

高强度PC钢丝断裂原因分析及改进措施

李祥才¹, 徐冰², 于同仁³, 杨丽珠³

(1 安徽工业大学 材料工程学院, 安徽 马鞍山 243000; 2 邯鄲钢铁集团公司, 河北 邯鄲056015;

3 马鞍山钢铁股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 对高强度PC钢丝断裂原因进行了分析, 认为连铸坯的中心偏析、中心缩孔、疏松和夹杂是导致PC钢丝断裂的冶金原因; 轧制过程中, 较差的修磨质量、表面缺陷导致的微裂纹, 过烧以及不适当的冷却速度导致的非正常显微组织, 盘条头部的耳子、盘条本身折叠是导致PC钢丝断裂的主要原因; 同时, 不恰当的酸洗、较差的磷化及热处理质量、不适当拉丝裂纹的产生、拉拔模具安放不正导致的横裂也是PC钢丝断裂的原因。并且针对上述部分原因提出改进措施。

关键词: PC钢丝; 断裂; 原因分析; 改进措施

中图分类号: TG356.4+6 文献标识码: A 文章编号: 1004-4620(2006)06-0036-04

Analysis of Fracture Reasons of High Strength PC Steel Wire and Improvement Measures

LI Xiang-cai¹, XU bing², YU Tong-ren³, YANG Li-zhu³

(1 School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243000, China;

2 Handan Iron and Steel Co., Ltd., Handan 056015, China; 3 Maanshan Iron and Steel Co., Ltd., Maanshan 243000, China)

Abstract: The fracture reasons of high strength PC steel wire are analyzed, it's considered that center segregation, central cavitation, poriness and inclusion are the metallurgical reasons which lead to the facture of PC steel wire and in the rolling process, differential coping quality, microcrack caused by surface defect, abnormal microstructure caused by burnt and improper cooling velocity, the ears on the head of the wire, overlapping of the wire rod itself are the main reasons which lead to the facture of PC steel wire. At the same time, inappropriate pickling, differential phosphorization quality, the bad heat treatment quality, the generation of crack in the improper drawing and transverse crack caused by abnormal laying of the drawing die are also the reasons of the cracking of PC wire. Improvement measures are put forward on the part reasons described above.

Key words: PC steel wire; fracture; reason analysis; improvement measures

高强度低松弛预应力钢丝具有强度高、塑性好、韧性高、耐腐蚀、低松弛等性能, 被广泛用于大、高、特等重要建筑, 其生产和使用越来越引起人们的重视。高强度低松弛预应力钢丝断裂的原因很多, 分析起来既困难又复杂。本研究拟就钢丝在生产过程中产生断裂的可能原因进行分析。

1 PC钢丝化学成分及生产工艺流程

高强度低松弛预应力钢丝牌号、化学成分见表1。

表1 高强度低松弛预应力钢丝的化学成分 %

牌号	C	Mn	Si	S	P
72B	0.68~0.74	0.60~0.90	0.12~0.32	<0.025	<0.025
75B	0.73~0.78	0.60~0.90	0.12~0.32	<0.025	<0.025
77B	0.75~0.80	0.60~0.90	0.12~0.32	<0.025	<0.025

80B	0.78~0.83	0.60~0.90	0.12~0.32	<0.025	<0.025
82B	0.80~0.85	0.60~0.90	0.12~0.32	<0.025	<0.025

生产工艺流程为：冶炼精炼→连铸（或者模铸）→初轧开坯→表面修磨→高速线材轧制→酸洗→磷化→拉拔→矫直回火→质量检验→入库。

2 PC钢丝原料的质量控制

影响PC钢丝用线材质量的因素是多方面的，按生产工序可分为炼钢和轧钢两方面的因素^[1]。

2.1 炼钢工序控制质量的途径

转炉炼钢，如果出钢量小于30t，则很难生产高档产品。原因在于：（1）小转炉生产出的钢水氧化性强，虽经炉后脱氧、吹氩处理，但钢中的含氧量仍难控制在低水平；（2）炉后增碳量过大，很难保证成品碳的稳定，含碳量的波动，对最终产品的性能造成很大的影响；（3）小转炉即使炉后配置钢包精炼装置，也很难发挥其精炼效果，即很难将夹杂物控制在低水平。因此，转炉生产优质高碳硬线钢必须具备以下条件：（1）转炉入炉铁水P、S的质量分数不大于0.030%；（2）转炉公称容量不小于50t，最好是顶底复吹转炉；（3）炉后必须配备钢包精炼装置。

