

铸轧辊表面裂纹的萌生及扩展机理

许志强, 张 沛, 杜凤山

(燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘 要: 对某厂生产中实际使用的铝板铸轧辊套进行解剖, 采用金相显微镜、扫描电镜及能谱分析等对表面裂纹和试件断口形貌进行观察。采用 X 射线衍射仪对裂纹中铝的化合物属性进行测量, 分析铝液对铸轧辊套表面裂纹形成及扩展的影响; 采用金相显微镜对辊套表面及内部金属组织进行对比观察, 分析高温及复杂应力作用对铸轧辊套表面金属组织性能的影响。结果表明: 辊套表面裂纹起源于机械加工产生的微缺陷, 铝液对铸轧辊套表面腐蚀作用很小, 但是渗入到裂纹中的铝液凝固氧化后, 相当于在辊套表面金属中嵌入高硬度的杂质, 在轧制过程中复杂应力作用下将加快裂纹的扩展速度; 高温及复杂应力作用对铸轧辊套表面金属组织的影响不大。

关键词: 铸轧辊套; 裂纹; 热疲劳; 腐蚀; 组织变性

中图分类号: TG 333.17

文献标识码: A

Mechanism of crack initiation and propagation on casting roller surface

XU Zhi-qiang, ZHANG Pei, DU Feng-shan

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: An actual shell of the casting roller was dissected for analysis. The cracks and cracked section were examined by metalloscopy and scanning electron microscopy with EDS mapping to investigate the mechanisms of the crack initiation and propagation. The quantify and characteristic of the compounds associated with Fe-Al were identified by X-ray diffractometry. The effect of the molten aluminum on the crack initiation and propagation on the casting roller surface was analyzed. The metal structure characteristics near the roller shell surface were contrasted to that in the shell interior using metalloscope, and the varieties by the action of the complex stresses and high temperature were analyzed. The results indicate that the crack is initiated in the manufactured defects on the roller surface, and the influence of the molten aluminum on corrosion behavior of the surface metal is little, but the molten aluminum may infiltrate into the cracks on the shell surface and becomes solidified and oxidized. The oxide is a kind of harder impurity inserted into the surface metal. The speed of crack propagation is accelerated when the shell surface subjects to the complex stresses in rolling process. The high temperature and the complex stresses have little effect on the microstructure of the roller shell surface.

Key words: casting roller shell; crack; heat fatigue; corrosion; structure characteristics

金属薄带铸轧是集凝固与轧制于一体的近终成型工艺, 是受到冶金、机械、材料制备等领域普遍重视的一项前沿技术^[1-3]。

铸轧过程中, 铸轧辊既与金属熔体接触, 使其快

速凝固, 起“结晶器”作用, 又对已凝固的带坯进行轧制, 起“热轧辊”作用。铸轧辊套承受多种影响因素的共同作用, 包括周期作用的轧制压力、热冲击和热应力、高温铝熔液对辊面的渗透腐蚀和脆化作用

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675187, 50374059); 河北省自然科学基金资助项目(E2004000247); 燕山大学博士基金资助项目(B140)

收稿日期: 2007-05-17; 修订日期: 2007-12-17

通讯作者: 许志强, 教授, 博士; 电话: 0335-8074553; E-mail: xzq@ysu.edu.cn

等等。铸轧辊通常由辊套与辊芯两部分热套装而成^[4]，其性能主要取决于辊套的性能。而生产中铸轧辊辊套的使用寿命主要由辊套表面裂纹萌生及扩展情况决定。

在铸轧辊套热损伤及相关理论与技术研究方面，国内外学者开展了许多研究工作，对辊套温度场、热应力进行了仿真分析^[5-10]或解析计算^[11]，对辊套的热应力进行了估算^[12]，也有学者分别从辊套材质、辊套使用等方面阐述了辊套的热损伤行为^[13-16]。

