

连铸管坯质量对钢管内折缺陷的影响

张惠萍, 陈洪琪, 卢玲玲, 李 群

(天津钢管集团有限公司, 天津 300301)

摘 要: 在对连铸管坯晶区进行划分的基础上阐述了连铸管坯穿孔特有的“隔墙”现象, 探讨了连铸管坯的低倍组织及主要化学成分等对钢管热轧的常见缺陷——内折的影响和连铸管坯的各区域及柱状晶的大小与内折之间的关系, 同时通过回归分析法得出碳当量与内折率的关系式。

关键词: 钢管; 内折缺陷; 连铸管坯; 疏松; 缩孔

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-2311(2006)06-0027-04

C.C. Steel Billet Quality vs Steel Tube Internal Folding Defect

Zhang Huiping, Chen Hongqi, Lu Lingling, Li Qun

(Tianjin Pipe (Group) Corporation Ltd., Tianjin 300301, China)

Abstract: Based on the identification of the grain zones of the C.C. steel billet for tube rolling, the unique phenomenon of “walling” of the billet as being pierced is analyzed. Discussed are the main elements of the C.C. billet responsible for the common defect——internal folding of the hot-rolled tube, i.e., the macrostructure and chemical composition, and the relationship between different grain zones and the size of columnar crystal and the said internal folding. Moreover the regression method is used to deduce the formula of the relationship between carbon equivalent and the internal folding rate.

Key words: Steel tube; Internal folding; C.C. billet for tube rolling; Porosity; Blister

0 前 言

钢管内折缺陷是指在钢管内表面存在着与整体金属熔合的紧贴着的重叠层, 或存在于钢管的头部, 或存在于整根钢管内; 或有规律, 或无规律。关于内折产生的机理, 过去的教科书中的理论主要是针对轧坯的, 对连铸管坯而言, 目前还没有一个系统、完整的理论。包钢无缝钢管厂曾就使用连铸管坯产生的钢管内折分析后认为: 内折的产生主要与连铸管坯的中心疏松和柱状晶有关^[1]。为了减少钢管内折, 在借鉴其他厂家经验的基础上, 天津钢管集团有限公司(以下简称天津钢管公司)有针对性地从管坯连铸和轧管两方面对钢管内折形式进行了分析研究。本文只介绍连铸管坯质量对钢管内折缺陷的影响。

张惠萍(1963-), 女, 高级工程师, 从事无缝钢管生产技术工作。

1 连铸管坯晶区与钢管内折缺陷的关系

天津钢管公司连铸管坯的内部组织分布情况, 见图 1。将连铸管坯分成 3 个晶区, 即激冷层、柱状晶区和中心疏松区。同时, 除进行常规硫印检验外, 还进行了低倍酸浸试验。试验结果根据 MDH (德国曼内斯曼德马克公司)提供的图片划分出不同的等级, 将皮下裂纹、皮下气泡、中部裂纹、芯部裂纹划分为 1~4 级, 缩孔划分为 1~3 级。统计结果见表 1。从表 1 看出, 连铸管坯激冷层较薄, 柱状晶粗大甚至穿晶, 疏松区呈椭圆形且偏心, 另外有部分连铸管坯中间裂纹较长。这种连铸管坯内部结构, 不利于轧制钢管。

在跟踪比较了 100 炉次 34Mn5 材质、 $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 7.72 \text{ mm}$ 钢管的内折率与连铸管坯结构之间的关系后, 得出连铸管坯最佳的结构是: 激冷层占连铸管坯半径的 10%~15%, 柱状晶区占 50%~55%, 等轴晶区占 30%~35%。

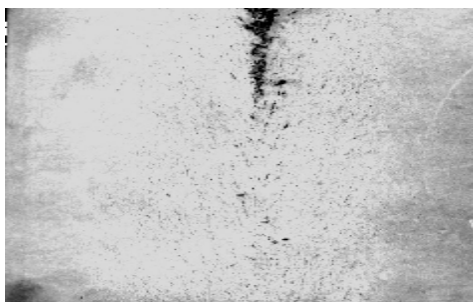


图1 连铸管坯酸洗后的低倍组织

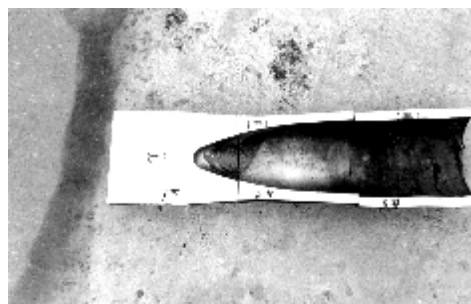


图2 纵剖穿孔毛管轧卡样

规格	表1 连铸管坯晶区尺寸 mm			
	激冷层厚 A	疏松区偏心距 B	疏松区直径	
			C	D
Φ210	10	30~40	100~110	60~80
Φ270	15	45~50	140~160	90~120
Φ310	25	50~60	160~190	75~150

