

连铸坯的热脆裂纹产生原因分析

郝金锋

武汉科技大学 湖北武汉 430080

摘要：连铸坯的裂纹缺陷是影响中厚板轧制及成本控制的重要因素之一，深入研究这个指标可有效降低不必要的裂纹修磨率和工序消耗，减少废品产出率，提升产品质量，同时可有效降低生产成本，增加企业的交货能力和市场竞争力。论述通过跟踪大量的连铸坯加热及轧制过程，收集相应的原料处理工艺、温度控制改进措施，将相关措施应用于实际生产中，较好地提升了轧制质量，不仅减轻了半成品钢材的中间工序库存压力，有效改善了钢材的生产效率和交货期，还显著提高了企业的经济效益。

关键词：裂纹缺陷；废品产出率；数据分析；改进措施

Analysis of the causes of hot brittle cracks in continuous casting billets

HAO Jinfeng

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430080, Hubei, China

Abstract: Even casting billet crack defect is one of the important factors affecting the plate rolling and cost control, further study of this index can effectively reduce unnecessary crack rate and process sequence consumption, reduce waste productivity, improve product quality, at the same time effectively reduce the production cost, Increase the delivery capacity and market competitiveness. This paper is about through the tracking of a large number of continuous casting billet heating and rolling process, collect the corresponding raw material processing process, temperature control improvement measures, applied to the actual production, better to improve the quality of rolling, not only reduce the semi-finished steel intermediate process inventory pressure, effectively improve the steel production efficiency and delivery time, also significantly improve the economic benefit of the enterprise.

Keywords: crack defects; scrap yield; data analysis; corrective measure

1 序言

连铸坯实现热装、热送是当前国内钢铁企业普遍采用的一种重要生产模式，但是由于不同成分连铸坯的内部残存气体在聚集后会选择原子结合力的晶界逸出，此时的连铸坯壳体可能硬度不足，而气体逸出引起晶界断裂，经加热炉长时间加热后，在

晶胞重构的组织应力和热应力叠加影响下，连铸坯出炉轧制时因出现塑性指标下降而晶界开裂加剧状况，最终发展为表面宏观裂纹缺陷。为改善连铸坯炉后热脆裂纹的异常情况，在轧钢区域经过长时间的跟踪并收集热装、热送相关数据，对几个关键因素重点攻关和分类试验摸索，找到了问题所在的原

作者简介：郝金锋，工程师，武汉科技大学同等学力硕士，国家“东数西算”工程及庆阳市大数据产业的重要参与者，主研究方向为金属材料热处理、压力加工、大数据，E-mail: 2041125621@qq.com。

因，并实时优化了连铸坯入炉前相关的温度 and 具体工艺参数，经过一系列工艺改进和技术优化，连铸坯的热脆裂纹出现频率得到了极大改善，同时，板材废品率也成功降到了合理的范围之内。

2 中厚板的生产工艺流程及轧制裂纹分类

中厚板生产工艺流程为：连铸坯预处理→入炉加热→高压水除鳞→粗轧机轧制→精轧机轧制→快速冷却→热矫直。其中，连铸坯预处理包括炉前表面淬火处理、坯料炉前检查及缺陷处理，入炉加热包括预热、快速加热及均热3个阶段。炉前预处理是否满足标准规定，加热工艺制度是否正常，会直接影响到中厚板的外观质量及产品合格率指标，某钢铁企业板材厂2023年前7个月生产的中厚板板面裂纹导致的修磨率数据见表1。

表1 某板材厂2023年前7个月中厚板板面裂纹修磨率

月份/月	1	2	3	4	5	6	7
修磨率 (%)	3.25	3.28	3.23	3.52	3.10	3.02	2.95

中厚板常见的宏观裂纹包括纵裂纹、横裂纹、星状裂纹及龟裂等，这些缺陷主要由连铸坯本身自带的微观缺陷引起，有少量宏观裂纹是基于加热原因。

3 连铸坯热脆裂纹的产生原因与预防措施

3.1 连铸坯表面裂纹

(1) 星形裂纹（网状裂纹） 经过取样观察发现，星形裂纹多见于晶体之间的微小裂缝，多为星形或网络状。查阅相关资料^[1]，连铸坯的表层吸附了钢液中的Cu，使Cu转变为液态，并沿着奥氏体晶界渗流而形成的；另外，连铸坯表层Fe发生选择性氧化，导致Cu、Al等滞留在铸坯基体上并沿着晶界弥散，从而引起开裂。在产品轧制完成后，表面星形裂纹如图1所示。