胡忠举等^[14]研究认为应该考虑介质的腐蚀影响，但没有给出相关研究结果，特别是没有给出高温铝液对铸轧辊表面裂纹产生和扩展影响的研究结果。另外，关于高温及交变应力对铸轧辊辊套表面材料组织性能的影响，材料组织性能是否发生改变及对表面裂纹萌生和扩展有何影响等方面的研究尚不多见。

由于铸轧辊辊套表面裂纹不仅严重影响铝带产品表面质量，而且降低铸轧辊使用寿命，在更换辊套时，还得中断生产，因此，对铸轧辊套表面裂纹萌生及扩展机理问题进行研究，分析辊套裂纹萌生及扩展机理的原因，对提高铝带产品质量好辊套使用寿命，具有重要的技术、经济意义。

为此，本文作者对某厂实际正常使用并产生表面裂纹的铝板铸轧辊辊套进行解剖分析，研究高温铝熔液的侵蚀作用对铸轧辊表面材料的疲劳裂纹形成和扩展的综合影响，以及铸轧辊表面金属在高温、应力作用下组织形态是否变化及其对表面裂纹萌生和扩展的影响。通过解剖实验分析，对铸轧辊辊套表面裂纹萌生及扩展的机理进行研究。

1 实验

实验用铸轧辊辊套是取自于实际生产中正常使用

的水平式双辊铝带铸轧机铸轧辊辊套。铸轧辊辊套使用一段时间(一个使用周期大约 2 个月)后，表面产生较大裂纹，影响铝带产品表面质量，此时的辊套表面裂纹如不处理，其扩展速度加快，将严重影响辊套的使用寿命，所以必须下线重新处理，处理方法为车削加工，表面车削厚度一般为 2.5 mm，然后进行表面裂纹检查，合格后重新进入下一个使用周期。当铸轧辊辊套最后一个服役期结束后，将该铸轧辊辊套进行解剖，从铸轧辊套上取试样进行实验分析，采用的实验分析方法为：金相电镜观察、SEM 及能谱分析和 XRD 分析测量。

铸轧辊辊套材料的成分及物理性能见表 1 和 2。水平式双辊铝带铸轧机的工作条件见表 3。

表 1 铸轧辊材料的组成

Table 1 Material composition of roller sleeve (mass fraction, %)

C	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Fe
0.32	0.050	0.30	3.0	1.0	0.20	Bal.

2 结果及分析

2.1 辊套表面裂纹形态分析

辊套表面不经处理裂纹微小肉眼直接观察不易发现。在辊套表面进行着色法处理(又叫渗透法，生产厂采用该方法检查辊套表面是否存在裂纹)后，可以观察到铸轧辊表面存在大量细小红色线段——裂纹(见图 1)，裂纹方向为铸轧辊周向，与机械加工的切削痕迹方向基本相同。其中有的线段在一端有一个较大的红点——表明该处裂纹较大且较深，说明此处为裂纹源；

表 2 铸轧辊材料的物理性能

Table 2 Physical properties of casting roller material

σ_b /MPa		σ_s /MPa		Heat conductivity/ (W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	Coefficient of linear expansion/°C ⁻¹	Hardness, HB
630 °C	20 °C	630 °C	20 °C			
600	1 350	480	1 125	31.0	12 × 10 ⁻⁶	430

表 3 铸轧机及铸轧辊有关参数

Table 3 Parameters of casting rolling and roller

Temperature of molten aluminum/°C	Temperature of aluminum strip at exit/°C	Thickness of aluminum strip/mm	Diameter of roller/mm	Speed of roll-casting/(m · min ⁻¹)
668	390	6.42	980.0-939.5	0.86

