

文章编号: 1000-4750(2011)04-0194-06

不锈钢热连轧机粗轧支持辊剥落影响因素的有限元分析

*曹建国¹, 王燕萍¹, 孔 宁¹, 杨连宏², 侯安全², 王泽斌²

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 山西太钢不锈钢股份有限公司, 山西, 太原 034207)

摘 要: 该文分析某 2250 不锈钢热连轧粗轧机频繁发生支持辊严重边部剥落难题的影响因素。通过理论及实际剥落断口形貌分析, 指出世界上不锈钢产量最大的该生产线复杂轧制工艺条件和服役期内辊系力学行为引起的不均匀辊间接触压应力分布是该轧机轧制过程中轧辊剥落的主要原因。根据现场跟踪实测数据, 采用大型通用有限元软件建立了四辊轧机辊系三维有限元模型, 仿真分析了带钢宽度、轧制力、轧辊磨损对辊间接触压应力峰值和位置的影响。结果表明: 随着带钢宽度和轧制力的增大, 辊间接触压力峰值增幅明显, 辊间接触压力分布不均匀度系数基本不变; 在不同磨损阶段, 当工作辊和支持辊都处于服役后期时, 压力峰值、不均匀度系数显著增大, 均在距轧辊辊身边部附近存在接触压应力尖峰, 且此位置与实际剥落位置一致。研究结果为成功研制的新支持辊形技术投入长期稳定工业应用累计轧制 600 万 t 以上未再发生剥落提供了理论依据。

关键词: 热轧; 轧辊; 磨损; 剥落; 有限元建模

中图分类号: TF31 **文献标识码:** A

FINITE ELEMENT ANALYSIS ON AFFECTING FACTORS OF SPALLING OF THE BACKUP ROLL OF A ROUGHING MILL FOR STAINLESS STEEL

*CAO Jian-guo¹, WANG Yan-ping¹, KONG Ning¹, YANG Lian-hong², HOU An-quan², WANG Ze-bin²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Shanxi Taigang Stainless Steel Corporation Limited, Taiyuan, Shanxi 034207, China)

Abstract: The objective of the paper is to analyze the affecting factors of spalling, which is one of the typical damage that occurs on the backup rolls of a roughing mill during stainless steel rolling process of 2250mm hot strip mill. Based on the theoretical study and fracture analysis on spall, the peak value of the uneven contact pressure between the work roll and the backup roll is found to be the key factor for the spalling accident during rolling process, which is caused by arduous operating conditions of the largest stainless steel production lines in the world. The three-dimensional finite element models of 4-high roll stacks are developed with measured work and backup roll contours configurations in service. The analysis based on the models demonstrates that the peak value of contact pressure and the location of the peak are influenced by strip width, unit width rolling force and work & backup roll wear contours in different service period. The simulation results show: (1) the peak value of the contact pressure between rolls increases sharply with the increasing of the strip width and unit width rolling

收稿日期: 2009-10-10; 修改日期: 2010-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(59835170); 北京科技大学科技发展专项基金项目(20050311890)

作者简介: *曹建国(1971—), 男, 湖南衡山人, 教授, 博士, 博导, 主要从事板带轧机力学行为及控制研究(E-mail: geocao@ustb.edu.cn);

王燕萍(1986—), 女, 江苏无锡人, 硕士, 从事轧钢机械装备及控制研究(E-mail: connie-ping@163.com);

孔 宁(1984—), 男, 湖北荆州人, 博士生, 从事金属轧制成形理论与技术研究(E-mail: yc-kn-2000@163.com);

杨连宏(1970—), 男, 天津人, 高工, 硕士, 厂长, 从事金属压力加工研究(E-mail: yanglh@tisco.com.cn);

侯安全(1972—), 男, 山西五台人, 高工, 硕士, 厂长助理, 从事轧钢工艺及设备研究(E-mail: houaq@tisco.com.cn);

王泽斌(1968—), 男, 山西介休人, 工程师, 从事轧辊工艺技术研究(E-mail: wangzb01@tisco.com.cn).

force; (2) the peak and the dissymmetry of the roll contact pressure become larger when the work rolls and backup rolls are at the end of the service; (3) the location of the peak shows good agreement with the actual position of spall at the edge of backup rolls. The developed backup rolls have been successfully applied to the production mill without spalling by strip rolling of 6 millions tonnage and more.

