

## 超纯铁素体不锈钢热疲劳性能的研究

谷宇<sup>1</sup> 张晶晶<sup>2</sup> 张保亮<sup>2</sup>

(山西太钢不锈钢股份有限公司 1 炼钢二厂; 2 技术中心, 太原 030003)

**摘要** 研究了预处理铁水-90 t K OBM S-VOD-LF-板坯 CC 流程生产的 1.5 mm 冷轧超纯铁素体不锈钢 409、429 和 441 板材室温-1 000 ℃ 800 次循环的热疲劳性能。结果表明, 429 钢( /% : 0.009C, 0.86Si, 15.3Cr, 0.47Nb) 和 441 钢( /% : 0.008C, 0.45Si, 17.9Cr, 0.39Nb, 0.18Ti) 的热疲劳(800 次循环的裂纹长度 1.2 mm) 明显优于 409 钢( /% : 0.007C, 0.40Si, 11.2Cr, 0.14Nb, 0.10Ti) 的热疲劳(800 次循环的裂纹长度 2.0 mm); 在室温-1 000 ℃ 的冷热交替过程中钢的薄弱部位 Fe 元素会首先形成氧化物并剥落, 从而产生裂纹。裂纹附近表面形成 Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合氧化膜, 阻碍裂纹进一步扩展。

**关键词** 汽车排气管 409、429 和 441 超纯铁素体不锈钢 室温-1 000 ℃ 热疲劳

## A Study on Thermal-Fatigue Behavior of Super Ferrite Stainless Steels

Gu Yu<sup>1</sup>, Zhang Jingjing<sup>2</sup> and Zhang Baoliang<sup>2</sup>

(1 No2 Steelmaking Plant, 2 Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** The thermal-fatigue behavior with 800 cycles of ambient-1 000 ℃ for 1.5 mm cold-rolled sheet of 409, 429 and 441 super ferrite stainless steels produced by pre-treated metal-90 t K OBM S-VOD-LF-slab CC flow sheet for auto exhaust pipeline has been studied. Results show that the thermal-fatigue (crack length with 800 cycles- 1.2mm) of steel 429 ( /% : 0.009C, 0.86Si, 15.3Cr, 0.47Nb) and steel 441 ( /% : 0.008C, 0.45Si, 17.9Cr, 0.39Nb, 0.18Ti) is better than the thermal-fatigue (crack length with 800 cycles- 2.0 mm) of steel 409 ( /% : 0.007C, 0.40Si, 11.2Cr, 0.14Nb, 0.10Ti); during reversing ambient-1 000 ℃ heating-cooling process, the Fe atoms in weak region of steel are first oxidized to form oxides and peel off from base metal, led to form crack, and the formed Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxide films near crack prevent crack further developing.

**Material Index** Auto Exhaust Pipeline, 409, 429 and 441 Super Ferrite Stainless Steels, Ambient-1 000 ℃ Thermal-Fatigue

排气管在交变温度的作用下容易产生热疲劳裂纹, 以致零件破坏<sup>[1-3]</sup>。新日铁等公司针对要求越来越高的排气管热端用材料进行了系统研究, 通过添加 Nb、V、Ti 等元素提高铁素体不锈钢的高温性能, 取得了一定的效果<sup>[4-6]</sup>。本试验通过模拟发动机工况, 研究室温到 1 000 ℃ 条件下多种铁素体不锈钢的热疲劳性能。

### 1 试验方法

试验选取了太钢不锈钢股份有限公司生产的 1.5 mm 厚 409、429、441 不锈钢冷轧板材(表 1)。

3 种牌号的不锈钢均采用如下工艺生产: 铁水三脱预处理→90 t K-OBM-S→80 t VOD→80 t LF→板坯连铸。

表 1 试验用超纯铁素体不锈钢的化学成分 / %

Table 1 Analysis of test super ferrite stainless steels / %

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Ti
409	0.007	0.40	0.23	0.017	0.001	11.2	0.14	0.10
429	0.009	0.86	0.30	0.015	0.001	15.3	0.47	-
441	0.008	0.45	0.07	0.015	0.002	17.9	0.39	0.18

