

Survey on Generation Mechanism and Healing Behavior of Internal Crack for Continuous Casting Slab

Mingyang Feng^{1,2}, Bo Wang^{1,2*}, Ligen Sun^{1,2}, Ming Lei^{1,2}, Guojie Huo^{1,2}

¹College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

²Hebei Province High Quality Steel Continuous Casting Engineering Technology Research Center, Tangshan Hebei

Email: *adherent@163.com

Received: Dec. 29th, 2018; accepted: Jan. 14th, 2019; published: Jan. 21st, 2019

Abstract

It is necessary to finish the billet if the cracks are light. If the cracks are serious, there will be steel leakage accidents or waste products. Therefore, the generation of cracks not only affects the production efficiency of continuous casting machine, but also affects the quality of products and increases the cost. However, if the internal cracks in the billet are not eliminated or alleviated in the subsequent rolling process, the quality and service life of the product will be greatly affected. In this paper, the characteristics and mechanism of typical internal cracks (intermediate cracks, triangular cracks and central cracks) in continuous casting slab are systematically discussed, and the healing behavior of internal cracks in rolling process is analyzed.

Keywords

Continuous Casting Slab, Internal Crack, Generation Mechanism, Healing Behavior

连铸板坯内部裂纹产生机理及愈合行为研究综述

封明阳^{1,2}, 王博^{1,2*}, 孙立根^{1,2}, 雷鸣^{1,2}, 霍国杰^{1,2}

¹华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山

²河北省高品质钢工程技术研究中心, 河北 唐山

Email: *adherent@163.com

*通讯作者。

收稿日期：2018年12月29日；录用日期：2019年1月14日；发布日期：2019年1月21日

摘要

铸坯出现裂纹轻者需要对铸坯进行精整，严重的会出现漏钢事故或产生废品。因此，裂纹的产生既影响到了连铸机的生产效率，又影响到了产品的质量，增加了成本。而铸坯中的内部裂纹若在后续的轧制过程中没有消除或减轻，将会对产品的质量和使用寿命产生很大的影响。本文针对连铸板坯典型内部裂纹(中间裂纹、三角区裂纹、中心裂纹)的特征及产生机理进行了系统探讨，同时对轧制过程内部裂纹的愈合行为进行了分析。

关键词

连铸板坯，内部裂纹，产生机理，愈合行为

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自钢铁行业使用连铸技术以来，影响连铸坯质量的各种缺陷便应运而生。在连铸坯的各类缺陷中，裂纹是重要的缺陷之一。据统计，铸坯中各种缺陷约50%来自铸坯裂纹[1]。铸坯中微小的内部裂纹在后续的轧制过程中有可能被焊合，但由于铸坯质量和压缩比限制等因素有些内部裂纹会遗留在后续的产品中，进而影响产品质量，造成安全隐患。本文针对连铸板坯常见的几种内部裂纹(中间裂纹、三角区裂纹、中心裂纹)的特征、产生机理及后续轧制过程的愈合行为进行了系统的探讨，对于实际生产具有深刻的指导意义。

2. 内部裂纹产生机理

连铸坯裂纹的形成是一个非常复杂的过程，是传热，传质及应力相互作用的结果[2]。内部裂纹是连铸坯主要的内部缺陷之一，由于生产节奏的加快，如拉速的不断提高、为适应热装而生产高温铸坯等因素，铸坯内部裂纹的发生率呈现提高的趋势。图1为影响裂纹产生的主要因素。Sorimachi等人[3]对连铸过程中应力分布进行了数值模拟，分析了热应力对裂纹产生的影响。陈淑英等人[4]探讨了“鼓肚”量对枝晶间距的影响，而枝晶的形态和大小对铸坯内部裂纹的产生有着密切的关系。Yamanaka等人[5]对矫直过程对内部裂纹产生的影响作出了相关的研究，认为内裂纹通常在黏滞性温度(LIT)和零塑性温度(ZDT)之间形成。Lankford等人[6]对结晶器与坯壳之间的摩擦引起内裂纹的原因进行了分析，由于摩擦力是表面力，会产生弯矩，进而在坯壳中产生弯曲应力，这个弯曲应力与轴向拉伸应力的合力为拉应力，当它足够大时，将引起内裂纹甚至使坯壳破裂。另外，拉速与水量[7]、结晶器锥度[8]和凝固组织[9]等因素都会引起裂纹的产生。可见，连铸过程中裂纹产生的原因是多种多样的。