Key words: hot rolling; roll; wear; spalling; finite element modeling

轧辊是影响大型工业轧机效率和轧材品质的重要消耗部件^[1-2]。轧辊辊面剥落是仅次于断辊的恶性事故^[3-4]，易造成钢板和轧辊的报废，造成辊面剥落的因素很多，主要包括热冲击载荷、轧辊工作面压力分布不合理、轧制事故、冷却不充分等^[5-6]。大型 4 辊轧机支持辊承受着轧制过程中绝大部分弯曲力矩，对轧线的正常运行起着重要的作用：一方面，支持辊更换时间长，发生事故对轧线影响大；另一方面，支持辊成本高，发生剥落直接降低其有效使用率^[7]。现场跟踪调查表明，支持辊发生一次一般的剥落，其辊耗是正常服役时辊耗的 7 倍—8 倍；两次较为严重的剥落，则可让一支新支持辊退役^[8-9]。

太钢 2250 热连轧生产线于 2006 年 6 月 29 日建成投产，设计年产量 400 万 t，其中不锈钢 200 万 t，为全球不锈钢产量最大的、技术装备最先进、品种最全的一条热连轧生产线。该热连轧机设置了一台粗轧机，以适应轧制不锈钢板坯时对温度的严格要求，从而使得该轧线具有宽、薄、大负荷重载、可逆多道次的特点，导致其轧制工艺条件恶劣、轧制难度大、服役期内辊系力学行为复杂。该粗轧机支持辊频繁发生严重边部剥落，每次事故不仅造成 50 万元甚至 200 万元以上的直接经济损失，而且事故处理时间长达 2h 甚至 5h—6h，直接威胁到 2250 热连轧机生产线的长期正常稳定运行。因此开展不锈钢热连轧机粗轧支持辊剥落影响因素研究具有重要理论意义与工程应用价值。

1 2250 粗轧支持辊剥落

2250 热连轧机粗轧机支持辊在 2008 年 3 月 8 日、4 月 4 日和 4 月 8 日的近 1 个月内连续发生 3 次大块严重边部剥落，如 4 月 4 日粗轧支持辊发生的边部剥落，剥落带周向长度为 4023mm(达到周长的 82%以上)，轴向宽度为 1250mm(达到轧辊辊身长度的一半)，半径深度最大达到 185mm(远超过新支持辊工作层半径厚度 80mm 的使用范围)；4 月 8 日粗轧支持辊剥落带周向长度为 1380mm，轴向宽

度为 370mm，半径深度最大达到 20mm。

图 1 为剥落断口实际形貌。支持辊剥落起初辊身表面某些部位产生麻坑或椭球状凹坑，呈小块剥落，随着轧辊的进一步使用，剥落面积逐渐增大，最终形成大面积剥落现象。在大面积剥落区域，剥落形态大致与辊身轴向呈一夹角沿辊身一周开裂，断裂处有撕裂痕迹，大部分区域属瞬时开裂，局部区域有疲劳扩展贝纹线。

