连铸圆坯应力裂纹与无缝钢管缺陷关系的探讨*

邹友富,米永峰,郝葆江,李东明,孟庆飞

(内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 大直径连铸圆管坯在冷却及拉矫过程中会产生应力集中,当应力过大时易在连铸圆管坯内部及表面形成应力裂纹。文章分析了连铸圆管坯应力裂纹产生原因及机理,梳理了热轧无缝钢管过程中因连铸圆管坯应力裂纹易造成的钢管缺陷类型;通过分析连铸圆管坯应力裂纹和无缝钢管缺陷关联性,给出了控制和解决连铸圆管坯应力裂纹及无缝钢管缺陷的指导性建议,有助于在实践中有针对性地控制相关要素,减少无缝钢管轧制过程的缺陷。

关键词: 大直径连铸圆管坯;应力裂纹;无缝钢管"圈裂"缺陷;无缝钢管内离层缺陷

中图分类号: TG335.71 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2019)04-0034-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.04.009

Discussions on Relationship between Stress Cracks of Continuous Casting Round Billet and Defects of Seamless Pipe

Zou You-fu, Mi Yong-feng, Hao Bao-jiang, Li Dong-ming, Meng Qing-fei

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

Abstract: The stress concentration is generated in the processes of cooling, stretching and straightening for continuous casting tube bloom with large diameter as well as the stress cracks are formed on the interior and surface of continuous casting tube bloom when the stress is too large. In this paper, it is analyzed their causes and mechanisms as well as summarized the types of defects for steel pipe caused by them in the process of hot rolling seamless steel tubes. Moreover, the guiding suggestions for controlling and solving stress cracks of continuous casting tube bloom and defects of seamless steel pipe are proposed by analyzing their relevance, which conduce to controlling the related elements pointedly in practices and reduce the defects in the process of rolling seamless steel pipe.

Key words: continuous casting tube bloom with large diameter; stress cracks; "ring crack" defect of seamless pipe; defect of inner bed separation of seamless pipe

轧管用大直径连铸圆管坯,在冷却降温和加热升温的过程中,表层和心部会产生较大的温度差,收缩与膨胀不一致,就形成了较大的热应力,降温或升温速度越快、钢种导热性越差,产生的热应力就越大;同时,伴随着温度变化带来的组织转变,表层与心部组织转变会因温差不同步和冷速不同而出现较

* 收稿日期:2019-06-05

作者简介:邹友富(1970-),男,四川省成都市人,高级工程师,现从事无缝管产品及工艺开发工作。

大差异，不同组织的比容不同而形成组织应力。应力过大，会在铸坯缺欠处形成应力集中，超过抗拉强度就会拉裂形成应力裂纹。轧管变形中，不同机组不同轧制规格影响应力裂纹的演变，进而会形成不同状态的缺陷。梳理分析大直径连铸圆坯应力裂纹形成机理及其轧管缺陷的演变过程，对涉及的工艺技术问题进行探讨，便于控制关键要素，减少缺陷产生。

1　管坯应力裂纹产生机理

合金钢和低碳低合金钢导热率相对较低，如果冷速或升温速度过快，对大直径连铸圆管坯而言，其表层和心部的温差大，就有不同的冷缩或热胀，同时组织转变带来比容变化也不同，这是引发应力的根源。热应力与组织应力交错发生，冷却过程中心部的应力还有一个由压应力转化为拉应力并逐渐增加的过程，因此，从全过程来理解相对复杂，但从容易产生应力裂纹的温度段来分析与理解，则比较简单。

1.1　管坯外表面应力裂纹的形成

大直径连铸圆管坯在中、高温段冷却速度过快，表层温度急剧下降，表层与心部温差大，表层冷缩量相对更大而产生较大的拉应力，这是产生外裂纹的条件之一；条件之二是表层局部塑性变差，或是处在了热脆性温度区间，或局部温度过低，或夹杂物聚集等。