内部裂纹的成因通常认为是凝固前沿受到拉应力已发的应变超过了其抵抗裂纹产生的最大变形，凝固前沿就会沿枝晶界面开裂，形成内部裂纹。内部裂纹形成大致要经历三个阶段，即凝固界面受到拉应力作用；柱状晶间开裂；偏析元素富集的钢液充填到开裂的空隙中[10]。另外，根据前人的研究结果，内

裂纹通常在黏滞性温度(LIT)和零塑性温度(ZDT)之间形成[11]。而 LIT 和 ZDT 对应的固相率分别为 0.9 和 1.0 [12]。图 2 为连铸坯凝固过程溶质元素分布情况,在该温度区间,溶质元素的浓度会很高,尤其对于易偏析的 P、S 等元素,浓度会更高,这些富集的溶质元素一般以夹杂物的形式存在于晶界处,大大降低了枝晶晶界的高温强度和高温塑形[13],从而降低了钢的抗拉强度,进而引起晶间断裂,同时还会降低树枝晶间液膜的凝固点,使 LIT 和 ZDT 之间的温差增大,致使裂纹发生的几率增加[14]。内部裂纹产生的机理可以认为,在连铸坯二次冷却过程中凝固前沿受到的拉应力超过其在凝固温度附近的强度,凝固前沿形成开裂扩展。从凝固角度来看,凝固前沿枝晶间的微观偏析是裂纹形成的内因。铸坯凝固过程中,凝固前沿的柱状晶在微观偏析的作用下很容易形成低熔点的液相薄膜,减弱了凝固前沿的抗变形能力,当凝固前沿受到拉伸作用时极易沿柱状晶开裂从而形成内裂纹。公式(1)为钢临界应力与碳含量关系[15]。

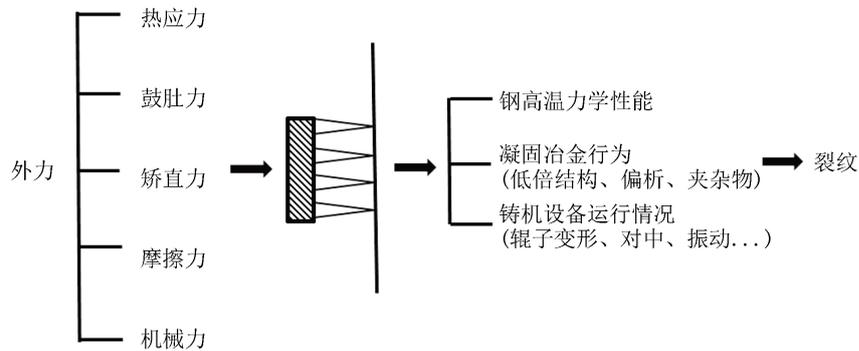


Figure 1. Main factors of crack formation
图 1. 裂纹产生的主要因素

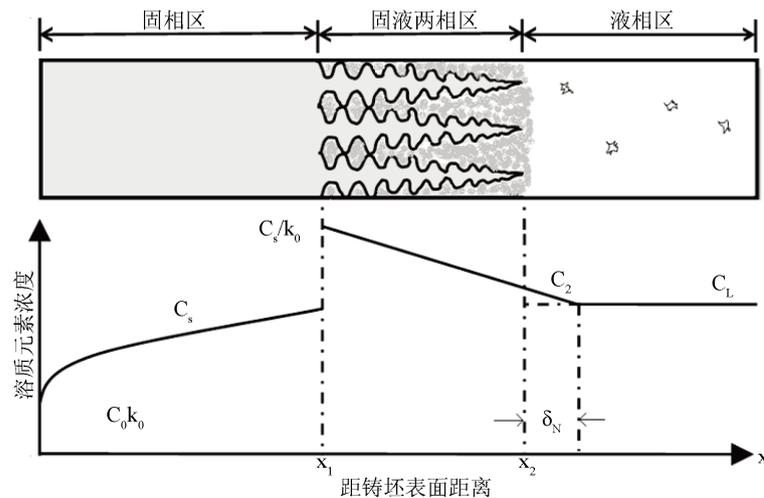
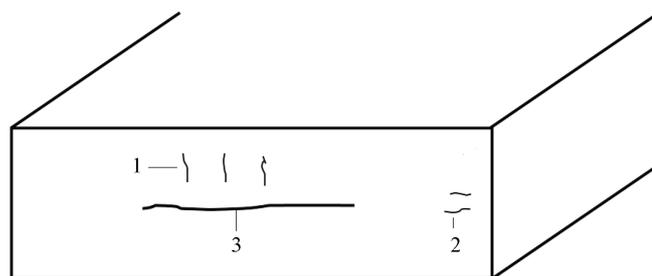


