

全浮动芯棒连轧管机组 轧件与芯棒速度及摩擦系数研究(下)

赵志毅¹, 董凯¹, 余勇², 赵佳¹, 潘峰², 周晓岚²

(1. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 宝山钢铁股份有限公司钢管分公司, 上海 201900)

摘要: 对宝山钢铁股份有限公司的全浮动芯棒连轧管机组各机架轧制压力、芯棒运动速度等一系列参数进行了综合测试, 获得了轧件速度曲线, 并探讨了轧件与芯棒速度之间的关系; 分析了轧件与芯棒间的摩擦状态, 并推算出两者间在各机架处的摩擦系数(为 0.033~0.074), 该系数沿轧制方向呈增大的趋势。以上结果为清楚认识连轧管过程中金属变形规律和芯棒摩擦作用机理提供了依据。

关键词: 连轧管; 轧制压力; 芯棒速度; 摩擦系数

中图分类号: TG33 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-2311(2007)01-0016-05

Study on Workpiece vs Mandrel Velocity and Friction Factor Relationship of Fully-floating Mandrel Mill(Part III)

Zhao Zhiyi¹, Dong Kai¹, Yu Yong², Zhao Jia¹, Pan Feng², Zhou Xiaolan²

(1. College of Material Science and Engineering, Beijing S & T University, Beijing 100083, China;

2. Steel Tube Co., Baoshan I & S Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: An overall measurement of all the relevant parameters of each roll stand of the fully-floating mandrel pipe mill located at Baoshan I & S Co., Ltd., including rolling force and mandrel velocity, etc., resulting in the workpiece speed characteristics. Furthermore, the workpiece vs mandrel velocity relationship is studied, and the friction condition between the workpiece and the mandrel is analyzed. It is identified that the friction factor of the two at each individual roll stand is 0.033 ~ 0.074, and the factor goes up along the rolling direction. The conclusion provides basis for identifying the metal deformation law and the mandrel friction effect mechanism during the mandrel mill rolling process.

Key words: Mandrel pipe mill; Rolling force; Mandrel velocity; Friction factor

4 轧件与芯棒间摩擦系数计算

轧件与芯棒间摩擦系数的确定对于连轧过程模拟仿真具有十分重要的意义, 通过对现场测试所得数据的分析总结, 并结合文献[2, 5, 6, 7]的理论指导, 归纳出了符合现场实际情况的轧件与芯棒间摩擦系数的计算方法。其步骤如下:

(1) 通过测得的芯棒速度曲线, 结合物理定律, 得到作用于芯棒上的总摩擦力曲线;

(2) 通过实测的轧制压力和轧件与芯棒接触面

积, 计算各机架作用于芯棒上的压力;

(3) 根据一定的假设条件, 对第 1 机架咬入时的轧件与芯棒速度进行分析, 找出顺轧向与逆轧向摩擦力的关系, 计算摩擦系数;

(4) 利用稳轧时前后机架轧制压力的关系与第 1 机架的摩擦系数, 计算其他各机架的摩擦系数。

4.1 符号

F_c —— 总摩擦力, N;

m —— 芯棒质量, kg;

k —— 芯棒的加速度, m/s²;

A_0 —— 轧辊与轧件的全部接触面积, mm²;

A_1 —— 轧件与芯棒的全部接触面积, mm²;

