

# 钒氮合金化 S450J0 H 型高强钢桩的生产技术开发

冯岩青<sup>1</sup>, 吴娟<sup>1</sup>, 卢雄慧<sup>2</sup>, 刘舵<sup>3</sup>, 吕超<sup>4</sup>, 卜向东<sup>5</sup>

- (1. 包头职业技术学院, 内蒙古 包头 014030;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司炼钢厂, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司轨梁厂, 内蒙古 包头 014010;
4. 内蒙古包钢钢联股份有限公司营销中心, 内蒙古 包头 014010;
5. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** S450J0 钢桩是 H 型钢家族中的钒氮合金化钢, 其特点为高强度厚规格并具有良好的冲击韧性及焊接性。文章主要介绍其关键技术和工艺, 根据产品的性能要求, 设计了钢种成分, 制定了相关冶炼、连铸及轧制工艺。生产实践表明, S450J0 成分设计合理, 产品满足技术协议要求, 技术难点在于工业生产时高氮含量的稳定控制和小压缩比的厚规格轧制。

**关键词:** S450J0; H 型钢桩; 高合金钢; 高强度; 厚规格

中图分类号: TG142.33

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2022)06-0058-06

## Production Technology Development of Vanadium Nitrogen Alloying S450J0 H - type High Strength Steel Pile

Feng Yan - qing<sup>1</sup>, Wu Juan<sup>1</sup>, Lu Xiong - hui<sup>2</sup>, Liu Duo<sup>3</sup>,  
Lv Chao<sup>4</sup>, Bu Xiang - dong<sup>5</sup>

- (1. Baotou Vocational Technical College, Baotou 014030, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Steel - making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. Rail and Beam Rolling Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
4. Marketing Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
5. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The S450J0 steel pile is vanadium nitrogen alloy steel in H section steel family as well as it is with such

收稿日期: 2022-07-04

基金项目: 包头职业技术学院“新材料工艺改进及性能控制”2022年科研创新团队(基金项目号: 2022BZYKC04)。

作者简介: 冯岩青(1977-), 女, 内蒙古包头市人, 博士, 副教授, 主要从事新产品研发及智能焊接工作。

characteristics as high strength, heavy gauge, good impact toughness and weldability. In the paper, its key technologies and processes are mainly introduced. The composition of steel is designed as well as the relevant smelting, continuous casting and rolling processes are formulated based on the performance requirements of products. The production practices show that the composition design of S450J0 is reasonable and products could meet the requirements of technical agreement. The technical difficulties are the stable control of high nitrogen content in industrial productions and rolling of heavy gauge with small compression ratio.

**Key words:** S450J0; H - type steel pile; high alloy steel; high strength; heavy gauge

欧标 S450J0 H 型高强钢桩是包钢热轧 H 型钢家族产品中强度最高、合金含量最高、单重最大的型钢产品。钢桩翼缘和腹板厚度尺寸在 30.3 mm 左右,是包钢 H 型钢产线现有热轧 H 型钢中的最厚规格,为保证产品性能及表面质量,采用钒氮合金化设计思想。由于采用异型坯生产,H 型钢桩相比其他规格的压缩比要小很多(压缩比在 3.6,其他规格的压缩比在 7.0 以上),属于低压缩比厚壁 H 型钢,同时要求有高的强度、良好的冲击韧性和焊接性,因此是包钢型钢产品中生产难度较大的产品之一。该类产品主要通过焊接等方式用于制作框架结构,应用于浅海及沼泽地带、房屋建筑体系、深基坑支护体系等工民建领域<sup>[1-2]</sup>。

