

## 26CrMo4V 钢高抗挤套管内折叠的分析和改进工艺措施

孙开明<sup>1,2</sup> 李士琦<sup>1</sup> 张传友<sup>2</sup> 郝健<sup>1</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 天津钢管集团股份有限公司技术中心,天津 300301)

**摘要** 26CrMo4V 钢(0.26C,0.95Cr,0.16Mo,0.07V)  $\Phi 245$  mm  $\times$  12 mm 套管内壁凸包折叠的分析表明,该缺陷有沿套管内壁同侧随机分布的规律性,凸包内存在 Si、Mn、Fe 复合氧化层。认为在穿孔时,连铸坯中的偏心缩孔内壁形成的稳定氧化层阻止缩孔内壁界面的“焊合”,在剪切-拉伸应变的作用下,形成内折叠缺陷。通过低过热度、弱二冷和控制拉坯速度等工艺措施,使内折报废率从 15.43% 降至 5.95%。

**关键词** 26CrMo4V 钢 套管 内折叠 连铸工艺

## An Analysis on Inner Overlap of High Anti-Collapse Strength Seamless Casing Tube of Steel 26CrMo4V and Improved Technology Measure

Sun Kaiming<sup>1,2</sup>, Li Shiqi<sup>1</sup>, Zhang Chuanyou<sup>2</sup> and Yu Jian<sup>1</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Technology Center, Tianjin Pipe (Group) Corp Ltd, Tianjin 300301)

**Abstract** It was indicated by analysis on bulge-like inner overlap of  $\Phi 245$  mm  $\times$  12 mm casing tube of steel 26CrMo4V (0.26C, 0.95Cr, 0.16Mo, 0.07V) that the defects distributed random at the same side of inner wall and there was Si-Mn-Fe compound oxide layer in overlap. It was considered that the bonding of eccentric shrinkage cavity in cast bloom was prevented in piercing by the stable oxide layer which formed at inner wall of eccentric shrinkage cavity, and the inner overlap defects formed at action of combined shear and tensile strains during piercing. With the technology measures such as lower overheating of liquid steel, weak secondary water cooling and controlling casting speed, the reject ratio of tube with inner overlap decreased to 5.95% from original 15.43%.

**Material Index** Steel 26CrMo4V, Casing Tube, Inner Overlap, Concasting Technology

天津钢管公司(TPCO)采用中碳 Cr-Mo-V 钢作为套管材料,开发了系列高抗挤毁套管<sup>[1,2]</sup>。内折是无缝钢管生产常见的缺陷形式,其形成的原因主要有 3 种:(1)工具磨损引起的内折,包括顶头磨损造成的螺旋状起皮、芯棒或其它硬物刮伤引起的内折<sup>[3]</sup>;(2)铸坯质量引起的内折<sup>[3,4]</sup>,包括夹杂物偏聚(如 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等)、端部疏松氧化和中心等轴晶偏心;(3)轧制内折<sup>[5,6]</sup>。分析认为,内折的形成除少量是由于顶头前压下量过大所造成的轧制内折以外,主要是铸坯质量差和轧制工具磨损引起的<sup>[5]</sup>。但 TPCO 经采用结晶器电磁搅拌、二冷独立配水表由 2 个增加到 17 个后,铸坯质量已明显改善,且加强了工具巡检,内折报废率大幅度降低<sup>[7]</sup>。

### 1 实验材料

26CrMo4V 钢种套管材料生产工艺:采用 150 t 超高功率电弧炉冶炼、LF 二次精炼、夹杂物变性处理后的圆坯连铸,经管坯检验、环形炉加热、管坯定心后的斜轧穿孔、250 mm 限动芯棒连轧机连轧和定减径,经过一次矫直后进行淬火+回火的调质处理,

再经二次热矫后,最后进行螺纹加工、拧接箍、通径和上保护环等后续机加工过程。

最近在生产规格为  $\Phi 245$  mm  $\times$  12 mm 的套管时,有 4 个炉次、每个炉次有 3~4 支轧管存在内壁鼓包缺陷。取炉号为 063973 的缺陷套管,从中截取带有缺陷部位的样管,进行缺陷分析。