赵志毅(1962-), 男, 副教授, 副主任, 主要从事压力加工工艺研究。

- L_s —— 该孔型出口处包容弧长度, mm;
- θ_s —— 轧件与孔型分离处的流动角, ($^\circ$);
- \bar{x} —— 轧件与孔型顶部圆弧同侧壁圆弧的交点接触的坐标, mm;
- x_A —— 轧件顶部与孔型接触点的坐标, mm;
- x_B —— 轧件与芯棒接触点的坐标, mm;
- α_s —— 侧壁角, ($^\circ$);
- $r_{\text{轧辊}}$ —— 轧辊辊身半径, mm;
- $r_{\text{芯棒}}$ —— 芯棒半径, mm;
- r_c —— 孔型顶部半径, mm;
- R_a —— 在前一孔型宽度钢管半径, mm;
- R_b —— 在前一孔型顶部钢管半径, mm;
- a_{cp} —— 变形区的平均高度, mm;
- b_{cp} —— 变形区的平均宽度, mm;
- S_a —— 在前一孔型宽度钢管壁厚, mm;
- S_b —— 在前一孔型顶部钢管壁厚, mm;
- R_A —— 在当前孔型宽度钢管半径, mm;
- R_B —— 当前孔型顶部钢管半径, mm;
- S_A —— 在当前孔型宽度钢管壁厚, mm;
- S_B —— 在当前孔型顶部钢管壁厚, mm;
- S_f —— 在该孔型内刚刚接触时的壁厚, mm;
- $P_{\text{轧机}}$ —— 轧件所受轧制压力, N;
- $P_{\text{芯棒}}$ —— 轧件对芯棒的压力, N;
- $F_{\text{总max}}$ —— 最大总摩擦力, N;
- F_+ —— 正向摩擦力, N;
- F_- —— 反向摩擦力, N;
- P_+ —— 正向摩擦力对应的正压力, N;
- P_- —— 反向摩擦力对应的正压力, N;
- A_+ —— 正向摩擦力对应接触投影面积, mm^2 ;
- A_- —— 反向摩擦力对应接触投影面积, mm^2 ;
- $f_{\text{前平均}}$ —— 前 3 机架轧件对芯棒平均摩擦系数;
- $f_{\text{后平均}}$ —— 后 5 机架轧件对芯棒平均摩擦系数;
- $P_1 \sim P_8$ —— 1~8 机架轧制压力, N;
- $f_1 \sim f_8$ —— 1~8 机架摩擦系数。

4.2 总摩擦力曲线的获得

芯棒上的摩擦力由多个方向叠加而成, 这里将各处的摩擦力进行加和, 称为总摩擦力。根据力学中滑动摩擦的理论可知, 研究总摩擦力可以通过研究芯棒的运动状态来进行, 即存在以下关系式:

$$F_c = m \cdot k \quad (1)$$

通过测速装置得到了芯棒速度曲线, 图中曲线的采样频率为 500 Hz, 相当于每 0.002 s 采集一个速度点, 因时间间隔足够小, 可以看成每两点之间

为恒加速度运动, 从而经计算可得到加速度。以曲线上任意两点为例, 计算过程如下:

$$k = \frac{v_1 - v_0}{t} = \frac{2.419\ 97 - 2.404\ 13}{0.002} = 7.92 (\text{m/s}^2)$$

将曲线上每两点计算一次加速度, 并结合式(1)以及芯棒的质量, 就可以绘制咬入阶段芯棒表面总摩擦力曲线, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 芯棒的总摩擦力曲线在第 1 机架咬入之后至稳定轧制状态, 存在若干个波峰, 其原因是: 芯棒速度的提升, 导致各机架接触面上的摩擦力方向不断发生改变, 从而使总摩擦力呈波浪形变化。

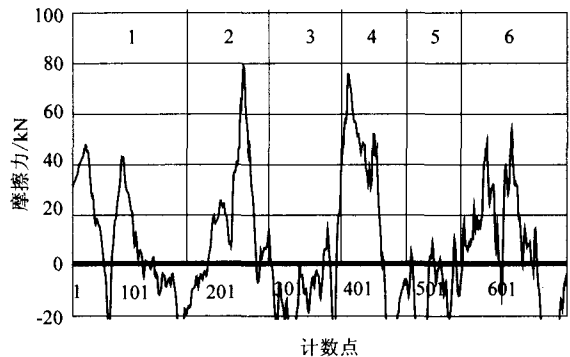


图 9 咬入阶段芯棒表面总摩擦力曲线(1~6 指机架号)

4.3 轧件对芯棒施加压力的计算

4.3.1 轧辊与轧件的全部接触面积

轧辊与轧件的全部接触面积可按下式计算^[5]:

$$A_0 = \frac{L_s}{\theta_s} \left\{ \frac{1}{3} (\bar{x} + 2x_A) \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_s \right) - \frac{\bar{x}}{5} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_s \right) + \frac{4\theta_s^4 \bar{x}}{5(\theta_s + \frac{\pi}{2} - \alpha_s) [\theta_s^2 + (\frac{\pi}{2} - \alpha_s)^2]} \right\} \quad (2)$$

