

HC 冷连轧机弯辊力饱和分析及调控策略

周一林

(攀钢集团攀枝花钢铁有限公司冷轧厂, 四川 攀枝花 617023)

摘 要: 四机架六辊 HC 冷连轧机组末机架在采用光辊轧制时, 工作辊弯辊力常处于饱和状态, 致使板形调控能力不足, 板形缺陷很难消除或进一步降低, 影响了板形质量的持续提升。为此, 收集并统计了部分热轧卷的板凸度及其分布, 结合前三机架弯辊力的分布特点, 分析了热轧来料凸度与冷轧末机架承载辊缝形状的匹配关系及对弯辊力的影响。同时分析了利用中间辊负窜来降低弯辊力的在线调整方法对带钢表面质量的影响。在此基础上, 提出了采用多段式凸度辊型来解决末机架弯辊力饱和的调控策略。在分析辊型参数对板形影响的基础上, 通过多次凸度工作辊轧制试验, 获得了较优的六次多项式辊型参数。辊型试验结果也表明, 在末机架采用五段式正凸度工作辊可增大弯辊的调节能力, 减小中间辊负窜量, 能有效地解决末机架弯辊力饱和的问题, 可进一步提升带钢板形质量。

关键词: HC 轧机; 弯辊; 窜辊; 热轧板凸度; 工作辊辊型

中图分类号: TG333

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)01-0185-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.01.028

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Analysis and control strategy of bending force saturation for HC tandem cold mill

Zhou Yilin

(The Cold Rolling Mill of Panzhihua Steel and Vanadium Co., Ltd., Pangang Group, Panzhihua 617023, Sichuan, China)

Abstract: The work roll bending force of the last stand of the four stands 6-Hi HC tandem cold rolling mill is usually in saturation state when the brightwork roll is used in the last stand. This production phenomenon leads to the lack of the ability to control the strip shape, and then the shape defects are difficult to eliminate or further reduce. In the meantime, these restrict the continuous improvement of the shape quality of the cold-rolled strip. Therefore, the crown data of some hot-rolled coils were collected, and then its distribution was computed. Combined with the distribution characteristics of the work roll bending force of the first three stands, the relationship between the hot-rolled strip crown and the shape of the loaded roll gap and its impact on the work roll bending force was analyzed. Meanwhile, the influence of the online adjustment method to reduce the work roll bending force by using the negative displacement of intermediate roll on the surface quality of strip was also analyzed. On these bases, a control strategy of using a multi-section positive crown work roll was proposed to solve the saturation of the work roll bending force of the last stand. With the help of analyzing the influence of work roll profile parameters on the strip shape, the optimized parameters of sixth-order polynomial work roll were finally obtained through several online crown work roll rolling tests. In addition, the test results also showed that using five sections of positive crown work roll in the last stand can increase the adjustment ability of the work roll bending and reduce the negative displacement of the intermediate roll. This phenomenon can effectively solve the problem of the saturation of the work roll bending force of the last

stand and improve the quality of the strip shape's quality.

Key words: HC mill, roll bending, roll shifting, hot-rolled strip crown, work roll contour

0 引言

攀钢集团攀枝花钢铁有限公司冷轧厂采用四机架六辊 HC 轧机生产冷轧板卷、热镀锌板卷、彩涂卷、冷硬卷四大系列近百个不同规格的产品,产品广泛应用于家电、建筑、门业、汽摩配等制造行业^[1]。HC 轧机是在四辊轧机的基础上增加一对中间辊,且中间辊可沿轧辊轴向移动,可改变工作辊和支撑辊的接触应力状态,消除有害的接触应力,使工作辊弯曲减小,具有良好的板凸度和平直度控制能力。近年来用户对板形质量的要求不断提高,其中门业用户普遍要求浪形高度不大于 2 mm,而冷轧实际板形大多在 ± 10 IU(相当于不平度 0.64%)^[2],普冷产品浪形高度多数也在 2 mm 以上,板形质量提升的难点在于末机架弯辊力时常处于饱和状态,工作辊

弯辊缺乏调控余量,导致板形缺陷很难消除或降低。为此,攀钢立项开展 HC 轧机板形质量攻关,针对末机架弯辊控制优化了工作辊辊型,通过理论研究、仿真模拟和工业试验,大幅度降低了末机架工作辊弯辊力,增强了板形调控能力,板形质量明显改善。