### 2 实验结果

#### 2.1 缺陷部位宏观形貌和钢的化学成分

在缺陷附近取样,进行化学成分分析,结果正常(表 1)。截取缺陷样管长约 200 mm,经肉眼观察发现,沿样管同侧内壁随机分布着数量较多的凸包状缺陷,大部分凸包缺陷形态完整,少量凸包缺陷呈破碎状,凸包的外形呈条状,绝大多数凸包沿管的纵向分布,极少数沿横向分布。但所有凸包缺陷的尺寸

表 1 折叠附近 26CrMo4V 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel 26CrMo4V near the overlap /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Al	O	N
0.26	0.23	0.98	0.013	0.004	0.95	0.16	0.07	0.018	0.0018	0.0078

有限,呈局部分布,并不是通长型凸包缺陷。

采用锯床将样管沿缺陷所在位置横向切开以后,对缺陷的断面进行了拍照,其典型形貌见图 1,断面形状为凸包状,开裂的位置在壁厚方向距内表面约 2 mm,裂缝长度约 7 mm。

### 2.2 缺陷形貌和能谱分析

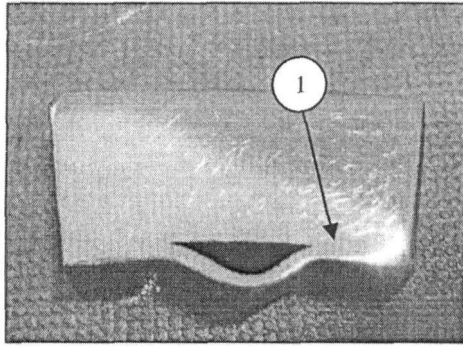


图 1 26CrMo4V 钢套管典型内折的形貌

Fig.1 Morphology of typical inner overlap of steel 26CrMo4V casing tube

图 1 中的样品经表面抛光后,在光学显微镜下观察,在凸包断面存在裂纹尖端(图 2a),在裂纹尖端前沿约 15 mm 处,如图 1 中箭头①所指位置,还发现一条小裂纹,图 2(b)为放大后的小裂纹全貌,裂纹长度约 20 mm,宽度约 0.1 mm,裂纹呈断续分布,在小裂纹中分布有灰色的填充物。

图 2(a)中的小裂纹经进一步放大后,观察了裂纹尖端的情况(图 2c)。裂纹四周的白色带状物为铁素体组织(图 2c 中箭头②指示),另外,在铁素体带上弥散分布着大量的细小颗粒状氧化物(图 2c 箭头③指示),说明在裂缝周围存在氧化脱碳现象。裂纹尖端被铁素体块钝化。

图 2(d)是小裂纹中间段形貌的金相照片。从图 2(d)中可见,裂缝内腔中呈灰色的氧化物已破碎,呈块状断续分布,在无氧化物的裂缝处存在铁素体块“桥接”的现象(图 2d 中箭头④和⑤指示),说明裂缝中的氧化物夹层有阻止其“愈合”的作用。