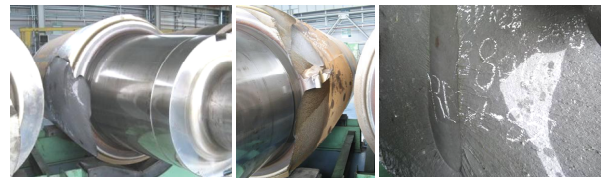


图 1 剥落支持辊断口形貌

Fig.1 Spalling of backup rolls

根据赫兹理论，支持辊和工作辊接触可看作两平行圆柱体的接触，其接触处的接触应力为三向压应力。过大的辊面接触压力是造成剥落的直接原因，在辊面的接触压力作用下，其表面应力的分布及中心处最大值可以用赫兹公式求得。根据强度理论，造成疲劳破坏的主要原因是接触区次表层的交变剪应力，此力随着轧辊的转动而发生大小和方向的变化，它们是造成接触疲劳的根源^[8]。支持辊实际剥落位置均位于辊身两端，这是由支持辊的磨损形式决定的^[8-9]。由于服役周期较长，支持辊因中间磨损量大、两端磨损量小而呈 U 型，导致辊身两端产生了局部的接触压力尖峰，交变剪应力增大，加快了支持辊的疲劳破坏。辊身中部的交变剪应力，在轧辊磨损的推动作用下，逐渐向辊身内部移动，不易形成疲劳裂纹；而轧辊边部磨损较少，最大交变剪应力点基本不动。在其反复作用下，局部材料弱化，出现裂纹。轧制过程中，辊面下由接触疲劳引起的裂纹源，由于尖端存在应力集中现象，从而自尖端以与辊面垂直方向向辊面扩展，或与辊面成小角度以致呈平行的方向扩展，两者相互作用，随着裂纹扩展，最终造成严重大块边部剥落。

对太钢粗轧机工作辊及支持辊磨损进行跟踪测试，如图 2 和图 3 所示。工作辊磨损大体为 U 形

磨损,局部存在突起;支持辊磨损为比较明显的“猫耳”磨损,传动侧与操作侧磨损不对称。

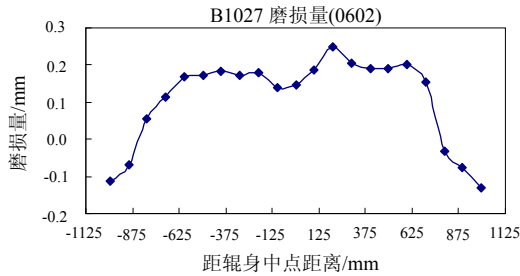


图 2 工作辊磨损辊形

Fig.2 Work roll wear contour after service

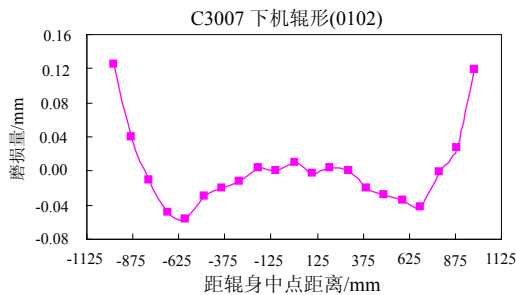


图 3 支持辊磨损辊形

Fig.3 Backup roll wear contour after service

通过以上分析可知: 1) 轧辊接触造成的距辊面一定深度的交变剪切应力是支持辊表层剥落的致因; 2) 剥落通常出现在最高接触压力区。常规轧辊的 U 形磨损形式导致轧辊边部的辊间载荷显著增大, 辊身中部辊间载荷变化较小, 轧辊边部的剥落时有发生。因此, 最理想的是获得轧辊间均匀一致的接触压力分布。有鉴于此, 可采用改进的支持辊新辊形, 改善辊间载荷的分布, 使得沿辊身全长的磨损较为均匀。

2 支持辊剥落的有限元分析

2.1 建模

为了解决轧制过程辊系过大的辊间接触压应力引起的轧辊剥落难题, 必须找出工作辊与支持辊之间接触压应力的分布规律。由于弹基梁方法及影响函数法将计算过程大为简化, 难以考虑辊系原始辊形、磨损辊形及接触变形等; 且影响函数法建立在平断面假设基础上, 从理论上只适于纯弯曲情况, 在轧辊弯曲变形中, 轧辊在受到弯矩作用同时还受到剪切力作用, 此时仍采用平断面假设必然带来误差, 且为处理辊间以及工作辊与带钢间的接触变形分别应用了两个无限长圆柱体接触和半无限体的假设, 不符合实际情况, 这也降低了影响函数