## 1 工艺流程

S450J0 H 型钢桩的生产工艺流程为铁水预处

理→转炉→LF 精炼炉→异型坯连铸机→加热→BD 粗轧→CCS 万能精轧→冷却→热锯→冷床→矫直→定尺→入库。

## 2 钢桩技术要求及生产难点

### 2.1 技术指标

S450J0 高强钢桩执行欧标 EN 10025 - 2—2004, S450J0 钢桩化学成分应符合表 1 规定,碳当量  $C_{eq} = \omega(C) + \omega(Mn)/6 + (\omega(Cr) + \omega(Mo) + \omega(V))/5 + (\omega(Ni) + \omega(Cu))/15, C_{eq} \leq 0.45$ 。力学性能及外形尺寸应同时满足欧标 EN 10034—1993 中的相关要求,见表 2。

表 1 S450J0 化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	N	V	Cu
≤0.20	≤0.55	≤1.70	≤0.030	≤0.030	≤0.025	≤0.13	≤0.55

注:完全采用 VN16 合金配钒。

表 2 S450J0 技术指标

项目	屈服强度 $R_{eH}/MPa$	抗拉强度 $R_m/MPa$	断裂后最小 延伸率/%	0℃ 纵向冲 击功 $KV_2/J$
标准	≥430	550~720	≥17	≥27
协议	≥450	550~720	≥17	≥27

### 2.2 生产技术难点

S450J0 钢桩是迄今为止包钢 H 型钢产品中强度最高、规格最厚、单重最大的 H 型钢,采用钒氮合金配钒,钒含量直接达到出口退税的合金钢要求,其生产技术难点在于工业生产时高氮含量的控制和厚规格轧制。

(1) 氮含量控制困难。S450J0 钢桩具有高强度

的同时还要满足中低温韧性,钢中的氮含量应控制在 0.015%~0.018%。实际生产中在转炉工位,未加钒氮合金的钢水氮含量在 0.004%~0.008% 之间波动,大量的钒氮合金加入钢水后难以保证氮含量的稳定,直接导致产品性能存在波动。

(2) 厚规格轧制。S450J0 钢桩规格符合欧标 EN 10034—1993,表 3 是包钢供货香港的四个规格。生产难点在于采用 BB2 坯型(555 mm×440 mm×105 mm×95 mm)轧制 UBP305×305×223、UBP305×305×149、UC305×305×180、UC305×305×283 四个规格。生产中 UC 305×305×283 规格的翼板顶端尺寸不合,这是因为采用 BB2(555 mm×440 mm×105 mm×95 mm)坯型,该坯型

翼缘尖部厚度为 69 mm、翼缘根部厚度为 121 mm、翼缘高度为 167.5 mm,而 UC305 × 305 × 283 规格的翼缘厚度  $t_2$  为 44.1 mm,即从铸坯的 69 mm 仅压到 44.1 mm,铸坯到成品的压缩比极小,钢桩的腿尖部

难以充满金属,见图 1。压缩比表述式为:

$$\begin{aligned} \text{压缩比} &= \frac{\text{铸坯翼缘厚度} - \text{成品翼缘厚度}}{\text{铸坯翼缘厚度}} \\ &= (69 - 44.1) / 69 = 36\% \end{aligned}$$

表 3 欧标 S450J0 规格

规格	截面尺寸/mm					理论重量 /(kg · m <sup>-1</sup> )
	H	B	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	r	
UBP305 × 305 × 223	337.9	325.7	30.3	30.4	15.2	223
UBP305 × 305 × 149	318.5	316.0	20.6	20.7	15.2	149
UC305 × 305 × 180	326.7	319.7	24.8	24.8	15.2	180
UC305 × 305 × 283	365.3	322.2	26.8	44.1	15.2	283