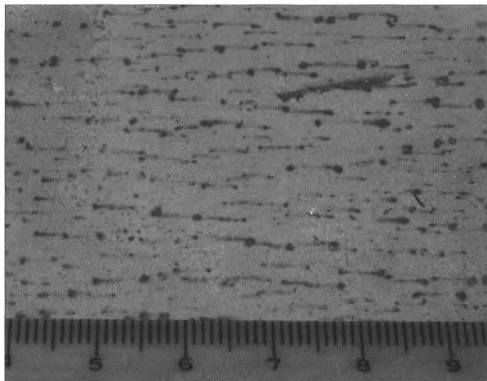


图 1 辊套表面裂纹

Fig.1 Cracks on surface of roller

而有的线段在两端各有一个较大的红点, 表明两个裂纹源产生的裂纹在扩展过程中相遇并重合, 这表明辊套表面裂纹具有较一致的方向性(铸轧辊周向)。这些方向及分布均较有规律性的裂纹遍及整个辊套表面, 不可能是材料中的杂质等随机因素引起的。

上述现象表明辊套表面裂纹起源于机械加工产生的微缺陷, 这些缺陷在高温铝熔液的渗透作用以及周期作用的轧制压力、热冲击和热应力等多种影响因素的共同作用下进一步扩展成裂纹。

2.2 扫描电镜观察裂纹形貌和能谱分析

将辊套用电火花机切割出含裂纹的小试样, 在铸轧辊纵向剖面上(与裂纹垂直方向)对裂纹进行观察分析(图 2)。从图 2 可以看出, 裂纹从铸轧辊表面有缺陷处开始形核并向内扩展, 裂纹深度已达到 1.2 mm, 且裂纹在向内扩展过程中, 裂纹间隙逐渐变小, 成楔形, 该楔形开口在辊套表面, 尖端沿径向伸向辊套内部。

将带有周向裂纹的试样沿裂纹剥开, 用扫描电镜对开裂面进行观察研究, 辊裂纹开裂面形貌见图 3。由图 3(a)上部可见, 裂纹开裂面平整, 呈典型疲劳裂纹形态。由图 3(b)可以看出, 裂纹形核处接近表面部分有白色物质, 且白色物质周围基体较暗。对白色物质尺寸进行测量(图 4(a)), 其平均宽度为 0.4 mm。对这些白色物质进行能谱分析(图 4(b)), 这些白色物质为铝的氧化物。

由图 3 和 4 可以看出, 由机械加工微缺陷产生的裂纹源, 裂纹源处开口较大, 随着铸轧过程的进行, 高温铝液在轧制力的作用下挤入裂缝中, 并发生氧化, 由于铝的氧化物硬度较高, 类似于裂缝中插入一个楔子。

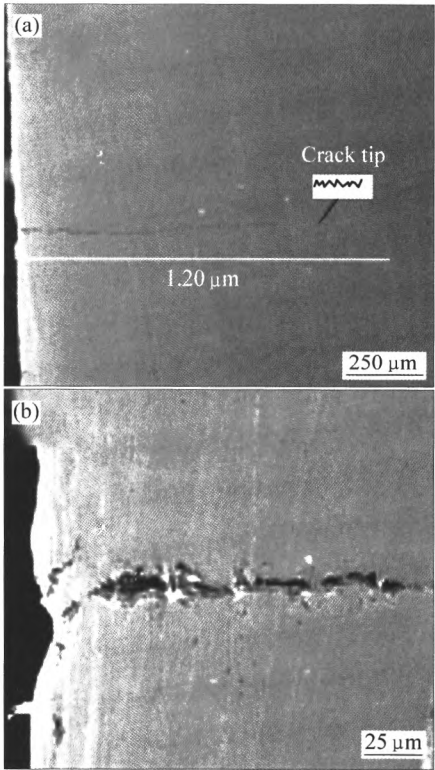


图 2 铸轧辊裂纹形貌及深度

Fig.2 Morphology and depth of crack: (a) General view; (b) Enlarged view near surface