法的计算精度。因而以上方法计算结果不精确。有限元法直接从弹性力学的平衡微分方程出发采用矩阵结构分析的方法解决问题, 它不受研究对象外形尺寸变化的影响, 只要网格生成和网格密度控制得当, 即可保证精度。

为了对 2250 宽带钢粗轧机轧辊剥落原因进行分析, 必须建立四辊轧机辊系有限元模型^[10-14]。图 4 所示的 ANSYS 有限元模型(具体建模参数见表 1, 模型单元分配情况见表 2), 建模时采用了辊系结构的 1/4, 将支持辊表面指定为目标面, 使用单元号为 TARGET170; 工作辊表面指定为接触面, 使用单元号为 CONTACT174, 以上两单元均为面-面接触单元。支持辊和工作辊间的接触压力主要受带钢宽度、轧制力、轧辊磨损等的影响, 利用所建模型对以上影响因素进行分析。

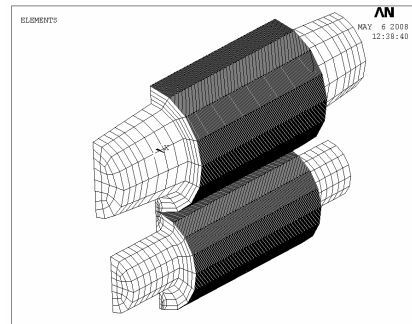


图 4 四辊轧机辊系变形有限元模型

Fig.4 Three-dimensional finite element roll system model of a 4-hi mill

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of model

轧辊	辊颈(直径/mm×长度/mm)	辊身(直径/mm×长度/mm)
支持辊	1030×1052	1600×2250
工作辊	710×830	1250×2250

表 2 辊系变形模型的单元分配情况

Table 2 Unit allocation of finite element model

工作辊		支持辊		总单元数	总节点数
实体单元数	接触单元数	实体单元数	接触单元数		
20184	900	15684	900	37668	68814

2.2 不同带钢宽度下辊间接触压应力分布

图 5 所示为单位轧制力 25kN/mm, 使用引进的 SMS200 支持辊辊形时, 轧制不同带钢宽度条件下支持辊的赫兹接触压应力分布情况。分析可知: 随着带钢宽度的增加, 辊间接触压应力峰值逐渐增加, 当带钢宽度 B 从 1010mm 变化到 2050mm 时, 辊间接触压力峰值增大了 106.3%。对于不同宽度的带钢, 辊间接触压应力分布趋势基本一致, 辊间接

触压力分布不均匀度系数分别为 1.36、1.38、1.41。分析辊间接触压应力峰值位置可以看出，辊间接触压应力峰值位置基本不变，基本位于距轧辊辊身边部 200mm 左右处。

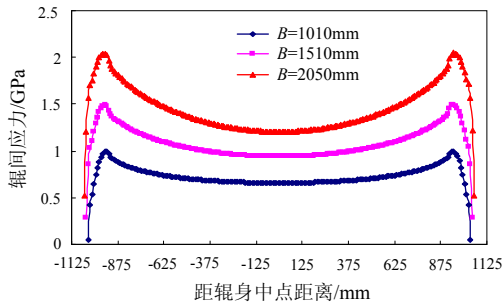
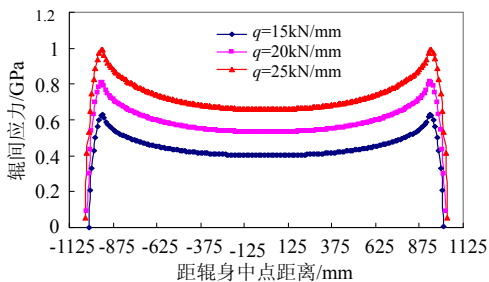