图1 厚板表面星形裂纹

(2) 表面横裂纹 横裂纹是铸坯表面上非常明显的横向裂纹，查阅相关资料^[2]可知，表面横裂纹与振痕是共生关系。振痕越深越明显，则横裂纹越严重，横裂纹在铸坯上深度不等，长度较短，一般不超过55mm，而且在横裂纹处常覆盖有FeO等一些不稳定的化合物及组织。轧制到成品后检查，其表面横裂纹如图2所示，横裂纹的深度一般都会超标。



图2 板材表面横裂纹

(3) 表面纵裂纹 铸坯的纵向小裂纹经轧制延伸后会更为明显，对成品的质量也有很大的影响。相关文献^[3]表明，纵向裂缝产生于铸坯初始壁厚不均的部位。当钢坯中的C含量（质量分数）为0.12%~0.17%时，易出现纵裂纹。板材表面纵向裂纹形貌如图3所示。部分纵裂纹经修磨处理后厚度尚在公差范围内，但修磨的痕迹过于明显，仍需作为废品处理，或降级处理。

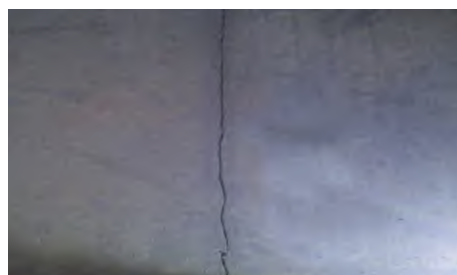


图3 厚板板面纵裂纹形貌

3.2 皮下气泡与气孔

在现场确认铸坯的表面质量，发现皮下气泡与气孔一样，都是存在于铸坯表皮以下，在加热过程中铸坯皮下气泡表面被氧化，因气泡的体积过大，轧制时无法焊合，另外皮下气泡还会影响钢材的耐腐蚀性，容易形成麻点或麻面缺陷。中厚板表面气泡缺陷形貌如图4所示。

3.3 板材表面龟裂

板材表面龟裂的基本特征是：板材表面有发散的大裂纹。一般来说，龟裂长度短、面积大，方向

各向异性。开裂痕迹极其明显的龟裂都会使钢材修磨的厚度超标，一般操作模式是修磨一处并测量厚度，厚度不满足要求即作为废品处理。龟裂缺陷如图5、图6所示。



图4 中厚板表面气泡缺陷形貌



图5 薄板表面龟裂



图6 厚板边部龟裂

3.4 加热裂纹的类别及产生机理

铸坯加热裂纹可分为外在裂纹和内在裂纹两种，加热产生的外在裂纹往往是由于原料表面缺陷（如皮下气孔、夹杂等）在原料检查过程中消除不彻底造成的。原料的表面缺陷很可能是在加热时受温度应力和相变应力的共同作用而发展成为可见的表面微小裂纹，在轧制时扩大成为在产品表面呈一定深度和面积的缺陷。此外，过热也可能产生表面裂纹，主要是晶粒长大过程中晶界结合力不足引起的。加热裂纹一般在轧制前很难被发现，只有在热塑性变形过程中才会随着延伸而凸显出来。图7、图8所示为炉后检查发现的加热裂纹。

3.5 加热导致的内在裂纹分析

图9、图10所示为连铸坯加热时内部形成的裂纹

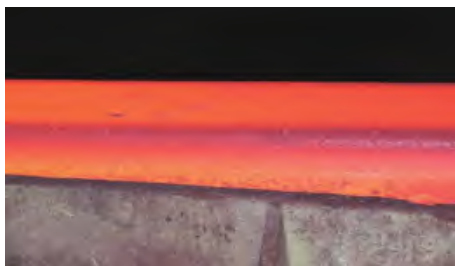


图7 铸坯边角处开裂



图8 轧制后的边部裂纹



图9 钢中内裂

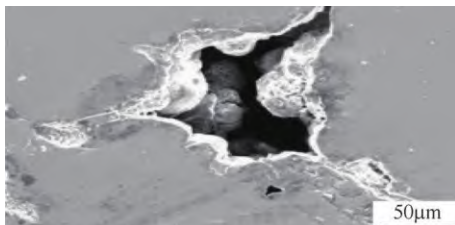


图10 金相组织中的内裂形貌

及轧制后钢材金相组织中的内裂形貌。根据金属内裂的原因进行分析，推测当连铸坯在快速冷却时，部分溶解在奥氏体面心立方晶胞中的氢原子或氮原子的溶解度降低，这导致部分原子需要从晶胞中逸出，由于此时铸坯的表面温度低于其内部温度，逸出的原子经结合后变成分子，在铸坯芯部的晶界的局部位置暂时存储下来，当铸坯进入加热炉内，温度回升到较高温度，表面的晶粒发生膨胀，对芯部的晶粒及组织形成强劲的压应力。心部的晶粒受铸坯表面的氧化铁皮影响，热导率降低，跟表面的温度有明显的差距，该差距使得拉应力作用在表面的晶粒上。当两种力作用在一起，晶胞的间隙被压

