铌钒微合金钢的高温塑性研究[*1]

姚晓乐,姜海龙,史文义

(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: 文章采用MMS-200型热力模拟试验机测试了15MnNbV的高温塑性,结果表明15MnNbV在900 ℃时,面缩率仅为26%,连铸时圆坯在进入矫直段时的温度在900 ℃左右,在矫直棍的应力作用下,圆坯特别是Φ430 mm圆坯表面容易产生微裂纹,造成钢管出现外表面结疤。通过研究分析钢的高温塑性影响因素及铌钒在钢中的析出特点,对15MnNbV的成分做出调整,调整后,15MnNbV在900 ℃时的面缩率达到88%,圆坯表面质量得到改善,钢管外表面结疤消除。

关键词: 铌钒微合金钢; 高温塑性; 面缩率

中图分类号: TG142.33 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2019)03-0054-03

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.03.016

Study on High Temperature Plasticity of Nb-V Microalloyed Steel

Yao Xiao-le, Jiang Hai-long, Shi Wen-yi

(*Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the paper, the high temperature plasticity of 15MnNbV was tested with MMS-200 thermal simulated test machine. The results showed that the reduction of area of 15MnNbV at 900 ℃ was only 26%, temperature of round billet entering straightening segment was about 900 ℃ during continuous casting, with the stress of straightening roll, there was easily to be microcracks on the surface of round billet, especially the Φ430 mm round billet causing wall scale on outside surface of steel tube. The composition of 15MnNbV was adjusted through analyzing the influencing factors for high temperature plasticity of steel and characteristics of precipitation for niobium and vanadium in steel. After that, the reduction of area of 15MnNbV at 900 ℃ reached 88%, surface quality of round billet was improved and wall scale on outside surface of steel tube was eliminated.

Key words: Nb-V microalloyed steel; high temperature plasticity; reduction of area

钢的高温塑性是表征凝固过程中铸坯受到应力时抵抗变形和裂纹的能力,连铸坯的高温塑性不良是导致表面裂纹产生的重要因素。掌握钢的高温塑性性能,了解钢的脆化机理并找出脆化区域,才能采取正确的应对措施,减轻和防止裂纹的产生。

1 实验材料与方法

包钢钢管公司生产断面为Φ430 mm的15MnNbV管线管用圆坯,经Φ460 mm机组轧制后,各个规格的钢管普遍存在外表面结疤,个别钢管外

* 收稿日期:2019-02-12

作者简介:姚晓乐(1986-),男,山西省运城市人,硕士,工程师,现从事无缝管新产品研发工作。

中国知网 https://www.cnki.net

表面结疤通体沿轴向呈带状间断分布，如图 1 所示。从坯料库剩余圆坯上取 300 mm 长的试样，送到炼钢厂检验室进行热酸检验，酸浸时间为 4 h。发现圆坯表面分布大量裂纹，并且裂纹通体沿轴向呈带状间断分布如图 2 所示，与热轧后钢管上外结疤位置分布特点基本一致。

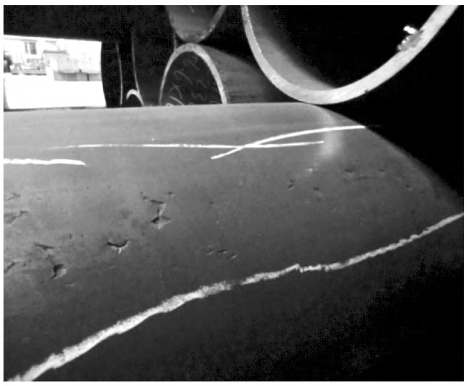


图 1　管体外表面结疤

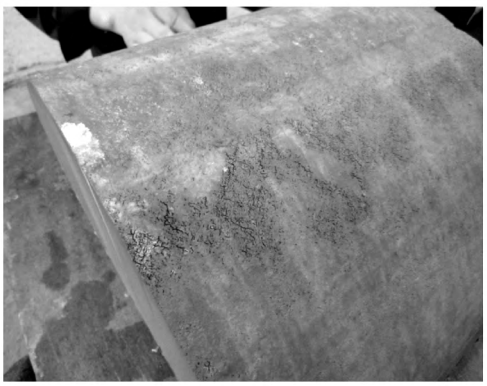


图 2　圆坯热酸检验

同时从出现外表面结疤、规格为 Φ457 mm × Φ20 mm的钢管上取样，进行裂纹分析。检测结果：裂纹附近有氧化圆点，内部有大量氧化铁，经 4% 硝酸酒精试剂侵蚀后有明显的脱碳，为典型的高温氧化特征，结合钢坯热酸检验结果，表明钢坯表面存在微裂纹，微裂纹高温氧化后在后续轧制过程中产生缺陷。

