

轧制

堆拉系数匹配对 SCR7000 铜杆粗轧过程的影响

杨 志¹, 刘 通¹, 程 明², 赵薪铭², 邵 俊³, 韩明奇³

- (1. 辽宁工程技术大学 材料科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;
2. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心, 辽宁 沈阳 110016;
3. 常州同泰高导新材料有限公司, 江苏 常州 213105)

摘要: SCR 连铸连轧法目前在铜杆加工领域应用十分广泛。针对生产现场中常出现的轧制过程不稳定现象, 基于 DEFORM 软件建立了 $\Phi 8$ mm 铜杆热连轧粗轧有限元模型, 分析了铜杆粗轧过程中的变形规律以及机架间的堆拉系数对轧制过程稳定性的影响。结果表明, 轧制过程中机架间的堆拉系数不匹配将使轧件受到较大堆力, 严重影响轧制过程的稳定性及产品质量。轧件宽度随堆拉系数的增大而减小, 轧制力与所在道次堆拉系数呈正相关趋势, 与前道次机架的堆拉系数呈负相关趋势。通过改变轧制速比, 重新匹配堆拉系数后进行轧制实验, 结果表明, 电机转矩及负荷降低约 2%~3%, 加工出铜杆后铜粉生成量降低约 6.8%, 提高了产线稳定性及成品质量。

关键词: 铜杆加工; 堆拉系数; 粗轧; 轧制稳定性; 轧制力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.07.015

中图分类号: TG335

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 07-0112-08

Influence of stacking coefficient matching on rough rolling process of SCR7000 copper rod production line

Yang Zhi¹, Liu Tong¹, Cheng Ming², Zhao Xinming², Shao Jun³, Han Mingqi³

- (1. College of Materials Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;
2. Shi-Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. Changzhou Tongtai High Conductivity New Materials Limited Company, Changzhou 213105, China)

Abstract: At present, SCR continuous casting and rolling method is widely used in the field of copper rod processing. Therefore, for the unstable phenomenon of rolling process often occurred in the production site, a finite element model for rough rolling in the hot continuous rolling of $\Phi 8$ mm copper rod was established by software DEFORM. Then, the deformation laws of copper rod during the rough rolling process was analyzed, and the influence of inter-stand stacking coefficients on the stability of rolling process was revealed. The results show that the mismatched stacking coefficients between stands during the rolling process cause the rolled workpiece to be subjected to greater stacking force, which significantly affects the stability of rolling process and the product quality. The width of rolled workpiece decreases with the increasing of stacking coefficient. The rolling force is positively correlated with the stacking coefficient of the pass, and negatively correlated with that of the preceding pass. The rolling experiments were conducted by changing the rolling speed ratio and re-matching the stacking coefficient. The results indicate that the motor torque and load are reduced by about 2%~3%, and the copper powder content of processed copper rod is reduced by about 6.8%, which improves the stability of production line and the quality of finished product.

Key words: copper rod processing; stacking coefficient; rough rolling; rolling stability; rolling force

铜杆作为生产电线电缆的重要原材料, 在有色

金属加工领域中一直备受关注^[1-3]。目前, 我国电力、军工、通讯领域的发展日新月异, 市场对电线电缆的需求量快速增长, 也开辟了铜杆领域蓬勃发展的新局面^[4-5]。目前, 在铜杆加工领域, 连铸连轧法占据主导地位。顺序式连铸连轧 (Sequential Cast-Rolling, SCR) 法因设备集成度较好, 维护方便, 生产的低氧铜杆质量优异, 在全球范围内备受

收稿日期: 2024-07-16; 修订日期: 2024-10-20

作者简介: 杨 志 (1973-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: yangzhi279@163.com

通信作者: 程 明 (1976-), 男, 博士, 正高级工程师

E-mail: mcheng@imr.ac.cn

铜杆制造商推崇^[6-9]。然而,SCR法的轧制道次多,环境相对封闭,因此,对轧件质量的控制较为困难。目前国内对其研究较少,如何提高产品质量是SCR生产的一大难题。

在提升SCR产品质量方面有很多方法,入轧坯料的形状与尺寸、轧制温度、机架间堆拉力大小、摩擦及轧辊孔型等工艺条件均对产品质量有一定的影响,但是这些参数的调整容易产生耦合效应^[10-12]。比如,某厂将轧辊由光辊替换为花辊来改善轧件质量,但接触条件的改变影响了该道次的接触摩擦因数,进而导致机架间堆拉力的变化,使得轧制过程不稳定,严重时会影响轧件尺寸精度,且轧辊磨损加快,服役寿命缩短。