电炉炼钢（指公称容量在50t以上的电炉），要想生产出优质高碳硬线钢，主要应控制好钢中有色金属元素的含量和N含量。控制钢中有色金属含量的途径，关键是钢铁料的选择，尽可能少用回收废钢。有条件可多用钢铁厂的自产废钢或采用海绵铁等替代品，也可使用一定比例的生铁块或热铁水。电炉采用相关技术措施，可将钢水中N的质量分数控制在 60×10^{-6} 以下。这些技术措施包括：（1）保证电炉的封闭性好；（2）采用泡沫渣冶炼工艺；（3）采用强供氧吹炼并安装炉底吹氩装置；（4）采用偏心炉底出钢；（5）出钢过程中，钢流采用惰性气体保护。

2.2 铸钢工序控制质量的途径

高碳钢在浇注成型过程中，最容易出现也是最致命的质量问题就是碳的偏析。

对于模铸生产，出现最严重碳偏析的部位是钢锭的头部，这是由钢的凝固特性和钢锭的凝固特点决定的，难以有效控制；另外钢锭头部保护渣选型不当，也能造成钢锭头部渗碳。因此，高碳钢模铸用复合保护渣，应选择微碳或无碳型。

方坯连铸生产往往产生中心碳偏析，根据有关文献报道，160mm×160mm连铸坯中心碳偏析系数达到1.45左右。根据欧洲主要高碳硬线生产厂家提供的经验，有效地控制连铸小方坯中心的碳偏析，采用如下技术措施，可将连铸小方坯的中心碳偏析系数控制在1.10以下：（1）中间包钢水的过热度控制在25℃以下；（2）在连铸结晶器上和凝固终端区安装电磁搅拌装置；（3）二冷段采用强化冷却技术；（4）采用凝固终端轻压下技术。

2.3 轧钢工序控制质量途径

轧钢工序的控制，主要是控制好线材的内部组织。目前，国内大部分高碳线材通过高速线材轧机生产，这种轧机具有良好的控冷（水冷和风冷）能力，可以直接生产出高索氏体化线材。但若控冷工艺制定不合理，不仅直接影响到线材的索氏体化程度，组织的规律性和均匀性，而且将导致线材产生非正常组织，从而直接影响到产品的力学性能和加工性能。

（1）如果吐丝温度过低，线材可在进入风冷线前便出现渗碳体组织；而如果吐丝温度控制过高，将导致线材心部因冷却过慢出现渗碳体。

（2）如果风冷强度过强，线材的边沿容易产生马氏体和贝氏体；而风冷强度过弱，则容易造成线材心部出现渗碳体。

（3）风冷线辊道速度的选择，将直接影响到风冷的效果，尤其是风冷线前3段的辊速。根据实际生产经验，一般要求前两段辊速稍快，第3段辊速适当放慢，有利于提高索氏体化程度。

此外，还应特别注意要保证钢坯加热温度均匀和钢坯在均热段的滞留时间。目前国内大部分轧钢厂在超

设计能力生产，钢坯的加热时间必然会缩短。钢坯缓冷后得到的组织为珠光体和渗碳体，如果钢坯加热温度不均，中心温度偏低，其渗碳体组织不能完全重新溶解，最终将留在线材中。而渗碳体重新溶解后需有足够的时间碳才能达到均匀化。所以，如果钢坯在均热段没有足够的滞留时间，钢坯将存在局部碳偏析区，难免重新产生渗碳体。

3 断裂原因分析

3.1 连铸方面的原因

3.1.1 连铸坯的中心成分偏析 随着凝固的进行，中心区液体成糊状，并逐渐失去流动性，由于糊状区下部的凝固产生体积收缩，对糊状区的液体产生一种抽吸作用，此时密集溶质的残余液体沿树枝晶间流动，凝固后形成V形偏析和中心偏析。