缩,虽然此时有部分气体再次溶解于奥氏体晶胞中,但溶解的速度赶不上晶胞间的相变挤压,在应力超过晶胞的抗压强度时,裂纹从存储气体的晶界处形成,并进一步扩展,直至出炉轧制成形,图11所示为钢材冲击试样断面厚度1/2处因气体而形成白点缺陷。



图11 心部白点缺陷

3.6 加热导致的外在裂纹分析

在试验过程中,部分高碳钢在加热完成后,出炉除鳞后近距离观察表面棱角处,发现有裂纹痕迹存在,将该铸坯冷却后仔细检查,在棱角处和边部中心位置处有肉眼可见的裂纹。取样做金相试验分析,发现缺陷位置有明显的气体通道和挤压开裂痕迹,经研究及推断,铸坯内的气体在高温时溶解掉一部分,剩余的气体通过铸坯厚度的1/2位置处逸出。由于高温铸坯其原子活动能量增大,可为气体的逸出提供晶界间隙,所以气体会从坯壳温度高且逸出阻力最小的边部位置或棱角位置逸出。图12所示为裂纹位置的微观金相组织,图13、图14所示分

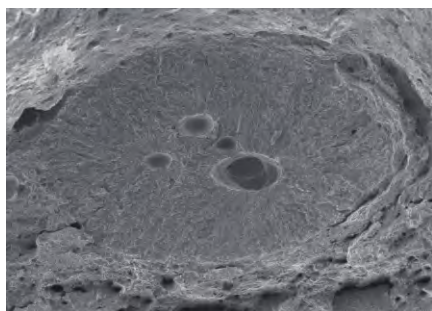


图12 心部微观金相组织

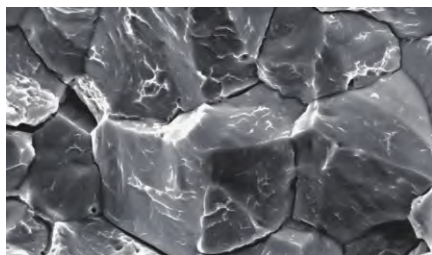


图13 晶胞组织

别为放大后的晶胞组织及晶间裂纹。结合宏观、微观组织及相关文献资料分析可知,铸坯内部相变产生的组织应力和残余气体逸出是铸坯加热形成外在裂纹的主要原因。因此,在加热过程中坯壳的硬度决定了其表面与棱角处是否会产生裂纹。



图14 晶间裂纹

3.7 热装热送的微合金铸坯表面裂纹形成机理

通过试验证明,在热送和冷送状态下铸坯组织处于不同的状态,高温铸坯是原始的奥氏体组织,中温铸坯为奥氏体和铁素体的混晶组织,低温或常温铸坯其组织为铁素体和珠光体等。由于铸坯在不同的温度下送轧,直接影响了铸坯在轧制前的晶粒尺寸,而晶粒尺寸大小会对铸坯的塑性造成一定的影响。查阅相关资料^[4]发现,产生影响的原因还与微量元素在钢中的析出状态有关,热送和冷送时的相变具体机理如图15所示。存在微合金化元素的铸坯在冷却过程中会有C、N等化合物析出,而这些析出物主要镶嵌于奥氏体的晶界间隙中。在微合金铸坯实施热装、热送时,虽然在加热和保温过程中又会发生C、N化合物的重溶,但依然有一些C、N化合物由于熔点高而继续存在于奥氏体晶界,这些存在于奥氏体晶界的C、N化合物影响了奥氏体的塑性,经炉后冷却或轧制后晶界开裂而出现裂纹,如图16所示。

