

# 先进变凸度工作辊辊形及其控制特性

李洪波<sup>1)</sup>✉ 张杰<sup>1)</sup> 曹建国<sup>1)</sup> 李慧慧<sup>1)</sup> 周一中<sup>2)</sup> 黄为民<sup>2)</sup>

1) 北京科技大学机械工程学院,北京 100083 2) 武汉钢铁(集团)公司,武汉 430083

✉ 通信作者, E-mail: lihongbo@ustb.edu.cn

**摘要** 跟踪某 2250 mm 热轧生产线 CVC 辊形实际窜辊数据发现,连续变凸度(CVC)辊形常窜到两端极限位置.分析表明,CVC 辊形的二次凸度调控能力随带钢宽度减小而呈二次方下降趋势,表现出对较窄带钢凸度控制能力的明显不足. Smart-Crown 辊形也存在同样问题.提出一种新的先进变凸度(AVC)工作辊辊形曲线,其二次和四次凸度与窜辊量呈线性关系,且随着四次凸度控制能力的增大,二次凸度控制能力随带钢宽度的变化明显放缓,有助于提高宽带钢或超宽带钢轧机对不同宽度带钢的板形控制能力.

**关键词** 热连轧机;工作辊;辊形;凸度控制

**分类号** TG333.7<sup>+</sup>1

## Advanced variable crown work roll contour and its crown control characteristics

LI Hong-bo<sup>1)</sup>✉, ZHANG Jie<sup>1)</sup>, CAO Jian-guo<sup>1)</sup>, LI Hui-hui<sup>1)</sup>, ZHOU Yi-zhong<sup>2)</sup>, HUANG Wei-min<sup>2)</sup>

1) School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Wuhan Iron and Steel (Group) Corporation, Wuhan 430083, China

✉ Corresponding author, E-mail: lihongbo@ustb.edu.cn

**ABSTRACT** After industrially tracing and testing the shifting positions of continuously variable crown (CVC) work rolls for a 2250 mm hot strip production line, it was found that CVC work rolls always worked at the limit positions. The analysis showed that the quadratic crown control capability of the CVC work roll contour declined quadratically with decreasing strip width, leading to an insufficient crown control capability to narrow strip steel, and so did SmartCrown work rolls. A new advanced variable crown (AVC) work roll was proposed, whose quadratic crown and quartic crown vary linearly with roll shifting positions. With the quartic crown control capability increasing, the quadratic crown control capability varies slowly with strip width, indicating that the new contour can improve the crown control capability of a wide strip or super wide strip rolling mill for different strip widths.

**KEY WORDS** hot rolling mills; work rolls; roll contour; crown control

板形是带钢生产最重要的质量指标之一,而在轧机机型确定的情况下,辊形是板形控制最直接、最活跃的因素<sup>[1]</sup>,当前很多国际知名的板形控制技术的创新就在于辊形的创新,如连续变凸度(continuously variable crown, CVC)辊形技术<sup>[2]</sup>和 SmartCrown 辊形技术<sup>[3]</sup>. CVC 辊形和 SmartCrown 辊形在世界范围内得到了广泛的应用,国内外学者也进行了很多的分析和研究,取得了较多对板带生产板形控制有指导意义的结论<sup>[4-8]</sup>.然而,在超宽轧机实际生产过程中 CVC 辊形对较窄带钢凸度的控制能力不足.因此,本文在对 CVC 辊形及 SmartCrown 辊形变凸度

控制能力进行深入分析的基础上,提出了一种新的先进变凸度(advanced variable crown, AVC)工作辊辊形,进而研究其凸度控制特性.

### 1 CVC 辊形及其变凸度能力问题

CVC 辊形是西马克公司提出的标志性板形控制技术,其特点是利用一套反对称的“S”形工作辊实现空载辊缝二次凸度的连续变化(图1).图1中参数为: $L$ 为轧辊辊身长度,mm; $s$ 为窜辊位置,mm; $y_{10}(x)$ 为轧机的上工作辊辊形函数(半径函数),可用通式表示为

收稿日期:2010-11-24

基金项目:北京科技大学科技发展专项基金项目(20050311890)

$$y_0(x) = R_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (1)$$

式中  $R_0$  为轧辊初始半径 (mm) ,  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  为辊形系数.