1 弯辊力饱和现象

对末机架工作辊为平辊时轧制的 PDA 数据进行分析,可以发现在轧制出口厚度 1.0 mm 及以下规格时,工作辊弯辊力处于 15 MPa 以上的轧制时间高达 50% 以上,如图 1 所示。由于现场工作辊弯辊最大工作压力为 18 MPa,末机架弯辊力长期持续处于极限压力位,一方面增加了设备的工作负荷,容易产生弯辊缸内泄问题,另外也直接导致板形调控能力不足。

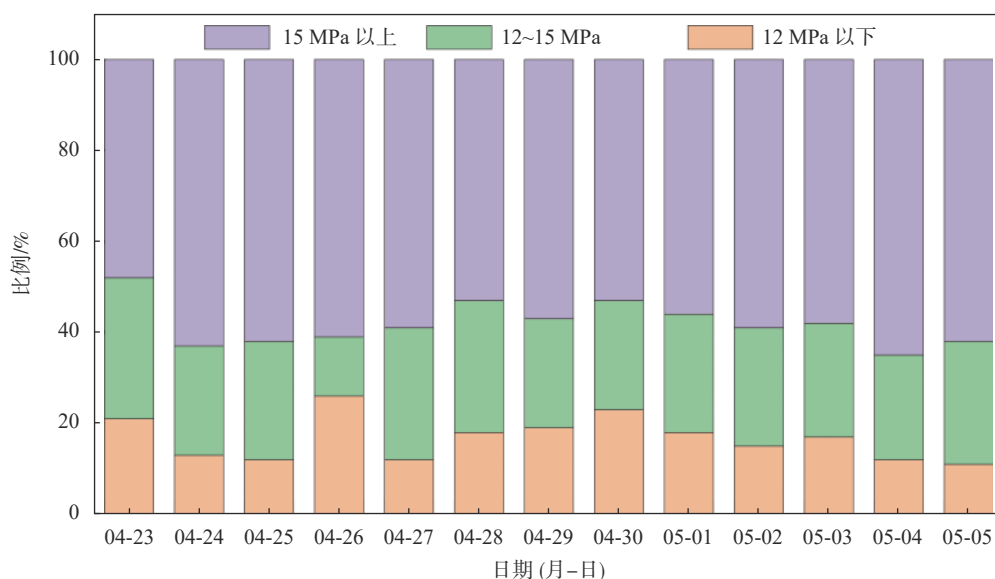


图 1 平辊轧制薄规格时工作辊弯辊力分布

Fig. 1 Bending force distribution of work rolls when rolling thin gauges with flat rolls

对现场 459 卷热轧来料凸度进行统计(见图 2),发现热轧来料凸度整体偏小,热轧凸度目标控制范围为 30 ~ 70 μm ,而统计卷凸度均值为 37.7 μm ,中位数为 33 μm ,大于 70 μm 和小于 30 μm 的比例分别为 1.31% 和 38.56%,介于 30 ~ 70 μm 的比例为 60.13%。结果表明,热轧来料凸度控制总体偏小、分布又较广的特点,反映出热轧凸度控制能力偏弱。

另外,在酸洗出口观察热轧板形多为边浪,操作工为防止轧件跑偏,常在 S1 机架施加 12 MPa 左右的正弯以获得微中浪,S2 和 S3 机架为防止边裂,弯辊力一般设置在 5 MPa 左右,最终在 S4 机架入口形成较为复杂的来料断面形状,与 S4 机架的承载辊缝形状不匹配,容易产生边浪,如图 3 所示。因此末机架常施加大弯辊力来减轻边浪^[3]。