对于生产预应力钢丝的线材来说，要求其金相组织的索氏体化程度越高越好。由奥氏体等温转变曲线可知，影响线材最终组织的主要因素是钢的成分和冷却速度。钢的成分决定C曲线的位置，一般而言，元素Cr、Mn、C均增加过冷奥氏体稳定性，推迟奥氏体的分解过程，因而使C曲线右移。连铸坯轧成盘条后，中心成分偏析并未消除，由于线材中心Cr、Mn、C含量很高，使中心区的C曲线与线材边部的C曲线相比更靠右。即使中心偏析区的冷却速度低于线材表面，仍有可能转变为马氏体^[2]。

从断口试验中发现，马氏体转变主要由以下三方面引起^[3]：（1）成分超标。马氏体转变点 M_s 、 M_f 主要决定于加热时溶入奥氏体中的合金元素的种类和数量，除铝和钴能提高马氏体点以外，绝大部分合金元素均降低马氏体点。从对断口的成分分析及金相检验发现，Mn的质量分数高达1.4%~1.5%时，C曲线向下移动，在正常的热处理工艺参数下加热易形成马氏体组织。（2）钢丝在热轧、正火或铅淬火过程中，由于喷水的原因，极易使奥氏体快速冷却，形成马氏体和屈氏体组织。（3）电接操作不到位，电接后没有通电回火，致使电接头存在各种复杂的不平衡组织。另外马氏体对氢脆裂纹非常敏感，即含氢量相同的盘条中心有马氏体，更容易产生氢脆裂纹，导致拉拔时出现脆断。

3.1.2 铸坯中心缩孔、疏松和夹杂 连铸坯凝固过程中，由于二冷区冷却的不均匀性，导致柱状晶不稳定生长，在铸坯纵断面中心常常出现“凝固桥”，桥下面的残余液体凝固要收缩，得不到上面液体的补充，就会形成缩孔、疏松，并伴随严重的中心偏析和夹杂物的富集。由于有与大气相通的缩孔，当铸锭（或坯）加热时，其内壁氧化，缩孔不能在随后的热压力加工过程中焊合；密闭的缩孔附近凝聚着大量夹杂物，在轧制过程中焊合也较困难，因而这些缩孔都保持在线材中；而非金属夹杂物在热轧时被压碎，其碎片分布成线状，形成带状组织，使原材料性能不均匀，塑性下降。拉拔时，非金属夹杂物便破裂，使金属基体的连续性被破坏，导致钢丝塑性和韧性降低。线材在拉拔过程中，中心空洞、裂纹便成为断裂的起源，随着拉拔、变形，裂纹扩展为锥形裂缝，导致钢丝断裂^[2]。

3.2 轧制方面的原因

3.2.1 铸坯表面修磨质量 线材厂所用钢坯存在一定数量气孔、夹杂等冶炼缺陷，同时钢坯也存在表面裂纹。这类缺陷在加热和轧制过程中，一部分经过回复再结晶得到修复，一部分随轧制暴露在表面，使轧件微观上存在不连续性，形成表面的微观裂纹源，最后在轧制过程中结疤。为消除钢坯的这类缺陷，必须合理控制冶金过程，减少缺陷数量，同时制定合理的钢坯清理和冷却工艺，保证无表面裂纹^[3]。

3.2.2 表面缺陷 原料在冶炼时成分控制不严，有害元素P、S、Cu等含量偏高，轧制时孔型磨损，控冷不良，对盘条组织及表面均有不良影响。常见的表面缺陷有耳子、折叠、断续裂纹及麻点，这些缺陷在钢丝生产过程中难以消除^[4]。由于线材本身的原因或拉拔过程中模子损坏的原因，极有可能在金属的表面、次表面或内部形成裂纹，并能在下道工序及使用过程中继续发展和扩大，使金属强度剧烈下降，甚至断裂；而折叠的出现，不如裂纹那样容易察觉，在盘条入库时，时常被线材表面氧化铁皮遮盖，难以发现，而且在拉丝时继续存在，只有在钢丝检验，经过扭转，呈现翘起时才得以发现。观察发现，折叠本身并不能造成钢丝断裂，只有在它和裂纹等其他缺陷同时存在时，才造成钢丝在拉拔过程中断裂^[3]。