随着有限元计算技术的逐步完善,针对堆拉系数对杆线材连轧影响的研究越来越多。王会廷等^[13]以张力为变量来改变道次间的堆拉率,使用有限元软件模拟分析了堆拉率对高速线材减定径轧件各部位宽展的影响规律,指出堆拉率应控制在0.002~0.010之间。张春光等^[14]通过改变成品道次轧辊转速得到不同堆拉系数的轧制条件,对钢材双机架减定径轧制变形及尺寸精度进行分析,发现轧件宽度与堆拉系数呈线性关系。堆拉系数每变化1%,轧件宽度变化约0.26 mm。这些研究均从机架间堆拉力的大小出发,但在实际轧制过程中堆拉力大小的评价及控制较为困难^[15-17]。

本文以SCR7000产线的热连轧机组为研究对象,结合现场装备与工艺条件,基于DEFORM有限元软件建立热连轧粗轧5道次三维有限元模型,以堆拉系数来评价机架间堆拉力的大小,并分析机架间不同堆拉系数对轧制过程中的轧制力、轧件尺寸的影响,进而通过重新匹配堆拉系数关系来改善轧制过程的稳定性并提高产品质量。

1 SCR连轧有限元模型建立

1.1 轧辊孔型

SCR7000连轧产线共有13道次,其中,前5道次为粗轧,6~13道次为精轧。除第1道次为箱型孔型外,后续道次分别为椭圆与圆形交替排列,孔型平立交错分布。因粗轧前3道次轧件变形量最大,坯料堆积现象显著,故本文以粗轧前3道次为研究对象,其孔型形状及尺寸如图1所示。

利用DEFORM有限元软件,结合现场生产工艺参数,建立SCR7000粗轧过程的几何模型,其中,

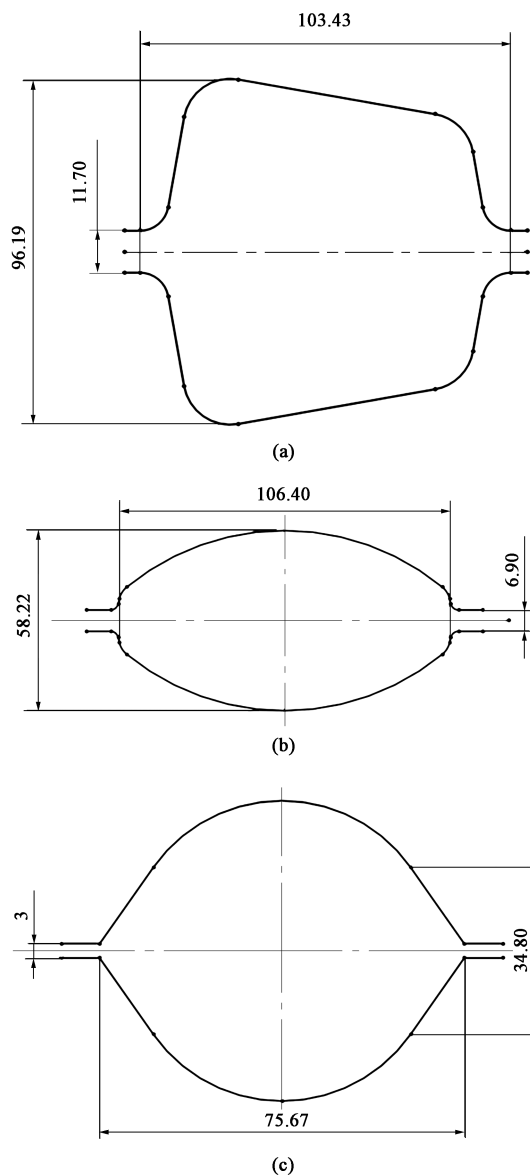


图1 粗轧前3道次的孔型形状及尺寸

(a) 第1道次 (b) 第2道次 (c) 第3道次

Fig. 1 Hole shapes and dimensions for the first three passes of rough rolling

(a) The first pass (b) The second pass (c) The third pass

前5道次粗轧的轧辊分布如图2所示。

入轧坯料为截面积为 8200 mm^2 的梯形坯。为使机架间形成连轧关系,坯料长度设置为1200 mm,机架间距设置为400 mm。由于轧制过程中坯料与轧辊在水平方向上左右对称,为提高计算速率,取轧件的1/2来进行模拟分析,设置中心纵截面为对称面,采用六面体网格,截面单元数为258个,坯料单元总数为103200个。坯料材质选用软件自带材料库中的C10100无氧铜。

