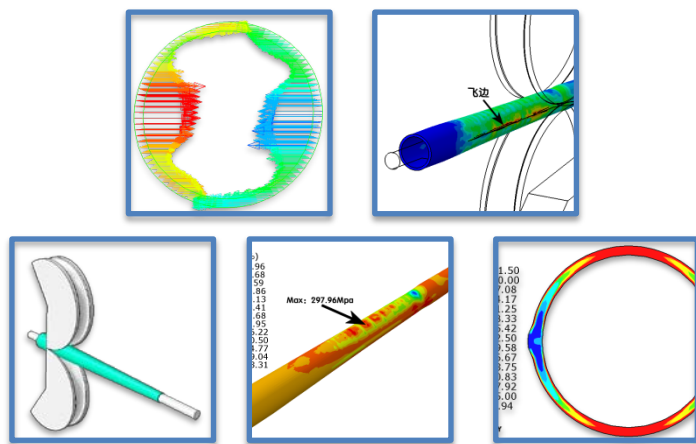


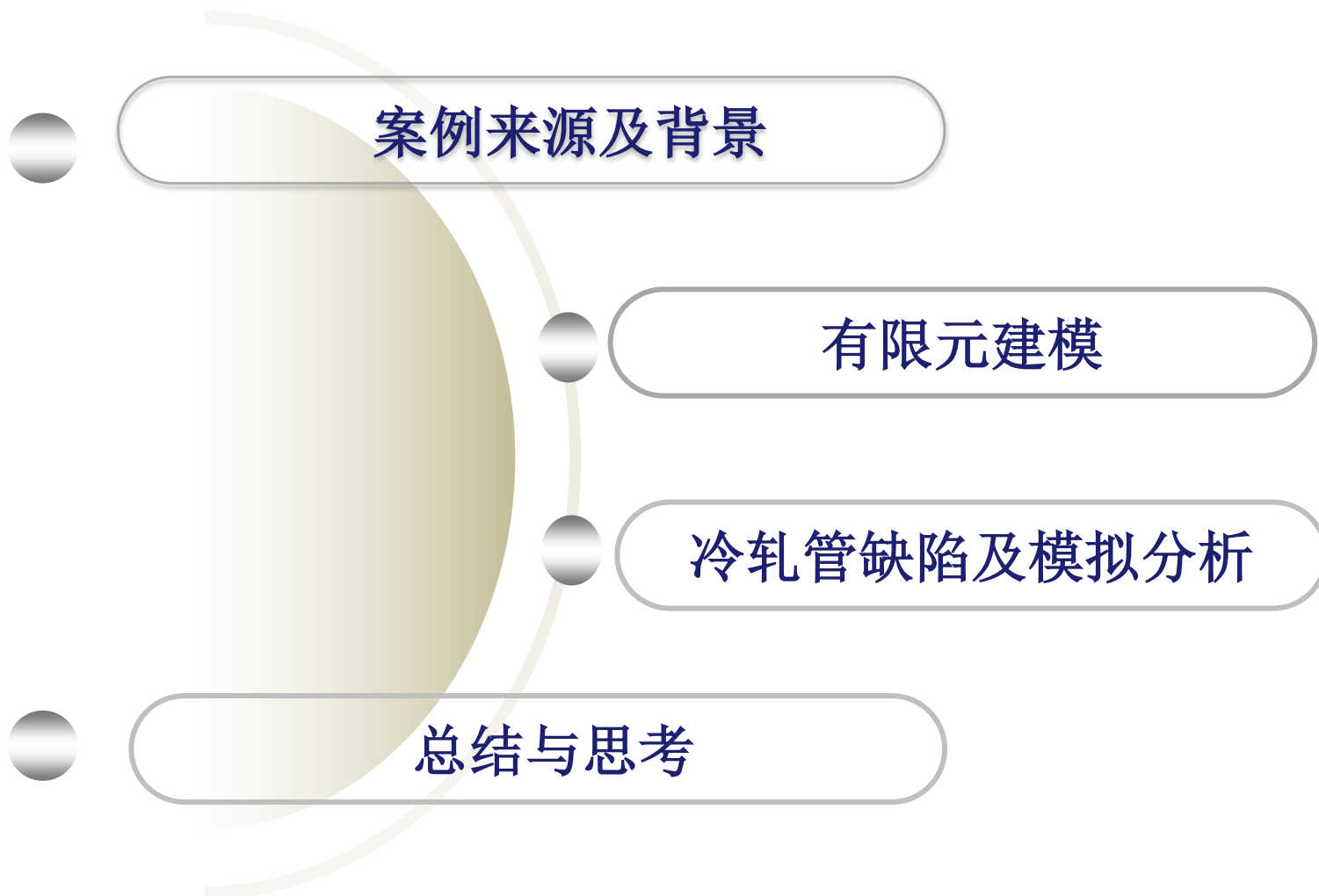
皮尔格冷轧H65黄铜管缺陷分析及解决措施



案例制作：林高用 教授

中南大学材料科学与工程学院

内容提纲：



一、案例来源及背景——皮尔格冷轧法概述

二辊周期式冷轧（皮尔格冷轧）是获得**高精度薄壁管**的重要生产方法，也是外径或内径要求高精度的厚壁管与特厚壁管，以及异型管、变断面管的主要手段。

皮尔格冷轧管的主要特点是**道次加工率大，壁厚纠偏能力强**，因此**广泛应用于各种铜合金管材的在制品生产**，多为连拉、盘拉或直拉工序供坯，而不直接生产成品。



图1 皮尔格冷轧管机实物照

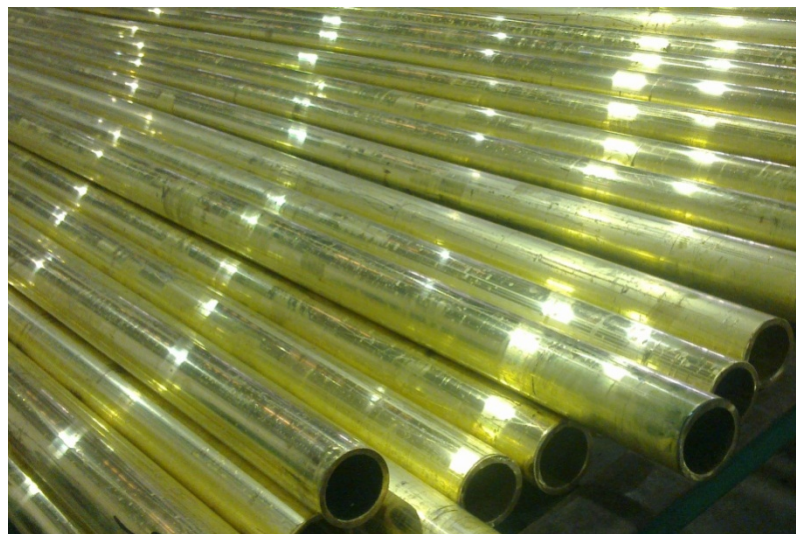


图2 铜管冷轧制品

一、案例来源及背景——研究背景

“水平连铸管坯——皮尔格冷轧开坯——拉拔”是一种高效短流程工艺，因其能耗低、投资省、成品率高、经济效益好而被广泛应用。目前采用该工艺已成功生产紫铜管和 α 单相黄铜管，但对于H65黄铜管的加工尚存在一定的困难。

理论上，H65黄铜在200 °C 以上就可能析出脆性相（ β 相和 β' 相）。如果H65黄铜内部存在一定量的脆性相，加上冷轧时轧槽开口处金属始终处于拉应力状态，若工艺控制不当，就会使管材表面出现环形压痕或横向周期性裂纹等缺陷，如图3。