其中, x_A 由下式计算获得:

$$x_A = \sqrt{2(r_{\text{轧辊}} - r_c)(R_b - r_c)} \quad (3)$$

\bar{x} 的取值存在以下两种情况: 轧件与轧辊开始接触是在孔型顶部; 轧件与轧辊开始接触是在侧壁。

(1) 轧件与轧辊开始接触是在孔型顶部。轧件与孔型顶部圆弧同侧壁圆弧的交点接触时, 轧件的形状已经发生变化, 用具有以下平均尺寸的椭圆形圆柱体的高和宽来代替原轧件截面, 即:

$$a_{\text{cp}} = R_a + \frac{R_b - r_{\text{芯棒}} - S_f}{2}; \quad b_{\text{cp}} = \frac{R_b - r_{\text{芯棒}} - S_f}{2} \quad (4)$$

将 a_{cp} 、 b_{cp} 和 $\theta_s = \frac{\pi}{2} - \alpha_s$ 代入下式, 计算 \bar{x} :

$$\bar{x} = \left\{ \frac{2(r_{\text{轧辊}} - r_c \sin \alpha_s)}{\sin \alpha_s} \right\} \times$$

$$\left[\frac{a_{cp} b_{cp}}{\sqrt{(a_{cp} \sin \alpha_s)^2 + (b_{cp} \cos \alpha_s)^2}} - r_c \right]^{1/2} \quad (5)$$

(2) 轧件与轧辊开始接触是在侧壁。由于轧件的形状还未发生改变, 只需将未被变形的轧件尺寸代入式(5)计算即可。

在计算全部接触面积时, 应首先确定接触点的位置(在孔型顶部或是侧壁上), 必须预先用未被变形的尺寸按式(3)求出 x_A , 按式(5)求出 \bar{x} 。如果 $x_A \geq \bar{x}$, 则按步骤(1)进行计算; 如果 $x_A \leq \bar{x}$, 则按步骤(2)进行计算。计算过程相关数据与结果见表 5。

表 5 各机架轧辊与轧件的全部接触的面积及相关数据

机架号	轧辊直径 /mm	轧件轧前尺寸/mm				轧件轧后尺寸/mm				\bar{x} /mm	x_A /mm	A_0 /mm ²
		R_a	R_b	S_a	S_b	R_A	R_B	S_A	S_B			
1	523.4	89.5	89.50	15.50	15.50	93.75	76.1	15.50	7.85	94.2	70.5	17 459
2	531.2	76.1	93.75	7.85	15.50	84.60	75.8	7.85	7.55	74.4	82.5	15 262
3	516.3	75.8	84.60	7.55	7.85	82.80	74.8	7.55	6.55	59.3	59.9	10 955
4	577.9	74.8	82.80	6.55	7.55	80.30	74.8	6.55	6.55	48.4	58.5	7 669
5	505.8	74.8	80.30	6.55	6.55	78.80	74.5	6.55	6.25	43.0	45.5	7 366
6	599.8	74.5	78.80	6.25	6.55	77.00	74.5	6.25	6.25	39.9	44.0	6 230

4.3.2 芯棒上的接触面积

芯棒上的接触面积同样可以利用式(2)进行计算, 只需将其中的 x_A 用 x_B 替换、 L_s/θ_s 用 L_0/θ_0 替换、 θ_s 用 θ_0 替换即可。其中 x_B 为减径区开始坐标, θ_0 为分离点对应的流动角。计算结果见表 6^[5,6]。 x_B 的计算式为:

$$x_B = \sqrt{2(r_{\text{轧辊}} - r_c)(r_{\text{芯棒}} + S_f - r_c)} \quad (6)$$

表 6 各机架芯棒接触面积计算结果

机架号	L_0 /mm	θ_0 /(°)	x_B /mm	A_1 /mm ²
1	97.9	71.4	53.3	10 570
2	67.2	50.0	54.9	8 236
3	65.7	50.0	21.8	4 505
4	59.0	45.0	20.7	3 457
5	62.4	48.0	10.3	2 646
6	62.4	48.0	11.6	2 624

4.3.3 轧件对芯棒的压力

在各个机架中, 轧件对芯棒的压力与轧制压力可以建立的关系为:

$$P_{\text{芯棒}} = P_{\text{轧机}} \times \frac{A_1}{A_0} \quad (7)$$

应用在宝钢现场测得的各机架轧制压力曲线, 结合式(7), 可以绘制出相应的芯棒受力曲线, 如图 10 所示。

4.4 计算过程

4.4.1 假设条件

(1) 在变形区内轧件的速度线性增加;