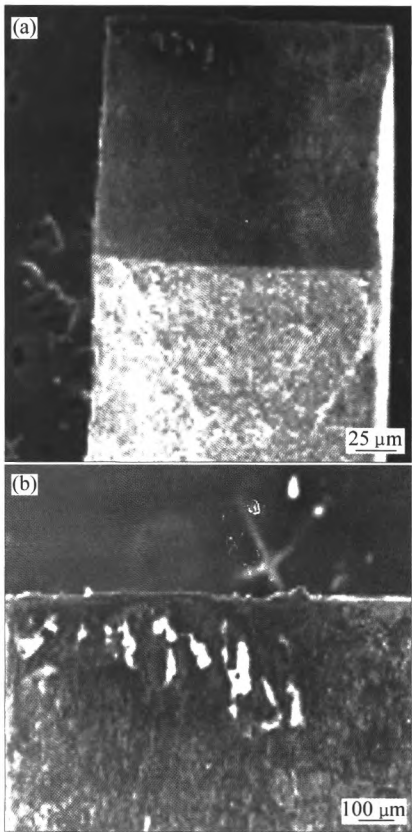


图 3 辊裂纹开裂面形貌

Fig.3 Morphologies of fracture surface of roller: (a) Full view; (b) Enlarged view near surface

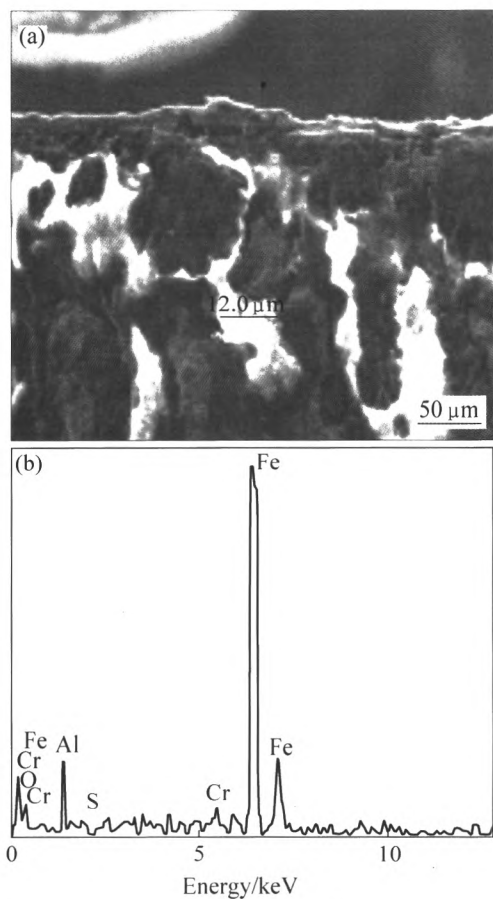


图 4 辊裂纹开裂面形貌及能谱分析图
Fig.4 EDS of fracture surface of roller: (a) Enlarged view; (b) EDS of fracture surface

铸轧过程中，在铸轧辊辊套表面承受复杂循环作用的轧制压力、热冲击和热应力等多种影响因素的共同作用下，整个裂纹将会出现循环开合的趋势，此时由于裂纹中插入一个较硬的“楔子”，促进裂纹的扩展。随着这些复杂循环应力的反复作用，这些较硬的铝氧化物在力的挤压作用下，逐渐嵌入到基体组织中。

2.3 X 射线衍射实验结果及分析

由于高温铝液与铸轧辊表面金属铁相互作用可能形成较脆的铁铝化合物，这对裂纹形成及扩展机理有显著影响。为分析是否形成铁铝化合物，对铸轧辊裂纹表面(图 3)进行 X 射线衍射分析，其结果如图 5 所示。由图可知，XRD 谱中没有发现铁铝化合物存在，证明铝液对铸轧辊表面的侵蚀作用较弱，其侵蚀作用对裂纹萌生和扩展影响不大。