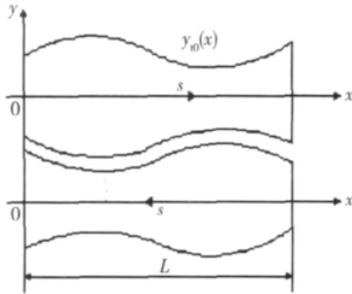


图 1 CVC 工作辊及其辊缝

Fig. 1 CVC work rolls and roll gap

根据 CVC 技术上下工作辊的反对称性可求得辊缝名义凸度  $C_q$  (辊缝名义凸度指以轧辊辊身全长进行计算得到的凸度值) 为

$$C_q = g\left(\frac{L}{2}\right) - g(0) = \frac{1}{2}a_2L^2 + \frac{3}{4}a_3L^3 - \frac{3}{2}a_3L^2s \quad (2)$$

某 2 250 mm 热连轧机 F1 机架窜辊范围为 -150 ~ 150 mm 对应辊缝名义凸度为 0.5 ~ -0.5 mm , 在该生产现场连续采集了 41 547 个钢卷超过 100 万 t 带钢轧制过程中 F1 机架 CVC 辊形的窜辊位置, 具体分布情况如图 2 所示. 图中横坐标为 -150 ~ 150 mm 共计 301 个窜辊位置, 纵坐标为每个窜辊位置所轧钢卷数占统计总数的百分比. 可以看出, F1 机架窜辊经常达到两端极限值, 在 -150 mm 和 150 mm 两个窜辊位置所轧带钢比例近 50%. 2 250 mm 轧机轧制宽度范围较大 (700 ~ 2 130 mm) , 实际生产中 1 500 mm 以下相对较窄规格仍占一定比例, 在轧制较窄带钢时, F1 机架窜辊达到两端极限值 -150 mm 或 150 mm 后, 往往仍达不到凸度控制的要求, 明显表现出 CVC 辊形对窄带钢凸度控制能力的不足. 为此, 生产现场曾对 CVC 的辊缝名义凸度调控范围进行了调整, 由 [-0.5 mm, 0.5 mm] 增大为 [-1.3 mm, 1.1 mm]<sup>[9]</sup>, 凸度调控范围的倍增使得窜辊位置分布明显好转, 如图 3 所示, 但窜辊位置仍以接近正负极限值为主, 并未能很好地解决 CVC 轧机对窄带钢的凸度控制需求.

这主要是因为 CVC 辊形在实际应用过程中, 对宽度为  $B$  的带钢所形成的实际辊缝凸度  $C_{qB}$  为

$$C_{qB} = g\left(\frac{L}{2}\right) - g\left(\frac{L}{2} - \frac{B}{2}\right) = \frac{1}{2}a_2B^2 + \frac{3}{4}a_3LB^2 - \frac{3}{2}a_3B^2s \quad (3)$$

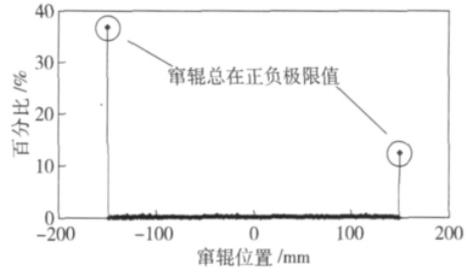


图 2 CVC 辊形窜辊位置分布

Fig. 2 Distribution of shifting positions for CVC work rolls

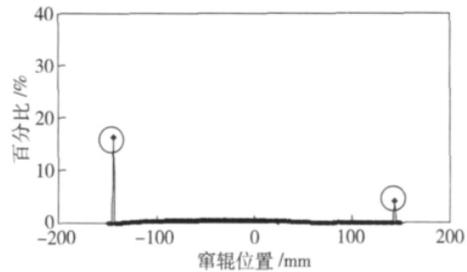


图 3 辊形改进后 CVC 辊形窜辊位置分布

Fig. 3 Distribution of shifting positions for modified CVC work rolls

可见, 对宽度为  $B$  的带钢, CVC 辊形的凸度调控能力为

$$\Delta C_{qB} = C_{qB}(-s_m) - C_{qB}(s_m) = \frac{B^2}{L^2} \cdot (C_1 - C_2) \quad (4)$$

式中:  $s_m$  为极限窜辊位置, mm;  $C_1$  和  $C_2$  分别为窜辊位置为  $-s_m$  和  $s_m$  时对应的辊缝名义凸度.

可以看出, CVC 的变凸度能力与带钢宽度  $B$  的平方成正比, 随着带钢宽度下降, CVC 凸度调控能力下降较快. 这一特性使 CVC 辊形应用在宽轧机尤其是超宽带钢轧机时表现出了对窄带钢凸度控制能力的不足. 要解决该问题就需要提出具有不同变凸度特性的工作辊辊形.