注：①柱状晶均为3级；②因疏松区呈椭圆形分布，统计时只测量长轴(C)和短轴(D)长度。

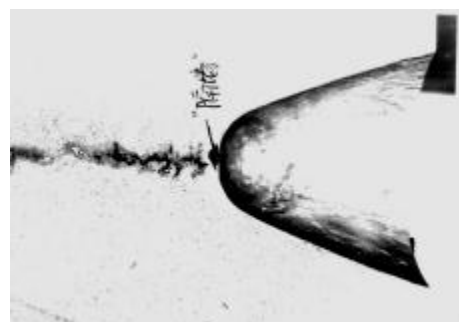


图3 纵剖穿孔毛管头部分的轧卡样

2 柱状晶粗大程度与钢管内折缺陷的关系

有关连铸管坯柱状晶粗大程度与钢管内折率的关系，参照了包钢无缝钢管厂内折攻关的结论。包钢无缝钢管厂经过对连铸管坯连铸工艺参数——过热度 Δt 、拉速 v 及柱状晶级别 GSN 值和内折率 N 进行比较，得到的回归方程式为：

$$N = e^{-0.23 + 0.71 \text{GSN}}$$

在总共 10 个自变量中，进入回归方程的只有 GSN 值，如果再进入其他自变量，则效果不显著。这说明柱状晶是导致内折的主要因素^[1]。

根据柱状晶粗大的程度，连铸管坯柱状晶划分为 1~4 级。统计结果显示：连铸管坯柱状晶普遍为 3~4 级。同时跟踪了部分柱状晶级别为 1~2 级的连铸管坯，发现钢管的内折率较小；而有穿晶的连铸管坯，钢管的内折率则较大。因此，对穿晶的连铸管坯必须判废，绝不允许轧制成管。

3 连铸管坯疏松区与钢管内折缺陷的关系

3.1 毛管轧卡实验

用材质为 25Mn5，规格为 Φ270 mm 的连铸管坯进行人为轧卡实验，然后纵剖穿孔毛管轧卡样，做宏观拍摄，轧卡样再经酸洗后进行分析，其结果见图 2 和图 3。

此次轧卡样在顶头鼻部前端有 1 条宽度为 5 mm 的金属带，将顶头与已经开始开裂的管坯中心

缩孔区隔开。这条隔离带，称之为“隔墙”现象。“隔墙”现象是由北京科技大学在研究钢管内折时提出的^[2]，包钢无缝钢管厂在研究内折问题时也发现了同样现象^[1]。

“隔墙”现象是金属流动造成的，而不是氧化铁皮或其他异物。在用轧制管坯穿孔时，顶头前的金属只有两种状态：开裂或不开裂，从不出现“隔墙”现象。因此，可以说“隔墙”现象是连铸管坯的特有现象。

由于连铸管坯中“隔墙”的存在，防止了管坯中心开裂金属发生氧化，从而可避免钢管内折、裂纹等缺陷的发生。

3.2 疏松区和内折的关系

从“隔墙”现象来说，连铸管坯的中心疏松不仅是凝固过程中不可避免的，而且对管坯穿孔变形过程有利，关键是疏松区面积大小和偏心的程度。从图 1 可以看出，天津钢管公司连铸管坯的疏松级别一般为 1 级，疏松区面积较小。

疏松区面积大，表明柱状晶比较不发达；疏松区偏心距大，表明有一个方向上柱状晶粗大。为了避免连铸管坯疏松区在穿孔过程中开裂，疏松区在穿孔顶头的鼻部所能覆盖的范围内，钢管不产生管端内折。

4 连铸管坯缩孔与钢管内折缺陷的关系

4.1 连铸管坯缩孔的形成

图 1 所示为连铸管坯酸洗后的低倍组织，从中可以看出连铸管坯缩孔较严重。缩孔形成的原因是在连铸过程中，在液相穴凝固末端连铸管坯的中心凝固速度和表面凝固速度相比有很大差异，由此会引起管坯中心收缩和表面收缩的差异，一般表现为中心的收缩速度快。凝固末端液相穴狭窄且钢水的粘性较大，如果中心收缩造成的体积空隙不能得到及时补充，就会在连铸管坯中心形成中心缩孔。