组织形貌观察结果推测,在穿孔轧制前,连铸坯

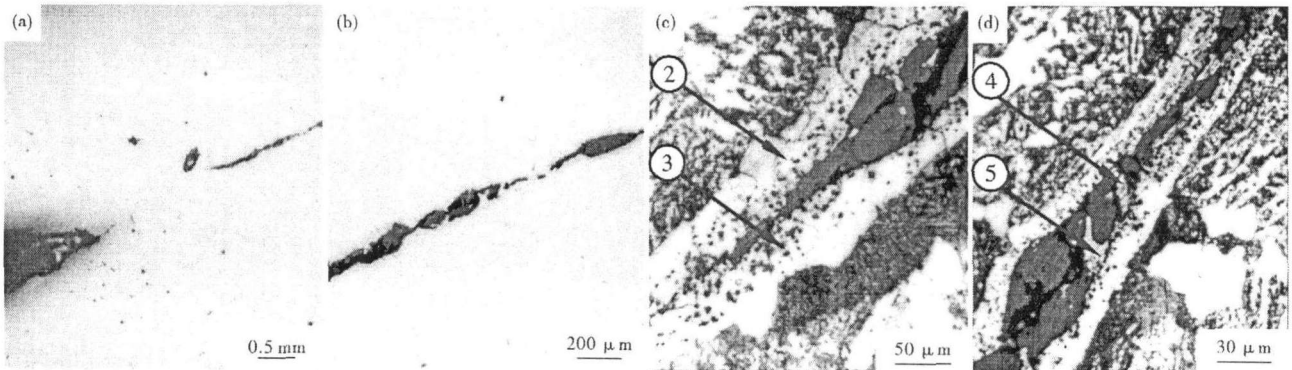


图 2 内折裂缝尖端宏观和微观组织形貌:(a)内折裂缝尖端及其前沿小裂纹;(b)小裂纹全貌;(c)裂缝四周的铁素体②及氧化物颗粒③;(d)铁素体④⑤“桥接”形貌

Fig.2 Morphology of macro- and micro- structure near crack tip of inner overlap: (a) crack tip and its front small crack; (b) morphology of small crack; (c) ferrite ② and oxide particles ③ around crack; (d) ‘bridge joined’ morphology of ferrite ④ ⑤

中存在内腔已氧化的宏观缩孔,伴随着脱碳现象。在随后的轧制过程中,缩孔受压延长,形成裂缝,沿形变带分布,并被铁素体带所包围。其中的氧化物被破碎成块,呈不连续分布。未氧化的部分裂缝处,在轧制过程中有愈合的趋势,即存在上述所谓“搭桥”现象,而裂缝表面氧化部分,则不能愈合。

采用扫描电镜对图 1 中裂纹的分析表明,在裂纹尖端的内腔中有氧化物填充,氧化物疏松呈颗粒状。EDAX 能谱对裂纹尖端微区的化学成分进行了分析得出,内壁凸包裂缝中的夹层为氧化物,且氧化物所含的主要化学成分有 Fe、Mn、Si,即内壁凸包裂纹内腔中的氧化物中除氧化铁外,还含有少量氧化

硅和氧化锰。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 缺陷性质及产生机制

对缺陷分布和组织形貌进行了观察,在 TP110TT 级套管中出现的内壁缺陷,具有如下特征:(1)缺陷外形呈凸包状,为局部缺陷,属于典型的局部内折;(2)凸包成片出现,且具有沿同侧内壁分布的规律性;(3)凸包被铁素体带包围,周围存在氧化脱碳现象,且裂缝中形成了氧化物夹层,无裂纹扩展现象。

缩孔致内折缺陷的产生机制为:连铸坯在凝固

过程中,首先是在结晶器内形成由激冷层构成的坯壳,其厚度与中间包中钢水的过热度有关,即过热度越大,激冷层的厚度越薄;当铸坯经过二冷区时形成柱状晶,在其初始阶段,柱状晶均匀生长,随后,某些晶体学方向有利的柱状晶择优生长,并形成“桥接”现象,柱状晶的厚度取决于二冷比水量及拉速的综合作用。当连铸坯拉速过大时,液相穴的深度增加,在二冷区及二冷之外形成“小钢锭”结构,即穴中钢水流动性变差,来不及补缩,产生中心疏松甚至缩孔。凝固后,缩孔保留在铸坯中,即使加热也不能消除。

在连铸过程中,如果铸坯在二冷区冷却均匀,柱状晶从坯壳向中心生长的平均速度一致,则缩孔将在铸坯中心形成。但如果铸坯在二冷区因上下水量分配不一致,冷却不均匀,在冷却强度较大的一侧柱状晶生长速度较快,形成的缩孔将偏离中心,而形成偏心缩孔。

在坯料的穿孔轧制过程中,中心缩孔大都会因变形直接穿孔洞而消失,对内折缺陷的形成影响相对较小。但偏心缩孔对内折缺陷的形成影响相对较大。

对内折缺陷套管对应炉次的连铸生产工艺进行了追溯,生产记录显示中间包钢水的温度为1548~1580℃,浇铸时钢水过热度为86~98℃;拉坯速度为0.80~0.95 m/min;二冷水强度采用32号水表控制在弱冷水平。经过二冷区水量仔细检查,发现有上下喷水量不一致的现象。上述情况表明,26CrMo4V套管生产时,少数炉次浇铸时钢水过热度偏大,拉速偏高,是铸坯宏观缩孔形成并最终导致内折缺陷的主要原因。