试验按照 HB 6660-92 进行。试样尺寸(mm)为 1.5 × 20 × 50。

试验使用的热疲劳试验机由支架、控制系统、电机、电阻炉和水浴组成。

试验机采用管式加热炉进行加热, 电炉温度控制器型号为 KSY6D-16, 炉内温度波动 ± 2°, 炉内均温带 50 mm。冷热疲劳实验过程为试样在加热段(1 000 ℃)保温 3 min, 然后进入水浴箱(室温)并保持 0.5 min, 使试样充分冷却, 再次将试样提升至电阻炉中加热和保温, 如此循环。保温过程由 JSS48A 型继电器自动控制, 并采用 DH48J 型计数器记录循环次数。当循环到一定次数后取出试样, 在显微镜测量试样表面裂纹长度。试验结果为几个最长裂纹的平均值。令裂纹长度为 200 μm 的循环次数为合金热疲劳裂纹的萌生次数。

### 2 试验结果

试样在循环 300 次后, 3 个试样上均萌生了裂纹 [图 1(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>)]。并且 409 钢试样表面明显氧

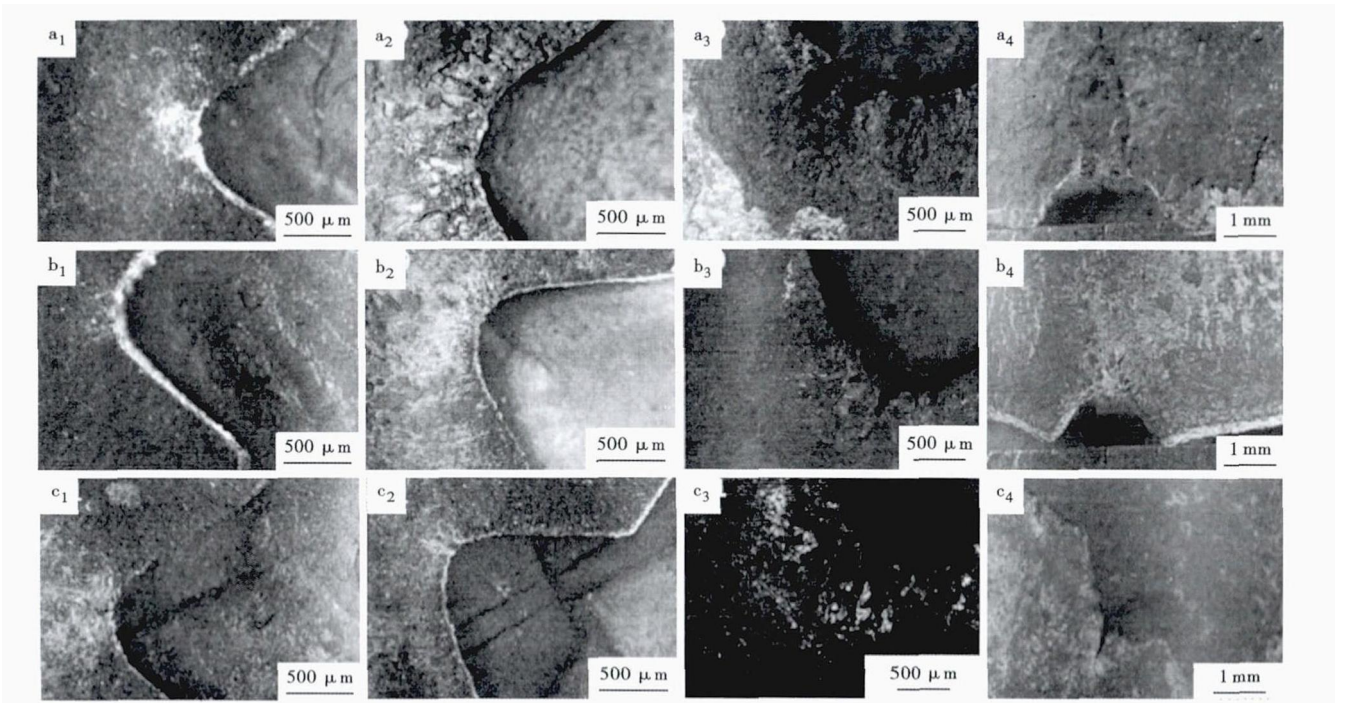


图 1 超纯铁素体不锈钢 409 (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>4</sub>), 429 (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, b<sub>4</sub>) 和 441 (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, c<sub>3</sub>, c<sub>4</sub>) 经室温-1 000 °C 300 次 (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>), 400 次 (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>), 600 次 (a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>, c<sub>3</sub>) 和 800 次 (a<sub>4</sub>, b<sub>4</sub>, c<sub>4</sub>) 热循环的表面形貌

Fig. 1 Morphology of surface of super ferrite stainless steel 409 (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>4</sub>), 429 (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, b<sub>4</sub>) and 441 (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, c<sub>3</sub>, c<sub>4</sub>) ambient-1 000 °C 300 times (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>), 400 times (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>), 600 times (a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>, c<sub>3</sub>) and 800 times (a<sub>4</sub>, b<sub>4</sub>, c<sub>4</sub>) thermal cycles

化,裂纹附近表面呈暗红色。热循环 300 次后才萌生裂纹,说明 3 种试验材料的塑性良好,可以通过变形释放应力。

图 1(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>) 为循环 400 次后的试样形貌, 409 钢试样表面有起皮现象,说明该钢的抗氧化性能较差。而 429, 441 钢试样表面比较平整,表明其氧化层与基体结合力较大。

图 1(a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>, c<sub>3</sub>) 为试样循环 600 次后的表面形貌。从形貌中可以观察到,各试样的裂纹延长,并且裂纹的末端十分明显,呈 V 字形。表明试样在一定程度上仍通过塑性变形方式缓解了局部的应力集中,试样表面都变得凸凹不平。

图 1(a<sub>4</sub>, b<sub>4</sub>, c<sub>4</sub>) 为试样循环 800 次后的形貌。试样的表面形貌与循环 600 次相似,均产生了严重的氧化,且在试样多处产生裂纹。结合图 1(a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>, c<sub>3</sub>) 中试样形貌,可以确定试样循环 600~800 次过程中,在试样变形处产生裂纹。这些裂纹的产生使试样的热疲劳抗力进一步下降。

如图 2 所示,试样热疲劳裂纹长度随着循环周次的增加逐渐增大,且 409 钢试样裂纹扩展速度明显高于 429 和 441 钢试样。

### 3 分析与讨论

图 3 为 429 钢试样裂纹端部细节的 EDS 分析,

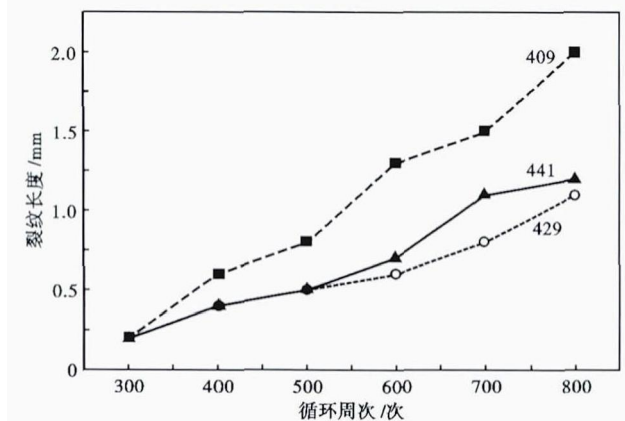


图 2 循环周期对超纯铁素体不锈钢 409、429 和 441 热疲劳裂纹长度的影响

Fig. 2 Effect of thermal cycles on length of thermal fatigue crack of super ferrite stainless steel 409, 429 and 441