4.2 中心缩孔对内折的影响

连铸管坯不连续的中心缩孔，在加热过程中空气不流通，在穿孔时又有“隔墙”的保护，周围的金属不会被氧化，可以被轧合而不产生内折。连铸管坯端面上的开放性缩孔在加热过程中被氧化，轧制时不能轧合而形成管端内折；管坯连续的过大的缩孔，轧制后在钢管内表面形成翘皮状折叠裂纹即内折。因此，连铸管坯允许有 2 级以下的不连续缩孔存在，而不允许有管坯端面上的缩孔及连续的过大的(2 级以上)缩孔存在。

4.3 影响缩孔的因素

影响缩孔的因素有：

(1) 调整合适的二冷水可控制缩孔，但单靠调整二冷水其作用是有限的。

(2) 结晶器电磁搅拌对减少缩孔效果明显。

(3) 合适的过热度以及在高过热度下配以合适的拉速，可以降低缩孔的发生率。

(4) 连铸管坯低倍中心收缩和内部裂纹级别高低的走向，基本与钢水过热度的大小走向一致。

4.4 提高连铸管坯低倍组织的质量

连铸管坯低倍组织的好坏取决于连铸工序，主

要的控制参数是过热度、拉速和二冷水量。拉速是根据过热度设定的，二冷水量又是根据拉速设定的。连铸管坯组织出现异常时，多是由于三者的关系未能很好匹配，特别是未能根据不同气候条件下水温的变化及时调整工艺参数。因此，针对不同钢种、不同连铸管坯规格设定相应的控制参数，对控制低倍组织至关重要。

天津钢管公司在 2001 年的设备改造中增加了电磁搅拌装置。电磁搅拌的实质是借助在连铸管坯液相穴内感生电流的电磁力强化液相穴钢水的运动，由此强化钢水的对流、传导、传质过程，从而控制连铸管坯的凝固过程。

使用电磁搅拌后连铸管坯的等轴晶率可达到 40%~60%，中间裂纹与疏松可减轻 0.5~1.0 级。跟踪炼钢厂改造后使用电磁搅拌的管坯发现，管坯的酸浸低倍组织得到了明显改善，激冷层厚度增加 2~4 mm，柱状晶变短，疏松区面积增大。

5 连铸管坯缓冷对钢管内折率的影响

连铸管坯凝固过程始终处于强制冷却状态，因凝固壳内外温差的存在而造成连铸管坯内部产生热应力。连铸管坯的热应力及其大小对管坯穿孔变形时的内应力是否有影响，从而影响钢管内折率。针对这一问题，进行了管坯缓冷试验。

缓冷试验钢种为 29CrMo44，管坯直径为 270 mm，钢级 P110，成品钢管规格 Φ177.8 mm×10.36 mm。试验办法是当连铸管坯定尺切割后冷却到大约 300 ℃时，用磁盘吊车吊到地面。每炉钢坯的一半采取堆垛缓冷，每堆 5 层；另一半采取正常冷却，平铺成一层。将缓冷管坯重新编炉号，共 6 炉。表 2 是连铸管坯缓冷试验的温度变化记录。

表 2 缓冷试验时连铸管坯堆垛各层的温度变化情况

时间(时:分)	℃					
	底层外部	底层中部	中层外部	中层	上层外部	上层中部
3:30	237	292	328	261	307	345
8:00	141	151	173	182	215	233
10:30	100	128	135	128	134	195
13:00	88	77	108	100	120	132
15:30	63	86	77	87	73	175

整个缓冷过程历时 12 h。9 d 以后将缓冷和非缓冷的连铸管坯依次间隔装入环形炉加热，再采用相同工艺参数轧制相同规格的产品，观察管坯缓冷

对钢管内折率的影响。表 3 是针对内折缺陷的质量统计。

通过试验初步得出以下结论：缓冷作用是比较

表3 缓冷试验时钢管内折缺陷的质量统计

序号	检验数 /支	合格数 /支	不合格品数/支		内折率 /%
			内折数	其他废品数	
01	141	129	7	5 (壁厚超差判废)	5.0
2	120	117	3	0	2.5
03	126	117	8	1 (无损探伤判废)	6.3
4	69	67	2	0	2.9
05	138	132	5	1 (无损探伤判废)	3.6
6	84	82	2	0	2.4