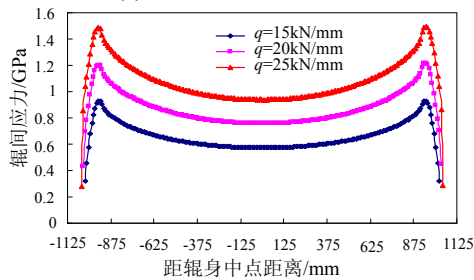
图5 不同带钢宽度下辊间接触压应力对比($q=25\text{kN/mm}$)
Fig.5 Contact stress distribution of different strip width ($q=25\text{kN/mm}$)

2.3 不同单位轧制力下辊间接触压应力分布

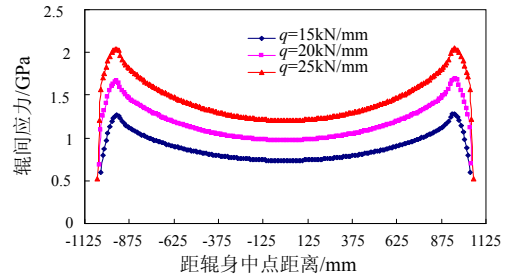
图6为带钢宽度为1010mm、1510mm、2050mm，在单位轧制力分别为15kN/mm、20kN/mm、25kN/mm，使用引进的SMS200支持辊辊形时，辊间接触压应力分布情况。可知：单位轧制力由15kN/mm变化到25kN/mm时，对于宽度1010mm、1510mm、2050mm带钢，其辊间接触压力峰值分别增大了56.8%、60.7%、59.3%；辊间接触压力分布不均匀度随着单位轧制力的增大而减小，对于宽度1010mm、1510mm、2050mm带钢，分别从1.42降低到1.36、从1.41降低到1.38、从1.45降低到1.41。对于不同单位轧制力，辊间接触压应力分布趋势相同，辊间接触压应力峰值位置基本不变，基本处于距轧辊辊身边部200mm左右处。



(a) 带钢宽度 $B=1010\text{mm}$



(b) 带钢宽度 $B=1510\text{mm}$



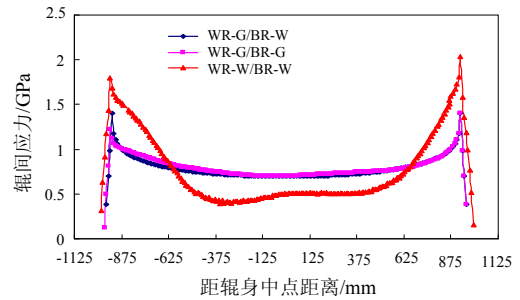
(c) 带钢宽度 $B=2050\text{mm}$

图6 不同单位轧制力下辊间接触压力对比

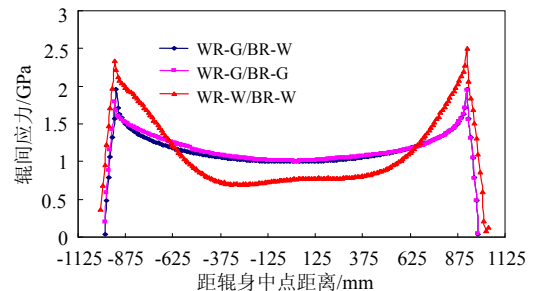
Fig.6 Contact stress distribution of different unit rolling force