实验材料取自出现外表面结疤、规格为 Φ457 mm × Φ20 mm 的钢管，化学成分如表 1 所示。取样后，加工成 Φ10 mm × Φ120 mm 的热模拟拉伸试样。

表 1　试样的化学成分(质量分数)　　%

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Al
0.170	0.320	1.420	0.018	0.009	0.032	0.026	0.027

高温拉伸在东北大学设计制造的 MMS－200 型热力模拟试验机上进行，试验前样品室内先抽真空，然后采用氢气保护，以 10 ℃/s 的速率升温，达到 1 350 ℃后保温 3 min，然后以 3 ℃/s 的冷却速度降温至试样的拉伸变形温度，保温 3 min 后以 $1.0\times10^{-3}s^{-1}$ 的应变速率进行高温拉伸试验，拉伸变形温度选为 800～1 300 ℃之间，每隔 50 ℃测试一个试样，记录面缩率(Z)。

2　实验结果及分析讨论

2.1　高温塑性曲线图

面缩率(Z)是表征材料高温塑性的重要指标，根据实验结果绘制 15MnNbV 的高温塑性曲线图，如图 3 所示。

根据热塑性理论，将断面收缩率 Z = 60% 定义为连铸坯塑性的临界值。研究表明，当 Z 超过此值时，连铸坯具有足够的塑性，不易产生裂纹；而小于此值的温度范围被定义为“塑性低谷区”，铸坯裂纹敏感性增高[1]。从图 3 可以看出，15MnNbV 的 Z 值在 950 ℃以下时出现一个脆性区，在 950～1 250 ℃范围内保持良好的塑性，升至 1 300 ℃时塑性又大幅下降。

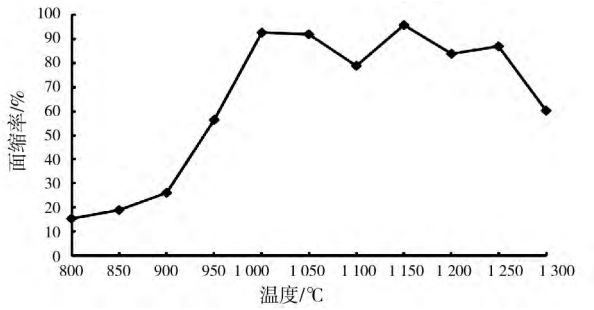


图 3　15MnNbV 的高温塑性曲线图

2.2　脆化机理分析

钢从 600 ℃到熔化温度(1 500 ℃左右)之间，存在三个脆性温度区[2]，分别称为高温脆性区、中温脆性区和低温脆性区。

发生在 1 200 ℃到熔点之间的高温脆性区 I，是由于树枝晶间富集 B、O、S、P 等微量元素或杂质含量增多引起的，形成熔点低于固相线温度的液体薄膜，使钢的塑性急剧降低，断裂沿树枝晶间的界面展开。研究表明，此区间钢的脆性与应变速率无关。

发生在 900～1 200 ℃间的中温脆性区 II 的脆化机理为：高温奥氏体固溶的 O、S 等元素以(Fe、

中国知网　https://www.cnki.net

Mn)O、(Fe、Mn)S等形式在奥氏体晶界沉淀，沉淀物沿晶界长大，降低了晶界强度，在应力作用下容易在晶界产生裂纹，裂纹沿晶界扩展、长大，造成沿晶断裂，奥氏体晶界上的析出物越多、越细小，钢的脆化越严重。同时，Cu、Sn、Sb等低熔点金属液向奥氏体晶界渗透容易引起晶间脆断。钢中 $w[S] > 0.03\%$ 或 $w[Mn]/w[S] < 20$ 时，该脆性加剧铸坯冷却时的温度应力，在该脆性敏感区易产生裂纹。第Ⅱ脆性温度区只在应变速率大于 $1\times10^{-2}\ s^{-1}$ 时出现，实际生产中，铸坯矫直变形为低应变速率，大约为 $1\times10^{-3}\ s^{-1}$，因此第Ⅱ脆性区钢的脆化与连铸过程关系不大。