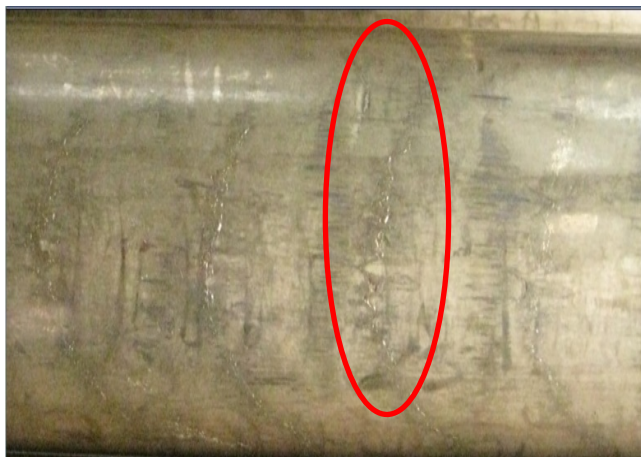
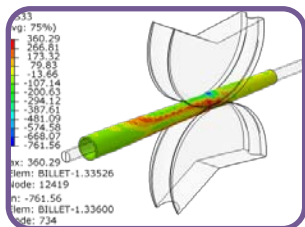


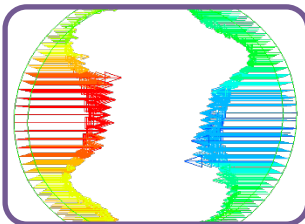
图3 H65黄铜管在冷轧过程中因工艺控制不当而引起的缺陷

一、案例来源及背景——目的与意义

本课题来自于国内某铜加工企业生产实际，通过有限元模拟以及生产实践结合，完成其新建H65黄铜管冷轧生产线的模具设计以及工艺制定，并通过将模拟与后续试产结合完成工艺优化，解决缺陷问题。



对不同工艺条件下的冷轧过程进行模拟，探究不同工艺条件对冷轧过程的影响规律，完成H65黄铜管冷轧工艺的制定，并通过后续试产优化工艺；



对偏心管坯的冷轧过程进行模拟，探究冷轧过程中金属的流动规律以及冷轧矫偏的机理。

二、有限元建模——几何建模：

本案例采用的皮尔格冷轧管机如图4所示，其主要装置包括机械系统（上料装置、喂料装置、送进回转装置、夹送装置等）、芯棒、孔型装置、润滑系统、电气控制系统等。其主要技术参数如下表1所示。



图4 皮尔格冷轧管机实物照

表1 皮尔格冷轧机主要技术参数

辊径 (mm)	机架行程次数 (次/min)	机架行程长度 (mm)	送进量(mm)	轧辊回转角度 (°)	轧制角度 (°)
450	60~80	1023	2~20	306	215