另外，原料的皮下气泡，残余缩孔，局部Si、C富集等因素会降低线材的塑性，拉拔后金属分层^[4]。

3.2.3 过烧 过烧是当钢丝加热温度接近于熔化温度时，由于过高温度而使其表层沿晶界处被氧气侵入而生成氧化物，而且在晶界处与枝晶轴向的一些低熔点相发生熔化产生裂纹。过烧的区域一定伴随有脱碳的产生。因为过烧使晶粒边界遭到破坏，而影响到晶粒与晶粒界的结合力，所以钢丝强度很低，脆性增大，容易造成钢丝断裂^[3]。

3.2.4 线材轧制过程中冷却速度的影响 在高速线材轧制过程中之所以采用斯太尔摩控冷线进行冷却，就是要获得较细的珠光体组织，即索氏体组织，并且索氏体化程度越高越好，以便于满足后续拉拔的需要。要满足此要求，斯太尔摩冷却速度曲线必须设计在该钢种C曲线的鼻尖处经过，否则就会出现冷却速度太慢或太快。如果冷却速度过快，容易出现贝氏体或马氏体组织；如果冷却速度过慢，则容易形成粗大的珠光体组织。对于亚共析钢来说，铁素体容易沿奥氏体晶界析出，随着铁素体量的增多，钢的强度降低；对过共析钢而言，在轧后缓冷过程中，沿奥氏体晶界将析出 Fe_3C 。在正常条件下，带控冷装置的高速线材轧机能有效地控制 Fe_3C 的析出，但是根据现场生产经验，当钢中碳的质量分数超过0.90%时，在现有的轧机控冷工艺条件下，亦有从奥氏体晶界析出 Fe_3C 的可能。在正常的炼钢生产过程中，高碳钢中碳的质量分数应能控制在0.86%以内，但是，如果浇注过程中控制不当，钢在凝固过程中产生偏析，使钢坯局部（主要是凝固中心或钢锭头部）碳的质量分数超过0.90%，亦有析出 Fe_3C 的可能，使钢丝在拉拔过程中断裂。在国产线材的个别试样中，确实发现局部碳化物的存在，尤其是线材的心部，此外有时在线材的边沿还出现马氏体或贝氏体^[5]。

3.2.5 显微组织对盘条拉伸断裂的影响 正常盘条的热轧态组织应是以细小均匀索氏体为主，并有少量珠光体和网状铁素体。但当盘条的热轧显微组织中出现较多的珠光体群，且其片距较大（大于 $0.15\mu m$ ），其间又有较多网状铁素体时，在适当拉伸速度时拉伸，断裂首先从盘条纵向表面有缺陷处萌生裂纹，经过一定塑性形变，裂纹向内缓慢扩展，最后发生快速脆性解理断裂，其断裂特征属于纤维状和结晶状混合断口的解理断裂机制^[6]。

3.2.6 盘条头部的耳子引起的拉拔横裂 部分盘条的头部带有或轻或重的耳子，这是轧钢时留下的缺陷，拉拔时必须剪掉。盘条经酸洗、磷化后若是发现很严重的耳子还可以剪掉，若是较轻的耳子则不易发现。这些未被发现的耳子在拉拔过程中被紧紧地碾在钢丝基体上，拉拔成成品并经过一段时间后，一部分耳子会被逐渐地释放出来——表现为某一侧或两侧的轻微横裂^[7]。

3.2.7 盘条本身折叠引起的断裂 折叠是一种常见缺陷，一旦产生很难排除，随着轧制过程的深化也被进一步细化。很深的折叠经拉拔后与基体紧紧碾在一起，在拉拔过程中不易暴露，经拉伸试验后暴露在断口处；嵌入具有一定深度盘条基体之中的折叠，在拉拔过程中或拉拔后会暴露出来——表现为很深的横裂。此横裂常为钢丝单侧横裂，由于裂痕较深，对钢丝的力学性能有毁灭性影响，导致钢丝断裂^[7]。