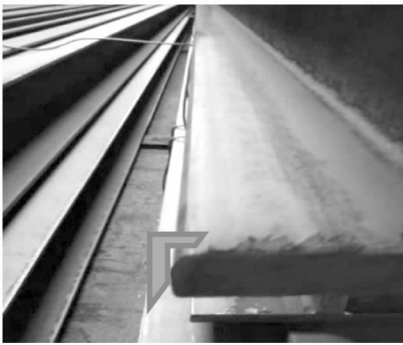


图 1 UC305 × 305 × 283 规格缺肉

含量容易引起偏析降低纵向冲击韧性,因此锰含量控制在 1.35% ~ 1.45%。

S450J0 钢实现高强度的最主要合金元素是 V 和 N,这是因为热轧 H 型钢当碳含量范围在 0.16% ~ 0.19%、锰含量范围在 1.35% ~ 1.45% 时,钢的上屈服强度在 355 MPa 左右,而 S450J0 钢桩在 355 MPa 钢的基础上必须通过添加大量的钒氮合金才能实现上屈服强度大于 450 MPa 的要求。合金钢标准规定,当钒含量大于 0.11% 称之为合金钢,并可出口退税。V(C, N) 在基体中析出,促进晶内铁素体的形成,细化铁素体晶粒,起到细化铁素体晶粒、提高钢的强度和韧性的作用。在高氮钢中,钒含量每增加 0.01% 时,屈服强度增加 10 ~ 25 MPa 左右,因此 S450J0 通过添加钒氮合金配钒,钒含量范围在 0.11% ~ 0.13%<sup>[1-3]</sup>。

碳当量是评价冷裂纹敏感性的指标,碳当量值越高,钢的淬硬倾向就越大,钢的冷裂纹敏感性也就越大,焊接性就越差。S450J0 钢桩要求  $C_{ev} \leq 0.45$  (碳当量以国际焊接协会 IIW 推荐的公式进行计算),所以在成分设计时,考虑高强度的同时,还应避免碳当量超过 0.45。因此当  $\omega(C) = 0.19\%$  (碳上限) 和  $\omega(V) = 0.13\%$  (钒上限) 时,必须控制锰含量范围为 1.35% ~ 1.40%,确保碳当量不超上限 ( $C_{ev} = 0.449$ ); 当  $\omega(Mn) = 1.45\%$  (锰上限) 和  $\omega(V) = 0.13\%$  (钒上限) 时,必须控制碳含量范围为 0.16% ~ 0.18%,确保碳当量不超上限 ( $C_{ev} = 0.447$ )。

### 3.2 冶炼工艺

转炉冶炼过程中,强化脱磷、脱硫。冶炼过程中控制合适的枪位和加料时机,渣料于终点前 3 min

## 3 生产工艺控制

### 3.1 成分设计思路

碳对钢的强度和硬度影响最大,是最有效的强化元素之一。钢中碳含量增加,上屈服点和抗拉强度升高,但塑性和冲击韧性会降低。同时碳是增加碳当量的最主要元素,随着碳含量的增加,焊接性恶化。企业与用户签订的技术协议要求高于标准要求,表现在上屈服强度大于 450 MPa,并兼顾高强度、0 °C 冲击韧性及焊接性,将碳含量控制在 0.16% ~ 0.19%。

硅能显著提高钢的屈服点和抗拉强度,但会使钢的延伸率、收缩率和冲击韧性有所降低,同时易形成带状组织,因此 S450J0 硅含量控制目标为 0.55% 以下。

锰在炼钢过程中是良好的脱氧剂,同时锰是提高钢的强度和硬度、改善韧性的重要合金元素,锰对强度及韧性的提高是由于珠光体相对量增加、固溶强化及一定程度的细化晶粒所引起的,但过高的锰

