

· 工艺技术 ·

### 套管 TG22 热轧钢带研究及产业化

武利平<sup>1,2</sup> 智建国<sup>2</sup> 刘青<sup>1</sup> 王少炳<sup>2</sup> 张江山<sup>1</sup>

(1 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083;2 包钢股份技术中心,包头 014010)

**摘要** 为了适应深井及超深井应用需求,通过设计化学成分及优化轧制工艺,开发一种兼备强度和低温冲击韧性的油气井用 TG22 热轧钢带。结果表明:采用化学成分设计为 Fe-0.24% C-0.20% Si-1.30% Mn-0.020% Nb 时,加热炉目标出钢温度 1 170 ℃、中间坯厚度 46 mm、终轧温度 830 ℃ 和卷取温度 570 ℃ 时,热轧钢带力学性能为 Rel 506 ~ 554 MPa、Rm 654 ~ 685 MPa、A<sub>50</sub>29% ~ 35%、Rel/Rm 0.75 ~ 0.82 及 KV<sub>2</sub>(-10 ℃) 45.5 ~ 63.6 J。

**关键词** 成分设计 热轧工艺 TG22 热轧钢带 力学性能

### Research and Industrialization of Hot Rolled Casing TG22

Wu Liping<sup>1,3</sup>, Zhi Jianguo<sup>2</sup>, Liu Qing<sup>1</sup>, Wang Shaobing<sup>3</sup> and Zhang Jiangshan<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 2 Centre of Technology, Baotou Iron and Steel Co Baotou 014010)

**Abstract** In order to adapt the application requirement for deep well and extradeep well, a combined strength and low temperature impact toughness of TG22 hot rolling steel pipes casing is developed by design of chemical composition and optimization of rolling process. The results indicated that the designed chemical composition is Fe-0.24% C-0.20% Si-1.30% Mn-0.020% Nb, the target temperature in the heating furnace is 1 170 ℃ and the intermediate slab thickness is 46 mm, the finishing rolling temperature is 830 ℃ with coiling at 570 ℃, the mechanical properties of strip are Rel 506 ~ 554 MPa, Rm 654 ~ 685 MPa, A<sub>50</sub>29% ~ 35%, Rel/Rm 0.75 ~ 0.82 and KV<sub>2</sub>(-10 ℃) 45.5 ~ 63.6 J.

**Material Index** Chemical Design, Hot Rolling Process, TG22 Hot Rolled Steel Strip, Mechanical Properties

包钢股份公司依托 2 250 mm 热轧生产线先进的在线控轧控冷特点,开发一种低成本、强度高、横向低温冲击韧性高、使用寿命长和服役期安全系数高的深井及超深井用 TG22 热轧钢带产品,并已进入稳定批量化生产阶段。

100 ℃/s 时,卷取温度在 600 ℃ 左右,预计产品的最终显微组织由铁素体 + 珠光体 + 贝氏体组成。

首次制定试验钢 2 250 mm 热轧生产线的轧制工艺见表 2 所示。

#### 1 热轧钢带成分及生产工艺设计

#### 2 生产工艺流程

##### 1.1 化学成分

##### 2.1 冶炼工艺

产品采用中碳 + 合金成分并围绕产品后期服役过程机械性能可靠性和产品低成本原则,综合各元素的作用机理特点<sup>[1-6]</sup>,设计试验钢 TG22 的化学成分见表 1 所示。

##### 1.2 生产工艺

根据试验钢 TG22 化学成分,利用 JMatPro 材料相图及性能模拟软件模拟计算出产品的 CCT 曲线见图 1 所示。从图 1 可以看出,冷却速度在 10 ~