2.4 不同磨损阶段辊间接触压应力分布

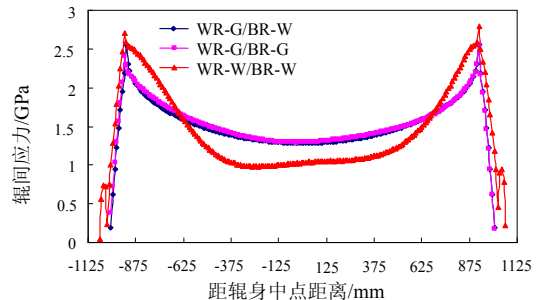
由于支持辊和工作辊的完整服役周期内轧辊磨损引起的辊形变化较大，且前者服役周期较长，因此需要研究完整服役期内不同磨损阶段辊间接触压力分布变化情况。图7为单位轧制力25kN/mm，使用引进的SMS200支持辊辊形，工作辊、支持辊处于不同磨损阶段时，不同带钢宽度的辊间接触压应力分布情况。图7中WR表示工作辊，BR表示支



(a) 带钢宽度 $B=1010\text{mm}$



(b) 带钢宽度 $B=1510\text{mm}$



(c) 带钢宽度 $B=2050\text{mm}$

图7 不同服役阶段辊间接触压应力分布

Fig.7 Contact stress distribution of different service period

持辊, G 表示服役前期辊形, W 表示服役后期辊形, 图 7 中 3 种工况依次为: 工作辊使用服役前期辊形, 支持辊使用服役后期辊形、工作辊、支持辊均采用服役前期辊形、工作辊、支持辊均采用服役后期辊形。对比分析可知: 对于宽度 1010mm、1510mm、2050mm 带钢, 当工作辊处于轧辊服役前期时, 支持辊处于轧辊服役后期比处于轧辊服役前期的辊间压力尖峰值略有增加, 辊间接触压力分布不均匀度基本不变; 当工作辊和支持辊都处于轧辊服役后期时辊间压力尖峰值增幅非常明显, 增幅分别为 43.7%、28.5%、9.2%, 辊间接触压力分布不均匀度分别从 1.76 增大到 2.61、从 1.68 增大到 2.26、从 1.66 增大到 1.95。比较而言, 由于轧辊辊身中部磨损引起的辊形变化大, 轧制窄带钢时辊间接触压力分布受磨损的影响更大。

2.5 仿真分析结论

从以上仿真分析可知, 使用引进的 SMS200 辊形时, 在距离支持辊辊身边部 200mm 左右的位置存在辊间压力尖峰, 此结论与现场出现的在距离支持辊辊身边部 230mm 处频繁发生严重边部剥落现象存在明显的对应关系。

对比不同带钢宽度、轧制力、磨损情况下辊间接触压力的分布得知, 当带钢宽度从 1010mm 变化到 2050mm 时, 辊间接触压应力峰值增大了 106.3%, 不均匀度系数基本相同; 当单位轧制力由 15kN/mm 变化到 25kN/mm 时, 对于宽度为 1010mm、1510mm、2050mm 的带钢, 其辊间接触压应力峰值分别增大了 56.8%、60.7%、59.3%, 其不均匀度系数变化均小于 4%; 当工作辊和支持辊都处于服役后期时, 对于宽度为 1010mm、1510mm、2050mm 的带钢, 辊间接触压应力峰值增幅分别为 43.7%、28.5%、9.2%, 辊间接触压力分布不均匀度系数分别增大了 48%、35%、17%。磨损对辊间接触压力影响较大, 应改善辊间载荷的分布, 使得磨损沿辊身全长的分布较为均匀。

在此研究基础上, 为了改善轧机辊间接触压应力的分布, 根据变接触轧制技术^[15-18]思想, 设计的 SCR(Smart contact backup rolls)支持辊新辊形(见图 8)经过上机轧制试验后已应用于工业生产实践, SCR 支持辊服役期内磨损较均匀, 辊形自保持性较好, 取得了自 2008 年 7 月 4 日长期应用以来已累计轧制 608.2 万 t 以上未再发生轧辊剥落的显著生产实绩。