Figure 2. Diagram of element distribution in solidification process of continuous casting billet
图 2. 连铸坯凝固过程溶质元素分布示意图

3. 板坯内部裂纹分布特征

内裂纹按其其在板坯中出现的部位的不同主要可以分为中心裂纹、中间裂纹和三角区裂纹[16]。图 3 为板坯中常见内裂纹示意图。绝大多数内裂纹是在凝固过程中形成的,所以有时内裂纹也称为“凝固裂纹” [17]。从概念上讲,从铸坯皮下一直到中心部位所产生的裂纹均可以称为内部裂纹。因此,内部裂纹

不仅包括凝固过程产生的裂纹，也包括那些在凝固温度以下析出的质点引起晶界脆化并在外力作用下引起的裂纹。



1——中间裂纹；2——三角区裂纹；3——中心裂纹。

Figure 3. Schematics of common internal cracks

图 3. 铸坯中常见内部裂纹示意图

3.1. 中间裂纹

中间裂纹是指铸坯横截面上位于宽面与板厚中心线之间的宽面柱状枝晶的晶间裂纹[18]。中间裂纹主要发生在合金钢，中碳钢铸坯的内弧侧，外弧侧有时发生。图 4 为中间裂纹形貌，发生的位置主要在铸坯表面至铸坯中心二分之一厚度上，沿铸坯宽度和浇铸方向延伸，位于凝固的柱状晶区，长度在 5~25 mm 之间。

当轧制方法和压缩比不当时，连铸坯的中间裂纹可能无法焊合而保留到轧制成品当中。从而对轧制成的中厚板机械性能造成一定的影响，使产品的抗拉强度、屈服强度、延伸率降低、厚板探伤不合格率增加。另外，连铸板坯中的中间裂纹还是引起切割过程中出现剪切裂纹的原因。

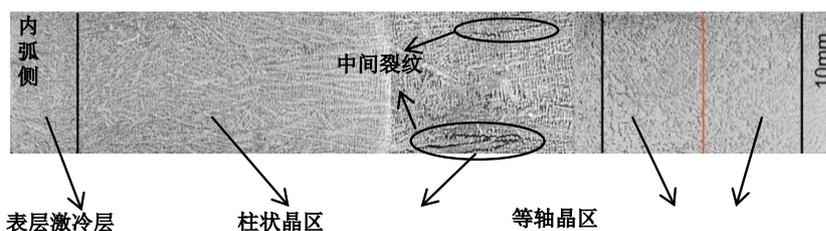


Figure 4. Morphology of intermediate crack

图 4. 中间裂纹形貌

3.2. 三角区裂纹

三角区裂纹是指铸坯横截面上位于板宽两端的，由宽面和窄面柱状晶前端相遇形成的三角区内的窄面柱状晶的晶间裂纹。铸坯出结晶器不久，窄面三角区受到窄面和宽面冷却所产生的热应力，及窄面足辊位置不当和宽面支撑不良等原因产生的机械应力的双重作用，并且凝固前沿的固-液交界面及附近区域富集的溶质元素引起的该部位钢的强度和塑性下降。当综合应力超过该钢种的临界强度时，便产生了开裂。

引起三角区裂纹的主要原因是二次冷却不良，铸坯侧面受到强冷，而弧面冷却不够，当铸坯回温的温度过高时就会三角区裂纹。其次，辊列异常也是影响三角区裂纹产生的重要因素之一。铸机弧度差过大，开口度不当，夹辊太弯曲，都将导致三角区裂纹的产生。最后，控制钢中的有害元素，提高钢的高温强度也是减少三角区裂纹发生的办法[19]。图 5 为三角区裂纹形貌。