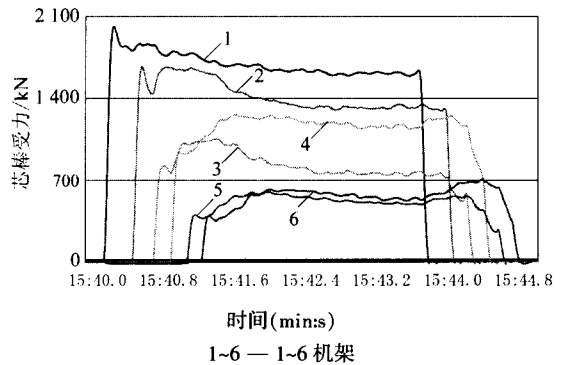


图 10 芯棒受力曲线

- (2) 轧件与芯棒的接触投影面积为矩形;
- (3) 轧件作用于芯棒的正压力在投影面积上均匀分布;
- (4) 轧件与芯棒间的摩擦系数沿轧制方向线性变化。

4.4.2 计算第 1 机架摩擦系数

在轧制过程中, 第 1 机架变形区内轧件的流动速度是连续变化的, 即从入口到出口的速度由 1.88 m/s 增加到 3.14 m/s, 轧件在减壁区入口处的速度要高于 1.88 m/s。经过对轧制压力曲线与芯棒速度曲线的对比分析, 确定了轧件在减壁区入口处的速度为 2.19 m/s, 并假设这一速度变化呈直线, 此时芯棒作为刚性体只能存在一个速度, 并介于 2.19 m/s 与 3.14 m/s 之间。因此, 轧件与芯棒速度相等的中性面一定存在于入口与出口之间 (如图 11 所示)。芯棒速度高于轧件速度的接触部分, 表面摩擦力方向与芯棒运动方向相反, 起阻碍作用; 芯棒

速度低于轧件速度的接触部分, 表面摩擦力方向与芯棒运动方向相同, 起推动作用。然而在第 1 机架咬入结束时刻正是正向摩擦力与反向摩擦力相差最大的时刻, 即存在一个总摩擦力的峰值, 这一峰值点从总摩擦力曲线(图 9)上可以得到证实。由于使用钢丝绳测得的芯棒速度会存在细微的滞后现象, 因此确定第 2 峰值为咬入阶段总摩擦力的最大点, 即 $F_{\text{总max}}=43\ 177\ \text{N}$, 相对应的芯棒速度为 $2.51\ \text{m/s}$, 它与入口、出口的轧件速度关系如图 11 所示^[7]。

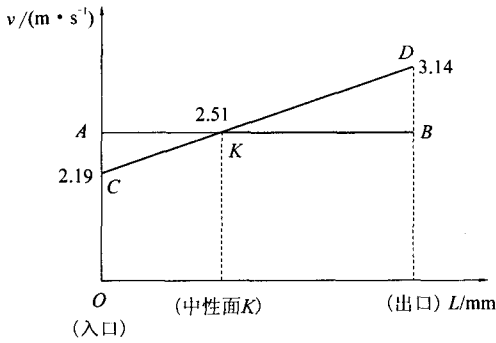


图 11 第 1 机架变形区轧件速度分布

由于轧件施加于芯棒正压力在投影面上均匀分布, 则可以得到正向摩擦力 F_+ 与反向摩擦力 F_- 的关系为:

$$F_+/F_- = P_+/P_- = A_+/A_- = KB/KA = DB/AC$$

$$= (3.14 - 2.51) / (2.51 - 2.19) = 0.63 / 0.32$$

总摩擦力应等于正向与反向摩擦力的差值, 此时上下轧辊施加的正压力均为 $2\ 010\ \text{kN}$, 所以有:

$$F_{\text{总max}} = F_+ - F_- = 2f_1 \times (P_+ - P_-) = 2f_1 \times [P_{\text{芯棒}} \times 0.63 \div (0.63 + 0.32) - P_{\text{芯棒}} \times 0.32 \div (0.63 + 0.32)]$$

