



连铸钢板坯凝固壳横截面变形 与内部裂纹的关系

曾全胜, 蒋云云

(长沙工业学校, 长沙 410014)

隋 然

(湖南出入境检验检疫局, 长沙 410007)

摘 要: 对实际观察到的连铸钢板坯拉出结晶器时的横截面形状与最终形成的内部裂纹进行了理论分析, 找到了凝固壳横截面形状变化与内部裂纹的形成及种类之间的因果关系及规律性, 为预防连铸钢板坯内部裂纹提供了理论依据。同时对 YB/T 4003—1991 标准中的有关问题进行了讨论, 并从生产工艺角度概述了影响连铸钢板坯内部裂纹的各种因素。

关键词: 连铸钢板坯; 内部裂纹; 凝固壳; 变形; 规律

中图分类号: TG249.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4012(2003)06-0290-05

RELATIONSHIP BETWEEN DEFORMATION OF CROSS SECTION OF COAGULATING SHELL AND INTERNAL CRACKS IN CONTINUOUS CASTING STEEL SLAB

ZENG Quan-sheng, JIANG Yun-yun

(Changsha Industry College, Changsha 410014, China)

SUI Ran

(Hunan Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Changsha 410007, China)

Abstract: True shapes of cross section of continuous casting steel slab in the time that slab is just pulled out of crystallizer and formed finally internal cracks are analysed in theory. The relationships and its law between deformation of cross section of coagulating shell and internal cracks are found. It is important to propose the theory basis for preusention of internal cracks. Train of thought is clear and systematic. For these reason, inadequacys and misunderstanding in standard YB/T 4003—1991 in effect are indicated. Meanwhile, influence factors on internal cracks are summarized from productive technology.

Keywords: Continuous casting steel slab; Internal crack; Coagulating shell; Deformation; Law

1 引言

目前, 有关科技书刊和标准关于连铸钢板坯内部裂纹的种类及成因的说法不尽相同, 对其本质的认识还存在误区。为了准确有效地预防内部裂纹, 正确合理地评价其危害, 有必要对连铸钢板坯内部裂纹作进一步的研究。

2 内部裂纹的定义及分类

普遍认为, 从结晶器拉出来的带液芯的铸坯, 在弯曲、矫直或辊子压力的作用下, 在正在凝固的、非常脆弱的固液界面产生的裂纹, 叫内部裂纹。这种裂纹可通过铸坯试样的酸浸和硫印试验显示, 是一次晶晶间裂纹, 有的用肉眼也可观察到。

在 YB/T 4003—1991^[1] 中, 将连铸钢板坯中的内部裂纹按其所在部位分为四类, ① 中间裂纹(铸坯横截面上位于宽面最先凝固的细小等轴晶激冷层与最后凝固的粗大等轴晶区之间的宽面柱状枝晶的

收稿日期: 2002-10-10

作者简介: 曾全胜(1973-), 男, 讲师, 学士。

晶间裂纹)。② 三角区裂纹(铸坯横截面上位于窄面最先凝固的细小等轴晶激冷层与最后凝固的粗大等轴晶区之间的窄面柱状枝晶的晶间裂纹)。③ 中心裂纹(铸坯横截面上最后凝固的粗大等轴晶区内的晶间裂纹)。④ 角部裂纹(铸坯横截面上位于角部的宽面柱状枝晶的晶间裂纹)。

铸坯横截面结晶结构和内部裂纹分别示于图 1 和图 2。

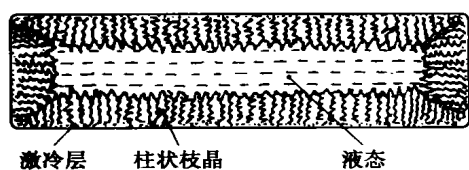


图 1 连铸钢板坯横截面结晶结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of casting structure of cross section in continuous casting steel slab

