# 热轧无缝钢管外表面结疤缺陷形成机制与抑制方法-PQF 机组轧制极限薄壁管工艺研究

胡亚东 马建成 丁 炜
天津钢管制造有限公司，天津 300301

[摘要]根据φ133×3.5mm 热轧无缝钢管径壁比大、外表面结疤、轧折频发的特点，对 PQF 机组薄壁管轧制过程中金属宽展和挤入辊缝的行为进行分析。PQF 机组由 1 架 VRS、5 架 PQF 和 3 架 EM 组成，原孔型试制薄壁管时出现 VRS 外折、连轧粘钢、脱管机青线、轧折。通过改变 VRS 脱离角、长轴和偏心距来调节 PQF 前 3 架的偏心距和槽底圆半径，增大 EM2 和 EM3 椭圆度，改善冷却水、除鳞水压力、轧制力曲线以及限动、脱管速度，从而得到孔型和工艺协同控制的方法。现场试制结果表明本方法可以减小金属挤入辊缝，降低外表面结疤和轧折缺陷。

[关键词]热轧无缝钢管；结疤缺陷；PQF 机组；薄壁管
DOI：10.33142/ect.v4i10.20657 中图分类号：TG3 文献标识码：A

# Formation Mechanism and Suppression Method of Scar Defects on the Outer Surface of Hot-rolled Seamless Steel Pipes - Research on the Rolling Process of Ultimate Thin-walled Pipes by PQF Unit

HU Yadong, MA Jiancheng, DING Wei
Tianjin Pipe Manufacturing Co., Ltd., Tianjin, 300301, China

**Abstract:** Based on the characteristics of large diameter to wall ratio, scar formation on the outer surface, and frequent rolling and bending of hot-rolled seamless steel pipes with a diameter of 133 ×3.5mm, the behavior of metal spreading and squeezing into the roll gap during the rolling process of thin-walled pipes in PQF units is analyzed. The PQF unit consists of 1 VRS, 5 PQFs, and 3 EMs. During the trial production of thin-walled pipes with the original hole type, VRS outward bending, continuous rolling sticking steel, stripping machine green line, and rolling bending occurred. By changing the VRS detachment angle, long axis, and eccentricity to adjust the eccentricity and groove bottom circle radius of the first three frames of PQF, increasing the ellipticity of EM2 and EM3, improving the cooling water, descaling water pressure, rolling force curve, as well as limiting and tube detachment speed, a method of coordinated control of hole type and process is obtained. The on-site trial production results show that this method can reduce metal extrusion into the roll gap, reduce surface scars and rolling defects.

**Keywords:** hot rolled seamless steel pipe; scar defects; PQF unit; thin-walled tube

## 引言

热轧无缝钢管在能源开发中承受高压，薄壁化可以减小管体自重、提高材料利用率。φ133×3.5mm 规格钢管径壁比达到 50，PQF 连轧机组一次成型难度大。以往市场上的同类产品大多为焊管或者冷轧无缝钢管，冷轧工艺需要先热轧φ152×5.5mm 母管，再经过冷轧减壁到φ133×3.5mm，工序长、成本高。天津钢管公司 PQF 机组为世界首套PQF连轧管机组，连轧主机由1架空减机架VRS、5 架连轧机架 PQF 组成，脱管机由 3 架 EM 组成。试制φ133×3.5mm 规格时出现 VRS 外折、连轧粘钢、脱管机青线、轧折。现场对比普通规格的产品可知，薄壁管的压下量大，金属纵向延伸、宽展量都变大，宽展的金属挤入了辊缝，就是产生缺陷的主要原因。

## 1 热轧无缝钢管外表面结疤缺陷形成机制

热轧无缝钢管外表面结疤大多沿着轧制方向呈条状或者片状分布，缺陷边缘与基体相连，压合界面处常常夹杂着氧化膜和污物。对于φ133×3.5mm 薄壁管来说，结疤产生和孔型容料能力不够直接有关。该规格的径壁比达