2.4 金相组织实验结果及分析

为分析高温及交变应力对铸轧辊表面附近材料组

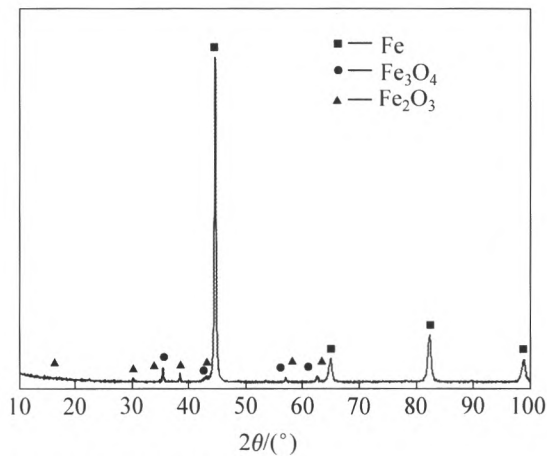


图 5 辊裂纹面的 XRD 谱
Fig.5 XRD pattern of fracture surface of roller

织性能的影响，在铸轧辊辊套接近辊面位置和接近辊套内表面位置取两个试样，对这两个试样进行金相组织对比分析。

观测面采用 4%硝酸酒精进行处理；采用光学显微镜进行形貌观察。

辊套表面与内部材料的金相组织如图 6 所示。由图 6 可知，沿辊套径向方向，组织基本相同没有产生明显差异，均为马氏体组织，组织细小且均匀。

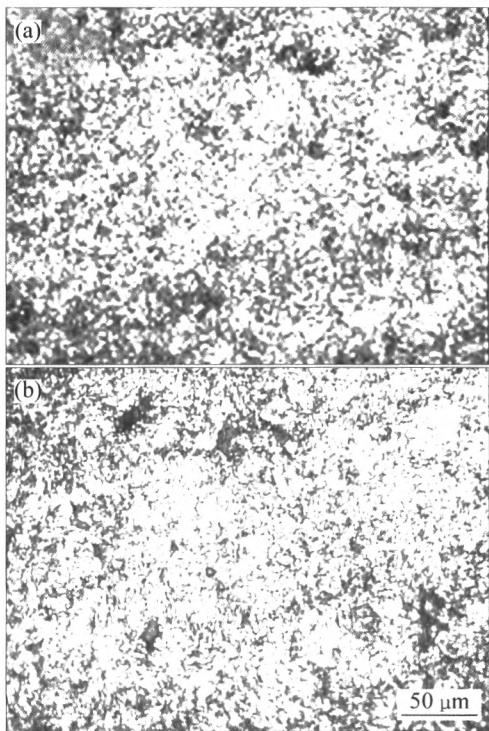


图 6 辊套表面与内部材料的金相组织
Fig.6 Metallurgical structures near roller shell surface and in shell interior: (a) Near shell surface; (b) In shell interior

对比辊套表面与内部材料的组织可知,由于铸轧辊工作温度较低没有超过奥氏体相变点,所以组织上没有明显变化。

3 结论

1) 铸轧辊辊套表面裂纹起源于机械加工产生的微缺陷,表面裂纹方向与切削痕迹方向相同;裂纹的扩展是由于复杂循环交变应力的疲劳作用。

2) 铝液对铸轧辊表面腐蚀作用很小,但是渗入到裂纹中的铝液凝固氧化后,相当于在辊套表面金属中嵌入高硬度的杂质,在轧制过程中加快裂纹的扩展速度;高温及复杂应力作用对铸轧辊辊套表面金属组织的影响不大。

