ .

用线切割机切去长为 190 mm 的 BNbRE 和 BNb 钢重轨段微鼓出的踏面表层 (最厚处小于 1 mm), 然后靠近切面切出一厚度为 0.9 mm 的“踏面”钢片; 再沿钢片的轧向, 各切出 40 条截面为 0.9 mm×0.9 mm, 长为 180 mm 的用于进行内耗测量的方“丝”. 供货态内耗样品的尺寸为 0.9 mm×0.9 mm×(150—170) mm, 将这种样品拉丝制出变形内耗样品. 放置 2 a 的变形样品是由供货态方丝直接拉出的; 而放置 1 a 的变形内耗样品, 则在变形之前先经固溶处理.

内耗测量在 NHI-12 型高温真空葛氏摆中进行. 测量 350 °C 以下温度的内耗时, 测量系统的真空度为 1 Pa 量级; 测量更高温度的内耗, 则在  $10^{-2}$  Pa 级的真空下进行. 金相与 SEM 观察分别在 Venament-2Union 7577 型光学显微镜与 SSX-550 型扫描电镜上进行.

## 2 实验结果

### 2.1 放置 1 年 (1 a) 钢轨样品的内耗

放置 1 a 钢轨的室温至 300—350 °C 升温内耗见图 1. 由图可以看出, BNb 钢重轨室温没有内耗峰; 而 BNbRE 钢重轨的内耗-温度曲线上, 有一个明显的室温峰. 在 200 °C 附近, 两种钢轨踏面样品的内耗-温度曲线上都有很明显的内耗峰; 但两种钢供货态样品的 200 °C 附近峰有较明显的差异: BNbRE 钢轨的内耗峰明显窄于也低于 BNb 钢轨的内耗峰; 前者峰温约为 190 °C, 较后者约低 20 °C. 两种钢轨供货态样品的 200 °C 附近峰低温支都有些拉长, 尤其是 BNbRE 钢样品拖长更明显, 已不是通常的对称峰. 图 1 还给出两种钢升温至约 700 °C 随后降温测出的内耗-温度曲线的较低温度内耗, BNbRE 钢“原位”退火试样有一较明显的 240 °C 内耗峰, 而 BNb 钢样品只是在 100 °C 附近有一可查觉的内耗现象.

图 2 示出放置 1 a 变形样品的内耗. 样品的室温变形量为 7.2%, 变形前样品先经 700 °C, 30 min, 水冷

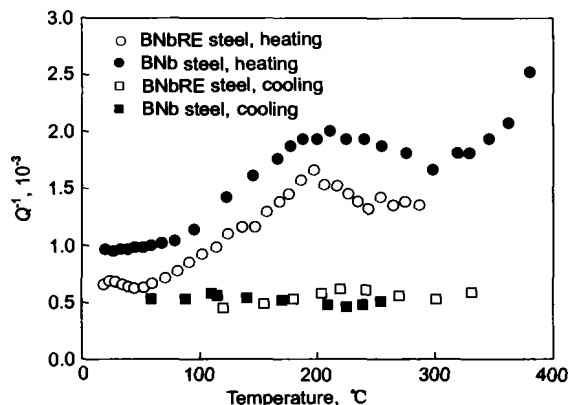


图 1 放置 1 年 (1 a) 的 BNbRE 和 BNb 钢轨供货态踏面样品的内耗

Fig.1 Internal frictions for the commercial rails of the BNbRE and BNb steels (specimens to be laid over one year,  $f = 0.88$  Hz)

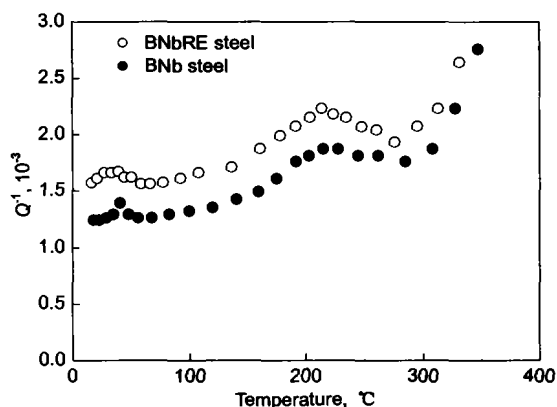


图 2 放置 1 a 的 BNbRE 和 BNb 钢轨 700 °C, 30 min, 水冷 (W.C.) 后变形样品的内耗

Fig.2 Internal frictions of BNbRE and BNb steel specimens cooled in water after annealing at 700 °C for 30 min and then deformed (specimens to be laid over one year,  $f = 0.88$  Hz)

(W.C.) 的固溶处理. 由图 2 看出, 与供货态样品的情况不同, 在同样处理和同一变形条件下, 两种钢轨踏面区的样品有近乎完全相同的内耗-温度曲线. BNb 钢变形样品也有了室温峰及在 100 °C 附近出现内耗抬起, 从图可见, 该曲线 70—120 °C 段上鼓; 两种钢的中温峰都在 220 °C 附近且为对称峰.