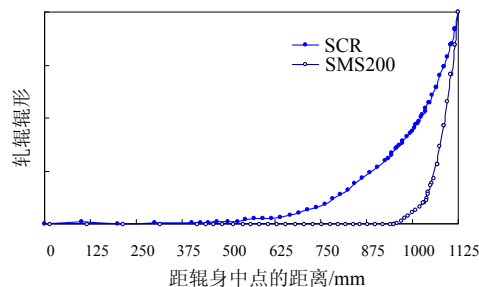


图 8 SCR 和 SMS200 支持辊辊形比较

Fig.8 Comparison of SCR and SMS200 backup rolls

3 结论

(1) 根据现场跟踪实测数据, 建立轧机辊系变形三维有限元模型, 仿真分析显示, 当带钢宽度从 1010mm 变化到 2050mm 时, 辊间接触压应力峰值增大 106.3%; 在单位轧制力从 15kN/mm 增大到 25kN/mm 的情况下, 辊间接触压应力峰值增大 56.8%以上; 采用现有的引进辊形技术时, 典型宽度带钢工况下辊间接触压力分布不均匀度系数都在 1.36 以上, 且当工作辊和支持辊都处于服役后期时, 压应力峰值增幅达 9.2%—43.7%, 不均匀度系数增大到 1.95—2.61。

(2) 有限元仿真确定的该轧机完整服役期内轧制条件下轧机辊系辊间接触压应力尖峰大小和位置发现, 过大的辊间接触压应力是轧制过程轧辊剥落的直接原因, 位于轧辊辊身边部附近基本不变的辊间接触压应力峰值位置与实际剥落位置一致。为了改善轧机辊间接触压应力的分布, 根据变接触轧制思想设计的新辊形技术成功投入长期工业应用, 取得辊形自保持性较好且未再发生剥落的显著生产实绩。

参考文献:

- [1] 周焱民, 黄林森. 中厚板轧制用工作辊剥落的类型及其原因分析[J]. 江西冶金, 2008, 28(5): 23—25.
Zhou Yanmin, Huang Linsen. Type and reason analysis of work roll desquamation in rolling of medium and heavy plate [J]. Jiangxi Metallurgy, 2008, 28(5): 23—25. (in Chinese)
- [2] Wu Qiong, Sun Dale, Liu Changsheng, Li Chunguang. Analysis of surface and sub-surface initiated spalling of forged cold work rolls [J]. Engineering Failure Analysis, 2008, 15: 401—410.
- [3] 渠彬, 朱世根, 顾伟生. 轧辊失效方式及其原因分析[J]. 山东冶金, 2005, 27(1): 31—33.
Qu Bin, Zhu Shigen, Gu Weisheng. Roll failure fashion and it's causes analysis [J]. Shandong Metallurgy, 2005,