注：序号前加“0”代表使用正常冷却的连铸管坯；1位数代表使用经缓冷的连铸管坯。

明显的。虽然此次试验温度较低，但从统计结果来看，缓冷的管坯轧管后没有无损探伤判废品，内折缺陷略有减少，其内折率小于3.0%；而不经缓冷的管坯轧管后的内折率大于3.5%。这说明缓冷能

释放管坯的内应力，在穿孔时管坯的切向应力相应降低。若提高穿孔临界压下率，将更加有利于金属变形，从而有效地降低钢管内折的产生。

6 碳当量对钢管内折缺陷的影响

把钢中合金元素(包括碳)的含量按其作用换算成碳的相当含量称为该钢材的碳当量，是评定钢材焊接性的一种指标。该指标决定了连铸管坯内裂纹有多少在热变形时能够轧合，以及影响钢管内折率的大小。

对天津钢管公司石油套管产品中的13个钢种进行了碳当量计算(表4)，连续6个月对这13个钢种的套管内折率进行统计，将其平均值列入表4。然后分别以碳当量与内折率为横、纵坐标绘制出两者的关系曲线(图4)，得出回归方程。

表4 13个钢种的碳当量及其钢管内折率

项 目	30Mn4	30Mn5	26MnMo	34Mn5	34Mn5V	37Mn5	26CrMo4S	37Mn2V	37Mn2V/1	26CrMo4	39Mn2V	29CrMo44	37MnCr62V
碳当量	0.514	0.525	0.532	0.559	0.561	0.621	0.647	0.665	0.657	0.658	0.679	0.718	0.765
内折率	4.380	3.590	3.300	3.890	4.770	4.370	4.250	4.530	4.230	6.010	6.700	6.540	6.770

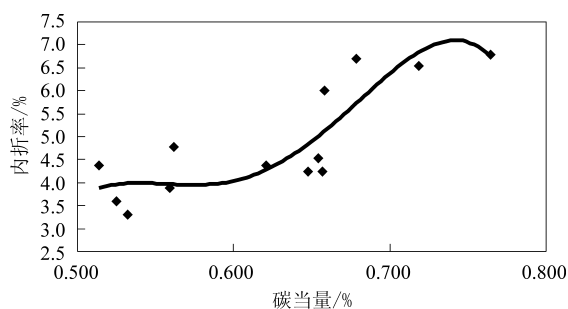


图4 碳当量与内折率之间的关系曲线

回归方程为：

$$\begin{aligned} \text{内折率} = & -83.862x^4 + 207.38x^3 - 190.34x^2 \\ & + 76.965x - 11.543 \quad (x \text{ 为碳当量}) \\ R^2 = & 0.7331 \quad (R \text{ 为回归系数}) \end{aligned}$$

由此可以看出，当碳当量在0.500%~0.800%时，随着碳当量的增加，连铸管坯的塑性降低，内折率相应增加。

7 结 论

(1) 柱状晶是导致内折的主要因素，因此穿晶的连铸管坯必须判废，绝不允许轧制。增大管坯的等轴晶率和缩短柱状晶长度，可以减少内折的产生。

(2) 连铸管坯穿孔变形的特点产生了“隔墙”现象，防止了连铸管坯中心开裂金属的氧化，从而使连铸管坯的疏松区在穿孔顶头的鼻部所能覆盖的范围之内，钢管不产生管端内折。

(3) 不连续的中心缩孔，在加热过程中空气不流通，在穿孔时又有“隔墙”保护，因而不产生内折。连铸管坯端面上的缩孔及连续的缩孔过大，易产生内折。因此，允许2级以下的不连续缩孔存在，不允许有连铸管坯端面上的缩孔及连续的过大的(2级以上)缩孔存在。

(4) 管坯缓冷不仅有利于轧制变形，而且减少内折的产生。

(5) 管坯的碳当量与钢管内折率之间存在着一定的曲线关系，还有待于进一步研究。

8 参考文献

- 1 陈维津，李小龙，朱景清，等. 连铸圆管坯的质量及其控制 [C]. 中国金属学会轧钢学会钢管学术委员会第四届一次年会，内蒙古包头，2000.
- 2 陈维津，朱景清，郭兆成，等. 连铸圆管坯质量的研究 [J]. 钢管，1997，26(5)：1~4.

(收稿日期：2006-04-25)