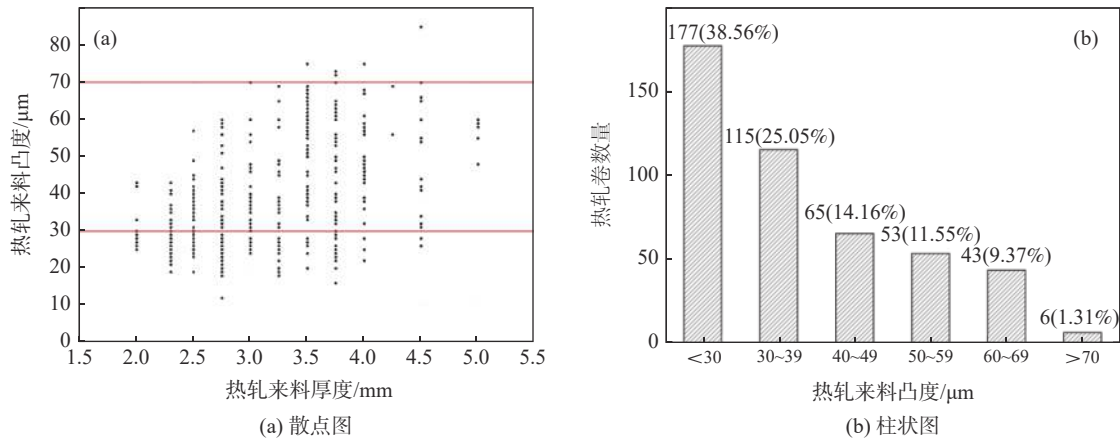


图 2 热轧来料凸度统计

Fig. 2 The crown statistics of the hot rolled material

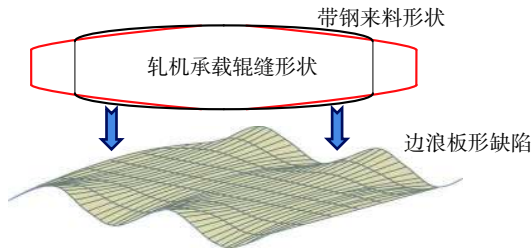


图 3 带钢来料与末机架承载辊缝形状

Fig. 3 Strip steel incoming material and the shape of the roll gap of the final frame

末机架弯辊力达到饱和时,现场也常采用中间辊负窜的方法来降低弯辊力,即将中间辊窜入端窜到板宽以内(见图 4),但窜入量不能太大,否则容易引起工作辊局部磨损。在目前依据工作辊辊期由宽到窄编排轧制计划的情形下,虽然不易引起辊期内钢卷外观质量,但容易造成下一辊期轧制宽规格带钢时表面出现宽窄印缺陷。

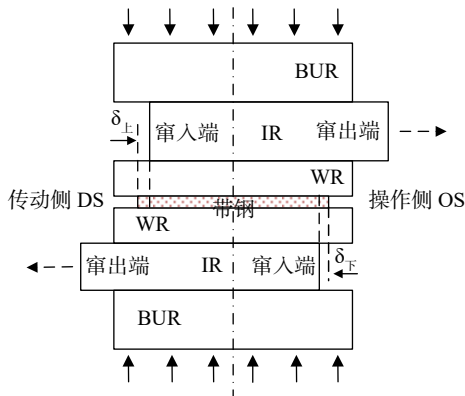


图 4 中间辊负窜示意

Fig. 4 Schematic diagram of the negative channel of the middle roller

2 工作辊辊型设计

为消除末机架工作辊弯辊力饱和,减小中间辊

负窜现象,同时增大弯辊力调控范围以提升板形控制水平^[4],特将末机架工作辊辊型设计为“五段式凸度辊”,如图 5 所示。辊型参数由中部凸度 C_1 、边部凸度 C_2 、端部凸度 C_3 及相应的长度参数 L_1 、 L_2 和 L_3 构成。其中中部凸度 C_1 用于控制中浪和肋浪,边部凸度 C_2 用于控制肋浪和边浪,端部凸度 C_3 用于控制边浪^[5], L_3 实为工作辊辊面长度, C_1 、 C_2 和 C_3 凸度值是根据设计经验并结合影响函数法来确定初值, L_1 和 L_2 初值是利用 2020 年现场板形历史数据,通过基于网格和密度的数据聚类方法^[6] 确定出双肋浪作用范围而给出的。工作辊辊型参数通过多轮在线辊型试验和板形指标改善效果判定进行持续优化并最终定型。