## 2 SmartCrown 辊形及其变凸度能力

SmartCrown 辊形是奥钢联工程技术公司提出的一种新型的板形控制技术, 在凸度控制上, 与 CVC 有异曲同工之妙, 其独特的优点在于对两肋浪敏感区进行局部控制<sup>[3]</sup>, 而关于 SmartCrown 辊形的凸度控制能力与带钢宽度的关系有待进一步分析.

与 CVC 类似, 对于轧机的上工作辊 (见图 1) , SmartCrown 辊形函数 (半径函数) 可用通式表示为<sup>[10]</sup>

$$y_0(x) = R_0 + a_1 \sin\left(\frac{\pi\alpha}{90L}(x - s_0)\right) + a_2x \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为形状角 ( $^\circ$ );  $a_1$ 、 $a_2$  和  $s_0$  均为辊形系数.

SmartCrown 辊形的辊缝名义凸度  $C_q$  为

$$C_q = 2a_1 \sin\left(\frac{\pi\alpha}{90L}\left(\frac{L}{2} - s - s_0\right)\right) \left(\cos\frac{\pi\alpha}{180} - 1\right) \quad (6)$$

与 CVC 辊形不同, SmartCrown 辊形具有一定的四次凸度控制能力, 其四次凸度  $C_h$  可表示为

$$C_h = g\left(\frac{L}{4}\right) - \frac{3}{4}g\left(\frac{L}{2}\right) - \frac{1}{4}g(0) = -2a_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi\alpha}{90L}\left(\frac{L}{2} - s - s_0\right)\right) \left(\cos\frac{\pi\alpha}{360} - \frac{1}{4}\cos\frac{\pi\alpha}{180} - \frac{3}{4}\right) \quad (7)$$

对宽度为  $B$  的带钢, SmartCrown 辊形的辊缝凸度  $C_{qB}$  为

$$C_{qB} = 2a_1 \sin\left(\frac{\pi\alpha}{90L}\left(\frac{L}{2} - s - s_0\right)\right) \left(\cos\frac{\pi\alpha B}{180L} - 1\right) \quad (8)$$

相应的凸度调控能力为

$$\Delta C_{qB} = \frac{\cos\frac{\pi\alpha B}{180L} - 1}{\cos\frac{\pi\alpha}{180} - 1} \cdot (C_1 - C_2) \quad (9)$$

可以看出, SmartCrown 辊形对不同宽度带钢的凸度调控能力与形状角  $\alpha$  有关, 目前我国应用的 SmartCrown 辊形的形状角为  $40^\circ$ . 以具有  $\pm 150$  mm 窜辊能力的 2550 mm 轧辊为对象, 分别设计辊缝名义凸度为  $[-0.5$  mm  $0.5$  mm] 的 CVC 与 SmartCrown 辊形, 对比它们在不同宽度下的二次凸度调控能力如图 4 所示.

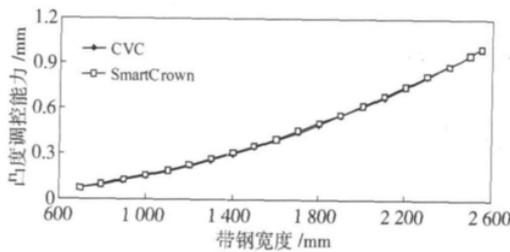


图4 CVC 和 SmartCrown 辊形的凸度调控能力

Fig. 4 Crown control capabilities of CVC and SmartCrown work rolls

可以看出, 与 CVC 相似, SmartCrown 辊形的凸度调控能力也随着带钢宽度下降而下降较快, 并不能解决超宽轧机的窄带钢板形控制问题.

### 3 先进变凸度 (AVC) 工作辊辊形及其变凸度能力

为解决 CVC 和 SmartCrown 辊形应用在宽轧机和超宽轧机时对窄带钢凸度控制能力不足的问题, 提出了一种新的 AVC 工作辊辊形, AVC 辊形可表示为

$$y_0(x) = R_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4 \sin\left(\frac{4\pi}{L}\left(x - \frac{L}{2}\right)\right) \quad (10)$$

式中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$  为辊形系数.