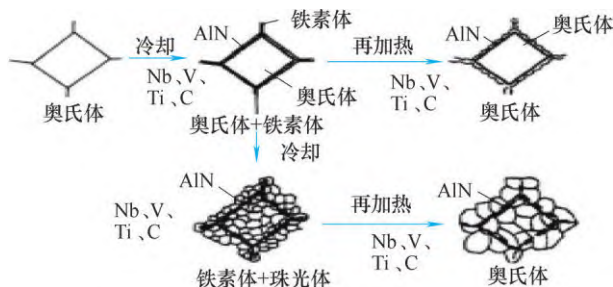


图15 微量元素在热送和冷送时的析出状态

3.8 高温铸坯内部气体运行轨迹分析

由于钢液冶炼时很难做到消除所有气体,炉前

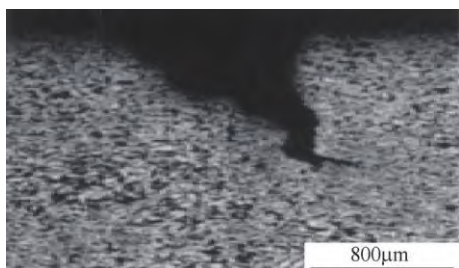


图16 钢材表面裂纹金相组织

的铸坯也无法做到通过长时间的静置来释放内部残余的气体，在炉内升温时，部分气体很可能会再次溶解于奥氏体组织中，待到铸坯出炉轧制时，气体可能选择从铸坯边部析出，因为此时边部厚度1/2处的温度最高，最有利于气体逸出。现场试验发现，离线缓冷的板材会有频繁的气体释放的爆破声。自然冷却的中厚板温度降到400℃以下时，靠近边部的气体通道尚未关闭，仍有气体存在，如果对边部做UT检测，则出现点状缺陷超标的概率较大。精整切边时，边部会有明显发蓝迹象，同时伴随着边部厚度1/2处的分层或开裂，如图17、图18所示。因此，铸坯加热阶段应保证上下表面温度差合理，同时成品剪切避开200~400℃的温度蓝脆区。

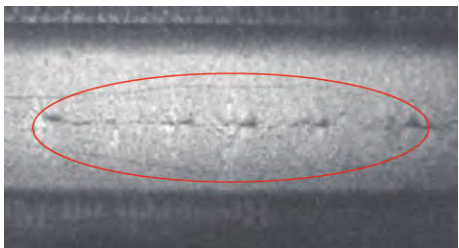


图17 边部分层缺陷



图18 边部开裂缺陷

3.9 连铸坯热脆裂纹现场控制办法

在轧钢生产过程中，为了抑制连铸坯的热脆裂纹，采取了很多控制措施，目前从实际效果来看，炉前表面淬火的温度参数优化、坯壳涂层保护、铸坯在炉内加热应力期的加热速度限制等措施均有很好的成效。其中，坯壳涂层保护技术是目前应用较

为广泛的策略之一，其工作原理是连铸坯在炉前表面淬火处理后，在上下表面喷涂耐高温防护涂料，该防护涂料的成分以锆化物、硅酸铝盐等为主，在完成喷涂后，连铸坯进入炉内加热不会产生过厚的氧化铁皮层，不会影响钢坯的热导率，铸坯在炉内实现了温度均匀增加，从而间接地降低了铸坯加热的温差及热应力，一些微细裂纹在轧制过程中得到愈合，不会因为应力集中或塑性波动而出现明显的裂纹缺陷，从未影响最终成品的质量和判定合格过程。

4 效果

通过对不同温度、不同碳含量及碳含量接近的合金钢坯入炉温度和出炉表面对比分析，发现对于高碳钢和高合金钢而言，更容易在加热过程中产生内在裂纹或外在裂纹，验证后得知，当铸坯在炉前表面淬火处理至550℃以下时，铸坯的坯壳为马氏体组织，该组织基本特点是硬度高，韧性一般。当心部温度返到铸坯外面时，由于无法达到700℃以上的相变温度，因此该组织转变成回火索氏体等。在这个自回火过程中铸坯表面的裂纹基本不会产生，但心部的微小裂纹可能会因组织相变应力或热导率影响产生的热应力作用而出现，后期在轧制过程中内部微小裂纹被压合而不影响最终钢材的内部质量，因此对加热炉产生的脆性裂纹研究价值就凸显了。控制钢液浇注前的气体含量和铸坯进炉的表面硬度，是降低铸坯表面及心部脆性裂纹扩展的重要举措。

5 结束语

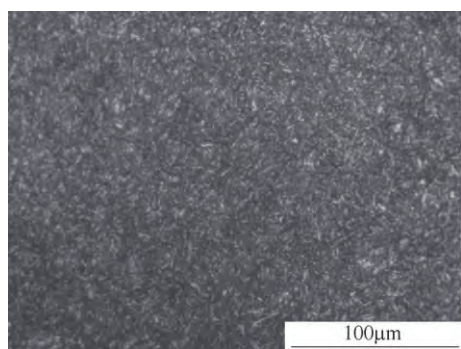
综上所述，可得出以下结论。

1) 连铸坯在炉前表面淬火处理后温度过高，加热时坯壳结合力不足，加热时珠光体或索氏体等组织快速相变，转变成奥氏体，但硬度较高的碳化物溶解慢且影响晶界的迁移是引起铸坯表面加热开裂的原因之一。