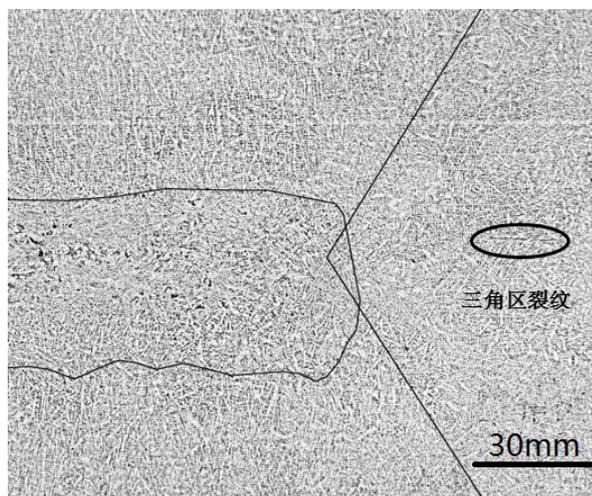


Figure 5. Morphology of triangular crack
图 5. 三角区裂纹形貌

3.3. 中心裂纹

中心裂纹是指铸坯横截面上位于板厚度中心线上两个三角区内顶点之间的等轴晶的晶间裂纹。中心裂纹是由于在凝固最后阶段铸坯芯部少量的未凝固的钢水被已经凝固的部分包围，凝固收缩得不到及时的补充所致[20]。中心裂纹的产生通常伴随着严重的中心偏析，其中 P、S 等元素的含量较高，且有夹杂物富集。实际上中心裂纹的形成是连铸过程中力学因素和冶金性能综合作用的结果。图 6 为板坯中心裂纹形貌。

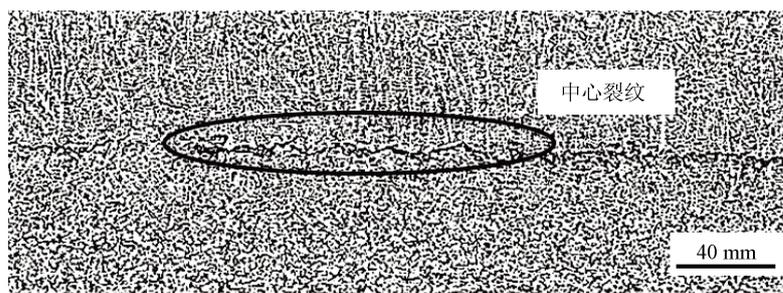


Figure 6. Morphology of central crack
图 6. 中心裂纹形貌

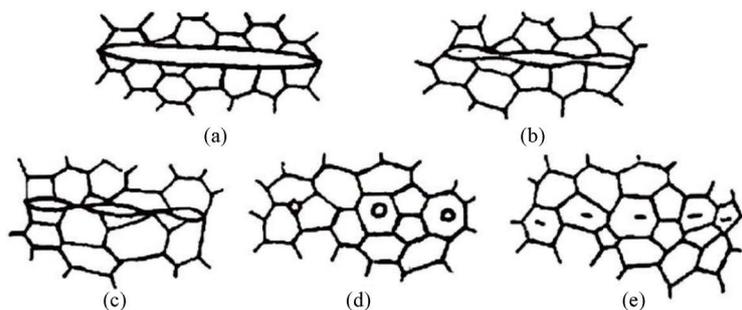
4. 内部裂纹愈合行为的研究

钢材产品在成型前要经历加热、轧制、锻造等工序，若连铸坯内部裂纹较细小，通过加热的方式就可以使内部裂纹愈合。若裂纹太大，只能通过热变形的的方式使内部裂纹焊合。

4.1. 加热过程对内部裂纹的影响

Griffith [21]认为断裂是一个不可逆的过程，但如果裂纹很小，对材料进行高温热处理，通过热激活使裂纹的两个裂纹面上的原子处于相互作用的区域内，就可能实现裂纹的愈合。肖亚航等人[22]对加热温度及保温时间对钢内部裂纹愈合的影响进行了相关的研究。对含有内部裂纹的试样在不同的加热温度和不同的保温时间的热处理条件下进行了金相显微镜及扫描电镜的观察分析。研究结果显示，随着加热温