二、有限元建模——几何建模：

H65黄铜管冷轧几何模型装配图如图5所示：

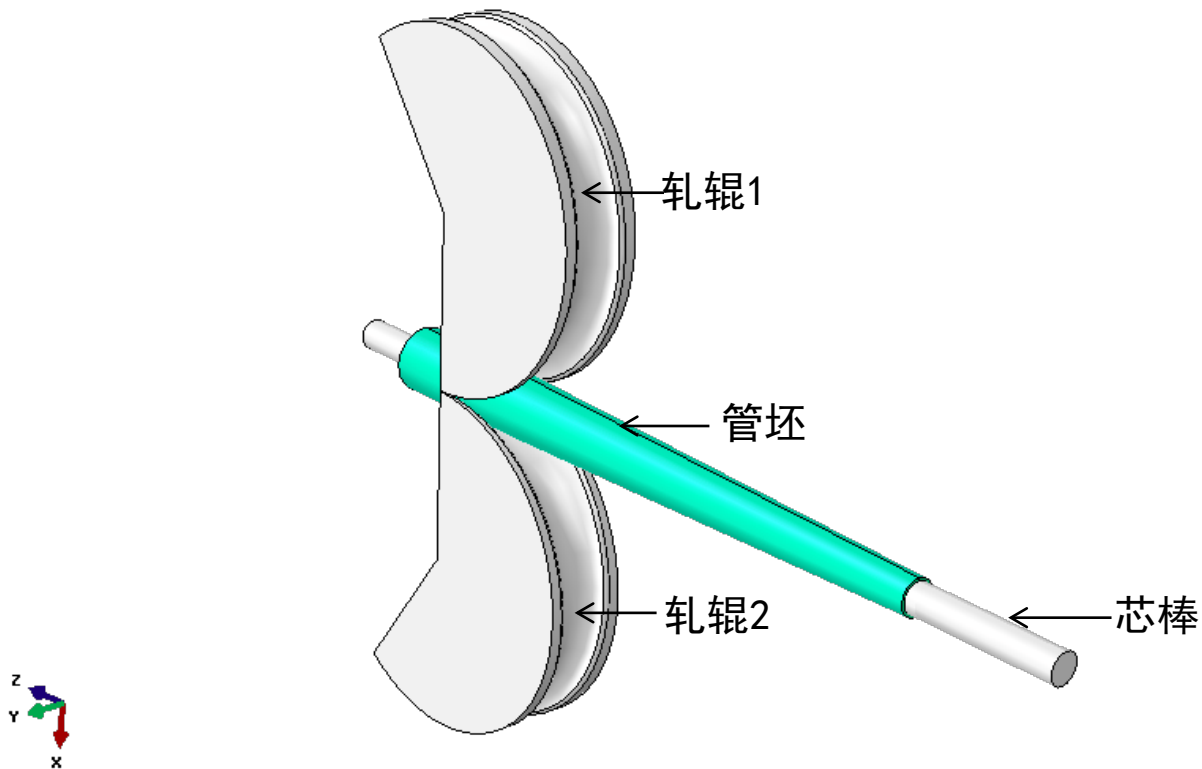


图5 H65黄铜管冷轧模拟的几何模型装配图



二、有限元建模——边界条件：

边界条件设置：

本文分别对3种润滑状态、3种送进量、4种轧辊孔型以及2种偏心率管坯的冷轧过程进行了模拟。模拟过程中的边界条件设置如下表2所示：

表2 模拟过程中边界条件设置参数

冷轧加工率	65%
轧辊行程	876.81mm
轧辊旋转角度	3.9rad
轧辊与管材的摩擦系数	0.12 0.18 0.24
芯棒与管材的摩擦系数	0.12 0.18 0.24
送进量	2.5mm 5mm 8mm
轧辊开口度	1.2 1.5 1.8 2
管坯偏心率	0 20%
对流换热系数	0.03kw/(m ² •°C)
接触导热系数	11kw/(m ² •°C)



三、冷轧管缺陷及模拟分析——应力场分析：

轧制过程中，轧槽底部金属延伸变形大于轧槽开口处金属，导致轧槽开口处金属始终受到附加轴向拉应力作用，轧槽底部金属受到附加轴向压应力作用。当孔型开口处金属的拉应力超过管材的强度极限时可能会产生横向周期性裂纹，这是限制冷轧变形率的主要原因之一。

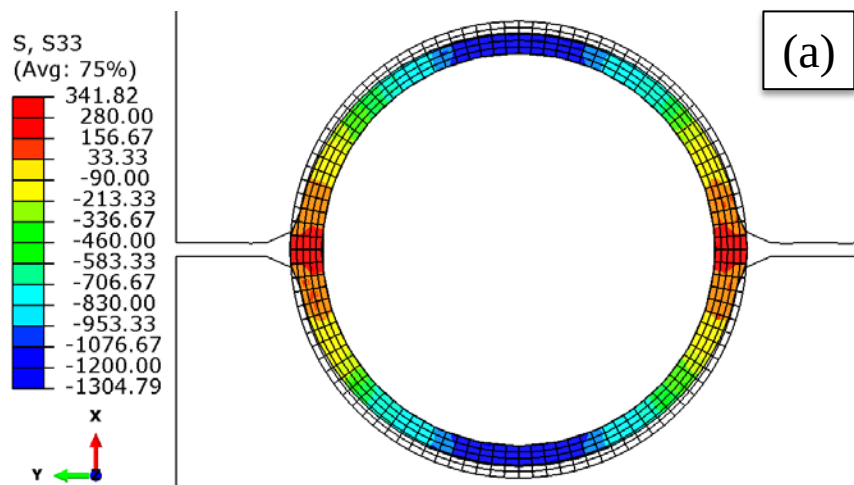


图6 H65黄铜管冷轧时管坯截面上的轴向应力分布

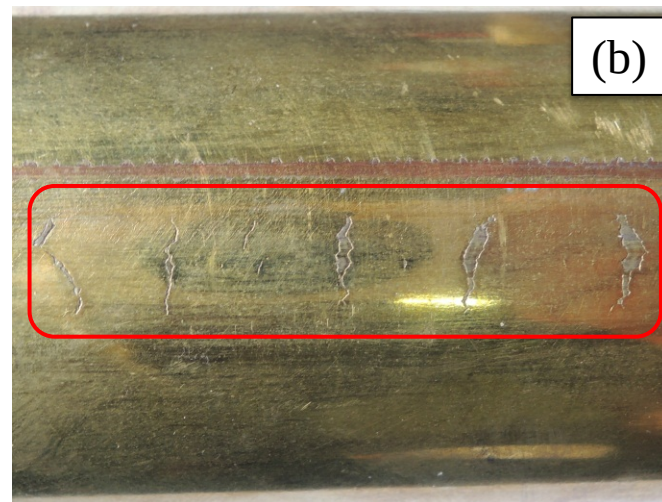


图7 H65黄铜管冷轧时出现的表面横向周期性裂纹

三、冷轧管缺陷及模拟分析

在皮尔格冷轧H65黄铜管过程中，**管材温升过高导致脆性相析出与轧槽开口处金属始终处于拉应力状态是冷轧开裂**的两大主要因素。所以在研究不同工艺因素对冷轧过程的影响规律时，着重考虑管材的最高温度与轴向应力分布。