AVC 辊形的辊缝名义二次凸度  $C_q$  和四次凸度  $C_h$  分别为

$$C_q = g\left(\frac{L}{2}\right) - g(0) = \frac{1}{2}a_2L^2 + \frac{3}{4}a_3L^3 - \frac{3}{2}a_3L^2s \quad (11)$$

$$C_h = g\left(\frac{L}{4}\right) - \frac{3}{4}g\left(\frac{L}{2}\right) - \frac{1}{4}g(0) = -4a_4 \sin\left(\frac{4\pi}{L}s\right) \quad (12)$$

可以看出, AVC 辊形的辊缝二次凸度仍只与参数  $a_2$  和  $a_3$  有关,  $a_2$  和  $a_3$  的设计与 CVC 辊形完全相同, 给出辊缝二次凸度调控范围  $[C_1, C_2]$  即可求得. AVC 辊形的四次凸度仅与系数  $a_4$  有关,  $a_4$  与  $a_3$  符号相反, 形成的四次凸度调控特性线是关于 0 对称的近似线性单调增加曲线 (见图 5), 给定 AVC 辊形的四次凸度调控范围  $[-C_{hm}, C_{hm}]$ , 即可求得系数  $a_4$ . 系数  $a_1$  与辊缝凸度无关, 由轴向力或者辊径差决定<sup>[4-6]</sup>.

设计辊缝二次凸度调控范围  $[-0.5$  mm  $0.5$  mm], 四次凸度调控范围  $[-0.2$  mm  $0.2$  mm], 轧辊长度为 2550 mm 的 AVC 辊形曲线, 其二次和四次凸度调控特性如图 5 所示. 可以看出, AVC 的辊缝名义二次和四次凸度均与窜辊位置较好地保持了线性关系.

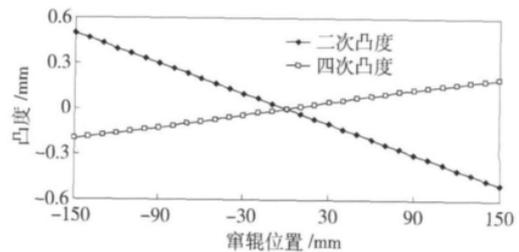


图5 AVC 的二次和四次凸度调控特性

Fig. 5 Crown control characteristics of AVC work rolls

计算可得, 对宽度为  $B$  的带钢, AVC 辊形的辊缝凸度  $C_{qB}$  为

$$C_{qB} = \frac{1}{2}a_2B^2 + \frac{3}{4}a_3LB^2 - \frac{3}{2}a_3B^2s + 2a_4 \sin\frac{4\pi s}{L} \left(1 - \cos\frac{2\pi B}{L}\right) \quad (13)$$

相应的凸度调控能力为

$$\Delta C_{qB} = \frac{B^2}{L^2} \cdot (C_1 - C_2) + C_{hm} \cdot \left(1 - \cos\frac{2\pi B}{L}\right) \quad (14)$$

进而得到 AVC 辊形在不同宽度下的凸度调控能力,与三次 CVC 及 SmartCrown 辊形的对比结果如图 6 所示。可以看出,AVC 辊形使得凸度调控能力随带钢宽度下降变化趋势明显放缓。

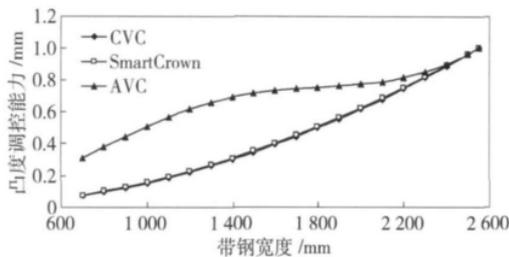


图 6 CVC、SmartCrown 和 AVC 辊形的凸度调控能力

Fig. 6 Crown control capability of CVC, SmartCrown and AVC work rolls

如果给定不同的四次凸度调控范围,得到的二次凸度变化特性也有所不同。图 7 给出了辊缝名义二次凸度调控范围为  $[-0.5 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm}]$ ,而四次凸度调控范围分别是  $C_{lm}$  为 0、0.1、0.2 和 0.3 mm 时,AVC 辊形在不同带钢宽度下的二次凸度调控能力。可以看出,随着四次凸度调控能力的增强,二次凸度调控能力亦有所增大。

可见,与 CVC 辊形和 SmartCrown 辊形相比,AVC 辊形在提供了二次和四次凸度板形调控能力的基础上,可适当均衡宽窄带钢的二次凸度调控能力,增强宽轧机或超宽轧机对窄带钢的板形控制能力,适合不同产品大纲的生产需要。