先说周向拉应力，其对心部产生很大的压应力，压缩心部释放应力的空间极小；随着应力积累，表层所受的拉应力越来越大，在其发生塑性变形而释放应力受限时，会在外表面选择一个应力集中点将其拉裂。这种情况一般发生在连铸环节局部温降过快的冷却段，形成的纵向裂纹在轧管加热环节氧化后十分明显，见图 1。



图 1　大直径连铸圆管坯表面纵裂

再说表层纵向拉应力，以热应力为主，连铸坯过拉矫机还会叠加矫直应力，表层有一条纵向直线带叠加的矫直拉应力最大，遇到振痕过大、局部温度过低等不利因素叠加，合力过大则会在铸坯表面缺欠点应力集中而拉出短小的横向裂纹。由于热应力与拉矫应力叠加后最大的纵向拉应力在一条直线带上，故该类横向小裂纹也常会在铸坯表面呈纵向直线带断续分布；裂纹细小，需酸洗后才能看见，见图 2。



图 2　大直径连铸圆管坯表面短小的横裂纹

1.2　大直径连铸圆管坯心部应力裂纹的形成

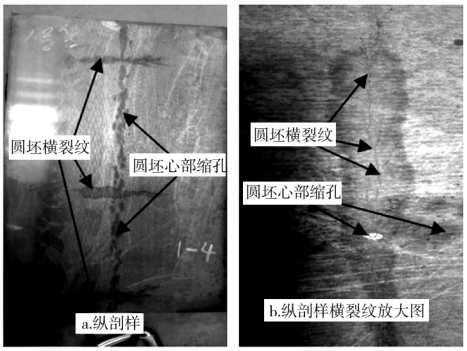
当铸坯到了低温段，情况则发生了改变，随着温度进一步降低，屈服强度、刚性显著提高，并且在冷却的最后阶段，热应力方向和高、中温段相反，即表层为压应力，心部为拉应力[1]。除此之外，铸坯冷却转变完成后的组织应力，也会叠加增大心部拉应力。以 12Cr1MoVG 为例，大部分组织已经转变为 F + P，随着进一步快速冷却，表层少量残余奥氏体发生贝氏体转变，比容变大，组织应力也使表层受压应力，心部受拉应力。热应力与组织应力叠加，铸坯周向、纵向都形成了较大的表层压应力和心部拉应力。表层压应力没有明显的危害性，心部拉应力则不然，或残存于钢坯内部成为残余应力，或于薄弱的应力集中点将心部拉裂（形成心部横裂、纵裂或环裂）而得到部分释放。在解剖未加热的 Φ600 mm 12Cr1MoVG 连铸坯时，曾在铸坯心部发现横向裂纹，形貌如图 3。对横裂纹取样作金相分析，表明其为应力裂纹。

1.3　大直径连铸圆管坯心部应力裂纹的扩展

带有残余内应力的大直径连铸圆坯，进入轧管机组加热，低温段的升温速度一般比较快，表层温度比心部高，表层热膨胀量大，从而给心部叠加一个较大的拉应力，升温速度越快，叠加的拉应力越大；这种力与铸坯冷却产生的残余内应力方向一致，两者叠加而成的合力急剧增大，会使原来已经形成的心部应力裂纹扩展而加重，也可能会在心部形成新的应力裂纹。故观察或解剖加热后的铸坯更容易发现心部裂纹。

铸坯心部横裂。因穿孔“圈裂”将同炉号Φ350 mm 12Cr1MoVG连铸坯从加热炉拉出，冷却后纵剖得到图3所示横裂纹，图中(a)纵剖样长500 mm，出现了三处横裂纹，(b)是(a)中间那个横裂纹放大后的形貌。从正面与背面观察，裂纹对称穿透，可以判定解剖前该段钢坯中有三处心部横裂面。

铸坯心部纵裂。从铸坯端面可以看出，裂纹从铸坯中心缩孔尖锐处开裂，它实际上是纵向心部开裂面，有的断续分布，有的在较长的范围内连续分布。图4即是发现穿孔毛管内表面纵向大螺旋内裂后从加热炉拖出的钢坯，端面可见其纵裂形貌。