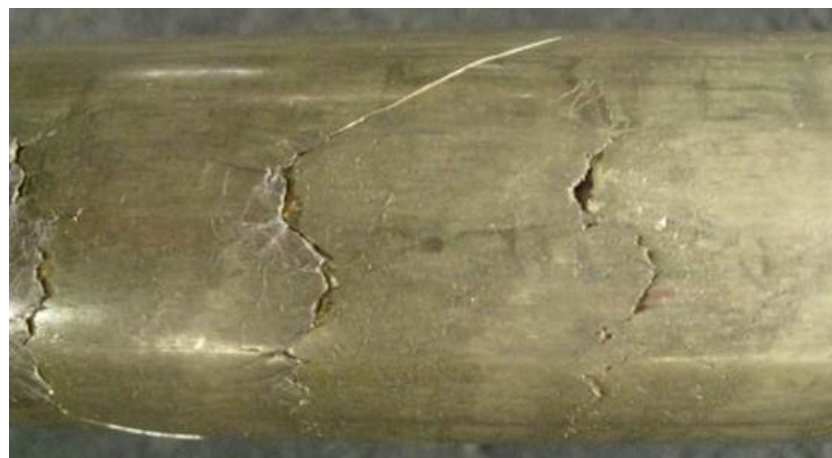


图8 H65黄铜管冷轧时出现的表面
横向周期性裂纹



三、冷轧管缺陷及模拟分析——送进量对轧制的影响规律：

1. 送进量对管材温度及轴向应力的影响规律

当摩擦系数 $\mu=0.12$ 时，本文模拟了送进量 m 分别为2.5mm、5mm以及8mm时的轧制过程。发现送进量越大，管材温度越高，送进量为8mm时温度高达342°C，如图9所示；轧辊开口区域金属的轴向拉应力随着送进量的增大而增大，送进量为8mm时轴向拉应力最大为403MPa，如图10所示。通过比较发现最佳送进量为2.5mm。

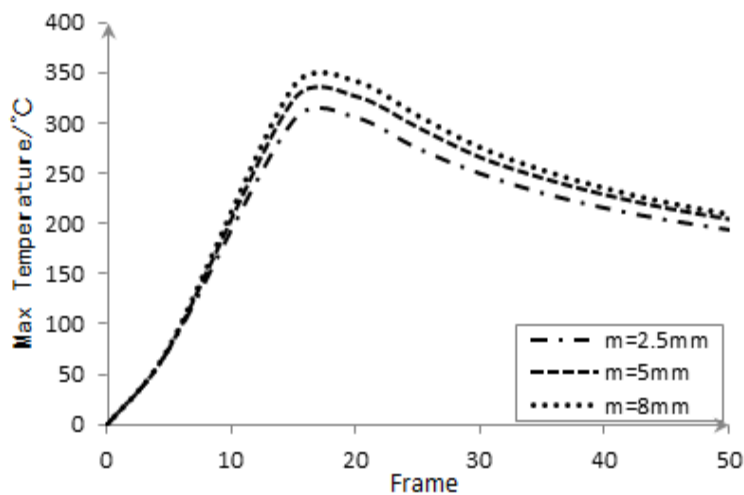


图9 H65黄铜管冷轧时管材最高温度随送进量变化曲线

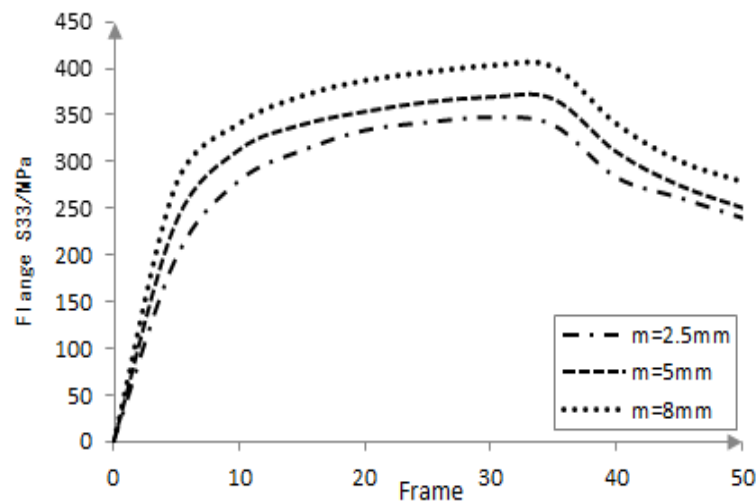


图10 孔型开口处金属最大轴向拉应力随送进量的变化曲线

三、冷轧管缺陷及模拟分析——送进量对轧制的影响规律：

1. 送进量对轧制过程的影响规律

实际生产中送进量的选取会直接影响到生产效率以及管材质量。送进量太小，不能充分发挥设备能力，生产效率低；送进量太大，管材不均匀变形程度增大，使得管材容易出现环形压痕，甚至产生横向周期性裂纹；此外还会造成工模具的损伤。试产时，当送进量为5mm时，管材表面容易出现环形压痕缺陷，如图11所示。



图11 冷轧时因送进量过大引起的表面
环形压痕

四、冷轧管缺陷及模拟分析——润滑情况对轧制的影响规律：

2. 润滑情况对轧制力的影响规律

润滑情况对轧制过程有显著影响，不良的润滑情况不仅会使管材公差不合格，还会加速轧辊磨损，降低管材表面质量，倘若辊面磨损不均，还会导致管材在轧制时上、下弯曲。从图11可以看出，**轧制力随着摩擦系数的增大而增大**。当 $\mu=0.24$ 时，最大轧制力高达为 4.36×10^6 N。