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

到 50，轧制时金属纵向延伸量大，宽展量也大。孔型侧壁脱离角太小或者偏心距不够，宽展金属就会沿辊缝溢出，在管壁外表形成耳子或者凸棱。下一机架继续压下，凸棱被压合到基体上，高温氧化膜很难愈合[1]，产生外折、结疤。脱管机原圆孔型对荒管外径约束大，薄壁荒管在辊缝处产生青线，青线经张减减径后发展成轧折。毛管温降使变形抗力增大，宽展比例变大；除鳞水压力过高、连轧前台冷却水开启都会增大温降，氧化铁皮压入概率增加。图 1 的 ANSYS 模拟得到金属从连轧辊缝挤出的形态，管坯截面在辊缝处向外凸起，凸起部分和现场外折位置一致。控制结疤要从孔型容料空间和轧制温度两条线入手，单纯地提高除鳞压力不能解决宽展挤入的问题。

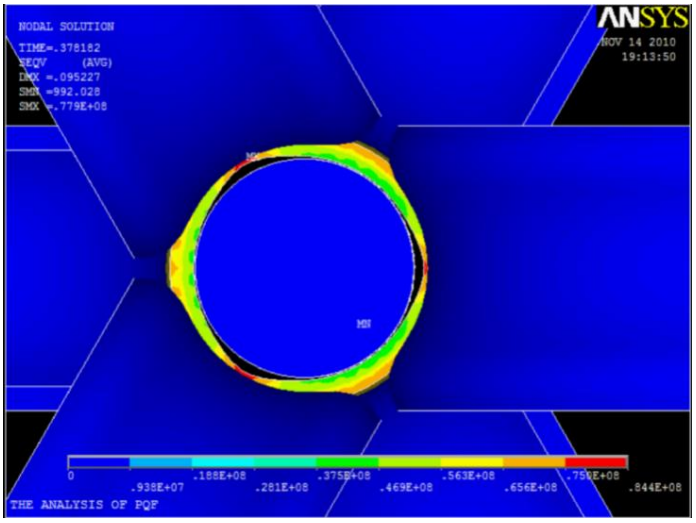



图 1　轧制薄壁管时金属从轧辊辊缝中挤出示意图

## 2 PQF 机组轧制极限薄壁管工艺分析

### 2.1 PQF 机组 PQF 连轧设备与孔型组成

PQF 机组连轧主机由 1 架 VRS、5 架 PQF 和 3 架 EM 组成。普通 VRS 孔型脱离角为 50.21°，长轴 111.58mm，短轴 106.7mm，椭圆度 1.046，偏心 6.92mm。普通 PQF 孔型中，PQF1#、PQF2#、PQF3#偏心距分别为 2mm、2mm、0mm，槽底圆半径分别为 392.6mm、382.2mm、328.025mm。EM 原设计为圆孔型，芯棒需从脱管机中间穿过，轧钢结束后脱管机打开，伺服压下系统完成脱棒。该孔型在普通规格的产品上可以满足荒管圆度的要求，但是用薄壁管时辊缝处的约束太强，青线和轧折出现的次数就增多。薄壁管试制初期 VRS 外折、连轧粘钢、脱管机青线、轧折集中出现，说明原有的孔型参数和薄壁管宽展特性不匹配。