1.2 初始边界条件设立及模型验证

参考现场数据,粗轧前3道次的轧制参数如

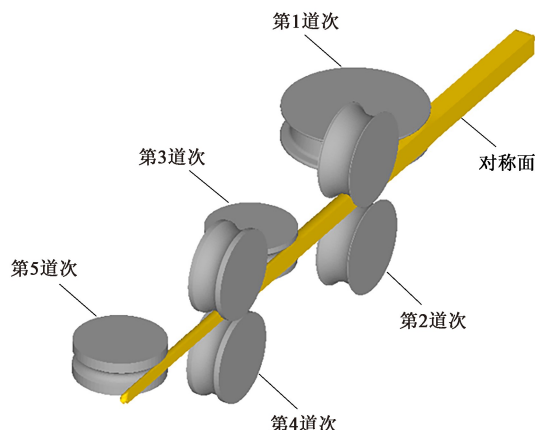


图2 前5道次粗轧机架分布

Fig. 2 Distribution of rough rolling mill for the first five passes

表1所示。坯料入轧温度为900℃，设为刚塑性变形体，环境温度为25℃。轧辊设置为恒温刚性体，由于轧制过程空间相对封闭，轧辊始终在冷却液的作用下。对喷淋后的冷却液进行测温，实测温度为45℃左右，因此，认为轧辊温度稳定不变，将其设置为恒温刚体。坯料与轧辊的摩擦类型为剪切摩擦，使用的轧辊材质为H13热作模具钢。由高温高速摩擦磨损试验拟合得到其摩擦因子的计算公式如下^[18]：

$$\lambda(T) = 6.299 \times 10^{-4}T + 0.499 \quad (1)$$

式中： λ 为摩擦因子； T 为轧辊温度，25℃≤ T ≤300℃。

表1 轧辊及轧制参数

Table 1 Parameters of rolls and rolling

道次	出口温度/ ℃	辊径/ mm	辊缝/ mm	线速度/ (mm·s ⁻¹)	轧辊转速/ (r·s ⁻¹)
1	880	Φ463.60	11.90	218.12	1.0929
2	820	Φ290.00	6.90	300.18	2.2564
3	820	Φ290.00	3.00	438.48	3.7465

通过现场轧卡试验结果反求进行修正，最终设置第1架压花轧辊的摩擦因子为0.92，其余机架光辊的摩擦因子为0.55。坯料的入轧速度为180 mm·s⁻¹。传热边界条件分别包括轧辊与坯料间的接触传热，该系数设为10 kW·(m²·℃)⁻¹，以及坯料与环境的对流及辐射传热系数，该系数设为0.3；坯料与冷却水喷淋的对流换热系数设为0.75；坯料与除磷喷淋的对流换热系数设为0.1；冷却水与除磷喷淋水的温度均为45℃。

1.3 连轧关系及堆拉系数确定

理论上连轧机组在自由轧制状态下，各机架间金属的秒流量是相等的，即前一架流出的金属体积

等于后一架流入的金属体积。但在实际连轧过程中，保持理论上的秒流量相等较难实现，通常人为调控轧制参数使得机架间金属的秒流量有所差异，从而在机架间产生一定的堆拉力。堆拉力可以优化轧制过程稳定性与轧件心部质量。堆拉系数是表示堆拉力的重要参数。以自由轧制为例，后一机架的秒流量与前一机架的秒流量之比称为堆拉系数，数学表达式为：

$$K_i = \frac{F_i V_i}{F_{i-1} V_{i-1}} \quad (2)$$

式中： K_i 为第*i*与第(*i*-1)机架间的堆拉系数， $i=2, 3, 4, 5$ ； F_i 、 F_{i-1} 分别为第*i*和第(*i*-1)机架的轧件出口截面面积； V_i 和第 V_{i-1} 分别为第*i*和第(*i*-1)机架的轧件出口线速度。

轧制过程中， K_i 值小于1时，表示为堆钢轧制，机架间力的类型为堆力； K_i 值大于1时，表示为拉钢轧制，机架间力的类型为张力。

2 模拟结果及分析

2.1 现有工艺条件下轧件变形分析

图3为各道次轧件截面，其中，1#~5#表示第1道次~第5道次，将此结果与有限元模拟轧后截面面积进行比较，如图4所示。模拟结果与现场测量之间的最大误差不超过2.3%，证明了该模型的计算精度较高。