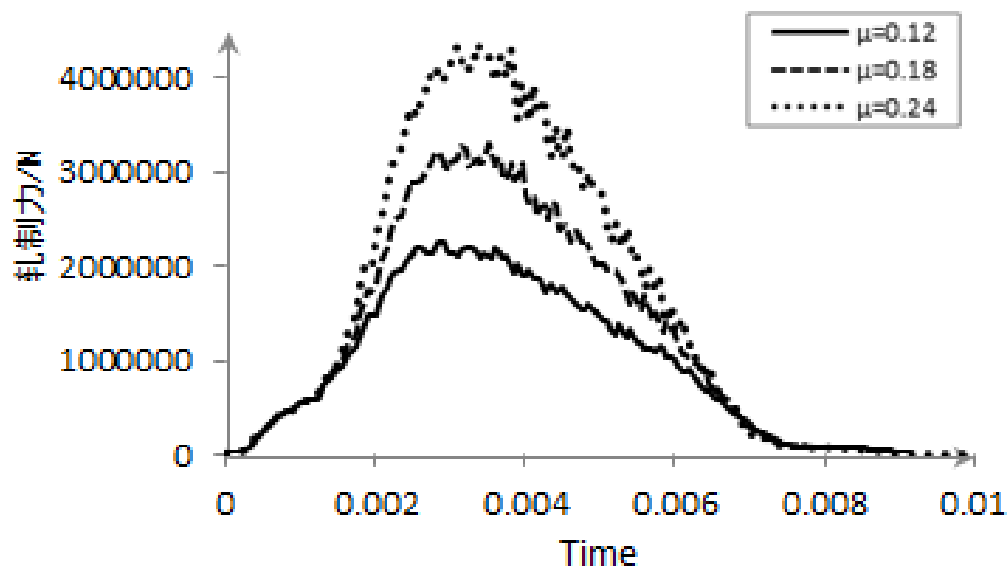


图12 H65黄铜管冷轧时轧制力随摩擦系数的变化曲线

三、冷轧管缺陷及模拟分析——润滑情况对轧制的影响规律：

2. 润滑情况对轧辊的影响

润滑条件越差，越容易造成轧辊的磨损，图13为孔型表面及边缘磨损较为严重的轧辊照片。如果继续用该孔型进行皮尔格冷轧，冷轧后的轧管外表面将会产生如图14所示的表面压痕或其它轧伤。



图13 孔型磨损较为严重的轧辊照片

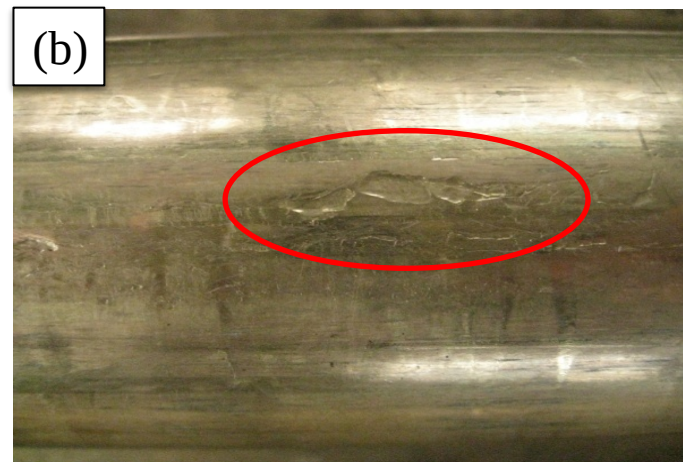


图14 冷轧时因轧辊磨损引起的表面压痕及轧伤



三、冷轧管缺陷及模拟分析——润滑情况对轧制的影响规律：

2. 润滑情况对温度的影响规律

摩擦系数对轧制过程中管材温度的影响规律如图15所示，由图可知，**摩擦系数越大，管材温度越高**，管材最高温度由 326°C ($\mu=0.12$) 升高至 439°C ($\mu=0.18$)，最后高达 **522°C ($\mu=0.24$)**。