### 2.2 极限薄壁管金属宽展与挤入辊缝行为

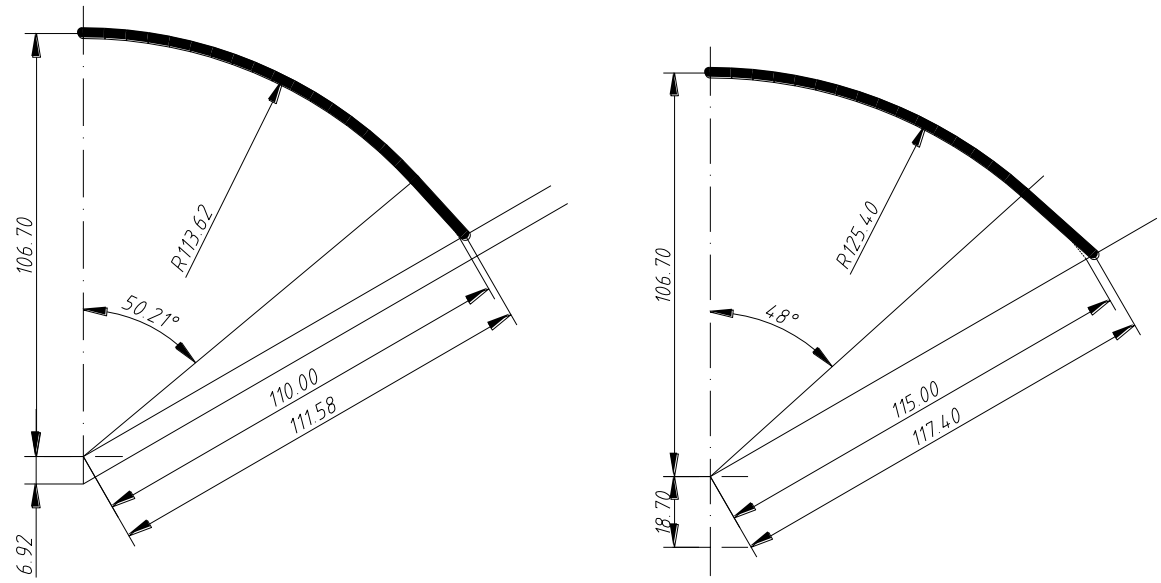
薄壁管和普通规格产品最大的不同就是压下量大时金属宽展量增大。壁厚减薄之后，金属在孔型中横向流动的阻力变小，宽展的金属更容易向辊缝方向移动。当宽展量大于孔型侧壁容料空间的时候，金属就被辊沿挤压进入 VRS、PQF、EM 辊缝中，产生耳子、凸棱、青线。机架压下后，凸起部分被压入到管壁里形成外折、结疤和轧折。从图 1 的仿真结果可以看出挤入位置在辊缝附近，和现场的缺陷位置一致。孔型曲线设计要保证金属在宽展量足够大的时候有向外流动的空间，不能用辊沿强行挤压的方式。VRS、PQF 前 3 架和 EM 的孔型参数要按照薄壁管宽展特征重新匹配，轧制温度和速度需要减小温降和机架间的拉力。

## 3 孔型与轧制工艺优化措施

### 3.1 空减机架 VRS 孔型修改

普通 VRS 孔型脱离角 50.21°，长轴 111.58mm，短轴 106.7mm，椭圆度 1.046，偏心 6.92mm。该孔型对于 Φ133×3.5mm 规格来说，侧壁对宽展金属的引导不够，容易使金属被辊沿挤入辊缝。现场将 VRS 孔型重新设计，脱离角降至 48°，长轴增至 117.40mm，短轴保持 106.7mm，椭圆度增至 1.10，偏心增至 18.7mm，如图 2 所示。图 2 为普通 VRS 孔型和薄壁管 VRS 孔型的对比，普通孔型长轴短、偏心小，薄壁孔型长轴和偏心增大[2]。长轴和偏心距增大之后，孔型侧壁对金属宽展的引导作用加强，轧件在 VRS 中的横向流动空间变大，宽展金属沿孔型侧壁向外移动，不再集中挤向辊沿。脱离角减小之后，辊对轧件的挤压作用变小，VRS 外折出现的次数减少。该修改不会改变短轴尺寸，荒管高度方向尺寸不变，后续 PQF 咬入条件没有受到明显的不良影响。修改后的 VRS 孔型在试制过程中按照批次测量荒管外廓尺寸，记录辊缝两侧凸棱高度，凸棱高度大于 0.3mm 时停止生产检查孔型入口和辊沿倒角，防止局部磨损扩大再挤入辊缝。


Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.




a.普通 VRS 孔型设计　　b.薄壁产品的 VRS 孔型设计

图 2　空间机架 VRS 孔型设计。

图中左侧为普通 VRS 孔型，右侧为薄壁管 VRS 孔型，薄壁孔型的长轴和偏心距增大。

### 3.2 连轧机架 PQF 孔型修改

PQF 孔型设计原理同 VRS 类似，修改时要兼顾成品管壁厚不均度以及连轧主变形分布。连轧主变形主要发生在前 3 架，现场只对 PQF1#、PQF2#、PQF3#孔型进行调整，修改项目为偏心距和槽底圆半径。普通 PQF 孔型中，PQF1#、PQF2#、PQF3#偏心距分别为 2mm、2mm、0mm，槽底圆半径分别为 392.6mm、382.2mm、328.025mm。薄壁管孔型中，偏心距分别改为 6mm、6mm、3mm，槽底圆半径分别改为 396.6mm、386.2mm、331.025mm。偏心距增大之后，孔型的容料空间变大，宽展金属在槽底附近流动的阻力减小。槽底圆半径增大之后，孔型底部曲率变小，金属在槽底和侧壁过渡处的挤入趋势变弱。前 3 架孔型参数调整之后，连轧粘钢、轧折出现的次数减少，成品壁厚不均度没有明显变坏。