3.3 加工方面的原因

3.3.1 酸洗程度的影响 如果盘条在酸池中浸酸时间过短或酸浓度太低，造成盘条表面的氧化铁皮酸洗不净便进行磷化，使得部分磷化膜未附在钢基上，而是附在氧化铁皮上，在拉拔时，氧化铁皮和基体不能同时进行均匀变形，并且氧化铁皮被嵌入钢基中，使得拉拔后的钢丝表面存在微裂纹。因酸液浓度、温度过高和浸酸时间过长导致的过酸洗，使盘条表面的氢不容易排出，产生氢脆，导致钢丝脆断，同时又使得盘条表面过于粗糙，拉拔时容易产生微裂纹，涂层不均匀也易造成钢丝拉伤。盘条无论欠酸洗还是过酸洗，一旦产生微裂纹，在预应力作用下，钢丝微裂纹会进一步扩展，最后造成钢丝断裂^[7]。

3.3.2 磷化质量的影响 磷化质量差，如磷化膜过薄或过厚，也会造成拉拔断丝。过薄，拉丝粉不容易被带入；过厚，磷化膜附着力不牢固，容易脱落，拉丝粉也不容易带入。两者均可造成钢丝拉拔时润滑不良，表面产生微裂纹，导致钢丝断裂^[8]。

3.3.3 热处理质量的影响 热处理质量不好引起拉丝断丝的原因有两个：（1）脱碳。脱碳是指钢丝表面C被氧化掉，铅淬火时先析铁素体较多，在后期拉拔时，表面与心部硬度不一样，金属流动速度不一样，势必在分界处产生分层，严重时会产生断丝现象。（2）由于停车或收线速度过慢，炉子出口处到铅锅入口处之间的一段钢丝在炭末的覆盖下仍处于高温状态，冷却速度较慢，使奥氏体中的铁素体过早地析出，滞留时间越长，铁素体析出量越多，而后进入铅液淬火后即形成较为粗大的网状铁素体和珠光体，影响钢丝的顺利拉

拔^[4]。

3.3.4 拉丝过程中裂纹的产生 在拉丝过程中裂纹源来源大致有3种：（1）总压缩率不合适。总压缩率越大，钢丝的强度升高越多，而弯曲、扭转值下降较快。对中高碳钢来说，总压缩量控制在75%~80%之间时，成品钢丝既能保证强度要求，又能保证弯曲、扭转韧性要求，即获得良好的综合力学性能。（2）道次压缩率分配不当。在总压缩率一定的情况下，道次压缩率的分配对钢丝性能也有一定的影响。试验表明，如道次压缩率较小（15%以下），索氏体中渗碳体片在拉拔中进行塑性弯曲变形，沿拉拔方向旋转，至总压缩率90%时，既得到高的强度，又能保证较好的韧性，弯曲值、扭转值也较高，但拉拔道次增多，降低了生产效率。如果道次压缩率过大（大于30%），渗碳体片在拉拔时会很快破碎，总压缩率大于60%时，韧性即变得很差，尤其是扭转韧性变差，容易产生扭转裂纹。（3）拉丝时温度升高。在一般拉拔速度下，中高碳钢拉一道平均温度升高80~100℃，在连拉机上，经多次拉拔后，钢丝温度累积可达400~500℃，拉拔时产生的热量虽然大部分被钢丝带走，但是钢丝与模孔接触处，由于热传导作用，仍有10%左右的热量保留在模具中，造成润滑剂失效，模具使用寿命降低，钢丝表面温度急剧升高，若润滑不良，往往会造成很大的残余应力，引起钢丝表面产生裂纹，甚至导致钢丝拉断^[4]。

3.3.5 拉拔模具安放不正的影响 模具安放不正会使拉出的钢丝不是与卷筒呈水平相切关系而是呈相割、相离或偏上、偏下的关系。相割会使钢丝外侧与模具强烈摩擦导致磷化膜脱落，润滑系统被破坏，拉拔温度骤升造成钢丝外侧表面被破坏而产生横裂；相离会造成钢丝内侧表面产生横裂；偏上偏下都会使钢丝产生横裂。