(a)横剖样 (b)纵剖样

图3 12Cr1MoVG连铸坯纵剖得到的横裂纹形貌

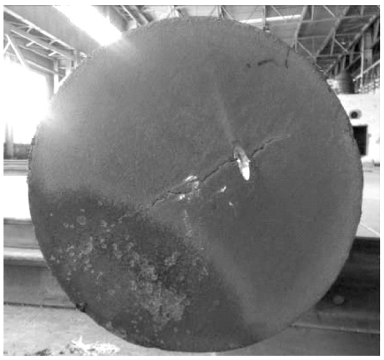


图4 Φ600 mm 4130X心部纵裂

心部环裂。这是一种在中心等轴晶区与中间柱状晶区之间产生的断续环向裂纹。当中心等轴晶区较小、心部周向拉应力较大时，这一带属于应力容易集中的薄弱环节。当周向拉应力过大时，应力于该界面集中而局部拉裂。图5即是这一带环状分布的发纹及酸洗后放大的形貌。

综上所述，大直径连铸圆管坯中、高温区冷却产生的外表面纵向裂纹，外观检查时相对容易发现，外表面横向小裂纹也可通过酸洗后检查发现；心部裂纹隐蔽性强，在加热前解剖检查发现的几率极小，在加热后的解剖检查发现的几率略微大一点。

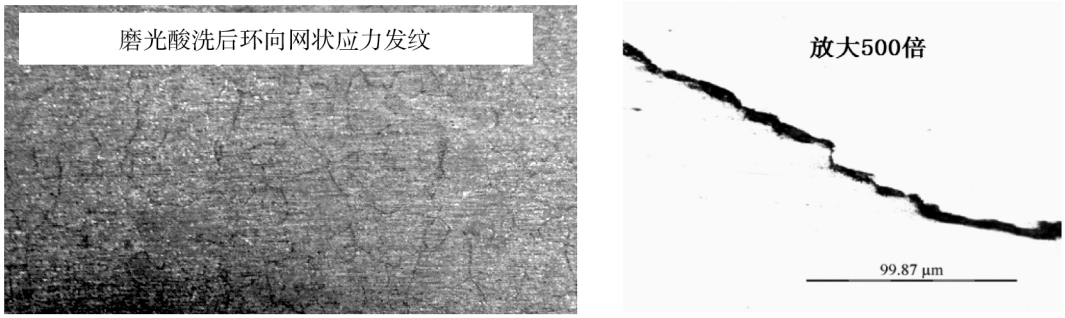


图5 环向发纹

2 管坯应力裂纹在穿孔变形中的演变

2.1 铸坯外表面应力裂纹演变为毛管外折

铸坯纵向外裂纹在加热过程中氧化严重，无“焊合”条件，穿孔变形后形成大螺旋分布的折叠。这种毛管外折叠一般比较严重，穿孔工序自检即可发现，常常剔除报废，不再进入轧管工序，该缺陷的责任判定也比较容易。铸坯外表面横向裂纹一般比较短小，穿孔变形后形成的外折缺陷也较小，穿孔后工序自检难以发现，带有这种缺陷的毛管会进入后续轧管。

2.2 铸坯心部横裂演变为毛管内表面“圈裂”

当中心缩孔较小且未连续，铸坯中间部分的横向裂纹则不会在加热过程中氧化，如果锻造比足够大，在塑性变形过程中可以将其“焊合”；但穿孔厚壁毛管时，锻造比小，对心部裂纹的“焊合”作用十分有限。

毛管在成型过程中，铸坯心部原始横裂面演变

为环形横裂圈，在毛管内表层较大的形变拉应力作用下，环形横裂圈被拉成毛管内表面“圈裂”。厚壁毛管的“圈裂”相对较深，形成后该断面与管体散热不同，外观可以辨认而将其剔出。同样条件下，穿孔薄壁毛管时，毛管内表面“圈裂”的绝对深度则浅一些，一是锻造比相对较大，对心部裂纹有一定的“焊合”作用；二是如果铸坯心部横裂面变形后投射到毛管壁厚的比例不变，薄壁毛管内表面“圈裂”的绝对深度自然浅得多。