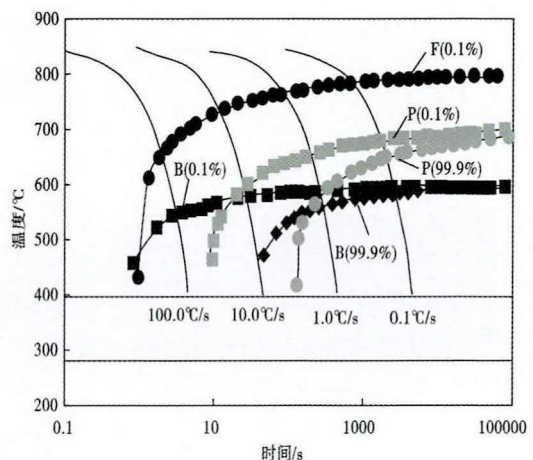


图 1 TG22 钢产品 CCT 变化曲线图  
Fig. 1 CCT curves of products of steel TG22

表 1 试验钢 TG22 化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested steels TG22/%

C	Si	Mn	P	S	Als	Nb	Ca
0.24	0.20	1.30	0.010	0.003	0.030	0.020	0.002 0

表 2 试验钢 TG22 轧制工艺  
Table 2 Rolled process of tested TG22 steels

铸坯厚度/mm	出钢温度/℃	轧制模式	粗轧末道次温度/℃	中间坯厚度/mm	精轧开轧温度/℃	终轧温度/℃	卷取温度/℃	成品厚度/mm
230	1 170 ± 15	3 + 5	1 000 ~ 1 100	40 ~ 55	980 ~ 1030	830 ± 15	610 ± 15	7.34

KR 脱硫 → 240 t 顶底复吹转炉 → LF 精炼 → 2 150 mm 板坯连铸。

## 2.2 轧制工艺

板坯加热 → 高压水除鳞 → 定宽压力机 → E1R1 粗轧机轧制 → E2R2 粗轧机轧制 → 飞剪 → 高压水除鳞 → F1 ~ F7 精轧机轧制 → 层流冷却 → 卷取 → 取样、检验。

## 3 试验结果

由于首次试制产品横向低温冲击韧性低于标准要求,又进行第二次工艺优化试制。通过两次试制结果,开发出一种强度与横向低温冲击韧性相匹配的油气并用 TG22 热轧钢带产品。

### 3.1 力学性能

钢带力学性能见表 3 所示,从表 3 可以看出,第一次试制产品的屈服强度明显低于第二次的,两次产品抗拉强度基本没有明显变化,而第二次伸长率相比第一次产品的伸长率略有下降趋势,第二次产品的屈强比略高于第一次。综上所述,增加中间坯厚度,降低卷取温度,对产品的屈服强度有明显的改善效果,对抗拉强度、伸长率和屈强比影响不大。

从表 3 也可以看出,第一次试制产品的低温冲击(-10℃)性能较低,无法满足实际生产应用,通过调整轧制工艺后进行第二次生产,其产品的冲击性能得到明显提升。

可见,通过增加中间坯厚度和降低卷取温度可以改善产品的强度和冲击性能。因为,在相同温度下,中间坯厚度增加,轧制道次变形量增大,晶粒细化程度增大,产品强度增大<sup>[7]</sup>,当中间坯厚度由 43 mm 调整为 46 mm 时,轧制过程钢带组织由表层到心部达到了均匀细化的效果,进而使产品的强度提高;目标卷取温度由 610℃ 调整为 570℃ 时,钢带组织更加均匀细化,位错密度提高,各晶粒间的相互滑移缠结提高,增加了位错运动的阻力,达到改善产品的强度与韧性效果<sup>[8]</sup>。

### 3.2 显微组织

沿钢带轧制方向在板宽 1/4 位置处取样,通过蔡司显微镜把试样组织放大 500 倍进行对比分析,具体组织形貌见图 2 所示。

图 2(a) 为第一次生产产品的显微组织,主要由铁素体 + 珠光体组成,且沿轧制方向带状组织比较

表 3 试验钢 TG22 的实际力学性能  
Table 3 Actual mechanical properties of tested steels TG22

项目	ReL/MPa	Rm/MPa	A <sub>50</sub> /%	屈强比	-10℃ 冲击性能(5 mm × 10 mm × 55 mm)/J	两次工艺优化对比
标准	430 ~ 560	≥520	≥26	≤0.85	≥41.25	-
第一次(No1)	481 ~ 499	634 ~ 657	36.5 ~ 37.5	0.75 ~ 0.76	31.3 ~ 45.5	中间坯厚度 43mm; CT: 610℃
第二次(No2)	506 ~ 554	654 ~ 685	29.0 ~ 35.0	0.75 ~ 0.82	45.5 ~ 63.6	中间坯厚度 46mm; CT: 570℃