发生在600～900 ℃间的低温脆性区III主要在低应变速率($10^{-4}\sim10^{-2}\ s^{-1}$)下出现，而连铸过程中，圆坯弯曲、矫直变形等的应变速率为 $10^{-3}\sim10^{-4}\ s^{-1}$，因此连铸圆坯弯曲和矫直过程中产生的铸坯裂纹与第III脆性区的脆化有着密切的关系。第III脆性区的脆化是由于伴随 $\gamma\rightarrow\alpha$ 相变时，Al、V、Nb等碳、氮化物的沉淀析出所引起的低温脆性，钢中Al、V、Nb含量越高，Al、V、Nb等碳、氮化物在晶界析出量越大，不仅抑制或推迟了再结晶，还是晶界微孔的形核源，使钢在第III脆性区塑性变差，产生脆性，从而使铸坯产生表面和皮下裂纹，铸坯应该尽量避免在该脆性温度区间进行弯曲和矫直变形。

15MnNbV钢中含有Nb、V、Al等微合金元素，Weiss、Abken和Leslie曾分别对Nb(C,N)和VN的动态析出C曲线进行过研究，发现Nb(C,N)析出C曲线的“鼻尖”温度在920 ℃附近，VN析出的“鼻尖”温度在850 ℃附近，AlN析出的“鼻尖”温度在815 ℃附近[3]，这证明了15MnNbV在950 ℃以下时出现脆性区，即第III脆性区。

由图3看出，900 ℃时，面缩率仅为26%，而炼钢生产铸坯矫直温度为900 ℃左右，正好处于第III脆性区。同时炼钢厂生产断面为Φ430 mm圆坯的1#铸机弧半径为12 m，按经验公式 $R=(30\sim50)\times D$ 计算，$R=12$ m连铸机可生产最大断面为Φ340 mm的圆坯[4]，因此生产断面为Φ430 mm圆坯属于小弧半径铸机生产大截面铸坯，在矫直辊的应力作用下，圆坯表面更容易产生微裂纹。

2.3 改进措施及效果

通过研究分析钢的高温脆化机理和15MnNbV的高温塑性曲线图，对15MnNbV的成分做出调整：严格控制钢中各种杂质元素含量，适当降低Nb含量，添加微量的Ti。

含Nb钢因Nb(C、N)的析出易在连铸坯表面产生微裂纹，而Ti的加入能在高温下固定钢中N，从而减少NbN的析出而减少裂纹的产生。TiN在1 300～1 200 ℃即可析出，由于颗粒粗大且零散分布，对钢的塑性不仅没有不良影响而且还可作为Nb、V的碳、氮化物的析出核心，从而减少微细Nb、V析出物的数量，因此对钢的塑性有利。另一方面，由于钢中的N优先与Ti反应，减少了参与Nb、V反应的氮量，也使Nb、V的碳、氮化物的析出受到抑制[2]。

添加Ti形成TiS会降低硫在晶界的偏析，改善钢的热塑性。TiS的形成减少了硫在晶界及析出物基体界面的偏析，因而存在较高的界面能，即使在应力集中的情况下，结合力也不会降低，所以钢的塑性得到改善[5]。

15MnNbV成分调整后在相同的实验条件下进行高温拉伸实验，记录面缩率，并与成分调整前作对比，如图4所示。

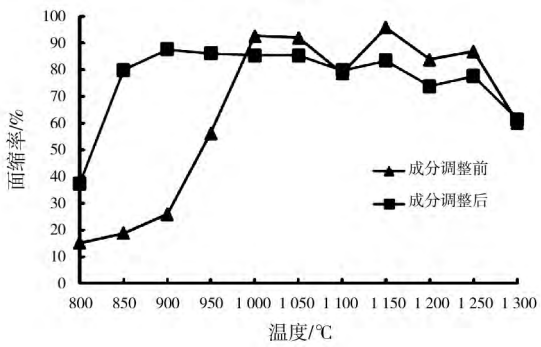


图4 15MnNbV成分调整前后高温塑性曲线图

从图4可以看出，成分调整后，15MnNbV在900 ℃的面缩率由26%提高至88%，第III脆性区向低温方向移动，由950 ℃降低到850 ℃。圆坯受应力最大的矫直段避开了第III脆性区，圆坯表面质量得到极大改善，经Φ460 mm机组轧制后，钢管外表面结疤得到消除。

3 结束语

包钢钢管公司生产断面为Φ430 mm的15MnNbV管线管用圆坯，经Φ460 mm机组轧制后，各个规格的钢管普遍存在外表面结疤，通过热酸及裂纹分析发现是因为圆坯表面存在着微裂纹，在随

(下转第59页)