两种钢供货态样品 350 °C 以上的升、降温内耗在图 3 中给出. 比较其升、降温内耗-温度曲线可见, 在通常  $K\hat{e}$  (晶界) 峰温度区都出现一种降温时便完全消失的阻尼. BNbRE 钢样品的这种阻尼出现在 550—680 °C; 而 BNb 钢轨样品, 则是在 450—600 °C 出现这种阻尼.

### 2.2 放置 2 年 (2 a) 钢轨样品的内耗

图 4 是放置 2a 的供货态样品的内耗曲线. 与放置

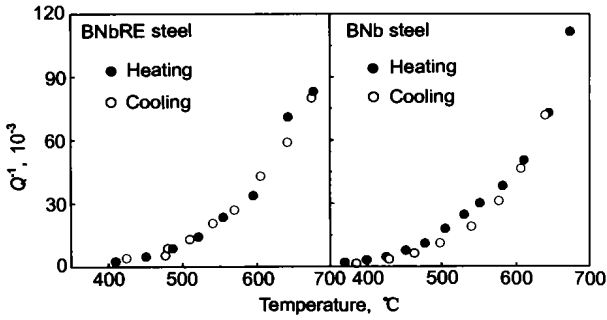


图 3 放置 1 a 的两种钢轨供货态样品的高温升、降温内耗  
Fig.3 Internal frictions of the tested steels in the high temperature range (specimens to be laid over one year,  $f = 0.88$  Hz)

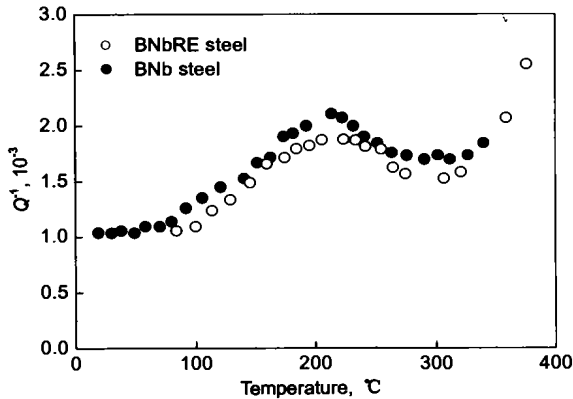


图 4 放置 2 a 轨的供货态样品内耗 - 温度曲线  
Fig.4 Internal friction curves of the specimens to be laid over two years

1 a 的供货态样品的测试结果比较, 放置 2 a 的 BNbRE 钢的室温峰消失了; 两种轨的中温峰高由  $(6.0-6.5) \times 10^{-4}$  增至  $(7-8) \times 10^{-4}$ ; 中温峰的峰温也有所上升, 特别是 BNbRE 钢, 约上升了 30 °C; 加之 BNb 钢中温峰的高温支稍向低温移动, 故放置 2 a 的两种钢轨供货态样品的中、低温内耗 - 温度曲线已接近相同, 都成为低温支明显拖长的不对称内耗峰。

图 5 示出放置 2 a 钢轨变形样品的内耗 (应变量为 6.8%—6.9%)。与图 2 的结果对比, 放置 2 a 轨变形样品内耗有了明显改变, 室温峰已基本消失, 80 °C 附近峰十分明显, 已成为分立的内耗峰。特别是 BNb 轨样品, 80 °C 附近峰高已达到 200 °C 附近峰的高度, 而且其室温—300 °C 背景内耗, 也不是通常的上升, 而是反常地下降, 这些都是以往未见报道的现象。与放置 1 a 经同样处理和同一应变变形的样品的内耗变得接近相同的情况不同, 在相同应变量的变形条件下, 放置 2 a 的两种钢变形样品的内耗出现明显差异。

对两种钢轨的轨头、轨腰和轨座 3 部位的样品, 分别随机取 10 个视场, 对珠光体片的片间距进行了测量, 结

果在表 1 中给出。由表 1 看出, 加 RE 细化了钢轨各部位的珠光体片, 尤其对性能较差的腰部细化更明显。SEM 观测表明, 加 RE 还可以使珠光体颗粒化和球化。