度的升高和保温时间的延长, 试样内部裂纹的愈合程度增加; 温度是影响裂纹愈合程度的主要原因, 加热时间影响相对较小。韦东滨[23]等人采用平板撞击的方法在纯铜和 45 号钢试样中制备了真实的内部裂纹。在 900℃ 温度保温一定时间后, 使用扫描电镜和超声波探伤的方法对裂纹进行检测, 结果均发现内部裂纹尺度趋于减小, 尤其是裂纹尖端出现了显著的愈合退缩现象。钟志平[24]对 20MnMo 管板用钢内部裂纹初始厚度、保温时间及加热温度对内部裂纹修复的关系进行了相关研究。结果发现, 延长保温时间有利于裂纹的修复, 在合理的高温修复工艺参数条件下, 当初始裂纹厚度小于 1.3 μm 时, 经保温处理可以将其修复, 而当初始裂纹厚度大于 1.6 μm 时, 经保温处理难以将其修复, 必须经过塑性变形的方法才能使其愈合。高克玮等人[25]对高纯铁单晶主裂纹附近微裂纹的愈合过程进行了研究, 结果表明: 加热温度在 973 K 以上时, 微裂纹开始愈合, 在 1023 K 温度停留 100 s, 微观裂纹可以完全愈合。张永军[26]认为扩散反应是导致内裂纹愈合的机理, 并提出内裂纹愈合过程主要经历局部界面的弓出与接触、界面孔洞的形成及球形化、界面消失和球形孔洞的缩小三个阶段。图 7 为扩散反应导致内部裂纹愈合过程示意图。可以看出, 加热是可以使钢中内部的微小裂纹愈合的, 并且随着加热温度的升高, 裂纹的愈合程度越好。因此, 制定合理的加热制度不但能提高材料的变形能力、改善组织性能, 同时还可以使钢中的微小裂纹得到愈合。



(a) 原始状态; (b) 裂纹界面弓出; (c) 弓出界面的接触及离散化; (d) 界面孔洞的形成及球形化; (e) 界面消失、孔洞的缩小。

Figure 7. Diagram of internal crack healing process induced by diffusion reaction [27]

图 7. 扩散反应导致内部裂纹愈合过程示意图[27]

4.2. 轧制过程内部裂纹的愈合行为

在轧制过程中, 压应力为裂纹的愈合提供了静力学条件, 塑性变形过程中大量原子定向移动, 为裂纹的愈合提供了物质补给, 裂纹两侧的原子更容易找到新的平衡位置, 形成统一的晶格点阵, 从而实现裂纹的愈合。刘相华等人[28]研究了位于轧件中心、厚度方向三分之一处等位置的裂纹在不同压下率下的愈合情况。实验结果表明, 压下率达到 50% 以上、开轧温度在 1100℃ 时, 内部裂纹可以完全愈合; 其中心位置裂纹的愈合情况要好于其他位置, 采用缓慢冷却的方式裂纹愈合程度要优于空冷。Pandey [29]对不同轧制工艺下裂纹的演变行为进行了研究, 研究发现: 轧辊直径、轧件厚度、轧制量等参数对裂纹的演变有很大的影响。Wang 等人[30]采用二维有限元的方法对热轧过程中轧件内部孔洞的闭合过程进行了研究, 并与实验结果进行对比, 两者吻合情况较好。为模拟轧制过程中轧件内部裂纹演变行为提供了模拟方法。韦东滨等人[31]对含有预置裂纹的 20MnMo 钢及 20 号钢试样进行了热塑性变形试验。结果表明, 内部裂纹完全愈合, 愈合区域内的组织为铁素体。与未变形处理只在高温处理的试样相比, 愈合程度得到了大大的提高。刘相华等人[32]对轧件热轧过程中内部裂纹的愈合进行了研究, 研究发现裂纹愈合的过程包括: 表面紧密贴合、间断性局部愈合、愈合区扩展和整体愈合四个阶段。轧制过程中裂纹愈合本质