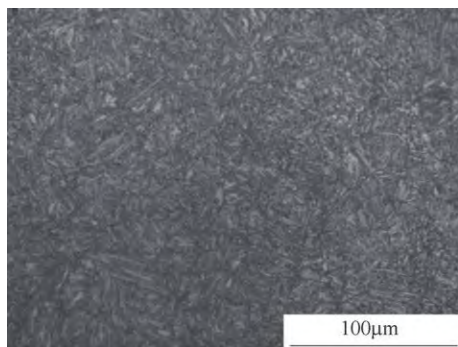
2) 连铸坯内部的气体在高温时以原子态溶解，温度降低时结合成分子逸出，在铸坯表面形成晶界气体通道，随着塑性变形进行，该裂纹通道会出现扩展。

3) 在连铸坯进入加热炉后，减缓在预热段的加

(下转第18页)



a) 直接切削螺杆头



b) 模锻冷挤压螺杆头

图5 淬火后两种工艺螺杆头凹槽处的金相显微组织 (500×)

综上所述可知,无论是化学成分、低倍组织均匀性、淬火后的硬度分布均匀性,以及金相组织等螺杆头成品技术指标看,模锻冷挤压工艺与常规切削加工工艺几乎一致,满足后续淬火要求。

4.2 快速成形螺杆头经济效益

批量生产后经现场观察,包含上下料、装夹时间在內,45型螺杆头圆棒感应加热模锻每个耗时约1min,冷挤压过程每个约0.5min,头柄部修整每个3min。而按照常规切削加工方式,每个螺杆头需耗

(上接第14页)

热速度,让晶胞的相变缓慢进行,以降低相变和热应力聚集的可能。铸坯的炉前预热是常用的措施之一。

4) 在同样的热送状态下,含微合金化元素(如Al、Nb、V、Ti)的钢种,表面裂纹产生的概率要远高于不含微量元素的一般普通钢种,特别是 $w_C=0.10\% \sim 0.20\%$ 的微合金化钢种,裂纹产生的概率很高,这与微量元素在钢中的析出状态有关。

5) 连铸坯喷涂防护涂料后进入炉内加热,可有效地减少氧化铁皮的产生量,降低了氧化铁皮对板坯内部传导传热的影响,铸坯表面热导率相对稳

定,温度的均匀性消除了轧制开裂的可能。

5 结束语

1) 对于复杂曲面螺杆头,采用热锻冷挤压和局部修整的创新组合工艺,经实践证明能代替传统机械加工成形,同时提高生产效率6.7倍,每年产生经济效益116万元以上,可有效解决机械加工效率低、工序多的问题,实现制造的降本增效。

2) 对于42CrMo这样具有较高DI值的中碳合金钢材料,挤压前进行磷皂化润滑处理,并在冷挤压过程中额外添加润滑石墨,可提高挤压后表面质量,降低表面挤压抗力,避免表面折叠甚至破损开裂。冷挤压过程需确保螺杆头保持竖直状态,防止因偏心而导致挤压后产生表面麻点缺陷,可通过优化头部台阶直径来增强其冷挤压工序的稳定性。

3) 模锻冷挤压组合成形工艺的螺杆头,淬火前低倍组织显示比热轧圆钢略好,淬火后表面与心部硬度均匀性好,仅相差3HRC,且金相显微组织均匀良好,符合技术要求。

参考文献:

- [1] 邵潭华. 材料工程基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [2] 贾俐俐. 挤压工艺及模具[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021.

MW 20240506

参考文献:

- [1] 杨慧贤, 杨昊, 赵英利, 等. 压力容器用钢表面裂纹分析与控制[J]. 金属热处理, 2017 (11): 187-191.
- [2] 孙坤. 高强度螺纹钢热送横裂纹控制研究[J]. 冶金与材料, 2024, 44 (4): 82-84.
- [3] 何航, 王子超, 曾杰, 等. 连铸坯表面纵裂纹的形成与控制研究现状[J]. 连铸, 2024 (2): 1-7.
- [4] 刘志明, 张炯明. 微合金钢连铸坯热送热装析出物的研究[J]. 炼钢, 2013, 29 (3): 49-52.

MW 20240710