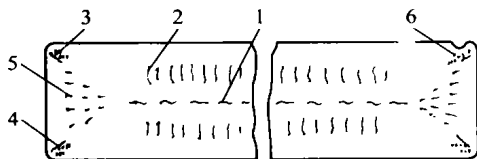


图 2 连铸钢板坯的各种内部裂纹示意图

1. 中心裂纹 2. 中间裂纹 3. 角部裂纹
4. 三角区分界线裂纹 5. 三角区裂纹
6. 角部表面凹槽对应的内部裂纹

Fig. 2 Schematic diagram of internal cracks in continuous casting steel slab

3 铸坯凝固壳横截面变形与内部裂纹关系

铸坯在凝固过程中具有内部裂纹的形成条件。铸坯凝固壳相当于承压容器,液芯静压力系正压,使凝固壳向外凸起,即鼓肚。因该压力与铸坯断面尺寸无关,仅取决于钢液密度和液芯的垂直高度,所以就某点而言,作用于宽面和窄面的钢液静压力是相同的。只是窄面凝固壳刚性较大,宽面鼓肚更凸而已。鼓肚经矫直辊、拉辊受压力又产生反向变形。从凝固壳横截面上看,这种变形表现为直边的弯曲。变形伴生内应力,弯曲变形内应力垂直于凝固壳的厚度方向即一次晶的晶界。外凸变形部分,中性线外层为拉应力,内层为压应力,而内凹变形部分则与之相反。导致开裂的内应力是拉应力。固液界面的临界强度仅为 1~3MPa,由变形至断裂的临界应变仅为 2%~4%,极为脆弱^[2],因此成为前述公认的

内部裂纹定义中所述的裂纹源。从内部裂纹的定义和分类中可知,裂纹的扩展方向都垂直于变形伴生的拉应力,即裂纹扩展的最小阻力路线——一次晶晶界垂直于拉应力。

通过对刚刚被拉出结晶器时的铸坯横截面形状的观测及后序对内部裂纹的检验,铸坯凝固壳横截面变形与内部裂纹的产生和种类存在下述关系。

3.1 宽边鼓肚-窄边凹陷

当窄边凝固壳有一定刚度但又不大时,宽边的鼓肚,即铸坯宽边中部坯厚增至最大,必然牵制窄边内部的坯宽减至最小,使窄边凹陷(表 1 中 A 图所示)。此时,宽边凝固壳内层为压应力,其固液界面在压应力下不开裂,所以无中间裂纹和角部裂纹产生;窄边内层为拉应力,其固液界面在拉应力下开裂,形成三角区裂纹;宽、窄边柱状枝晶前端交界处的内层,既受宽边内层的压应力,又受窄边内层的拉应力,两者应力抵消,不形成裂纹。

鼓肚随后受到支承辊、矫直辊和拉辊的压力,铸坯凝固壳横截面可发生如下三种变形。


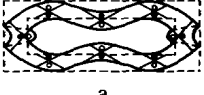
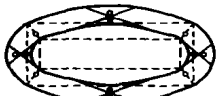
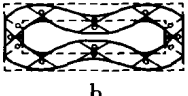
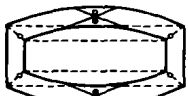
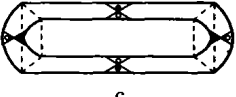
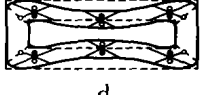
(1) 辊压下,宽面鼓肚反向变形的同时,钢液被挤压向窄面,若窄边凝固壳刚性较大,不能由凹转凸,则只能进一步凹陷,如表 1 中 a 图所示。为平衡宽边因鼓肚而超坯宽的部分,宽边中部反向变形至凹陷、端部随窄边的凹陷而凸起。此时,宽边中部内层为拉应力,可形成中间裂纹;端部内层为压应力,不形成角部裂纹;三角区分界(即宽、窄边柱状枝晶前端交界)处于宽边端部内层压应力和窄边内层拉应力之中,不形成裂纹。

(2) 辊压下,若窄边凝固壳刚度不大,被挤压向窄面钢液的静压力可使其部分反向变形,直至既不凹陷也不凸起,如表 1 中 b 图所示。此时,窄边凝固壳因反向变形,其内应力也反向,其内层由拉应力变为压应力,不再形成三角区裂纹;宽边凝固壳的变形、应力和内部裂纹与第一种类似;三角区分界处于宽边端部内层和窄边内层,由于宽、窄边内层压应力的收缩作用而使凝固壳内层的三角区分界承受拉应力,易形成裂纹。