穿孔毛管“圈裂”曾在大直径模铸坯穿孔中大量出现，容易出现该缺陷的钢种主要有中碳硅锰钢（27SiMn、26MnNbTi）、中高碳钢（45 钢）与中高碳合金钢（42CrMo、D6AE）等。随着连铸圆管坯的直径越来越大，之前没有出现过穿孔毛管“圈裂”的 12Cr1MoVG、35CrMnSiA、4130X 等品种也出现了“圈裂”缺陷，并在纵剖铸坯时发现，穿孔前坯料内已经出现径向横裂[2]。

针对 12Cr1MoVG 等大直径连铸圆管坯穿孔“圈裂”问题进行研究，分析相关因素并作了验证试验。大直径 12Cr1MoVG 连铸圆管坯穿孔毛管“圈裂”无规律性，同样轧管变形工艺连续生产，多数炉号质量良好，某些炉号部分钢坯穿孔“圈裂”；“圈裂”的道数差异极大，有的多达 10 圈以上，有的只有零星两三圈，有的钢坯又没有；“圈裂”的深度也无规律，有的深度达到毛管壁厚的 50% 以上，甚至局部达到 100% 而裂穿，有的深度则在毛管壁厚的 10% 以内；“圈裂”的均匀性也无规律，有的是整圈深度、宽度十分均匀，有的是半圈深半圈浅形成偏心状，还有的甚至呈半圈月牙形。这都是铸坯在连铸冷却和轧管加热过程中所受的应力状态不同、穿孔前形成了不同的心部横裂面所致。不同的典型“圈裂”缺陷如图 6 所示。

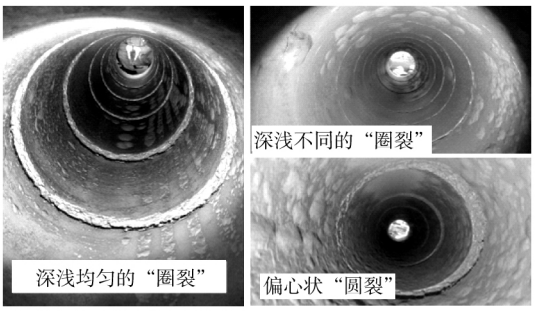


图 6　穿孔毛管“圈裂”形貌

2.3　铸坯心部纵裂演变为大螺旋状分布的毛管内裂

铸坯心部纵裂后空气容易顺着纵裂面进入，在加热中氧化，热变形不能将其“焊合”，穿孔内径扩大过程中形变拉应力将其拉开形成内裂，如图 7，毛管内表面既有“圈裂”，又有纵裂。

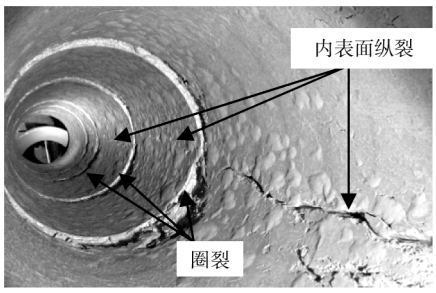


图 7　毛管纵裂与圈裂

2.4　断续环向裂纹演变为毛管内离层

环形裂纹断续分布，穿孔过程的塑性变形对其有一定“焊合”作用，未“焊合”的裂纹面则形成离层缺欠保留在毛管中，在穿孔工序自检或离线毛管检查中都难以发现。

3　后续轧管定径变形中的演变

3.1　外表面大螺旋状外折

如果毛管外折叠相对较小或安排轧后检查，则会让有缺陷的毛管进入轧管、定径工序。随着减壁、减径变形的进行，管材变薄变长，外折叠变薄、变长，且与基体贴得更紧，大螺旋状分布的螺距随着管材增长比例而增加。