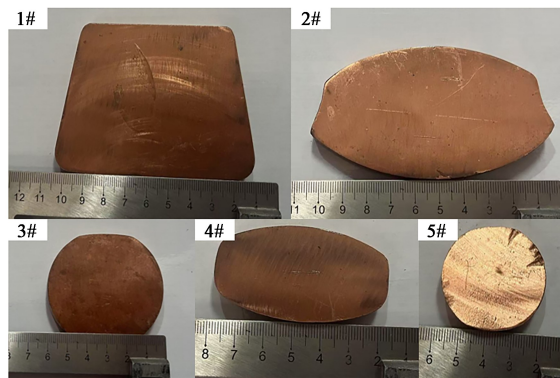


图3 各道次轧件截面

Fig. 3 Cross-sections of rolled piece in each pass

图5为各道次轧后截面的等效塑性应变分布。可见，轧件截面上大的塑性应变主要集中在边部，在往心部延伸方向上逐渐减小，渗透性较为一般。这是因为：进入轧制变形区时，边角部位首先与辊身接触并发生变形，且在压下过程中金属堆积，变形量较大；其他部位与轧辊接触时，轧件变形已基

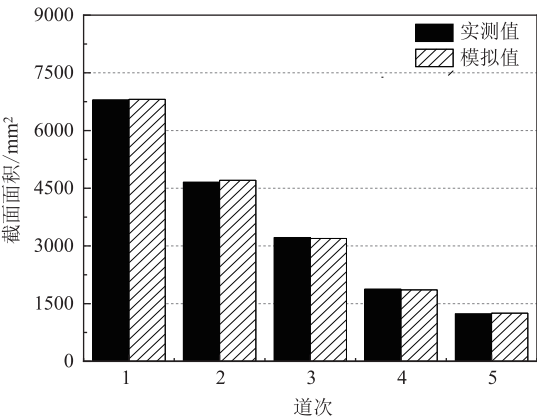


图 4 轧制截面面积的实测值与模拟值对比
Fig. 4 Comparison between measured and simulated values of rolling cross-section area

本成形，并在摩擦力的作用下，等效塑性应变较小。其中，第 2 道次轧件边部的等效塑性应变最为集中，以点 $P1$ 到点 $P2$ 的距离为最小宽度，点 $P3$ 到点 $P4$ 的距离为最大宽度。最大塑性应变主要分布在最小宽度的两角上，最大宽度上次之，应变集中区域容易产生裂纹等缺陷。

模拟后进行切片分析，其轧后各道次的变形数据如表 2 所示。在连轧过程中，一般设定机组之间为拉钢轧制，机架间采用堆钢轧制，SCR7000 产线粗轧机组设置第 1 道次为单独机组，后续 4 道次为一个机组。由表 2 可以看出，前 3 道次间的堆拉系数均小于 1，属于堆钢轧制。由于堆力作用导致道次出口面积较下道次入口处的面积稍小，其中， K_2 的值最小，孔型充满度过高，金属沿轧制方向的流动受到严重阻碍，影响轧制过程稳定性。并且第 2 道次的断面收缩率最大 (31.47%)，应力过于集中，轧件边部产生的刮伤毛刺、表面折叠及粘辊现象较为严重。由图 6 可见，第 2 道次轧辊较第 3 道次轧辊的两侧磨损更严重，并伴有较大横裂纹。而轧辊表面的磨损及裂纹又会进一步影响轧件质量。这些表面缺陷在后续轧制过程中难以愈合或压合不牢固，容易在拉拔扭转过程中产生铜粉，这是影响铜杆品质的主要因素^[19-20]。

为解决第 2 道次轧件的表面缺陷大、轧制不稳定和轧辊磨损严重等问题，拟通过改变 K_2 、 K_3 来调整第 2 道次受到的前后张力，进而控制进料量和出料量，降低该道次电机负荷，提高轧制稳定性。结合式 (2) 计算进行 K_2 和 K_3 的调整，分别改变第 1 道次和第 3 道次的轧辊转速，以 0.01 为堆拉系数增量 (-0.02、-0.01、0.00、0.01、0.02、0.03) 来模