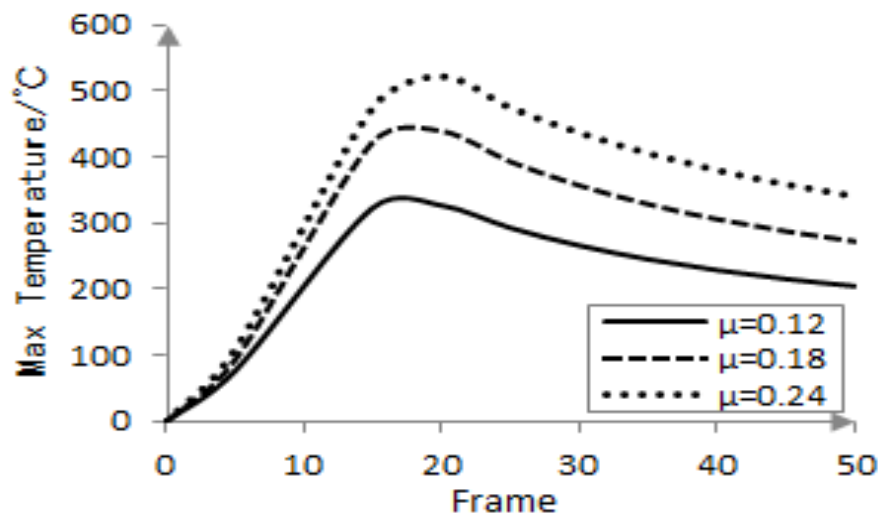


图15 H65黄铜管冷轧时管材的最高温度随摩擦系数的变化曲线

三、冷轧管缺陷及模拟分析——润滑情况对轧制的影响规律：

2. 润滑情况对轴向应力的影响规律

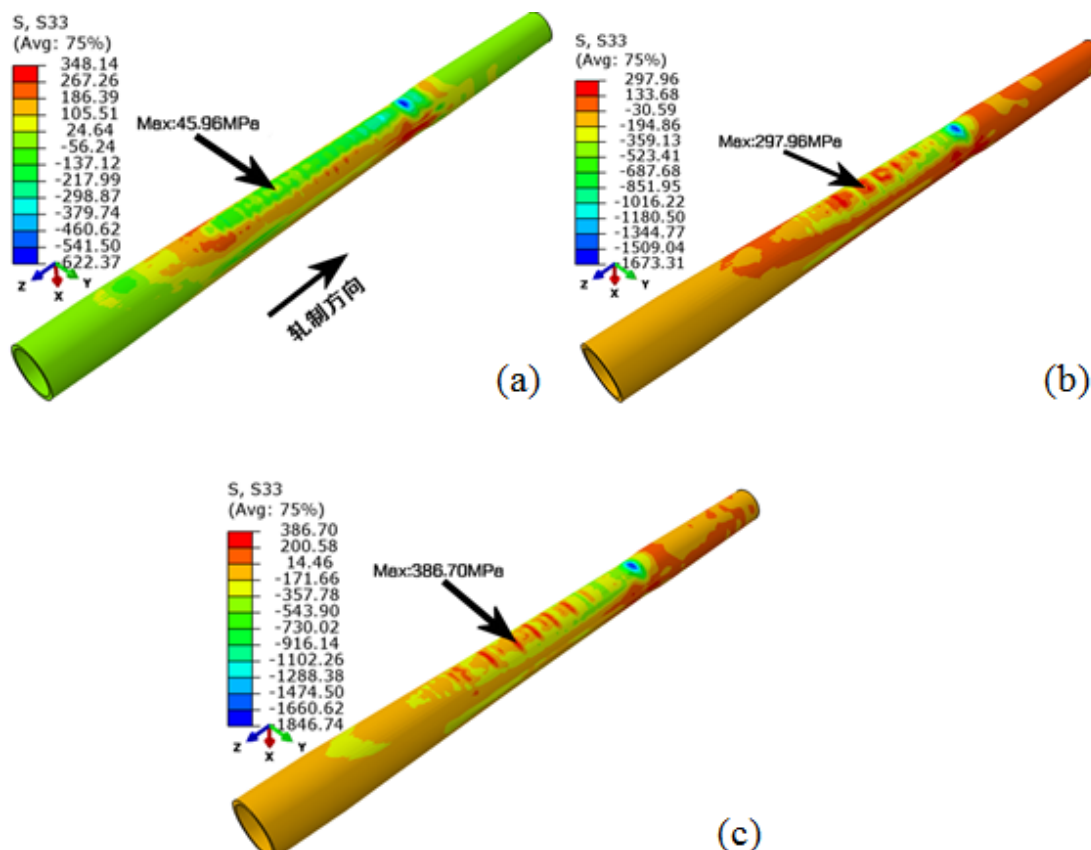


图16 H65黄铜管在不同摩擦条件下冷轧时的轴向应力分布云图

(a) $\mu=0.12$

(b) $\mu=0.18$

(c) $\mu=0.24$

三、冷轧管缺陷及模拟分析——润滑的影响：

2. 润滑不当带来的缺陷

试产时，当润滑不当时就会出现如图17所示的缺陷。图18为管材纵截面开裂处的金相组织，可以看出开裂处的金属发生了剧烈的变形。

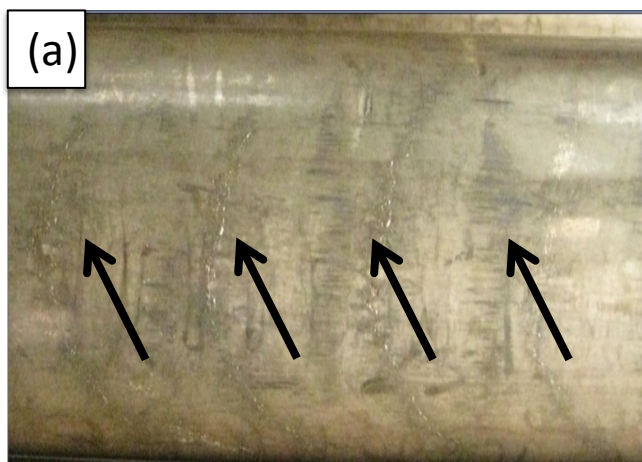


图17 润滑不当致冷轧管横向周期性开裂实物照

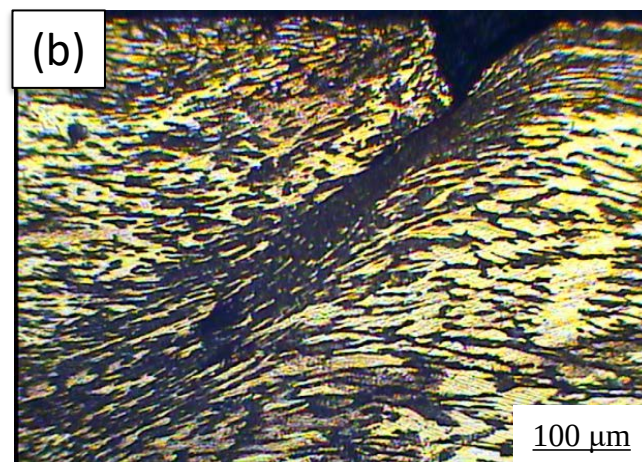


图18 轧管表面开裂处的纤维金相组织（纵截面）



三、冷轧管缺陷及模拟分析——轧辊孔型的影响：

3. 轧辊开口度的影响

当摩擦系数 $\mu=0.12$ ，送进量 $m=2.5\text{mm}$ 时，本文对孔型开口度分别为1.2、1.5、1.8、2.0的四种轧辊模型进行了模拟。不同开口度孔型轧制时开口处金属的典型分布情况及轴向拉应力的大小如图19所示。