加完。终点压枪时间不低于 30 s, 终点控制  $\omega(\text{C}) \geq 0.06\%$ ,  $\omega(\text{S}) < 0.020\%$ ,  $\omega(\text{P}) < 0.02\%$ 。采用单渣工艺冶炼, 做到初期早化渣, 过程化好渣, 终渣化透。出钢过程中, 减少钢水二次污染。出钢温度控制在 1 530 ~ 1 550 °C。采用硅锰、硅铁、钒氮合金进行合金化, 放钢前称量好合金, 钒含量根据工艺控制, 合金成分按中限控制。采用渣洗精炼、炉渣改质和软吹氩等工艺, 精炼出站前软吹氩 7 ~ 12 min, 并喂入一定数量的钙线, 保证夹杂物的充分上浮和形态改变, 有效地减少钢中氧含量。根据炉渣的黏度、颜色及泡沫化程度调整炉渣, 出站前顶渣应达到白渣或黄白渣。连铸采用全保护浇注, 中间包采用碱性覆盖剂, 减少钢水二次氧化, 浇注过程液面要保持恒定, 过热度控制在小于 35 °C, 二次冷却采用弱冷, 拉速要求控制在 0.8 ~ 1.1 m/min。尽量减少铸坯疏松、缩孔及偏析, 提高铸坯内外在质量。

### 3.3 轧制工艺

S450J0 钢桩属于厚规格高强度合金钢, 钒含量高达 0.12% 以上, 钢中没有 Cr、Ni、Cu 等合金元素, 但比普通的 H 型钢壁厚, 因此对加热及轧制工艺进行了规范。加热控制目标为预热段温度不低于 800 °C、加热 I 段上下温度不低于 1 000 °C、加热 II 段上下温度不低于 1 150 °C、加热 III 段上下温度不低于 1 300 °C、均热段温度不低于 1 280 °C, 每段的 4 个测温点均不准超温度上限, BD1 开轧温度控制在 1 120 ~ 1 180 °C。由于 S450J0 钢桩规格厚, 所以在预热段停留时间较同类产品的 H 型钢稍长。

### 3.4 装钢方式

在更换 H 305 mm × 305 mm 钢坯料时, 前面空出四个步距, 避免受到前面品种加热温度的影响。为保证试轧工艺及工序调整时不受出料口的影响, 同时保证钢坯在炉内便于分段控制, 要求每两个步距装入一支钢坯, 目的是当生产不正常时, 可将生产不利因素对加热质量的威胁降低到最小。

具体控制方案:

(1) 装钢前 20 min 将加热 I 段所有烧嘴关闭, 避免急速升温产生坯料缺陷。

(2) 在加热该钢种时, 对上下烧嘴进行调整, 烧嘴喷出的火焰长度不超过炉宽的 2/3, 同时要倒换烧嘴, 避免局部温度过高造成加热质量事故; 每班接班时, 必须首先检查烧嘴情况。

(3) 钢坯避免快烧快出, 加热 II 段目标温度控制在 1 100 °C, 不超过 1 150 °C, 进入加热 III 段后可

以快速提温, 均热段目标温度控制在 1 250 °C, 遇到长时间停轧复产后提温, 可以控制在 1 250 °C, 但不超 1 280 °C。

(4) 开轧温度尽可能适中, 温度控制在 1 150 ~ 1 180 °C 之间, 温度太高无法保证冲击韧性, 温度太低厚壁轧制力过大引起跳闸, 轧钢需要提温时应联系调度室增加保温时间, 保证开轧温度适中, 应保证终轧温度在 920 ~ 950 °C。

## 3.5 孔型设计

### 3.5.1 工艺路线

使用异形坯料生产, 加热后使用 BD 轧机开坯, 在 CCS 轧机的精轧组孔采用四辊万能模式往复轧制成断面尺寸符合要求的成品 H 型钢。

### 3.5.2 孔型设计

BD 开坯机配置 3 个开坯孔型, 分别为 1 个立压孔型及 2 个异形孔型, 共轧制 7 道次, CCS 配置了 UR、E、UF 孔型, 使用万能轧制工艺连续往复轧制 7 道次。为了保证成品的尺寸重新设计了各孔压下量分配制度、连轧速度, 通过合理的轧制变形保证成品 H 型钢尺寸稳定。