中国知网 https://www.cnki.net

重合，造成台肩的存在和单项值不稳的问题。设计前车丝刀头为单面车丝，一个刀片车丝三遍成型，车丝使用一个刀位号 T13D01，正刀补，毛刺使用刀位号 T13D03，负刀补；双面设计后初车丝两遍，使用一个刀位号 T13D01，正刀补，精车丝一遍使用一个刀位号 T13D02，负刀补，毛刺使用一个刀位号 T13D03，正刀补。因而编程中要严格注意 X 轴的正负号，避免撞刀事故的出现，见表 1。

表 1　车丝程序改进

程序号	加工程序内容
N5000	THREADING FACE B CT90108
	$ TC_DP3 [13,1] = 41. 15
	$ TC_DP4 [13,1] = 311.
N5010	T13 D01
N5020	R23 = 1000. * R75 / (3. 14* 108.)
N5030	M04 S = 423
N5040	G00 X - 119. 585 Z167. 64
N5050	M07
N5060	G33 X - 109. 025 Z0. 0 K5. 08
N5070	G33 X - 98. 865 Z - 5. 08 K5. 08
N5080	G00 Z177. 64
N5090	G01 X - 120. 76 Z167. 64 F5. 08
N5100	G33 X - 100. 04 Z - 5. 08 K5. 08
N5120	G00 X - 82. 3 Z250. 00
	$ TC_DP3 [13,2] = 41. 15
	$ TC_DP4 [13,2] = 311.
N5130	T13 D02
N5140	R23 = 1000. * R75 / (3. 14* 108.)
N5150	M04 S = R23
N5160	G00 X = 121. 16 + R87 Z170. 18
N5170	M07
N5180	G33 X = 110. 60 + R87 Z0. 00 K5. 08
N5190	G33 X = 100. 44 + R87 Z - 5. 08 K5. 08
N5200	G00 X82. 3 Z156. 84

3　经济效益分析

降本增效是市场竞争力的基础，Colinet 接箍车丝机刀头双面车丝设计作为一种工艺技术攻关，带来的经济和产品质量效益相当可观。此工艺技术攻关所能带来得效益不仅是解决梯形扣车丝螺纹丝扣上台阶技术难题，变单面车丝为双面车丝，解决接箍车丝单项值不稳定和台肩的问题，还提高车丝成品率 3 个百分点，每月可减少因台肩和单项不稳的废品 500 个，按每个接箍毛料 700 元计算，每月可节约成本 35 万元；同时单面变双面，单面磨损严重的双面车丝刀头可替换下来，用于圆扣车丝生产，年可节约车丝刀头 6 个，每个车丝刀头的价格为 5 009 元，每年可节约 3 万余元，新设计的双面车丝刀头累计全年节约 423 万元。

4　结束语

Colinet 接箍车丝刀头双面车丝设计打破原固有刀头的设计思路，采用双面车丝加工设计，大大提高了车丝刀头的使用寿命，满足了日益发展的市场需求，提高了生产效率，全年累计节约 423 万元，对企业的降本增效起到了积极的促进作用。

参　考　文　献

[1] 蒋勇敏，续永刚. 数控机床的使用与维护 [M] . 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2010.

[2] 杨小荣. 车床数控改造 [M] . 上海：上海科学技术出版社，2007.

(上接第 56 页)

后的热轧生产中形成外表面结疤。通过研究分析钢的高温塑性影响因素及铌钒在钢中的析出特点，对 15MnNbV 的成分做出调整，严格控制钢中各种杂质元素含量，适当降低 Nb 含量，添加微量的 Ti。调整后，15MnNbV 第 III 脆性区向低温方向移动，圆坯受应力最大的矫直段避开了第 III 脆性区，圆坯表面质量得到极大改善，钢管外表面结疤消除。

参　考　文　献

[1] 王建锋，邓深，饶江平，等. 铌钛及铌钒钛微合金钢的高温力学性能研究 [J] . 炼钢，2011，27 (1) : 46 - 49.

[2] 常桂华，曹亚丹，吕志升，等. 连铸坯的高温力学性能分析 [J] . 鞍钢技术，2007，(6) : 25 - 29.

[3] 王新华，刘新宇，吕文景，等. 含 Nb、V、Ti 钢连铸坯中碳、氮化物的析出及钢的高温塑性 [J] . 钢铁研究学报，1998，10(6) : 32 - 36.

[4] 刘谦，李峰，蔡燮鳌. R12 m 弧形连铸机生产大截面特殊钢圆坯的工艺实践 [J] . 连铸，2009，(2) : 20 - 23.

中国知网　https://www.cnki.net