上是裂纹表面两侧大量的原子通过定向运动穿越裂纹区域表面, 并发生相互作用, 形成统一晶格点阵, 使局部区域裂纹表面消失的结果, 而位错运动能促进此过程。董超芳[33]采用热压愈合的方法对碳钢氢腐蚀裂纹的愈合行为进行了研究。结果表明, 在 1000℃、压下率 40%、15 分钟短时间处理的条件下, 碳钢试样中的氢腐蚀裂纹基本能够消除, 局部未修复裂纹尺寸呈 4 μm~8 μm 的透镜状, 并且与单纯加热 1000℃ 保温 10 小时的试样进行对比发现, 塑性变形可大大缩短裂纹愈合所需要的热处理时间。

综上所述, 在热变形过程中, 内部裂纹的愈合过程主要经过以下几个阶段: 第一阶段, 裂纹表面相互贴近; 第二阶段, 裂纹局部愈合并形成了一些未愈合的微小裂纹区; 第三阶段, 裂纹完全愈合, 那些微小的未愈合的小裂纹区在热应力和原子扩散的作用下, 裂纹表面的大量原子离开原来的平衡位置, 形成新的晶粒, 同时裂纹两个表面紧密贴合并最后全部愈合。

5. 结论

1) 连铸坯内部裂纹产生的机理可以认为, 在二次冷却过程中凝固前沿受到的拉应力超过其在凝固温度附近的强度, 凝固前沿形成开裂扩展。从凝固角度来看, 凝固前沿的柱状晶在微观偏析的作用下很容易形成低熔点的液相薄膜, 减弱了凝固前沿的抗变形能力, 当凝固前沿受到拉伸作用时极易沿柱状晶开裂从而形成内裂纹;

2) 对连铸坯几种典型内部裂纹(中间裂纹、三角区裂纹、中心裂纹)的特征、分布位置及形成原因进行了系统分析;

3) 加热是可以使钢中内部的微小裂纹愈合的, 并且随着加热温度的升高, 裂纹的愈合程度越好。因此, 制定合理的加热制度不但能提高材料的变形能力、改善组织性能, 同时还可以使钢中的微小裂纹得到愈合。

4) 在轧制过程中, 压应力为裂纹的愈合提供了静力学条件, 塑性变形过程中大量原子定向移动, 为裂纹的愈合提供了物质补给, 裂纹两侧的原子更容易找到新的平衡位置, 形成统一的晶格点阵, 从而实现裂纹的愈合。

基金项目

河北省钢铁联合基金项目(E2018209195); 唐山市科技计划项目(18130203a); 华北理工大学大学生创新训练项目(X2018064)。

参考文献

- [1] 蔡开科. 连铸坯裂纹[J]. 钢铁, 1982, 17(9): 45-55.
- [2] 李广艳. 连铸坯内部裂纹产生的主要原因及解决措施[J]. 山东冶金, 2014, 36(2): 40-43.
- [3] Sorimachi, K., Brimacombe, J.K. (1977) Improvements in Mathematical Modelling of Stresses in Continuous Casting of Steel. *Ironmaking & Steelmaking*, **4**, 240-245.
- [4] 陈淑英, 常国威, 吴春京. 连铸钢坯一次枝晶间距及“鼓肚”的影响[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(7): 15-18.
- [5] Yamanaka, A., Okamura, K., Nakajima, K. (1995) Critical Strain for Internal Crack Formation in Continuous Casting. *Ironmaking & Steelmaking*, **22**, 508-512.
- [6] Lankford, W.T. (1972) Some Considerations of Strength and Ductility in the Continuous-Casting Process. *Metallurgical Transactions*, **3**, 1331-1357. <https://doi.org/10.1007/BF02643017>
- [7] Fujii, H., Ohashi, T., Hiromoto, T. (1978) On the Formation of Internal Cracks in Continuously Cast Slabs. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, **18**, 510-518.
- [8] 陶红标, 吕晓军, 席长锁, 等. 薄板坯表面纵裂纹形成机理及结晶器锥度研究[J]. 炼钢, 2012, 28(25): 25-28.
- [9] Irving, W.R., Perkins, A., Brooks, M.G. (1984) Effect of Chemical, Operational, and Engineering Factors on Segregation in Continuously Cast Slabs. *Ironmaking & Steelmaking*, **11**, 152-161.