为使上述五段式辊型连续光滑,结合现场磨床的辊型加工能力,根据图 5 中七个特征点的坐标,将辊型拟合为六次多项式曲线。首先以 $(0, C_3)$, $((L_3-L_2)/2, C_2)$, (L_3, C_3) 三点构造二次函数 $y' = a_2'x^2 + a_1'x + a_0'$, 以 $((L_3-L_2)/2, C_2)$, $((L_3-L_1)/2, C_1)$, $((L_3+L_2)/2, C_2)$ 三点构造二次函数 $y'' = a_2''x^2 + a_1''x + a_0''$, 以 $((L_3-L_1)/2, C_1)$, $(L_3/2, 0)$, $((L_3+L_1)/2, C_1)$ 三点构造二次函数 $y''' = a_2'''x^2 + a_1'''x + a_0'''$;接着在辊面长度范围 $[0, (L_3-L_2)/2]$ 和 $[(L_3+L_2)/2, L_3]$ 内分别以二次函数 y' 均匀生成 N 组数据,在 $[(L_3-L_2)/2, (L_3-L_1)/2]$ 和 $[(L_3+L_1)/2, (L_3+L_2)/2]$ 长度范围内分别以二次函数 y'' 均匀生成 N 组数据,在 $[(L_3-L_1)/2, (L_3+L_1)/2]$ 长度范围内以二次函数 y''' 均匀生成 $2N$ 组数据;最后采用最小二乘法将上述 $6N$ 组数据进行六次多项式拟合,即:

$$y = a_6x^6 + a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (1)$$

式中, y 为工作辊半径差, x 为工作辊辊面长度横向坐标, $a_0 \sim a_6$ 为回归系数。

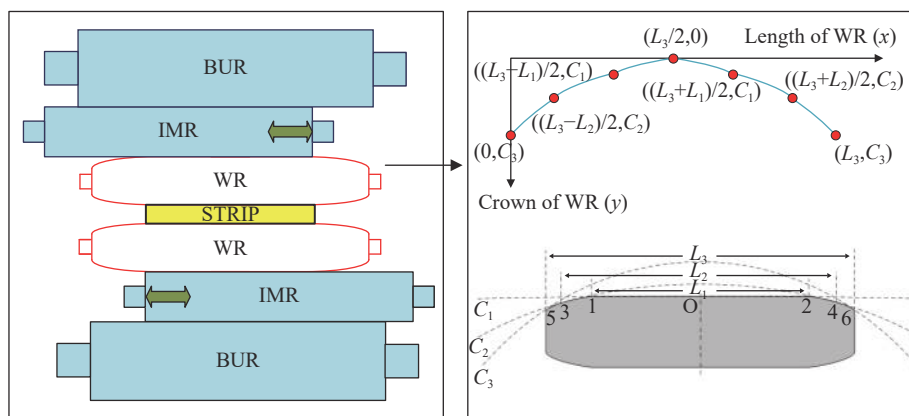


图5 多段式工作辊辊型示意

Fig. 5 Schematic diagram of multi-segment work roll profile

3 辊型参数对板形的影响分析

为掌握凸度辊型参数变化对板形的影响,基于正交试验法确定辊型参数的变化范围(见表1),对每一组辊型参数可采用影响函数法^[7-8],计算出如表2所示的轧制参数下的板形变化,如图6所示。

表1 辊型参数变化范围

Table 1 Variation range of roll contour parameters

中部凸度 $C_1/\mu\text{m}$	边部凸度 $C_2/\mu\text{m}$	端部凸度 $C_3/\mu\text{m}$	长度 L_1/mm	长度 L_2/mm
1 ~ 9	10 ~ 30	40 ~ 80	600 ~ 850	900 ~ 1 100

表2 板形计算用轧制参数示例

Table 2 Rolling parameters for flatness calculation

轧制速度/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	摩擦系数	前张力/kN	后张力/kN	入口厚度/mm	出口厚度/mm	宽度/mm	工作辊弯辊力/MPa	中间辊窜辊/mm
850	0.05	21	120	0.65	0.52	1 010	5	20