3.2　外表面小外折

钢坯外表面横向裂纹形成的毛管短小外折则在轧管、定径中进一步延展，形成比较典型的钢质外折缺陷，如图 8。这种外折数量较少时，分布稀疏而无规律性，如果数量多、分布密集时则多数也呈大螺旋状分布。

3.3　内表面“圈裂”与纵裂

毛管内表面“圈裂”与纵裂经过轧管与定径的减壁减径后，内裂深度和形状有所改变，加上部分氧化铁和芯棒润滑物嵌入，外观看起来不那么明显了，有的甚至难以通过肉眼检查出来，见图 9。



图8 管材外折

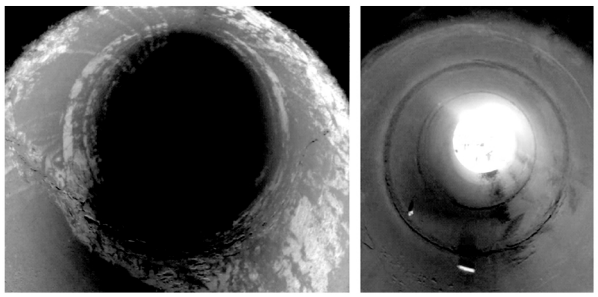


图9 管材内裂形貌

3.4 内表面离层型缺陷

内表面离层型缺陷在毛管上很难发现，经过轧管、定径后则容易形成缺陷暴露出来，变形中管材内径减径量越大，缺陷暴露越充分。连轧管机组在轧管过程中有空减径环节，即轧辊将毛管减径使其内表面贴紧芯棒的过程。减径中作用于内表层一个很大的周向压应力，对靠近内表面的离层，分离部分相当于非常薄(D/S非常大)的管件，在较大周向挤压应力作用下，非常容易产生失稳形成内鼓包现象[3]。内鼓包接触到芯棒被压破，并在后面减壁过程中被辗压而形成不规则的起皮状缺陷。原来较厚的离层部分在空减环节没有失稳鼓起，在轧管减壁的过程中被轧薄，到定减径环节，热变形在内表层产生周向压应力和纵向拉应力，在这两种应力作用下，较薄的离层失稳形成内鼓包并被拉长，有的甚至被拉成局部开口状鼓包。这时候荒管内表面没有变形工具，鼓包不容易被破坏而完整地保留下来。不同状态的内表面离层型缺陷的形貌见图10。

通过对比试验发现，同样的生产条件，由于不同轧管机组的热变形差异，严重影响内表面离层型缺陷的产生和暴露。如Φ280 mm铸坯在连轧管机组轧制Φ244.48 mm×11.05 mm 25CrMoNbV时，出现批量性内离层缺陷，将同炉号的连铸坯转到精密轧管机组(斜轧管机组)，以同样的加热控制，结果内离层缺陷几乎消失，只有微小的、可忽略的缺欠。两种轧管变形对比如表1(尺寸数据均为公称规格)。

表1 Φ280 mm铸坯轧制Φ244.48 mm×11.05 mm变形参数对比表

机组	毛管/mm		荒管/mm		光管/mm		轧管内径减径率/%	定径内径减径率/%
	规格	内径	规格	内径	规格	内径		
连轧管	336×23.6	288.8	281×10.57	259.86	244.5×11.05	222.4	10.02	14.42
斜轧管	294×16.05	261.9	283×10.8	261.4	244.5×11.05	222.4	0.19	14.92