$$= 2f_1 \times 2\ 010\ 000 \times (0.63 - 0.32) \div (0.63 + 0.32)$$

$$= 43\ 177\ (\text{N})$$

解得 $f_1 = 0.033$

4.4.3 计算其他机架摩擦系数

在稳定轧制阶段, 根据实测的轧制压力, 经换算, 得到 1~6 机架作用于芯棒的正压力, 其平均值分别为: $P_1=1\ 600\ \text{kN}$ 、 $P_2=1\ 320\ \text{kN}$ 、 $P_3=750\ \text{kN}$ 、 $P_4=1\ 150\ \text{kN}$ 、 $P_5=500\ \text{kN}$ 、 $P_6=530\ \text{kN}$, 而第 7、8 机架经另一组实测得到: $P_7=50\ \text{kN}$ 、 $P_8=30\ \text{kN}$ 。由于实测的稳定轧制时芯棒速度与第 3 机架出口速度相近似, 可以认为前 3 个机架芯棒摩擦力与轧制方向相反, 后 5 个机架芯棒摩擦力与轧制方向相同, 则可以得到以下等式:

$$f_{\text{前平均}}(P_1+P_2+P_3) = f_{\text{后平均}}(P_4+P_5+P_6+P_7+P_8) \quad (8)$$

将各项数据代入式(8)可以得到:

$$f_{\text{后平均}} / f_{\text{前平均}} = (P_1+P_2+P_3) \div (P_4+P_5+P_6+P_7+P_8)$$

$$= (1\ 600+1\ 320+750) \div (1\ 150+500+530+50+30)$$

$$\approx 1.6$$

由此可以推断, 轧件与芯棒间的摩擦系数沿轧制方向增大, 即 $f_8 > f_7 \cdots > f_1$, 根据假设, 可以得到关系式:

$$f_{\text{前平均}} = (f_1 + f_2 + f_3) \div 3 = f_2$$

$$f_{\text{后平均}} = (f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_8) \div 5 = f_6$$

$$f_6 / f_2 = 1.6$$

设 $f_2 = f$, 则通过直线增大趋势可以得到 $f_1 = 0.85f$ 、 $f_3 = 1.15f$ 、 $f_4 = 1.3f$ 、 $f_5 = 1.45f$ 、 $f_6 = 1.6f$ 、 $f_7 = 1.75f$ 、 $f_8 = 1.9f$ 。

由 $f_1 = 0.033$, 则可以得到其他机架的摩擦系数, 见表 7。

表 7 各机架摩擦系数

机架号	1	2	3	4	5	6	7	8
摩擦系数	0.033	0.039	0.045	0.050	0.056	0.062	0.068	0.074

4.5 摩擦系数趋势分析

计算得到的摩擦系数从入口到出口机架呈现增大的趋势, 分析其原因: 在稳定轧制阶段, 芯棒前端已经过多机架的连续轧制(尤其在第 8 机架处, 芯棒已经过 7 道次轧制), 在每个轧制道次, 芯棒都会在较高的轧制压力下与轧件发生相对滑动, 而此过程中芯棒表面的润滑剂会在高温情况下逐渐失去润滑作用, 两者间良好的润滑条件被破坏, 从而导致摩擦系数的增大。这一现象已在关于连轧管机轧管用润滑剂的相关研究中得到证实^[5]。

5 结论

(1) 在宝钢现场综合测试中使用的轧制压力传感器与芯棒测速装置, 均能适应宝钢的实际工作环境, 获得理想的测试结果, 为分析总结打下了良好的基础。

(2) 利用测得的第 1~6 机架轧制压力曲线, 处理后分别绘制出轧件前端咬入与尾端抛出的速度曲线, 并结合芯棒运动速度, 可以分析轧制过程中芯棒与轧件速度之间的相互关系。

(3) 在连续轧制过程中, 轧件对芯棒表面施加的摩擦力在各机架的具体情况不尽相同, 主要由中性面 K 所决定: 在导前机架中轧件速度高于芯棒速度, 摩擦力为正向(沿轧制压力方向为正); 在滞

后机架中轧件速度低于芯棒速度，摩擦力为负向。

(4) 利用第 1 机架咬入时轧件速度与芯棒速度，结合总摩擦力曲线，确定了顺轧向与逆轧向摩擦力的比例，从而计算出第 1 机架的摩擦系数为 0.033，之后利用稳轧时前后机架的轧制压力之间的关系，计算出其他各机架的摩擦系数为 0.033~0.074，并从入口到出口机架呈现增大的趋势。

6 参考文献

- [1] 张丕军, 卢于速. 连轧管“竹节”问题的研究[J]. 钢铁, 1995(2): 37-44.
[2] 王先进, 徐树成. 钢管连轧理论[M]. 北京: 冶金工业出

版社, 2005.