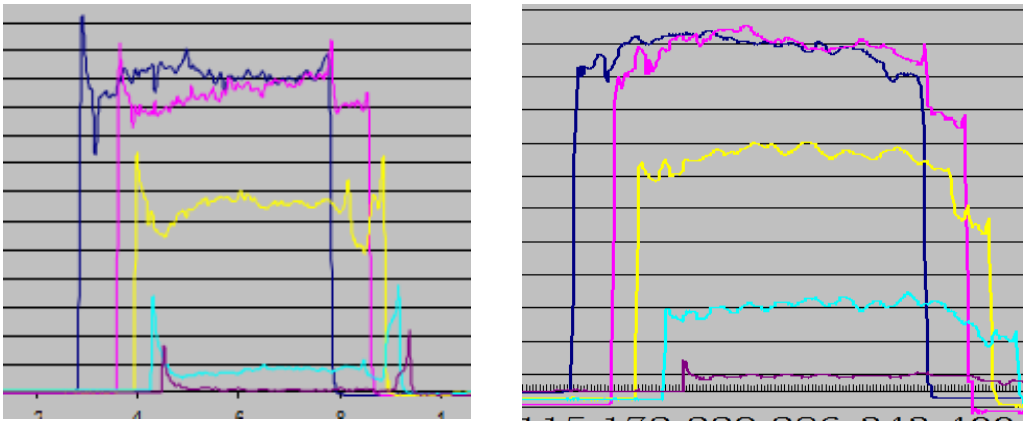
### 3.3 脱管机架 EM 孔型修改

EM 孔型修改受芯棒穿过、伺服压下系统所限，不能由圆孔型完全改成椭圆孔型。荒管进入张减之前要保证足够的圆度，EM 孔型调整幅度受限制。现场采用增大 EM2 椭圆度、调整 EM3 短轴的方法。EM2 短轴减小 0.5mm、长轴增大 0.5mm，孔型椭圆度增大，辊缝处对荒管的约束减弱，青线产生条件变好。EM3 改为较小椭圆孔型，短轴减小 0.3mm，荒管外径略减小，张减咬入条件改善。经过 EM2、EM3 的调节之后，脱管机青线和轧折的出现次数减少，荒管外径波动变小。荒管外径减小后，张减机咬入更加平稳，张减辊表面损伤减小，外表面青线、裂纹也相应减少。EM 孔型调整幅度不能太大，否则荒管圆度不够会影响张减壁厚精度。

### 3.4 连轧轧制工艺优化

Φ133×3.5mm 规格壁厚薄、温降快，连轧工艺参数要与普通规格相同。现场关闭连轧前台全部冷却水，减小毛管温降。连轧除鳞水压力降低 30%后，在保证除鳞效果的基础上减小了毛管表面的温降。轧制力曲线由平特性曲线改为微堆特性曲线，如图 3 所示。图 3 给出了普通规格产品轧制力平特性曲线和薄壁管产品轧制力微堆特性曲线的对比，微堆曲线可以减小前后连轧机架之间的拉力。限动速度在计算机轧制表的基础上降低 10%，使脱管机脱棒过程稳定，在脱棒期间给荒管一个向前输送的趋势。EM1、EM2、EM3 辊速分别提高 1%、2%、3%，使每架脱管机产生脱棒拽力，脱棒过程更加稳定。上述工艺参数和孔型修改配合使用之后，薄壁管轧制过程的稳定性得到提高，金属挤入辊缝的量变小。工艺参数调整后记录各架轧制力峰值、限动速度和脱管机电流，轧制力峰值超过设定窗口时检查来料温度和孔型润滑，脱管机电流波动增大时复查 EM 辊速匹配。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.