## 4 工业化生产

### 4.1 力学性能

经过三轮次的工业试制, 通过不断优化成分、冶炼工艺及轧钢工艺, UBP305 × 305 × 223、UBP305 × 305 × 149、UC305 × 305 × 180、UC305 × 305 × 283 四个规格的力学性能见表 4。从同样的成分设计下, 可以看出 UBP305 × 305 × 223 和 UC305 × 305 × 283 的强度最合理, 而 UBP305 × 305 × 149、UC305 × 305 × 180 强度偏高, 个别抗拉强度接近上限 720 MPa, 这是因为规格为 UBP305 × 305 × 223 和 UC305 × 305 × 283 钢桩的腿部厚度大于规格 UBP305 × 305 × 149 和规格 UC305 × 305 × 180 的腿部厚度, 所以相同的成分下, 相对薄壁的钢桩强度更高一些, 这在今后的实际生产中应该将成分按规格进行窄范围细分更为合理, 满足性能的同时降低制造成本。

S450J0 四个规格的 0 °C 冲击功均在 40 J 以上, 部分冲击功值可达到 80 J, 平均冲击功为 50 J, 既满足了轧制态的高强度, 又满足了冲击韧性。S450J0 钢桩为轧态交货, 由于其碳含量较高, 又添加了大量的钒氮合金, 因此冲击韧性均值很难达到 100 J 以上的高韧性, 冶炼过程要求有充分的时间保证合金

充分溶解且均匀化,保证钢水的洁净度,同时避免产生 C、Mn 偏析,氮完全以 VN 的形式存在,不能以游离氮的形式存在是保证冲击韧性的必要条件。今后

的生产通过不同规格的窄成分范围细分,降低强度的同时,可提高 S450J0 的冲击韧性。

表 4 工业试制 S450J0 力学性能

规格	屈服强度 $R_{eH}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	断裂后最小延伸率/%	0 °C 纵向冲击功 $KV_2/\text{J}$
UBP305 × 305 × 223	492 ~ 508	630 ~ 655	23 ~ 24	40 ~ 70
UC305 × 305 × 180	483 ~ 545	640 ~ 711	22 ~ 25	45 ~ 75
UC305 × 305 × 283	475 ~ 500	600 ~ 637	22 ~ 24	40 ~ 77
UBP305 × 305 × 149	488 ~ 537	656 ~ 703	22 ~ 24	42 ~ 81

注:断裂后最小延伸率公称厚度  $L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$  mm

#### 4.2 金相组织及分析

对 7 炉工业试验钢进行了金相组织检验,从检测结果可以看出个别炉次试验钢的硫化物较高。通过控制夹杂物后,再次工业试制的试验钢夹杂物控制水平良好,晶粒尺寸细小,组织均为珠光体 + 铁素体,通过扫描电镜的能谱分析,未发现氮化物,表 5 为金相检测结果,图 2(a) 为硫化物夹杂物,图 2(b)

为金相组织。

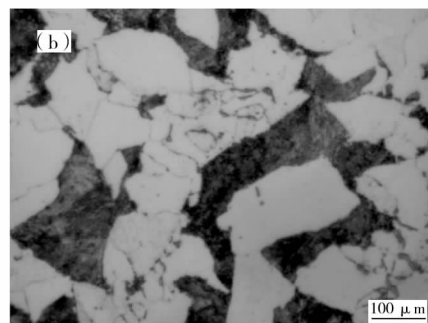
通过扫描电镜对工业试制的 S450J0 进行了断口分析,断口面上的韧带区不明显,裂纹起源于冲击试样开槽处,裂纹源区及扩展区断口形貌均为河流状花样的解理形貌并伴有少量韧带,同时断口上有少量二次裂纹,断口的整体形貌与冲击韧性偏低具有一致性,见图 3。