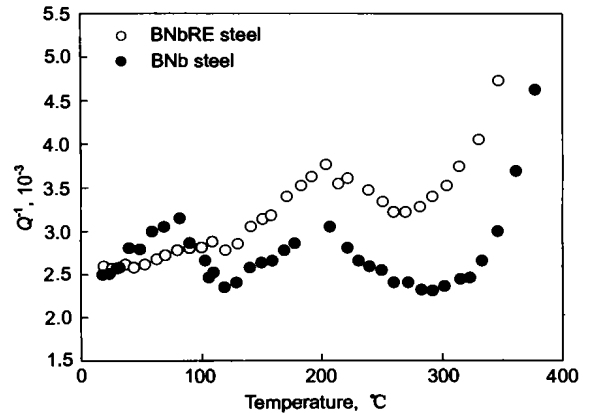


图 5 放置 2 a 轨变形样品的内耗  
Fig.5 Internal frictions of the deformed specimens to be laid over two years

表 1 BNbRE 和 BNb 钢轨中珠光体片的间距  
Table 1 The distances between the pearlite lamellar in BNbRE and BNb steel rails

Steel rail	( $\mu\text{m}$ )		
	Rail top	Rail waist	Rail base
BNbRE	0.85	0.88	0.87
BNb	0.89	0.97	0.93

### 3 讨论

#### 3.1 室温峰

金相和 SEM 观测都表明, BNbRE 和 BNb 钢轨的组织为近乎 100% 的珠光体。本研究测出的室温峰, 应是铁素体片的 C-Snoek 峰。室温下 C 在  $\alpha$ -Fe 里的溶解度非常低 ( $< 0.5 \times 10^{-6}$ )<sup>[5]</sup>, 加上有强碳化物形成元素 Nb 以及相当数量的位错等, 便出现了图 4, 5 中的放置 2 a 后重轨样品的室温峰基本消失甚至完全消失的情形。

#### 3.2 中温阻尼

3.2.1 供货态样品的中温峰 图 1 中 BNbRE 钢 190 °C 附近峰和 BNb 钢 210 °C 附近峰, 以及图 4 中两种钢供货态样品的中温峰, 都出现在变形铁基材料的 SKK 峰温度区域内<sup>[6,7]</sup>, 加之这些峰又和图 2, 5 中的变形样品的 SKK 峰在同一温区, 以及试样中 50% 的成分是含 C 的  $\alpha$ -Fe 等, 有理由认为供货态的 200 °C 附近峰, 就是 SKK 阻尼峰。根据样品成分及制造钢轨的过程, 通常是不应该出现上述 SKK 峰的; 供货轨出现 SKK 峰, 显然与其它因素有关。

在图 1 示出的降温内耗 - 温度曲线上, 出现在 240 °C 附近的内耗峰, 类似文献 [8] 中含粗大 NbC(N) 粒子的 IF 钢嵌镶内应变位错引起的 SKK 峰; 而在 100 °C 附近的阻尼行为, 可视为是一种“B”阻尼峰<sup>[9]</sup>。对于 Fe<sub>3</sub>C

与 $\alpha$ -Fe共存的重轨钢,图1,4中的SKK峰和B峰,是 $\text{Fe}_3\text{C}$ 在铁素体中的嵌镶应力产生的应变位错引起的。

3.2.2 变形样品的中温阻尼 图2,5中变形样品的200℃附近峰都是SKK峰。鉴于供货样品出现SKK峰,此处重轨的B峰(即图2中的100℃附近内耗上鼓)和图5中的80℃附近峰,应是一种“二次变形”峰;而图2,5的SKK峰分别低于图1,4的SKK峰则进一步表明,引起后两者SKK峰的饱和Cottrell气团已变形稀释为稀气团<sup>[9,10]</sup>。由于这些阻尼是B峰,放置1a和固溶处理的样品中 $\alpha$ -Fe固溶C较高,其B峰明显变小(图2),而固溶C少的BNb钢样品80℃附近峰明显比BNbRE钢的高(图5)。

背景内耗主要是由位错运动引起的<sup>[11]</sup>。BNb钢变形样品背景内耗随温度反常变化,预示在升温测量内耗时,样品内的位错区出现了比原子偏聚(包括较强钉扎的Cottrell气团)更强的钉扎。对于放置了2a的轨腰,有理由认为,在升温测量内耗时出现了一些极细的、对位错有很强作用的Fe-碳化物沉淀粒子,引起BNb钢变形试样背景内耗的反常下降。

### 3.3 高温内耗

图3结果表明,在供货态样品的升温内耗-温度曲线的 $K\hat{e}$ 峰温区和磁-机械阻尼温区,出现测量到约700℃后降温测量内耗可完全消失的阻尼现象。显然,它既不会是晶界阻尼,也不会是磁-机械内耗,因为这两者都不是降温消失、而应是降温升高的<sup>[12,13]</sup>。这种降温测量可以消失的很像辐照、淬火缺陷和应变位错等引起的内耗,是位错“湮灭”的过程阻尼。