a.普通规格产品轧制力平特性曲线　　b.薄壁管产品轧制力曲线微堆特性曲线

图 3　连轧轧制力曲线

图中上侧为普通规格产品轧制力平特性曲线，下侧为薄壁管产品轧制力微堆特性曲线，微堆曲线可以减小机架间拉力。

## 4 外表面结疤缺陷抑制方法

### 4.1 孔型参数匹配与检查控制

现场建立 VRS、PQF 前 3 架和 EM 孔型参数台账，将 VRS 脱离角 48°、长轴 117.40mm、短轴 106.7mm、偏心 18.7mm，PQF1#至 PQF3#偏心距 6mm、6mm、3mm 和槽底圆半径 396.6mm、386.2mm、331.025mm，EM2 短轴减小 0.5mm、长轴增加 0.5mm，EM3 短轴减小 0.3mm 列入换辊检查表。换辊后用 CAD 样板核对孔型曲线，用塞尺检查辊缝间隙，防止辊缝过大造成宽展金属进入。轧制过程中对荒管外径和壁厚进行定期测量，当发现外径有波动或者青线增多的时候立即检查孔型的磨损情况。孔型参数和轧制规格一一对应，避免使用普通孔型来轧制薄壁管。孔型检查分换辊、班中、异常停机三个阶段进行。换辊时记录 VRS 入口侧壁、辊沿倒角尺寸，班中测量 PQF1#到 PQF3#出口轧件壁厚、外径，异常停机后复查 EM2、EM3 短轴尺寸。孔型磨损量用样板和塞尺配合判断，VRS 侧壁磨损大于 0.5mm、PQF 槽底圆半径磨损大于 0.8mm、EM 短轴磨损大于 0.3mm 时更换或者修磨孔型。检查记录与轧制规格、批号对应，发现外折或者青线时回溯同批次孔型参数及辊缝记录，确定是孔型磨损还是来料温度波动造成的。孔型装好后用手动盘车检查辊缝两侧间隙是否一致，间隙偏差大于 0.2mm 时重新调节压下装置，防止一边宽展金属集中挤入。

### 4.2 轧制温度与冷却水控制

薄壁管温降快，现场关闭连轧前台冷却水，减小毛管在连轧前的温降。除鳞水压力降低 30%之后要检查氧化铁皮清除效果，调节喷嘴角度、流量，防止局部过冷和除鳞不净。毛管温度用测温仪测量，温度低于设定值时减慢轧制节奏或者调节加热炉出钢温度。除鳞水压力不能单纯追求低压，压力太低会使得氧化铁皮压入管壁，产生结疤。现场把除鳞水压力、毛管温度和轧制节奏三者结合起来控制，保证除鳞效果和温降控制的平衡[3]。测温点设在连轧前台及除鳞机出口处，当连轧前台温度低于设定的下限时停止轧制或者提高加热炉出钢温度，除鳞机出口温度下降过快时检查除鳞水流量及喷嘴是否堵塞。除鳞水压力降低 30%后每周标定一次流量，记录喷嘴角度和覆盖宽度，氧化铁皮清除不净时先调整喷嘴角度，再考虑局部提高压力，避免整体提高压力造成温降增大。毛管表面氧化铁皮厚度采用目视、压痕法抽查，氧化铁皮压入管壁的缺陷批次单独标记，回溯除鳞水压力、毛管温度记录。冷却水关闭后检查连轧前台设备冷却是否受到影响，设备温度超过允许值时采用局部外冷，不恢复轧件冷却水。

### 4.3 轧制力与速度匹配控制

连轧轧制力用微堆特性曲线后，在现场设定各架轧制力窗口，监控轧制力波动。轧制力曲线出现尖峰或者下凹时，检查孔型磨损、润滑以及来料温度。限动速度降低 10%，EM1、EM2、EM3 分别提速 1%、2%、3%，速度参数与轧制力曲线匹配。当脱棒过程中拽力不够时，检查 EM 辊速及伺服压下动作。轧制力、轧制速度参数放入轧制表，换规格时重新计算、现场修正，防止机架间拉力过大造成孔洞、断管。轧制力窗口 PQF1#～PQF5#进行设置，超出窗口上限时检查来料壁厚、温度，低于窗口下限时检查孔型润滑、轧辊磨损。限动速度降低 10%后记录脱棒时间、脱管机电流，脱棒时间变长或者电流增大时重新调整 EM1 到 EM3 辊速提高比例。轧制力曲线出现尖峰时同


Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

步观察对应机架出口轧件表面，发现孔洞或者断管立即停止运行检查孔型和速度匹配。速度参数调整之后连续跟踪三个批次的轧制力曲线、脱棒电流，保证微堆特性曲线稳定之后再进入正式轧制表。换规格时重新计算限动速度、EM 辊速，不直接套用 φ133×3.5mm 规格参数。

### 4.4 脱管与张减衔接控制

EM 孔型调整之后，在现场对荒管的圆度、外径、表面青线进行检查。当荒管外径过大时，调节 EM2、EM3 的短轴，当荒管外径过小的时候，检查张减咬入及壁厚。张减前清除荒管表面的氧化铁皮，检查张减辊表面的状态，辊面有磨损或者粘钢时及时更换。张减咬入不稳定时，重新测量 EM3 短轴尺寸、荒管温度。脱管与张减衔接控制以减少青线、轧折、结疤为目的，孔型参数、速度参数、温度参数同时调整。荒管圆度用卡尺测量长轴和短轴，圆度偏差大于 0.5mm 时调整 EM2 椭圆度或 EM3 短轴。当荒管外径偏大时先减小 EM3 短轴，外径偏小时检查张减咬入角和张减辊磨损。张减前用压缩空气吹扫荒管表面的氧化铁皮，发现氧化铁皮压入时检查除鳞水和荒管温度。张减辊表面有粘钢或者磨损沟槽时更换轧辊，更换后测量首支钢管外径和壁厚[4]。张减咬入打滑时检查 EM3 出口荒管温度、圆度，温度低时加快轧制节奏或者调节加热炉出钢温度。脱管及张减衔接检查记录以批次为单位保存，对青线、轧折缺陷的批次进行回溯，找到 EM 孔型、荒管温度、张减辊的状态，再进行参数的调整。

## 5 结束语

φ133×3.5mm 热轧无缝钢管径壁比大，薄壁管轧制时金属宽展量增大，宽展金属挤入 VRS、PQF 和 EM 辊缝是外表面结疤、外折、青线和轧折的重要来源。PQF 机组现场将 VRS 脱离角降至 48°，长轴增至 117.40mm，偏心增至 18.7mm；PQF 前 3 架偏心距改为 6mm、6mm、3mm，槽底圆半径改为 396.6mm、386.2mm、331.025mm；EM2 短轴减小 0.5mm、长轴增加 0.5mm，EM3 短轴减小 0.3mm。轧制工艺关闭连轧前台冷却水，除鳞水压力降低 30%，采用微堆特性轧制力曲线，限动速度降低 10%，EM1 至 EM3 分别提速 1%、2%、3%。孔型参数和工艺参数配合之后，金属挤入辊缝的量变小，VRS 外折、连轧粘钢、脱管机青线以及轧折的出现次数也减少了。现场要保证孔型参数检查、温度控制、轧制力和速度匹配、脱管和张减衔接的协调，不能因为某一个参数的调整而产生新的表面缺陷。

## [参考文献]

[1]朱智禄,刘建群,刘志伟,等.PQF 连轧管机组 238mm 孔型的优化设计与开发[J].钢管,2025,54(1):33-39.
[2]朱智禄,侯双平,刘建群,等.无缝钢管外表面凹坑缺陷形成原因分析及解决措施[J].钢管,2025,54(3):39-43.
[3]杨玉萍,郭海明,韩久富,等.张力减径张力系数对无缝钢管壁厚不均的影响[J].钢管,2024,53(2):69-73.
[4]姜志超,李靖,董屹盛,等.Q345B 热轧无缝钢管外折叠缺陷成因分析及改进措施[J].热加工工艺,2026(17):207-212.

作者简介：胡亚东（1979—），男，汉族，湖北云梦人，工程师，大学本科，2002 年毕业于武汉科技大学材料成型与控制工程专业，从事无缝钢管轧制工作 24 年，对锥型穿孔机、张力减径机及 PQF 轧机有一定的研究，熟悉不锈钢无缝钢管的轧制过程。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.