从分析结果可以看到,紧挨裂纹的 b 位置出现了 Cr 偏析,由初始基体的 Cr 含量 15.3% 下降到了 12.02%,没有检测到其他元素如 Si、Nb 等;而在裂纹处 c 位置 Cr、Si、Nb 等元素均出现了较大的偏析,其中 Cr 含量由基体的 15.3% 提高到 47.43%,Si 含量由 0.86% 提高到 7.03%,Nb 由 0.47% 提高到 2.77%;c 位置与 b 位置的成分偏析是吻合的。

由图 3(c)EDS 结果推测得到如表 2 氧化膜成分。可推断在高低温反复作用下,试样表面因温度

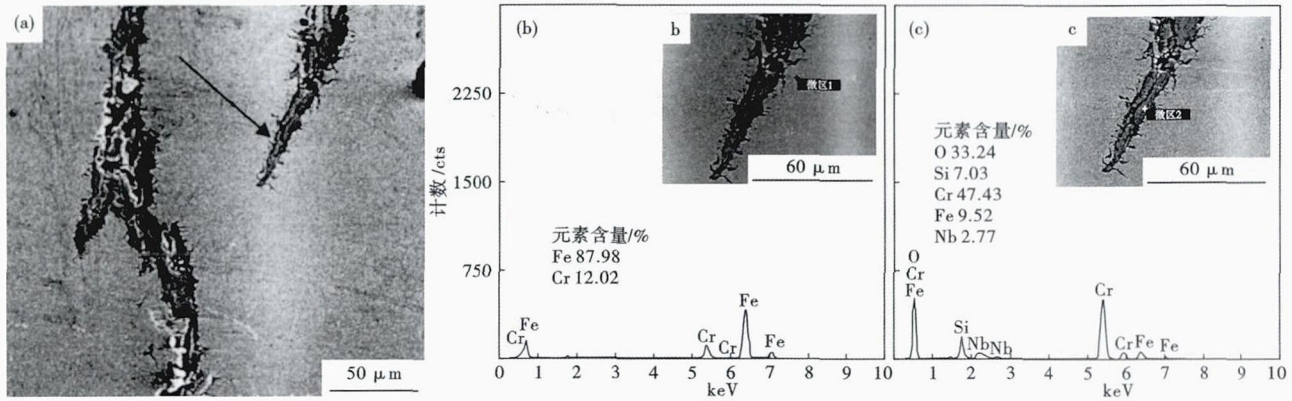


图 3 超纯铁素体不锈钢 429 热疲劳裂纹形貌(a),微区 1(b)和微区 2(c)的能谱(Energy Dispersive Spectrum)分析  
Fig.3 Morphology of thermal fatigue crack (a), EDS (energy dispersive spectrum) analysis of micro-region 1 (b) and 2 (c), super ferrite stainless steel 429

表 2 超纯铁素体不锈钢 429 热疲劳裂纹处氧化膜成分/%  
Table 2 Ingredient of oxide films at thermal fatigue crack of super ferrite stainless steel 429 / %

Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> Nb(Fe <sub>3</sub> Nb <sub>3</sub> C)
69.3	15.1	8.0	6.1