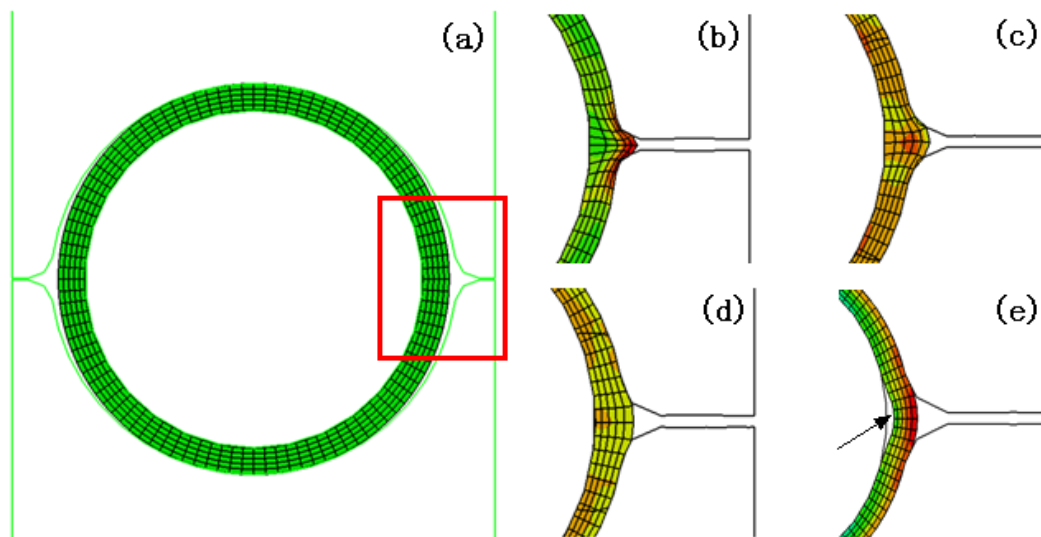


图19 H65黄铜管冷轧时轧辊开口处金属的分布情况
(a)轧制前截面 (b) $B_x=1.2$ (c) $B_x=1.5$ (d) $B_x=1.8$ (e) $B_x=2$



三、冷轧管缺陷及模拟分析——轧辊孔型的影响：

3. 轧辊开口度对轴向应力的影响规律

轧制时轧辊开口处金属的最大轴向拉应力随孔型开口度的变化情况如图20所示，开口度 $B_x=1.5$ 与 $B_x=1.8$ 时最大轴向拉应力的区别并不是很大；当 $B_x=2$ 时，可以看到最大轴向拉应力大幅增大，最高时达485MPa；而当开口度减小到1.2时，轧制过程中出现飞边，如图21所示。通过比较发现最佳孔型开口度为1.8。

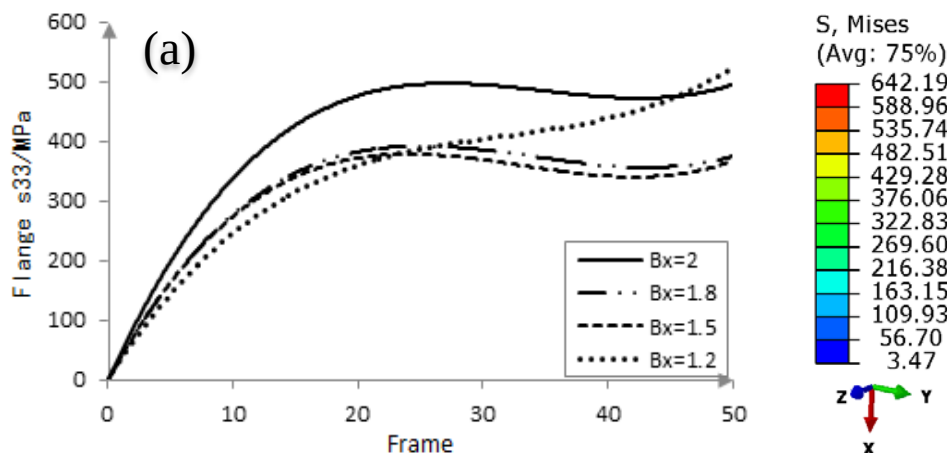


图20 H65黄铜管冷轧时轧辊开口处金属轴向拉应力随摩擦系数的变化曲线

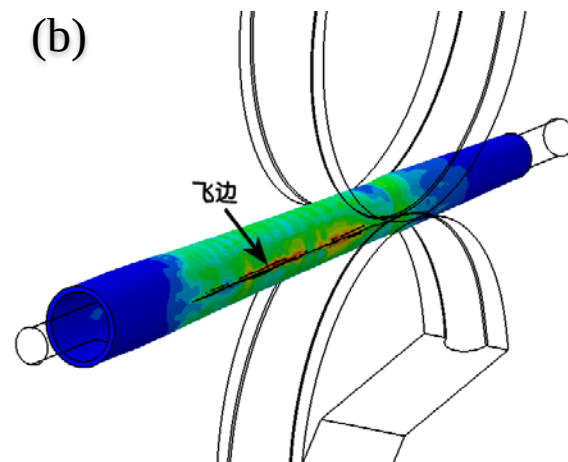


图21 H65黄铜管冷轧过程中出现的飞边缺陷

三、冷轧管缺陷及模拟分析——偏心管坯的轧制模拟：

1. 偏心管坯的建模

本文进行模拟的偏心管坯内径为 $\phi 70\text{mm}$ ，最大壁厚为 5.5mm ，最小壁厚为 4.5mm ，管坯偏心率为20%。最大、最小壁厚在初始时刻均位于轧槽底部，如图22所示。