- [3] 卢于速, 蒋金梅, 傅晨光. 钢管生产工艺学简明教程[M]. 北京: 北京科技大学, 1985.
[4] 张之奇. 钢管[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001.
[5] 王北明译. 国外连轧钢管[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1978.
[6] 李连诗. 钢管塑性变形原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985.
[7] 兰兴昌, 刘宏民, 连家创. 连轧管芯棒速度及其摩擦对轧制过程影响的研究[J]. 钢铁, 1994(9): 29-33.

(续完)

(修定日期: 2006-09-09)

● 信息

美国奥林巴斯公司开发出精密超声波测厚仪

美国奥林巴斯公司开发出的 35、35HP、35DL 和 35DLHP 型手提超声波精密测厚仪能够对某些很难到达或接触不到的地方进行精确、反复测试，还能够计算和显示材料的声速以便确定材料的特性。

35DL、35DLHP 波型测试仪能够适时地显示波形。另外可调节型测厚仪在测试复杂断面时，可通过调整参数达到最佳效果，并可对数据进行实时冻结。这两种测厚仪可测量金属、塑料、玻璃、橡胶、铸件、玻璃纤维和复杂形状的组合体，并配置了数字字母混合数据记录仪，便于操作人员编码存储、读取和传送厚度数据。35 和 35DL 波型测试仪可测量 0.15~500.00 mm 厚的金属及最小厚度为 0.08 mm 的塑料。

35HP 和 35DLHP 波型测试仪专用于测量厚度为 1.25~500.00 mm 的玻璃纤维组合体、橡胶和铸件等，而这些材料是用传统的超声波测试仪无法测量的，其独有的“自动回忆功能”具有选择和取出、存储标准和前期设置数据，操作者可根据不同用途进行切换。其他像“报警”和“差分”功能在很多复杂情况下有较理想的结果。

(攀钢集团成都钢铁有限责任公司 张立)

俄罗斯钢管冶金公司引进钢管热处理设备

俄罗斯钢管冶金公司为提高所属企业按国际先进标准生产热处理钢管的数量，于 2006 年 8 月 7 日同世界上主要的钢管热处理设备制造商——意大利 Olivotto Ferre 公司签订了总金额为 5 000 万欧元的钢管热处理设备的引进合同。该合同规定，意大利 Olivotto Ferre 公司将向俄罗斯钢管冶金公司下属的伏尔加钢管厂、辛那尔钢管厂、塔干罗格钢厂提供钢管热处理设备，其中提供给辛那尔钢管厂的设备在 2007 年 11 月份建成投产；伏尔加钢管厂的在 2007 年 12 月份建成投产；塔干罗格钢厂的在 2008 年初建成投产。待这批先进的钢管热处理设备建成投产后，俄罗斯钢管冶金公司按国际先进标准生产热处理钢管的数量将增加 74 万 t，几乎是该公司现有热处理钢管生产能力的 1 倍。

(攀钢集团成都钢铁有限责任公司 杜厚益)

世界最大钢管生产厂商 Tenaris 公司“Tenaris 焊接中心”举行落成仪式

2006 年 11 月 8 日，世界最大钢管生产厂商 Tenaris 公司“焊接中心”举行落成仪式。“Tenaris 焊接中心”是 Tenaris 公司全球研发网络的一个组成部分。该中心坐落在墨西哥湾，靠近墨西哥国家石油公司(Pemex)基地，其地理位置对参与深水 and 超深水勘探工程项目的规划和实施非常有利。

“Tenaris 焊接中心”拥有世界一流的设备设施，聘用了 3 120 名高级专家，可开展各种类型的研发工作；特殊产品需求分析；有关焊接技术的研究；特殊产品的评价以及钢管生产工艺方面的改进等。

该焊接中心投入使用后，将进一步增强 Tenaris 公司全球研发网络的研究与开发能力，并有助于巩固 Tenaris 公司在开发世界最急需的高端钢管产品方面的领军地位。

(攀钢集团成都钢铁有限责任公司 高少华)