由于模具安放不正引起横裂的裂痕深浅视其偏差的程度而定。安装偏差越大，横裂痕越深，对力学性能影响也越大，尤其对塑、韧性值影响大^[7]。

4 改进措施

在实际生产中，导致钢丝断裂的原因并非单一出现，这就使得分析产生断裂的主要因素和实施控制的难度大大增加，针对导致钢丝可能断裂的因素提出原则性的改进措施。

（1）在钢水冶炼和连铸过程中，控制中间包钢水温度高于液相线15~25℃，采用钢包底部吹氩气搅拌和连铸结晶器中电磁搅拌，提高连铸坯化学成分的均匀性。对连铸工艺进行优化，采用浸入式水口保护浇注及铸坯强冷工艺，打破铸坯的柱状晶。

（2）增大铸坯断面，控制二次冷却，使钢坯横截面等轴晶区所占比例尽可能大，从而使偏析的元素充分扩散，降低偏析程度。对保护渣使用进行跟踪，不同的钢种采用不同的保护渣，同时提高保护渣的质量，降低钢水浇注温度。

（3）改善钢水质量，尽可能降低P、S含量。炉后挡渣、吹氩、烘包、保温；硅铝铁脱氧；提高终点[C]含量。耐材选优，改进品质，例如可以用铝碳水口取代石英下水口等。稳定操作，扩大中间包容量，缩短钢水衔接时间等。

（4）轧制之前必须对坯料进行探伤、修磨精整。通过喷丸（铁砂）处理去除表面氧化铁皮，经荧粉探伤，对有缺陷的地方作标志，再利用砂轮修磨进行精整处理，防止裂纹出现。

（5）坯料加热时要防止表面脱碳。加热炉宜采用步进梁式加热炉，分段加热控制，这样炉区温度易控制，坯料加热温度也较均匀。根据不同钢种优化加热工艺，对开轧温度以及均热段、加热段温度进行不断调整对比。

（6）优化控冷工艺，调整控冷工艺参数，摸索一套适用于转炉炼钢特点的控冷工艺。高线斯太尔摩控冷速度对不同钢种要适当，防止出现有害组织。加强工艺控制，对吐丝温度进行动态监测，吐丝温度的波动应严格控制在±10℃范围内，以改善通条性能，轧制大规格高碳钢线材，相变转变前的冷却速度大于10℃/s，以抑制先共析渗碳体组织的析出。

（7）热处理要准确设定线温、车速、铅温并严格控制，出炉口封闭要严。酸洗时严格控制酸液浓度、温度、酸洗时间，避免过酸洗或欠酸洗；磷化时，严格控制磷化液浓度和浸磷化液时间，避免磷化膜过薄或

过厚；盘条本身要防止折叠，拉拔时模具要放正，避免产生横裂。拉丝在保证通水、润滑良好状态下，尽量采用小压缩率多道次拉拔等。

参考文献：

- [1] 潘贻芳. 大规格高碳钢线材的质量控制[A]. 2000年全国线材制品行业年会，天津，2000.
- [2] 桂美文. 连铸PC钢丝锥状断口的成因分析及改进措施[A]. 2000年全国线材制品行业年会，天津，2000.
- [3] 傅百子，曹清. 钢丝生产过程中断裂原因分析[J]. 金属制品，1997，23（3）：17-18.
- [4] 王快社，李国哲. 碳素弹簧钢丝裂纹原因分析[J]. 金属制品，2000，26（2）：15-16.
- [5] 周海斌. 湘钢高速线材优质硬线产品开发与生产[A]. 2000年全国线材制品行业年会，天津，2000.
- [6] 尹万全，郭延风，曹家麟，等. 碳钢盘条拉伸异常断口分析[J]. 金属制品，1998，24（5）：8-9.
- [7] 郭志民. PC钢丝拉拔叫模及横裂原因分析[J]. 金属制品，2000，26（2）：18-19.
- [8] 刘立军. 高强度预应力钢丝脆断原因初探[J]. 金属制品，2000，26（3）：29.

[返回上页](#)