表 5 金相检测结果

夹杂物/级					晶粒度/级	组织
A	B	C	D	Ds		
2.0	0.5	1.0	1.0	0.5	9.5	铁素体 + 珠光体
2.5	1.0	1.0	1.0	0.5	9.5	铁素体 + 珠光体
1.0	0.5	1.0	0.5	0.5	9.5	铁素体 + 珠光体
0.5	0.5	0.5	1.5	0.5	9.0	铁素体 + 珠光体
1.0	0.5	1.0	1.0	0.5	9.5	铁素体 + 珠光体
0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	9.5	铁素体 + 珠光体
1.5	0.5	0.5	1.0	0.5	9.5	铁素体 + 珠光体



(a) 硫化物



(b) 铁素体+珠光体

图 2 金相组织

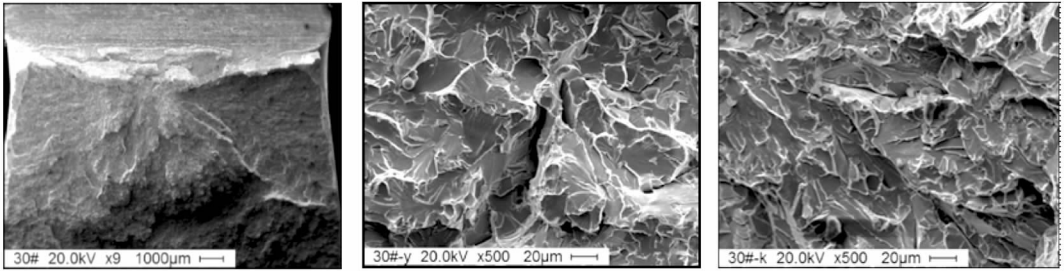


图3 断口分析

## 5 结论

(1) 采用单一添加钒氮合金生产的 S450J0 性能满足技术要求。

(2) S450J0 钢桩生产技术难点在于难以保证氮含量的稳定性,导致产品性能存在波动;厚规格轧制时,铸坯到成品的压缩比小,钢桩的腿尖部难以充满金属。

(3) 相同的成分设计下, S450J0 薄壁钢桩的强度富裕量大,厚壁钢桩的强度适中,下一步在实际生产中应将成分按规格进行窄范围细分,达到满足性能的同时降低制造成本。

(4) S450J0 钢桩 0 °C 冲击均值为 50 J, 满足技术要求,但冲击韧性偏低。

(5) S450J0 钢桩轧制过程工艺窗口宽,对温度敏感性不强。开轧温度尽可能适中,温度太高无法保证冲击韧性,温度太低厚壁轧制力过大引起跳闸,应保证终轧温度在 920 ~ 950 °C。

## 参 考 文 献

- [1] 方金林,武玉利,李超,等. S450J0 H 型钢桩生产实践[J]. 江西冶金,2016,36(1):22-26.
- [2] 朱秋菊,张蕾,李同敬. 高强度厚壁 H 型钢桩轧制工艺优化研究[J]. 江西冶金,2013,33(4):38-44.
- [3] 丛晓艳. VN 元素在微合金化钢中的作用和开发前景[J]. 北京科技大学学报,2004,32(3):3-5.
- [4] 任安超,吉玉,赵隆崎,等. U75V 钢的连续冷却相变行为[J]. 机械工程材料,2008,32(7):15-17.
- [5] Roman Kuziak, Ryszard Molenda, Jerzy Pietryka. A New Method of Head Hardening of Rail Profiles [J]. Hutnik, wiadomosci hutnicze, 2003,(2):53-59.
- [6] Satyam S. Sahay, Goutam Mohapatra, George E. Totten. Overview of Pearlitic Rail Steel: Accelerated Cooling, Quenching, Microstructure, and Mechanical Properties [J]. Journal of ASTM International,2009,6(7):1-26.
- [7] 吴鹏松,吴朝野,周东华. 钢轨在线热处理自适应逆控制系统研究[J]. 西北大学学报,2007,37(5):729-733.
- [8] TB/T 2344—2012,43 kg/m ~ 75 kg/m 钢轨订货技术条件[S].
- [9] (上接第 52 页)