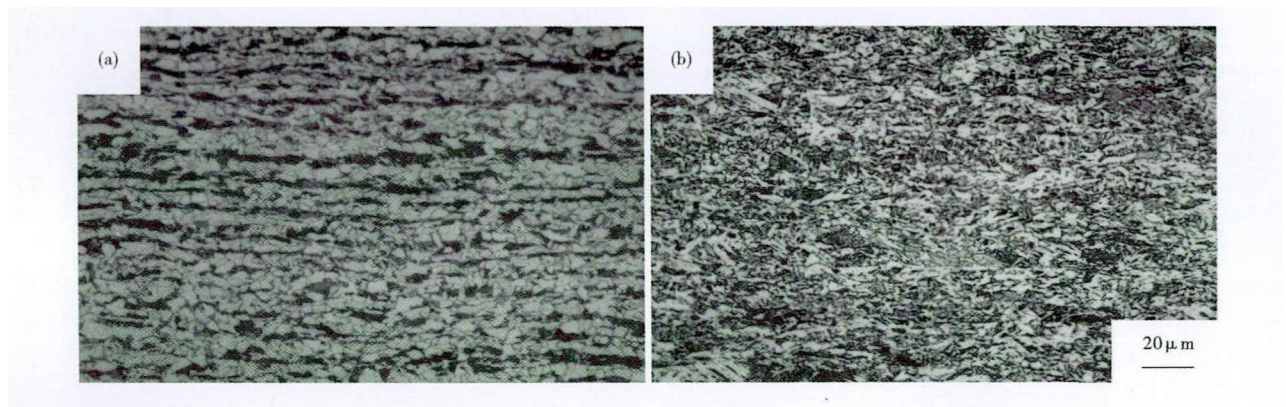


图 2 TG22 钢 7.34 mm 带的组织形貌:(a)第一次(No1)试生产 CT 610℃, F + P;(b)第二次(No2)试生产 CT 570℃, F + P + B

Fig. 2 Morphology of structure of 7.34 mm TG22 steel strip:(a) No1 pilot production, CT 610℃, F + P;(b) No2 pilot production, CT 570℃, F + P + B

严重;图 2(b)为第二次生产产品的显微组织,主要由铁素体 + 珠光体 + 贝氏体组成。对比图 2(a)与图 2(b)两者的组织形貌特点,第二次小批量生产钢带带状组织较第一次有明显改善,且晶粒尺寸细小,位错密度增加,使产品的强度增加,韧性提高<sup>[9]</sup>。

#### 4 分析论证

油气井用热轧钢带产品不仅要保证热轧卷优良的力学性能,而且要满足在制管过程的焊接工艺、中频炉加热及热张减径后成品钢管的力学性能。在服役过程中,需确保承受在深井及超深井环境下外加荷载力的冲击,即该产品设计之初需具有较高的力学性能和抗挤毁性能<sup>[10]</sup>。

基于上述情况,第一次试制产品的强度及塑性基本能满足要求,但在横向低温(-10℃)冲击试验时,钢带母材的冲击功较低,无法达到设计要求。一方面产品化学成分设计中目标碳含量较高,另一方面产品组织中带状组织较为严重,因此冲击功的提升空间相对较难。针对该现象,考虑到强度与塑韧性的匹配对立关系,应在精轧阶段有足够的变形量,最大限度的发挥精轧阶段大变形量对钢带组织细化和析出物的作用影响,结合实际成品钢带的厚度,增加中间坯厚度;在层流冷却阶段,降低卷取温度,采用适当的冷却工艺,达到细化热轧钢带组织的效果,进行了系统性工艺优化,开始第二次生产试制。结果显示,产品力学性能与第一次相比,屈服强度提升了 40 MPa 左右、抗拉强度提升了 25 MPa 左右、冲击功提升了 16 J 左右,较好的完成了设计和标准规定