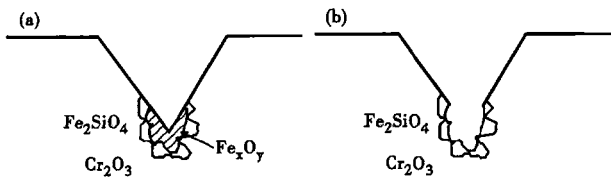


图 4 热疲劳过程中裂纹萌生理理  
Fig.4 Mechanism of crack emergence induced by thermal fatigue

高且与空气接触,出现局部氧化并形成氧化层,如图 4(a)所示。由于铁的氧化物致密性差,在温度交替的过程中逐渐剥落,形成裂纹,如图 4(b)。在裂纹产生的位置,由于铁的氧化物大量剥落,导致 Cr、Si、Nb 等元素的富集,形成 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 等致密氧化膜,阻止了裂纹的进一步扩展,此外,高温下 Nb 与 Fe 形成的 Fe<sub>2</sub>Nb 及 Fe<sub>3</sub>Nb<sub>3</sub>C 等析出物钉扎在裂纹附近,也阻碍了裂纹的扩展<sup>[7-8]</sup>。

429 钢通过高温下形成的 Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合氧化膜,实现了与 441 不锈钢相当的抗热疲劳裂纹扩展的性能,表明 Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 对裂纹扩展的抑制作用要强于 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

#### 4 结论

(1)429、441 不锈钢有较好的室温-1 000 °C 抗热疲劳性能,409 不锈钢抗热疲劳性能差。

(2)在冷热交替过程中,薄弱部位 Fe 元素会首先形成氧化物并剥落,从而产生裂纹。随着 Fe 的氧化物的不断剥落,裂纹开始扩展。裂纹扩展后表面

形成的氧化物膜为 Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合氧化膜,且 Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 对裂纹扩展的抑制作用要强于 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。此外,Fe<sub>2</sub>Nb 及 Fe<sub>3</sub>Nb<sub>3</sub>C 析出物钉扎在裂纹附近,对裂纹扩展起到了一定的阻碍作用。

(3)429 不锈钢的合金成本低于 441 不锈钢,其抗热疲劳性能略高于 441 不锈钢,是一种低成本高抗热疲劳性能的不锈钢。

山西省自然科学基金资助项目(2011011025-4),同时感谢沈阳金属所提供的试验支持。

#### 参考文献

- [1] Chassagne F, Mithieux J D, Schmitt J H. Stainless Steels for Exhaust Lines[J]. Steel Research International, 2006, 77: 608-685.
- [2] Kajimura H. Application of Heat Resistant Stainless Steels to Exhaust Components of Automobile[J]. Bulletin of ISIJ, 2006, 11: 67-73.
- [3] Manabu Oku. 日新制钢汽车排气系统用耐热铁素体不锈钢的开发[J]. 世界钢铁, 2011(5): 10-16.
- [4] Miyazaki A, Takao K, Furukimi O. Effect of Nb on the Proof Strength of Ferritic Stainless Steels at Elevated Temperatures[J]. ISIJ International, 2002, 42: 916-920.
- [5] Fujita N, Fukumura K, Yamamoto A. Change of Microstructures and High Temperature Properties during High Temperature Service of Niobium Added Ferritic Stainless Steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 351: 272-281.
- [6] Sim G M, Ahn J C, Hong S C, et al. Effect of Nb Precipitate Coarsening on the High Temperature Strength in Nb Containing Ferritic Stainless Steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 396: 159-165.
- [7] Fujita N, Kikuchi M, Ohmura K. Expressions for Solubility Products of Fe<sub>2</sub>Nb<sub>3</sub>C Carbide and Fe<sub>2</sub>Nb Laves Phase in Niobium Alloyed Ferritic Stainless Steels [J]. ISIJ International, 2003, 43: 1999-2006.
- [8] 谷 宇, 孙铭山, 范光伟. 铌含量对 17% Cr 超纯铁素体不锈钢组织与高温强度的影响[J]. 钢铁, 2011, 46(1): 70-74.

谷 宇(1979-),男,博士(清华大学),高级工程师,2002 年清华大学(本科)毕业,钢铁材料研究。

E-mail: guyu01@tisco.com.cn

收稿日期: 2013-08-26