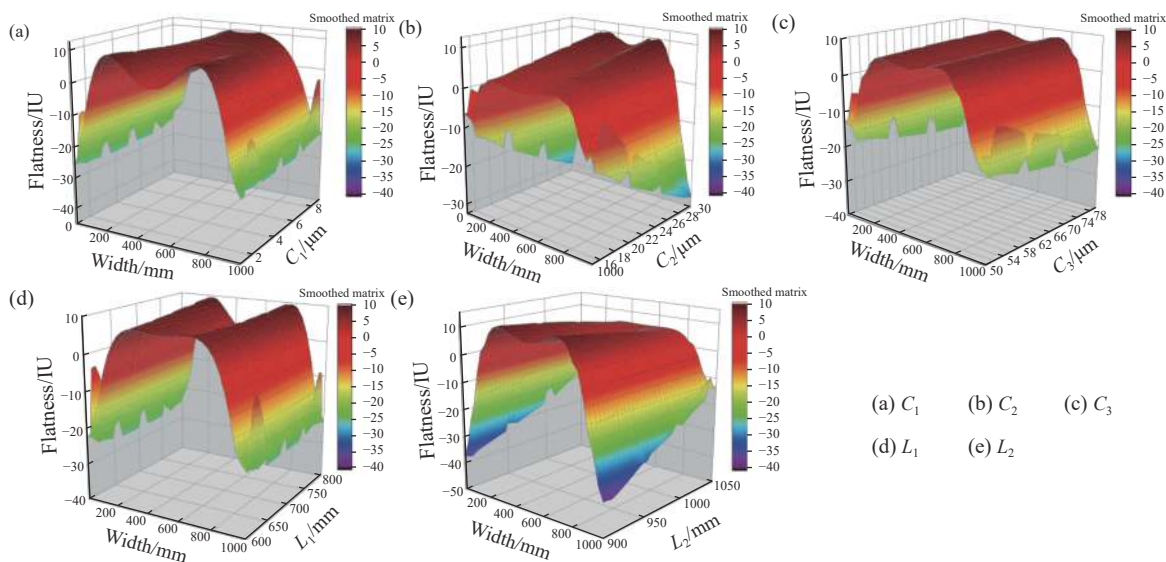


图6 辊型参数变化对板形的影响

Fig. 6 The influence of the change of roll shape parameters on the shape of the plate

由图6(a)可见,当其他参数不变时,随着中部凸度 C_1 值的增大,带钢板形逐渐由双肋浪向中浪转变,带钢边部浪形无明显变化;由图6(b)可知,随着边部凸度 C_2 值的增大,双肋浪形状没有发生变化,但中部和边部压应力明显增大,为保持应力平衡,端部拉应力也逐渐增大;由图6(c)可知,端部凸度 C_3

对中浪和肋浪均无明显影响,随着 C_3 值的增大,端部平直度负值逐渐减小,即拉应力逐渐增大;由图6(d)可知,随着 L_1 长度的增加,带钢板形逐渐由中浪演变为肋浪,端部无明显变化;由图6(e)可知, L_2 长度的变化并没有改变肋浪形状,但随着 L_2 值的增大,肋浪浪高逐渐减小并且边浪开始增大。

综上所述, 辊型参数 C_1 和 L_1 可调控中浪缺陷, C_1 、 C_2 、 L_1 和 L_2 可调控肋浪缺陷, C_2 、 C_3 和 L_2 可对边浪进行调控, 而轧制品种、轧制厚度和宽度规格的变化将产生不同的板形缺陷, 因此需要通过辊型试验, 根据板形指标变化情况来确定较佳的辊型参数。

4 在线辊型试验

在线辊型试验时, 末机架工作辊曾选用最大凸度为 $20\ \mu\text{m}$ 的六次多项式辊型先后对 78 卷罩退料和 116 卷镀锌料进行了三个辊期轧制, 轧制厚度为 $0.5 \sim 2.5\ \text{mm}$, 轧制宽度为 $840 \sim 1\ 142\ \text{mm}$ 。同时也收集了末机架工作辊采用平辊轧制的 53 卷薄规格钢卷(轧制厚度 $\leq 1.0\ \text{mm}$, 宽度 $930 \sim 1\ 059\ \text{mm}$) 和 37 卷厚规格钢卷(轧制厚度 $> 1.0\ \text{mm}$, 宽度 $905 \sim 1\ 055\ \text{mm}$) 的轧制参数和板形数据。对凸度辊与平辊轧制时的末机架工作辊弯辊力变化范围进