### 3.4 稀土对BNb重轨钢的影响

3.4.1 稀土对内耗谱的影响 从以上结果可知,BNbRE样品的Snoek峰高于BNb样品的Snoek峰,表明稀土有增加热轧铁素体固溶C浓度的作用。这与稀土细化重轨钢组织因而降低了珠光体中的相界面能,以及抑制了 $\alpha$ -Fe中固溶的C向位错和Fe-C化合物晶核扩散有关。

供货轨出现SKK峰的归因于 $\text{Fe}_3\text{C}$ 在铁素体中的嵌镶应力、应变,稀土减弱SKK阻尼显然与其减少这种应变有关。这与图3中BNbRE钢试样的位错“湮灭”过程阻尼出现的温区明显高于BNb钢样品是一致的,是稀土细化重轨组织的结果。

3.4.2 内耗及其变化与重轨钢的性能 C是铁素体最强的固溶强化元素,且有很大的活性又与位错有很强的相互作用。BNbRE钢重轨铁素体将比BNb钢铁素体具有高的强度和加工硬化倾向,也使稀土钢耐磨、抗剥落、疲劳寿命长。此外,加稀土有减小SKK阻尼和因而减小内应力的作用,对疲劳损伤,特别是核伤和轨腰损

伤有较好抑制和减消效果。

## 4 结论

(1) 加稀土有增强BNb钢热轧轨Snoek峰、减弱其SKK峰和使其位错湮灭过程阻尼向高温移动、并减弱这种阻尼的作用。

(2) 加稀土增加BNb钢热轧铁素体固溶C含量,减小其产生SKK峰的珠光体内的应变、应力;稀土还有稳定重轨钢珠光体里相界面和减低 $\alpha$ -Fe中C的扩散及其脱溶沉淀的作用。

作者怀着无限敬仰的心情,以此文纪念“冶金内耗”这个学科最热忱、最锐敏和无微不至的支持者,弹性能量耗散(内耗)学科领域的杰出导师和创始人之一、世界著名的凝聚态物理学家——葛庭燧教授诞辰90周年!

### 参考文献

- [1] Baotou Iron and Steel Co., Research Institute of Rail Science, Central Iron and Steel Research Institute, Guangzhou Rail Group Co. *The Collection of the Appraisal Data of the BNbRE Rail Steel*. Baotou: Baotou Iron and Steel Co. Press, 1997: 5  
(包头钢铁公司,铁道部科学研究院,冶金工业部钢铁研究总院,广州铁路(集团)公司. BNbRE钢轨鉴定材料. 包头:包头钢铁公司, 1997: 5)
- [2] Kê T S. *Phys Sin*, 1988; 17(2): 68  
(葛庭燧. 物理, 1988; 17(2): 68)
- [3] Ji J W, Che Y Y, Liu A S, Lu X L, You M. *J Chin Rare Earth Soc*, 1996; 14: 350  
(戴景文,车韵怡,刘爱生,卢先利,由 淼. 中国稀土学报, 1996; 14: 350)
- [4] Ji J W, Liu F D, Wang D J, Che Y Y, Hua Q Z, Liu J M, Huang Z R. *Acta Metall Sin*, 1999; 35: 913  
(戴景文,刘芬娣,王登京,车韵怡,华桥柱,刘建民,黄镇如. 金属学报, 1999; 35: 913)
- [5] Honeycombe R W K. *STEELS, Microstructure and Properties*. Edward Arnold, 1981: 5
- [6] Ji J W, Zhao Z Q, He L D, Geng D Q. *Acta Phys Sin*, 1985; 34: 1620  
(戴景文,赵增祺,贺礼端,耿殿奇. 物理学报, 1985; 34: 1620)
- [7] Ino H, Sugeno T. *Acta Metall*, 1967; 15: 1197
- [8] Zeng G Y, Che Y Y, Jin H Z, Ji J W, Huang Z R, Liu J M, Hua Q Z, Zhou X. *Acta Metall Sin*, 1997; 33: 912  
(曾桂仪,车韵怡,金洪中,戴景文,黄镇如,刘建民,华桥柱,周星. 金属学报, 1997; 33: 912)
- [9] Yu N, Ji J W. *Acta Metall Sin*, 2002; 38: 230  
(于 宁,戴景文. 金属学报, 2002; 38: 230)
- [10] Pettarra D P, Bechers D N. *Acta Metall*, 1967; 15: 791
- [11] Nowick A S, Berry B S. *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*. New York: Academic Press, 1972: 454
- [12] Kê T S. *J Appl Phys*, 1950; 21: 414
- [13] Yu N, Wang D J, Ji J W. *Acta Metall Sin (Engl Lett)*, 1999; 12: 694