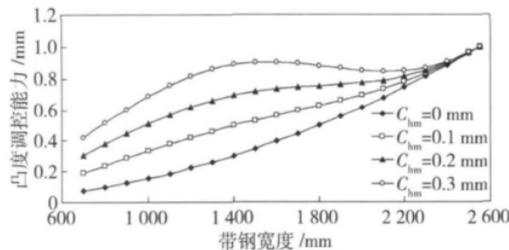


图 7 不同 AVC 辊形的二次凸度调控能力

Fig. 7 Quadratic crown control capability of different AVC work roll contours

## 4 结论

(1) 跟踪测试某 2 250 mm 热连轧机 F1 机架 CVC 实际窜辊数据,发现窜辊位置经常达到两端极限值,表现出凸度控制能力的不足。

(2) 目前常用的 CVC 与 SmartCrown 辊形的变凸度能力随带钢宽度的减小而下降较快,使其应用于宽带钢或超宽带钢轧机时对窄带钢的凸度控制能力有限,不利于板形控制能力的充分发挥。

(3) AVC 工作辊辊形的二次和四次凸度与窜

辊量基本呈线性关系,而其二次凸度控制能力随带钢宽度的变化明显放缓。

(4) 随着四次凸度控制能力的增强,AVC 辊形的二次凸度调控能力也有所增大,因此可满足宽轧机或超宽轧机的板形控制需求。

## 参 考 文 献

- [1] Cao J G, Zhang J, Chen X L, et al. Selection of strip mill configuration and shape control. *Iron Steel* 2005, 40(6): 40 (曹建国,张杰,陈先霖,等. 宽带钢热连轧机选型配置与板形控制. *钢铁* 2005, 40(6): 40)
- [2] Zhang J, Chen X L, Xu Y H, et al. Roll contour design of 4-high mill with variable crown by axial shifting. *J Univ Sci Technol Beijing*, 1994, 16(Suppl): 98 (张杰,陈先霖,徐耀寰,等. 轴向移位变凸度四辊轧机的辊型设计. *北京科技大学学报*, 1994, 16(增刊): 98)
- [3] Yang G H, Cao J G, Zhang J, et al. SmartCrown work roll contour of a 4-hi tandem cold rolling mill. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2006, 28(7): 669 (杨光辉,曹建国,张杰,等. SmartCrown 四辊冷连轧机工作辊辊形. *北京科技大学学报* 2006, 28(7): 669)
- [4] Tellman J G M, Steden G, Lingen F. Shape control with CVC in a cold strip mill-development and operational results // *Proceedings of 5th International Steel Rolling Conference*. UK, 1990: 260
- [5] Lu C, Tieu A K, Jiang Z Y. A design of a third-order CVC roll profile. *J Mater Process Technol*, 2002, 125/126: 645
- [6] Cao J G, Zhang J, Chen X L, et al. Design of CVC roll contour in 1 700 mm tandem cold mill. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2003, 25(Suppl): 1 (曹建国,张杰,陈先霖,等. 1 700 mm 冷连轧机连续变凸度辊形的研究. *北京科技大学学报* 2003, 25(增刊): 1)
- [7] Wei G C, Cao J G, Zhang J, et al. Optimization and application of CVC work roll contour on 2250 hot strip mills. *J Cent South Univ Sci Technol*, 2007, 38(5): 937 (魏钢城,曹建国,张杰,等. 2250CVC 热连轧机工作辊辊形改进与应用. *中南大学学报: 自然科学版* 2007, 38(5): 937)
- [8] Yang G H, Cao J G, Zhang J, et al. Optimization of application of SmartCrown on tandem cold rolling mill. *Iron Steel*, 2006, 41(9): 56 (杨光辉,曹建国,张杰,等. SmartCrown 冷连轧机板形控制新技术改进研究与应用. *钢铁* 2006, 41(9): 56)
- [9] Hao J W. *Study on Roll Contour of Finishing of 2250 CVC Hot Strip Rolling Mill* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2007 (郝建伟. 2250 CVC 热连轧精轧机辊形的研究[学位论文]. 北京:北京科技大学, 2007)
- [10] Li H B, Zhang J, Cao J G, et al. Control characteristics contrast among cubic CVC, quintic CVC and SmartCrown roll contours. *China Mech Eng*, 2009, 20(2): 237 (李洪波,张杰,曹建国,等. 三次 CVC 五次 CVC 及 SmartCrown 辊形控制特性对比研究. *中国机械工程* 2009, 20(2): 237)