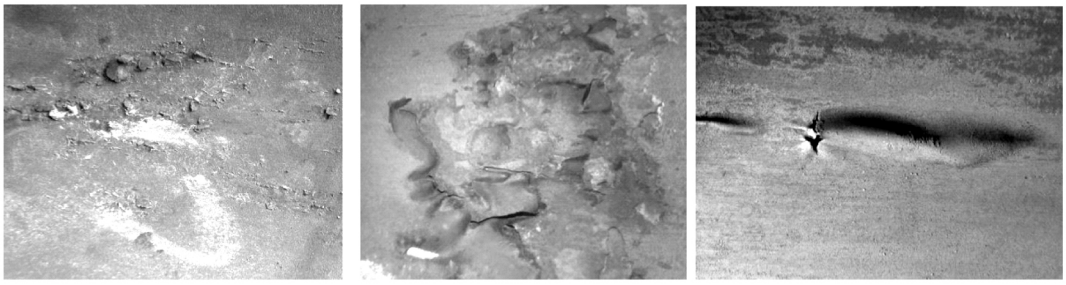


图10 内表面离层型缺陷的形貌

(下转第51页)

司具备了生产抗硫化氢套管的能力，进一步完善了自己的产品结构，增强了企业在国内外市场的竞争力，在企业取得良好经济效益的同时，也带来了很好的社会效益。

参 考 文 献

[1] 李呐，李晨光，汤智涛，等. 抗 H_2S 石油套管钢的设计 [J]. 金属学报，1998，34(10)：1073－1076.

[2] 毕永德，许文妍，赵游云. 抗硫化氢应力腐蚀石油套管系列产品的开发与应用 [J]. 天津冶金，2005，(6)：23－25.

(上接第 38 页)

环向断续应力裂纹是根源，穿孔中演变成内离层，毛管穿得越薄，其焊合作用越大；内径减小是内离层缺陷暴露出来的动力，斜轧管环节温度高、减壁过程中内径几乎没有减小，“焊合”作用进一步加大；定径时虽然内径减径率与连轧管机组相近，但原来的离层“焊合”了，导致鼓包几乎消失。

4 预防措施

只要明确了大直径连铸圆管坯应力裂纹形成机理及其带来的轧管缺陷，预防措施也就明确了。铸坯外表面应力裂纹的预防由炼钢工序来控制，措施容易落实到位；心部应力裂纹由连铸低温段冷却与轧管加热低温段升温两个环节的应力共同作用产生，需要达成共识，共同控制和落实预防措施。综上所述，预防心部应力裂纹需要控制三个因素：一是防止炼钢连铸低温段冷却产生的心部拉应力过大，二是避免轧管加热时低温段升温叠加的心部拉应力过大，三是提高铸坯心部冶金质量水平及抗裂性。如这三者都控制到位，则能最大程度地避免产生铸坯心部裂纹风险。

4.1 炼钢连铸环节的预防措施

对容易出现心部应力裂纹的大直径连铸圆管坯，工艺上要求缓冷，并根据实际生产情况制定相应措施，以保证连铸坯的缓冷效果。

4.2 轧管加热环节的预防措施

适当减慢轧管加热过程中低温段升温速度是重要的预防措施。可参照易裂钢加热工艺制度试行加热作对比，即控制入炉时的炉温、延长低温段的加热时间，使钢坯在低温段的升温速度降到较低水平。

5 结语

通过分析大直径连铸圆管坯应力裂纹形成机理及其在轧管过程中的演变情况，能更好地分析理解相应轧管缺陷的来龙去脉，有利于找出关键因素并采取措施进行预防。大直径连铸圆管坯心部应力裂纹一般是铸坯冷却环节与轧管加热环节产生拉应力的合力过大所致，针对规格品种，从全流程角度优化铸坯缓冷工艺和轧管加热升温制度，明确需要炼钢与轧管工序协同落实工艺要求和预防措施，才能有效控制其危害。

参 考 文 献

[1] 中国机械工程学会热处理专业分会. 热处理手册(第 3 版第 1 卷) [M]. 北京：机械工业出版社，2001.

[2] 刘谦. 4130X 气瓶管内壁圈裂原因探究及解决办法 [J]. 中国冶金. 2016，26(4)：57－61.

[3] 周梦雄. 钢管内表面鼓包形成原因分析 [J]. 轧钢. 2006，23(4)：26－27.