- [10] 修立策. 板坯内部裂纹形成机理的讨论[J]. 安徽工业大学学报, 2005, 22(4): 676-680.
- [11] Seol, D.J., Won, Y.M., Oh, K.H., *et al.* (2000) Mechanical Behavior of Carbon Steels in the Temperature Range of Mushy Zone. *ISIJ international*, **40**, 356-363. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.356>
- [12] Kim, K., Yeo, T.J., Oh, K.H., *et al.* (1996) Effect of Carbon and Sulfur in Continuously Cast Strand on Longitudinal Surface Cracks. *ISIJ International*, **36**, 284-289. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.284>
- [13] Mintz, B. (1999) The Influence of Composition on the Hot Ductility of Steels and to the Problem of Transverse Cracking. *ISIJ International*, **39**, 833-855. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.833>
- [14] 王子亮, 王新江, 陈煜, 等. 板坯中间裂纹的成因分析及预防措施[J]. 钢铁, 2004, 39(7): 31-34.
- [15] Hiebler, H., Zirmgast, J., Bernhard, C., *et al.* (1994) Inner Crack Formation in Continuous Casting: Stree or Strain Criterion. *Steelmaking Conference Proceedings*, Chicago, 405-416.
- [16] 蔡开科, 程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [17] 韩志强, 袁伟霞, 韩传基, 等. 连铸内裂纹的形成与防止[J]. 连铸, 1999(6): 10-15.
- [18] 曾全胜, 隋然. 连铸钢板内部裂纹的研究[J]. 冶金标准化与质量, 2002, 40(6): 17-20.
- [19] 何宇明. 连铸板坯三角区裂纹的形成与防止[J]. 炼钢, 1997, 13(5): 35-46.
- [20] Kusano, A., Misumi, H., Chiba, H., *et al.* (1998) The Formation Mechanism of Center-Line Cracking on the Continuous Cast Slab. *Tetsu-to-Hagane*, **84**, 43-48. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.84.1_43
- [21] Griffith, A.A. (1921) The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, **221**, 163-198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>
- [22] 肖亚航, 傅敏士, 袁森. 45 钢内部裂纹愈合的热处理试验研究[J]. 金属热处理, 2005, 30(6): 83-85.
- [23] 韦东滨, 韩静涛, 谢建新, 等. 金属材料平板撞击内部裂纹高温愈合研究[C]//2000 年材料科学与工程新进展 (下)——2000 年中国材料研讨会论文集. 北京, 2000.
- [24] 钟志平, 陈英. 内部裂纹高温静态修复的临界尺寸研究[C]//2002 年材料科学与工程新进展 (下)——2002 年中国材料研讨会论文集. 北京, 2002.
- [25] 高克玮, 乔利姐, 褚武扬. Fe 单晶中裂纹愈合过程的 TEM 原位观察[J]. 金属学报, 2001, 37(2): 118-120.
- [26] 张永军, 韩静涛, 刘靖, 等. 金属材料内部裂纹愈合形态演化过程的扩散热力学分析[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(2): 122-125.
- [27] 乔桂英, 白象忠, 肖福仁, 等. 单脉冲电流对高速钢裂纹的止裂效果[J]. 金属学报, 2000, 36(7): 718-722.
- [28] 刘相华, 艾峥嵘, 喻海良. 轧件内部裂纹的模拟实验方法与愈合行为[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(10): 1420-1424.
- [29] Pandey, J.C., Raj, M. and Choubey, P.N. (2009) Split Ends and Cracking Problem during Hot Rolling of Continuously Cast Steel Billets. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **9**, 88-96. <https://doi.org/10.1007/s11668-008-9194-x>
- [30] Wang, A., Thomson, P.F. and Hodgson, P.D. (1996) A Study of Pore Closure and Welding in Hot Rolling Process. *Journal of Materials Processing Technology*, **60**, 95-102. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02313-8](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02313-8)
- [31] 韦东滨, 韩静涛, 谢建新, 等. 热塑性变形条件下钢内部裂纹愈合的实验研究[J]. 金属学报, 2000, 36(6): 622-625.
- [32] 刘相华, 喻海良. 热轧变形轧件内部裂纹愈合试验研究和机理分析[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(6): 36-39.
- [33] 董超芳, 李晓刚. 热塑性变形条件下碳钢氢腐蚀裂纹的愈合[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(2): 104-108.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7613，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ms@hanspub.org