(3) 辊压下,若窄边凝固壳刚度很小时,被挤压向窄面钢液的静压力使其反向变形,由凹转凸,如表 1 中 c 图所示。此时,窄边内层为压应力,不再形成三角区裂纹;宽边内层因反向变形而成为拉应力,可形成中间裂纹或角裂纹或两者兼有之;三角区分界处于宽边内层拉应力和窄边内层压应力之中,不易

表 1 连铸钢板坯凝固壳横截面变形、应力及内部裂纹

Tab. 1 Deformation stress and internal crack of cross section of coagulating shell of continuous casting steel slab

鼓肚状态			鼓肚在辊压下状态		
变形	应力	内部裂纹	变形	应力	内部裂纹
		三角区裂纹			中间裂纹 三角区裂纹
A			a		
		三角区分界裂纹			中间裂纹 三角区分界裂纹
B			b		
		三角区分界裂纹			中间裂纹 角裂纹
C			c		
					中间裂纹 三角区分界裂纹
			d		

注: 图中○为拉应力,●为压应力。

开裂。

3.2 宽、窄边均鼓肚

若窄边凝固壳刚度很小,宽边凝固壳因冷却稍强而刚度稍大,两者刚度相当时,钢液静压力使两者均鼓肚,如表 1 中 B 图所示。此时,宽、窄边内层均为压应力,不会产生中间裂纹、角部裂纹和三角区裂纹;三角区分界处于宽、窄边内层,由于宽、窄边内层压应力的收缩作用而使凝固壳内层的三角区分界承受拉应力,极易开裂。

辊压下,宽边反向变形的同时,辊压使钢液进一步挤压窄面而使鼓肚增加,如表 1 中 c 图所示。此时,窄边内层间仍为压应力且随鼓肚加剧而增大,不形成三角区裂纹;宽边内层因反向变形而反向成拉应力,可形成中间裂纹或角部裂纹或两者兼有之;三角区分界处于宽边内层拉应力和窄边内层压应力之中,不易开裂。

3.3 宽边鼓肚,窄边不变形

若窄边凝固壳刚度很大,钢液静压力不能使之鼓肚,宽面鼓肚也不能牵制其随之凹陷,如表 1 中 C 图所示。此时,窄边凝固壳不变形,也就不产生内应力,自然不产生三角区裂纹;宽边内层为压应力,不会形成中间裂纹和角部裂纹;三角区分界因宽边内层压应力而受拉,而窄边凝固壳刚性不变形又不能松弛该拉应力,可形成三角区分界裂纹。

辊压下,可出现以下两种变形:

(1) 辊压大时,被挤压向窄面钢液静压力可使

窄边鼓肚,如表 1 中 c 图所示。同前,宽边凝固壳可形成中间裂纹或角部裂纹或两者兼有之;窄边凝固壳不形成三角区裂纹;三角区分界不易开裂。

(2) 辊压不大时,不足以使窄边鼓肚,如表 1 中 d 图所示。窄边凝固壳不变形,也就无应力产生,自然不产生三角区裂纹。由于窄边刚性不变形和平衡宽边因鼓肚超坯宽的部分长度,必然是宽边中部凹陷、端部相对凸起,此时,宽边中部内层因拉应力而产生中间裂纹,端部内层因压应力而不产生角部裂纹;三角区分界因宽边端部内层压应力而受拉,而窄边因刚性不变形又不能松弛该拉应力,因而易开裂。

3.4 中心裂纹与变形的关系

当铸坯处于凝固末期,即中心区域处于糊状脆化态时,宽边鼓肚在坯厚方向造成拉应力,使位于坯厚中心线、两三角区内顶点之间形成线状的粗大等轴晶晶间裂纹,即中心裂纹。若窄边凹陷时,窄边中部坯宽减小,增大宽边鼓肚方向拉应力,起促进作用;若窄边鼓肚,则起抵消作用。但一般来说,宽边总比窄边更易鼓肚,所以不能完全抵消宽边鼓肚对中心开裂的作用。