REFERENCES

- [1] AMIT S, YOGESHWAS. Modeling of thermo-mechanical stresses in twin-roll casting of aluminum alloys[J]. *Materials Transactions*, 2002, 43(2): 214-221.
- [2] HAGA T, SUZUKI S. A high speed twin roll caster for aluminum alloy strip[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001(1/3): 291-295.
- [3] 干勇,仇圣桃. 先进钢铁生产流程进展及先进钢铁材料生产制造技术[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(S1): 25-29.
GAN Yong, QIU Sheng-tao. Development of advanced steel production process and steel products manufacturing technology[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(S1): 25-29.
- [4] 马锡良. 铝带坯连续铸轧生产[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1992.
MA Xi-liang. Production of aluminum ribbon by continuous roll-casting[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1992.
- [5] 许志强,杜凤山,方园. 铸轧辊热辊型的研究[J]. *钢铁研究学报*, 2006, 18(6): 26-29.
XU Zhi-qiang, DU Feng-shan, FANG Yuan. 3-D FEM simulation of hot roll shape during twin-roll strip casting process[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, 18(6): 26-29.
- [6] ERTAN S, DUNDAR M, BIROL Y. The effect of casting parameters on twin roll casting strip[J]. *Light Metals*, 2000: 667-672.
- [7] KANG C G, KIM Y D. Thermal elastic-plastic finite-element analysis to roll-life prediction on the twin roll strip continuous casting process[J]. *Metall Mater Trans B*, 1997, 28(6): 1213-1225.
- [8] 金珠梅,赫冀成,徐广军. 双辊连续铸轧工艺中流场、温度场和热应力场的数值计算[J]. *金属学报*, 2000, 36(4): 391-394.
JIN Zhu-mei, HE Ji-cheng, XU Guang-jun. Numerical simulation of flow, temperature and thermal stress fields during twin-roll casting process[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2000, 36(4): 391-394.
- [9] 李晓谦,李毅波. 基于MARC平台的连续铸轧热力耦合分析[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(9): 915-918.
LI Xiao-qian, LI Yi-bo. Thermo-mechanical coupling analysis of continuous cast rolling process using MARC software[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(9): 915-918.
- [10] 熊勇刚,毛明智,臧铁刚,谭建平. 超薄快速铸轧机铸轧辊温度场和热凸度仿真及实验[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(3): 485-488.
XIONG Yong-gang, MAO Ming-zhi, ZANG Tie-gang, TAN Jian-ping. Emulation and test research of temperature field and thermal crown for super-thin high-speed mills roll[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001.11(3): 485-488.
- [11] YIANNPOULOS A C, ANIFANTIS N K, DIMAROGONAS A D. Thermal stress optimization in metal rolling[J]. *Journal of Thermal Stresses*, 1997, 20(6): 569-590.
- [12] 张立华,黄明辉,肖文锋. 提高铸轧辊使用寿命的研究[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(7): 614-616.
ZHANG Li-hua, HUANG Ming-hui, XIAO Wen-feng. Study on improving life of casting roller[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(7): 614-616.
- [13] 程利. 铸轧辊套失效机理的理论研究[J]. *太原重型机械学院学报*, 1998, 19(2): 157-161.
CHENG Li. Research on the failure mechanism of cast-rolling roller[J]. *Journal of Taiyuan Heavy Machinery Institute*, 1998, 19(2): 157-161.
- [14] 胡忠举,梁洁萍,陈宏斌. 金属薄带铸轧辊套抗热损伤行为分析[J]. *湘潭师范学院学报(自然科学版)*, 2004, 26(2): 1-4.
HU Zhong-ju, LIANG Jie-ping, CHEN Hong-bin. The investigations on withstanding thermal damages for roll shell in the metal thin strips produced with continuous roll casting[J]. *Journal of Xiangtan Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, 26(2): 1-4.
- [15] 马连清. 铸轧辊套表面龟裂问题初探[J]. *轻合金加工技术*, 1991, 19(3): 13-19.
MA Lian-qing. Preliminary study on the map-cracking on the surface of the cast roller[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 1991, 19(3): 13-19.
- [16] 赵保全,肖鸿伟. 铸轧机轧辊使用寿命的探讨[J]. *重型机械*, 2001(1): 46-48.
ZHAO Bao-quan, XIAO Hong-wei. An approach to the service life of casting roller in casting-rolling mill[J]. *Heavy Machinery*, 2001(1): 46-48.

(编辑 龙怀中)