- 27(1): 31—33. (in Chinese)
- [4] Li Hongchun, Jiang Zhengyi, Kiet A Tieu, Sun Weihua. Analysis of premature failure of work rolls in a cold strip plant [J]. *Wear*, 2007, 263: 1442—1446.
- [5] 陈守关, 王建泽, 康永林. 45Cr4NiMoV 锻钢热轧支撑辊辊身剥落分析[J]. *山东冶金*, 2006, 28(3): 51—53.
Chen Shouguan, Wang Jianze, Kang Yonglin. Barrel spalling analysis of 45Cr4NiMoV forged steel backup roll for hot rolling [J]. *Shandong Metallurgy*, 2006, 28(3): 51—53. (in Chinese)
- [6] Ray A K, Mishra K K, Das G, Chaudhary P N. Life of rolls in a cold rolling mill in a steel plant-operation versus manufacture [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2000, 7: 55—67.
- [7] 马叶红, 郭继友. 热连轧支撑辊剥落的原因分析[J]. *甘肃冶金*, 2007, 29(1): 19—22.
Ma Yehong, Guo Jiyou. Prevention and analysis on spalling of back-up roll used for hot strip mill [J]. *Gansu Metallurgy*, 2007, 29(1): 19—22. (in Chinese)
- [8] 曹建国, 陈先霖, 何安瑞. 宽带钢热轧机轧辊剥落及其解决方案[J]. *冶金设备*, 1998, 4: 5—7, 18.
Cao Jianguo, Chen Xianlin, He Anrui. Spalling of roll and its solution in hot wide strip mill [J]. *Metallurgical Equipment*, 1998, 4: 5—7, 18. (in Chinese)
- [9] 曹建国, 陈先霖, 杨荃. 宽带钢热轧机轧辊剥落的控制与效果[J]. *冶金设备*, 1999, 4: 6—9, 45.
Cao Jianguo, Chen Xianlin, Yang Quan. Preventing method and its effect for roll spalling in hot wide strip mill [J]. *Metallurgical Equipment*, 1999, 4: 6—9, 45. (in Chinese)
- [10] Yang Guanghui, Cao Jianguo, Zhang Jie, Jia Shenghui, Tan Renwei. Backup roll contour of a SmartCrown tandem cold rolling mill [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing: Mineral Metallurgy Materials*, 2008, 15(3): 357—361.
- [11] 李洪波, 张杰, 曹建国. CVC 热连轧机支持辊不均匀磨损及辊形改进[J]. *北京科技大学学报*, 2008, 30(5): 558—561.
Li Hongbo, Zhang Jie, Cao Jianguo. Characteristics of backup roll wear contour in a CVC continuous hot rolling mill [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30(5): 558—561. (in Chinese)
- [12] 曹建国, 轧楠, 米凯夫. 宽带钢热连轧机自由规程轧制的板形控制技术[J]. *北京科技大学学报*, 2009, 31(4): 481—486.
Cao Jianguo, Ya Nan, Mi Kaifu. Profile and flatness control technology for schedule-free rolling in hot wide strip mills [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(4): 481—486. (in Chinese)
- [13] 窦鹏, 李友国, 梁开明. CVC 热轧机支承辊接触压力有限元分析[J]. *清华大学学报*, 2005, 45(12): 1668—1671.
Dou Peng, Li Youguo, Liang Kaiming. Finite element analysis of contact stresses on the backup roll of CVC hot rolling mills [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2005, 45(12): 1668—1671. (in Chinese)
- [14] 杜凤山, 黄华贵, 许志强. 大型非均质轧辊辊间接触应力分布规律的研究[J]. *工程力学*, 2006, 23(7): 176—179, 141.
Du Fengshan, Huang Huagui, Xu Zhiqiang. Research on distribution law of contact stresses between heavy rollers made of heterogeneous material [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(7): 176—179, 141. (in Chinese)
- [15] Chen Xianlin, Yang Quan, Zhang Qingdong. Varying contact backup roll for improved strip flatness [J]. *Steel Technology International*, 1994/1995 (yearly): 174—178.
- [16] 陈先霖, 张杰, 张清东. 宽带钢热连轧机板形控制系统的开发[J]. *钢铁*, 2000, 35(7): 28—33.
Chen Xianlin, Zhang Jie, Zhang Qingdong. Development in profile and flatness control system of hot strip mills [J]. *Iron and Steel*, 2000, 35(7): 28—33. (in Chinese)
- [17] Cao Jianguo, Zhang Jie, Chen Xianlin. Control of roll contour for strip profile and flatness in hot rolling [C]// David L. 44th Mechanical Working and Steel Processing Conference Proceeding. Florida, 2002: 1001—1010.
- [18] Cao Jianguo, Wei Gangcheng, Zhang Jie. VCR and ASR technology for profile and flatness control in hot strip mills [J]. *Journal of Central South University: Science & Technology of Mining and Metallurgy*, 2008, 15(2): 264—270.