辊压下,处于糊状脆化态的中心区域不仅不会形成新的裂纹,而且已形成的中心裂纹还会因辊子压力大而焊合消失。

3.5 归纳整理

为了便于比较,将上述分析和实际变形与内部裂纹的关系示于表 2。

表 2 连铸钢板坯内部裂纹

Tab. 2 Internal cracks in continuous casting steel slab

形状变化	鼓肚中形成的内部裂纹					鼓肚在辊压下形成的内部裂纹				
	宽边凝固壳		窄边凝固壳	宽窄边凝固壳交界	心部	宽边凝固壳		窄边凝固壳	宽窄边凝固壳交界	心部
	中间裂纹	角裂纹	三角区裂纹	三角区分界裂纹	中心裂纹	中间裂纹	角裂纹	三角区裂纹	三角区分界裂纹	中心裂纹
A→a	无	无	有	无	有	有	无	有	无	无
A→b	无	无	有	无	有	有	无	无	有	无
A→c	无	无	有	无	有	有	有	无	无	无
B→c	无	无	无	有	有	有	有	无	无	无
C→c	无	无	无	有	有	有	有	无	无	无
C→d	无	无	无	有	有	有	无	无	有	无

纵观表 1 和表 2,不难看出:

(1) 中间裂纹和角部裂纹均与宽边鼓肚相关,但形成时期均不在宽边鼓肚变形中,而是宽边鼓肚在辊压下反向变形中形成。其中,只要宽边鼓肚,辊压下就可形成中间裂纹;而角部裂纹的形成还要附加辊压下窄边必须鼓肚(凸起)条件,此与文献[3]中的“与窄边凸出有关”这个事实相符。

(2) 无论是宽边鼓肚中,还是其鼓肚在辊压下反向变形,只要窄边凹陷,就可形成三角区裂纹。此与文献[3]中的事实相一致。

(3) 中心裂纹只形成于宽边鼓肚过程中。

4 应当指出的问题

4.1 除中心裂纹外的内部裂纹实质是偏析

中间裂纹、角部裂纹、三角区裂纹、三角区分界线裂纹,都是液芯存在下凝固壳中形成的。裂纹处于真空态,相对缝外呈负压态,具有吸液能力;钢液静压力系正压,具有将钢液压入裂缝的能力,所以裂缝中充满了杂质元素浓化的钢液,形成偏析。如同钢锭中的“鬼线”,本质是偏析而非裂纹。事实上也不具备裂纹特征,YB/T 4003—1991 中评定原则也是以疏偏析线长短、多少来评级的。固然在凝固过程中曾是裂纹,但与杂质元素浓化的钢液熔合后就不再是裂纹。从使用角度看,内部裂纹可以通过适当的锻、轧加工焊合而消失,但偏析则不会消失,只能改善或减轻。

4.2 中心裂纹是真正的裂纹

中心区域为液态时,只能形成缩孔、疏松,不能形成裂纹。只有处于凝固末期即糊状脆化态时,由

于无流动的杂质元素浓化的钢液填充中心裂纹而不能形成偏析,只能是裂纹。这就是 YB/T 4003—1991 中唯中心裂纹的评定原则是“以裂纹宽度和长度的大小评定”之所在。

4.3 局部凹陷与内部裂纹

局部凹陷又称纵向凹槽。局部凹陷处凝固壳的外层为压应力,内层为拉应力,其固液界面在拉应力作用下易开裂,并沿柱状枝晶的晶界扩展。局部凹陷处的内部裂纹,若位于宽边端部,则为角部裂纹;若远离宽边端部,则为中间裂纹;若位于窄边,则为三角区裂纹。这种裂纹的产生也是由于变形即铸坯凝固壳横截面局部变成对应的内层拉应力而引起的。

4.4 三角区分界裂纹

三角区分界裂纹,既不垂直于宽边,也不垂直于窄边,也不沿柱状枝晶的晶界扩展,而是在宽、窄面柱状枝晶前端的交界面上扩展,它也不一定位于铸坯角部,与 YB/T 4003—1991 中的角裂纹特征不符,所以应在标准中单列一类。

4.5 YB/T 4003—1991 中的“产生原因”有误

(1) 中间裂纹的产生原因中,没有指明是哪一面鼓肚,窄面鼓肚不能形成中间裂纹,只有宽面鼓肚并且在辊压下反向变形中才形成。

(2) 角裂纹与三角区裂纹的产生原因均是“铸坯窄边或宽边的凹陷或凸起”是不准确的。前已述及,三角区裂纹的形成只与窄边的凹陷有关;角裂纹的形成与窄边的鼓肚(凸起)有关,而且是宽边鼓肚在辊压下反向变形中被挤压向窄面钢液静压力所致的窄边鼓肚。