行统计和对比, 如图 7 所示。图中 A、B 分别代表平辊和凸度辊轧制厚度大于 $1.0\ \text{mm}$ 的厚规格带钢情形, 而 C 和 D 分别代表平辊和凸度辊轧制厚度小于等于 $1.0\ \text{mm}$ 的薄规格带钢情形。

由图 7(a) 可见, 相较平辊而言, 利用凸辊轧制薄规格带钢时 S4 机架弯辊力降低 $3 \sim 7\ \text{MPa}$, 轧制厚规格带钢时弯辊力减小 $3 \sim 6\ \text{MPa}$ 。显然, 凸度工作辊的应用改变了末机架辊缝区边部形状, 可降低带钢边部的压应力, 从而富余弯辊力, 可确保工作辊弯辊处于较佳的调节位置, 保持对板形缺陷的调控能力。由图 7(b) 可见, 采用凸度工作辊后, 中间辊窜辊值也相对增大了 $10 \sim 20\ \text{mm}$, 这也表明操作工通过中间辊负窜来富余弯辊力的情形也降低了, 末机架窜辊值更多设置在正常窜辊位置(半板宽 $+20\ \text{mm}$), 有利于降低工作辊局部磨损, 使得工作辊磨损更均匀, 也就避免了板面宽窄印缺陷的产生。

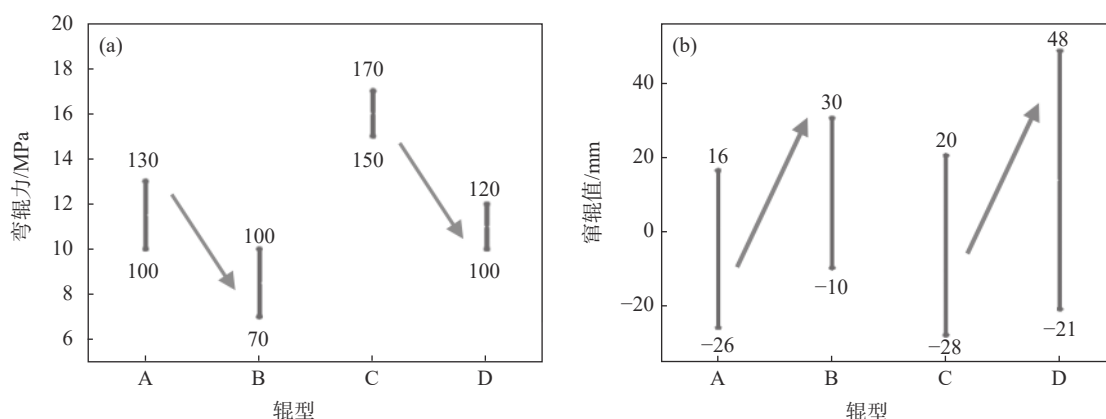


图 7 平辊与凸辊轧制力与窜辊值对比

Fig. 7 Comparison of rolling force and roll shifting value between flat roll and convex roll

5 结论

1) HC 冷轧机组末机架弯辊力饱和主要是因为热轧来料凸度偏小, 使得来料形状与承载辊缝形状不匹配, 为避免边浪的产生, 对工作辊施加较大的初始弯辊力, 导致板形缺陷调控时弯辊力明显不足。

2) 将末机架工作辊设计为五段式变接触凸度辊型, 采用凸度参数 C_1 、 C_2 、 C_3 , 长度参数 L_1 和 L_2 来

表征辊型, 可显著增强辊型调整的柔性。辊型参数 C_1 、 L_1 主要影响带钢中浪缺陷, C_1 、 L_1 、 C_2 、 L_2 主要影响带钢肋浪缺陷, C_2 、 C_3 主要影响带钢边浪缺陷。

3) 在末机架应用凸度工作辊, 可明显增大工作辊弯辊力的调节能力, 消除弯辊力饱和现象, 同时可促使中间辊窜辊更多设置在正常位置, 有利于降低工作辊局部磨损, 避免板面宽窄印缺陷的产生。

参考文献

- [1] Zhou Jun, Dai Jianhua. The cold rolling mill of Pan steel and vanadium increases new product development[J]. Sichuan Metallurgy, 2011, 33(2): 38.
(周军, 代建华. 攀钢钒冷轧厂加大新产品开发力度[J]. 四川冶金, 2011, 33(2): 38.)