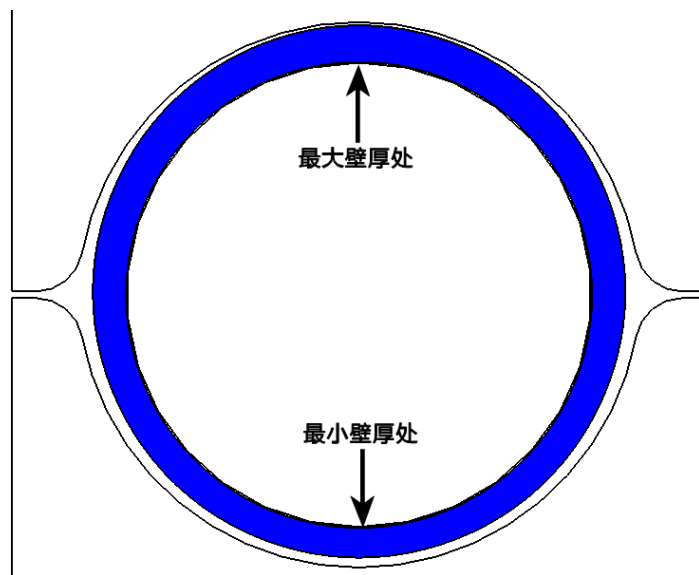
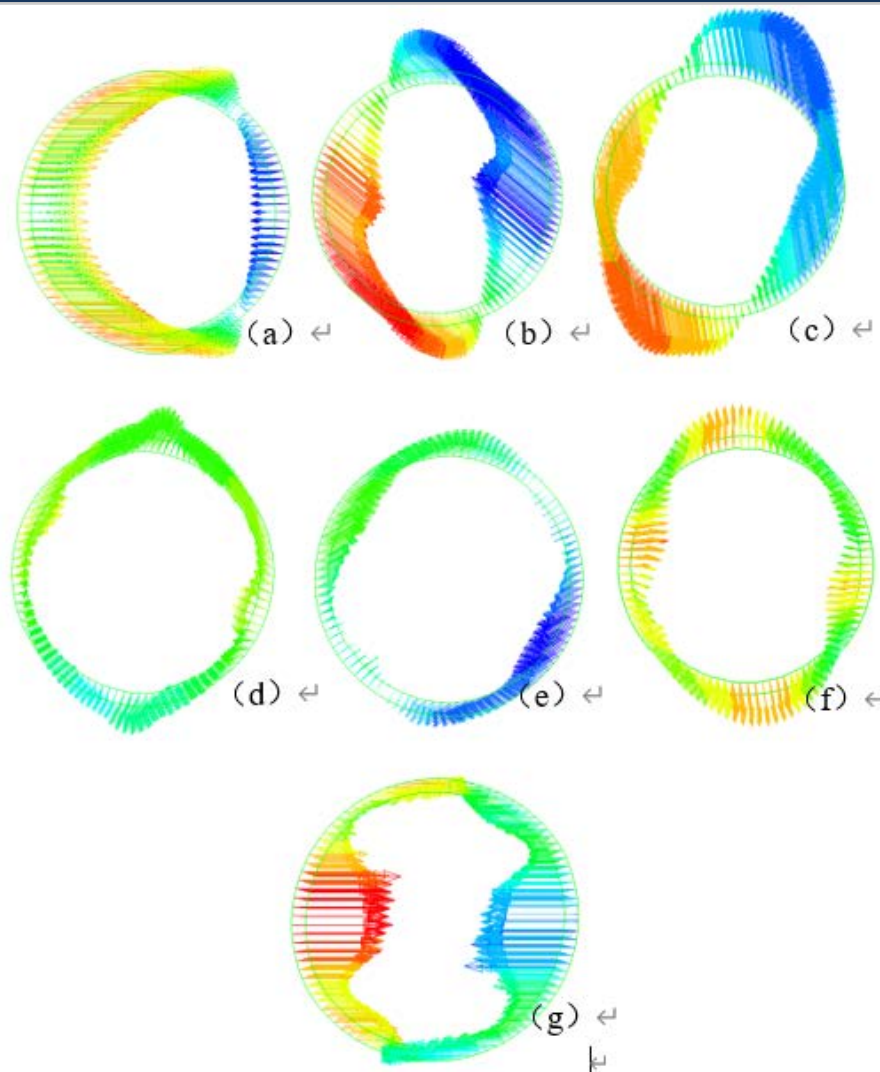


图22 H65偏心管坯轧制前截面

三、冷轧管仿真模拟

如图所示为不同道次轧制过程中同一截面上材料在截面内的位移矢量图。从图中可以看出，轧制过程中材料不仅有轴向上的移动，而且有**切向上的移动**。厚壁处金属沿切向流向薄壁处最终使得壁厚均匀是皮尔格冷轧纠偏的根本原因。

对不同进程轧制过程中同一截面上最大、最小壁厚进行测量，列入下表中。可以发现，经过4个轧制周期后，管材的偏心率由原来的20%降低为3.52%，表明冷轧矫偏效果显著。



不同轧制道次中同一截面上金属的流动规律

(a)、(b)、(c)、(g)第1、2、3、4次进程轧制；(d)、(e)、(f)第1、2、3次回程轧制

	Forward 1	Forward 2	Forward 3	Forward 4
最大壁厚/mm	3.35	3.31	3.27	3.18
最小壁厚/mm	2.91	2.97	3.03	3.07
偏心率	14%	10.83%	7.62%	3.52%

四、总结与思考

本案例利用中南大学高性能计算平台，采用有限元软件ABAQUS对H65黄铜管的皮尔格冷轧过程进行了三维热力耦合模拟，很好地解释了冷轧管缺陷形成的原因，并由此对冷轧工艺进行来优化。研究表明：

①轧制过程中送进量越大，管材温升越高且轧辊开口处轴向拉应力越大，当送进量为8mm时温度高达342℃，拉应力403MPa；摩擦润滑条件越差，管材温升越高，轧槽底部金属轴向拉应力越大，当摩擦系数 $\mu=0.24$ 时，管材温度高达522℃，易引发脆性相的生成。轧槽底部金属轴向拉应力高达386.7MPa；孔型开口度越大，轧辊开口处轴向拉应力越大，开口度过小，容易出现飞边等缺陷。

②对于特定规格管材（ $\phi 81 \times 5.5\text{mm}$ 轧到 $\phi 45 \times 3.5\text{mm}$ ）的轧制过程，最佳工艺条件为：送进量 $m=2.5\text{mm}$ ，摩擦系数 $\mu \leq 0.12$ ，轧辊孔型开口度为1.8。

③通过对偏心管材轧制过程的模拟，发现在轧制过程中金属不仅有轴向位移，而且有切向位移。壁厚处的金属发生切向位移流向薄壁处，是皮尔格冷轧能够矫偏的根本原因。

④通过对偏心管材4个周期轧制过程的模拟，发现管材偏心率由最初的20%降到3.52%，表明冷轧矫偏效果显著。



案例引申思考：

- 目前BFe10-1-1、H80、HA177-2等合金均已实现皮尔格冷轧开坯，但H65管的冷轧至今仍存在很大困难，其根本原因是合金中脆性相的析出。是否可以通过微合金化等措施消除或抑制这种脆性相？
- 皮尔格冷轧管变形过程非常复杂，有限元CAE分析是一种有效方法。这种方法关键是几何与工艺模型的建立，需要对生产现场有深入的认识。可见，CAE模拟分析与生产实际不可分割！
- H65黄铜管是否可以采用行星轧管机开坯？这是一种大胆设想，有待深入研究开发。



Thank you !