要求。

此外,从上述两次产品的显微组织上也可以明显的看出,第一次产品的显微组织主要由铁素体 + 珠光体组织,且沿轧制方向钢带的带状组织较为严重,而第二次产品的显微组织由铁素体 + 珠光体 + 贝氏体组成,带状组织明显较弱甚至消除,进一步说明增加中间坯厚度时后续精轧过程产品的从表层到心部组织变形均匀,晶粒充分细化,提升产品的冲击韧性<sup>[11]</sup>;在降低卷取温度后,增加精轧后冷却速率,从而抑制多边形铁素体的形成,促进贝氏体的转变,改善产品的强韧性<sup>[12]</sup>,产品的最终组织也与 CCT 曲线预测模拟的相一致。

#### 5 结论

(1)中碳 + 合金成分油气井用热轧钢带 TG22 的化学成分(%)为:0.24 C, 1.30 Mn, 0.20 Si, 0.020 Nb,很好的保证热轧钢带及后续热处理制管后产品的各项机械性能的匹配原则,基本实现工业稳定化生产。

(2)通过优化热轧工艺,将粗轧后钢带的目标中间坯厚度设置为 46 mm,目标终轧温度设置为 830℃,目标卷取温度设置为 570℃,得到热轧钢带的组织为铁素体 + 珠光体 + 贝氏体,热轧钢带 TG22 的综合性能优良。

(3)产品的屈服强度大于 500 MPa,抗拉强度大于 650 MPa,伸长率大于 29%,横向低温(-10℃)冲击功大于 45 J 以,可以保证套管在后期服役过程产品安全稳定性。

#### 参考文献

- [1]黄进峰,方鸿生,徐平光,等. 硅对贝氏体铸钢高应力冲击磨损性能影响[J]. 钢铁研究学报,2001,13(1):40-45.
- [2]马娅娜,杜林秀,胡 军,等. Mn 含量对热轧超低碳钛合金钢组织和力学性能的影响[J]. 材料工程,2015,43(9):3-4.
- [3]于 洋,孟宪堂,王 林,等. 750 MPa 级高强汽车大梁钢冲压开裂原因及机制[J]. 钢铁,2014,49(1):54-57.
- [4]Qian L H, Zhou Q, Zhang F C, et al. Microstructure and Mechanical Properties of a Low Carbon Carbide-Free Bainitic Steel Co-Alloyed With Al and Si[J]. Materials & Design, 2012, 39:264-268.
- [5]闻玉辉,朱国明,郝 亮,等. Nb-Ti 微合金化热冲压成形用钢的微观组织与力学性能[J]. 工程科学学报,2017,39(6):864-865.
- [6]韩承良,王彦锋,杨永达,等. 终轧温度对 Q420qE 钢板组织性能的影响[J]. 轧钢,2018,35(2):27-28.
- [7]高志玉. 特厚板用 HSLA 钢的热变形行为与组织演变研究[D]. 北京:北京科技大学博士学位论文,2015.
- [8]庞启航,唐 狄,赵征志,等. 卷取温度对高 Ti 高强钢组织及性能的影响[J]. 中南大学学报,2017,48(4):914-915.
- [9]He. B. B, Hu. B, Yen. H. W, et al. High Dislocation Density-Induced Large Ductility in Deformed and Partitioned Steels [J]. Science, 2017, 357(6355):1029-1032.
- [10]李金浩. 石油套管用钢的开发生产及裂纹原因分析[J]. 轧钢, 2018, 35(4):34-36.
- [11]Shin S Y, Hwang B, Lee S, et al. Correlation of Microstructure and Charpy Impact Properties in API X70 and X80 Line Pipe Steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 458(1/2):281-289.
- [12]王海燕,毛卫明,谭 啸,等. 不同终冷温度下管线钢热轧板的组织与组织演变[J]. 金属热处理,2015:40(1):27-29.

武利平(1991-),男,博士生,2015 年内蒙古科技大学(本科)毕业,新产品开发。  
E-mail:qliu@ustb.edu.cn  
E-mail:1520024546@qq.com

收稿日期:2019-06-22