### 3.2 防止缺陷产生的措施

根据上述对26CrMo4V套管内壁缺陷的分析,改善铸坯冶金质量,尽量减少铸坯中的宏观缩孔,是降低套管内折缺陷率的关键。为此,必须严格控制连铸工艺参数,即主要控制钢水过热度、二冷比水量、拉速三者之间的匹配关系,并提出了以下工艺措施:

(1)对于26CrMo4V钢,建议中间包钢水过热度控制在30~50℃为宜,且在连铸生产中应高度重视钢水过热度的波动,在过热度偏高时不浇,以防止个别炉次产生铸坯冶金质量问题。但是,应该注意的是,过低的过热度会造成浸入水口堵死而造成浇铸失败。即使是能够浇铸也会出现铸坯表面翻皮、结疤、折皱等缺陷,大型夹杂物不易上浮。

(2)拉速的控制应与过热度相匹配,严格按照 $\Delta T-V_g$ 工艺曲线进行控制,并尽可能控制在曲线值

的下限值附近进行拉坯,有利于减轻铸坯内外应力的作用。因此,建议拉坯速度控制在0.60~0.80 m/min。

(3)连铸的二冷比水量应选择弱冷方式上,即比水量稍小为宜,这对铸坯裂纹敏感性较高的26CrMo4V套管钢有好处。更为重要的是,还应加强对二冷区水表的检测,确保上下水量一致,使铸坯冷却均匀,以防止宏观偏心缩孔。

按改进的连铸工艺对26CrMo4V进行了生产试制。典型连铸工艺参数为中间包钢水温度1531℃,浇铸时钢水过热度49℃;拉坯速度0.60 m/min;二冷水强度控制在弱冷水平。针对个别坯次的铸坯在不同部位截取多个断面样进行了检验,没有发现宏观缩孔现象,夹杂物级别为0级,低倍检查等轴晶区、柱状晶区和疏松区的尺寸分别为10~20 mm、100~120 mm和90~110 mm。统计内折报废率从工艺改进前的15.43%降低到工艺改进后的5.95%,说明经连铸工艺改进后,产品合格率大幅度提高。

## 4 结论

在用26CrMo4V钢种生产高抗挤石油套管过程中,内壁产生的凸包缺陷是局部内折,是因铸坯中的宏观偏心缩孔在穿孔变形过程中内腔氧化不能焊合而形成的。其特征是凸包周围存在氧化脱碳现象,内有氧化物夹层,外有铁素体带包围,且凸包沿同侧内壁随机分布。采用低过热度 and 弱二冷水连铸,并确保上下水量一致,可提高铸坯的冶金质量。

国家863课题资助项目(2007AA03Z509)

### 参考文献

- 1 严泽生,高德利,张传友,等.一种新型高抗挤套管的研制.钢铁,2004,39(7):35
- 2 张传友,沈淑君,严泽生,等.适应非均匀载荷超高强度的套管研制与应用.天津冶金,2004(5):10
- 3 周晓峰.无缝钢管内折缺陷分析.天津钢管,2007(3):10
- 4 张惠萍,陈洪琪,卢玲玲,等.连铸管坯质量对钢管内折缺陷的影响.天津钢管,2007(1):32
- 5 李宏峰,陈洪琪,张惠萍.连铸圆坯斜轧穿孔变形特征和内折缺陷的探究.天津钢管,2007(3):6
- 6 郭殿锋,李春龙.减少连铸圆坯轧制无缝管产生内折缺陷研究.2001中国钢铁年会论文集,2001:713
- 7 沈涛,孙彦辉,温德松,等.圆坯连铸机技术改造.天津冶金,2005(6):19

孙开明(1959-),男,总工程师,教授级高级工程师,1982年北京科技大学毕业,钢铁冶金和无缝钢管制造。

收稿日期:2008-05-21