5 影响内部裂纹的因素

由前述可知,凝固壳变形伴生内部应力,当凝固壳内层为拉应力时,固液界面成为裂纹源开裂,形成内部裂纹。因此,讨论影响内部裂纹的因素归结为分析凝固壳变形因素。

5.1 影响宽边鼓肚的因素

(1) 拉速过高、冷却不良,使铸坯温度过高,因而弹性模量太小,凝固壳刚度小,易形成辊间鼓肚。

(2) 两对支承辊间距过大或不对中,也会造成辊间鼓肚。

(3) 液压压力过小、液压系统故障、辊子断裂,可在铸机内发生鼓肚。

(4) 拉速过高或二次冷却过弱,使铸坯的液芯长度超过了铸机的冶金长度,拉出铸机后形成大面积严重鼓肚。

5.2 影响窄边鼓肚(凸起)和凹陷的因素

(1) 结晶器窄边铜板锥度过小;拉速过高、宽窄边之比过小、窄面冷却过弱、窄面足辊不当;辊子压力过大等因素均影响窄边鼓肚。

(2) 结晶器窄面铜板锥度过大;二次冷却区不均匀冷却等因素均影响窄边凹陷。

5.3 影响局部凹陷的因素

主要是结晶器内冷却(即一次冷却)不均匀所致。但由于板坯局部凹陷多出现在宽边两端,于是有人认为^[4],由于结晶器上部锥度太小和刚性的角部转动,使近角顶凹陷形成;又由于结晶器下部锥度太大,结晶器压向坯壳使凹陷加剧,并且归属于角部裂纹。

此外,在二次冷却区,如果各段之间冷却不均匀,会导致铸坯表面温度呈周期性回升。回温使铸坯凝固壳膨胀,当施加到固液界面的拉应力超过钢的高温允许强度、膨胀超过临界应变,会出现中间裂纹。

参考文献:

- [1] YB/T 4003—1991,连铸钢板坯缺陷疏印评级图[S].
- [2] 蔡开科,程士富,等主编.连铸钢原理与工艺[M].北京:冶金工业出版社,1994.236—237.
- [3] 卢盛意编著.连铸坯质量(第2版)[M].北京:冶金工业出版社,2000.30—42.
- [4] Brimacombe J K, Samarasekera I V. Future Trends in the Development of Continuous Casting Moulds[J]. Steelmaking Conference Proceedings, 1991,(1):189.

(上接第289页)

轧制过程中,FeS, MnS 和(Mn, Fe)S 沿轧制方向延伸成条带状。一般情况下,硫化物与硅酸盐共同产生和存在,并且对钢的性能产生影响。采取脱硫工艺,在减少和控制钢中硫化物含量的过程中,同时也能够降低硅酸盐夹杂物的含量。如果A类硫化物的平均级别降低到1.5级以下,那么相应的C类硅酸盐夹杂物可降低到2.5级以下,使得A+C之和 <4.0 ,将使低合金钢的性能合格率大幅度提高。

连铸坯中夹杂物含量的高低直接决定着中厚板产品的最终内部质量。一般情况下,提高钢的纯净度主要是在钢水进入结晶器之前来保证,并且应尽可能的减少内生的和外来的夹杂物。因此,分析和探讨连铸坯中夹杂物的来源与分布以及进一步降低各个生产环节中的夹杂物含量是非常重要的。根据上述研究结果,结合济钢现行的工艺条件,为进一步提高连铸坯的清洁度水平,建议在实际生产中①完

善挡渣出钢,稳定钢包下渣量;②完善和稳定钢包吹氩操作,防止钢水翻腾,以获得钢包吹氩去除夹杂物的稳定效果;③在钢包与中间包之间使用长水口保护浇注,同时增设中间包挡墙;④尽可能减少结晶器液面波动,以免造成铸坯的卷渣。

5 结语

(1) 在连铸坯厚度距内弧 $1/4$ 处和中心线处有夹杂物的峰值出现,说明这两个位置是夹杂物的富集区域。

(2) 不同低合金钢的塑性夹杂物级别之和平均为4.0级。

(3) 在实际生产中,采取脱硫工艺,同时采取完善挡渣出钢和钢包吹氩操作,在钢包与中间包之间使用长水口保护浇注,可使铸坯中的塑性夹杂物含量明显下降。