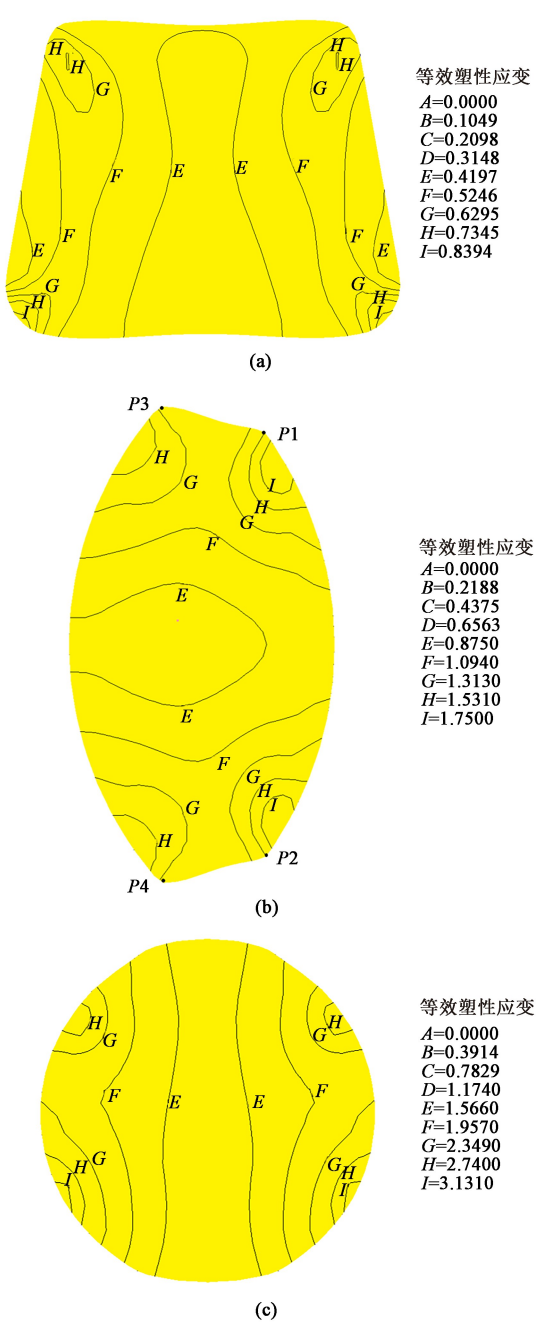


图 5 各道次轧件的等效塑性应变分布
(a) 第 1 道次 (b) 第 2 道次 (c) 第 3 道次
Fig. 5 Distributions of equivalent plastic strain for rolled piece in each pass
(a) The first pass (b) The second pass (c) The third pass

表 2 现有轧制工艺变形参数						
Table 2 Deformation parameters of original rolling process						
道次	入轧面积/ mm ²	出轧面积/ mm ²	孔型充满 度/%	压下量/ mm	延伸 系数	堆拉 系数
1	8300.00	6810.06	94.96	37.74	1.22	0.989
2	6819.15	4705.48	96.94	29.45	1.45	0.943
3	4707.27	3195.74	94.15	30.33	1.47	0.991

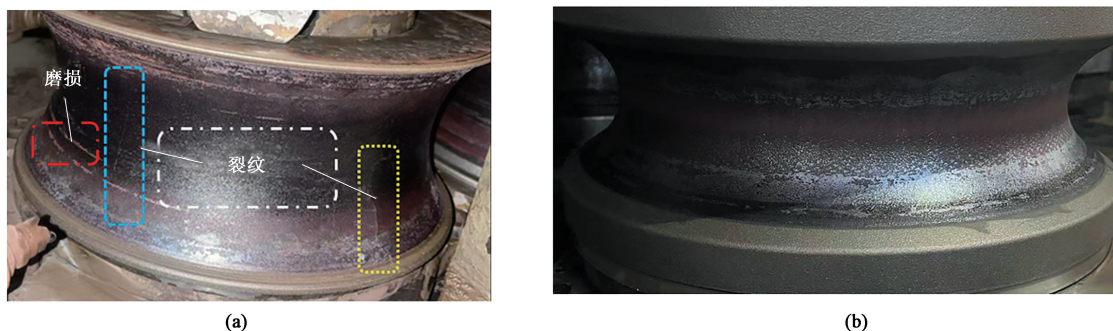


图 6 第 2 道次轧辊 (a) 与第 3 道次轧辊 (b) 对比

Fig. 6 Comparison between rolls in the second pass (a) and the third pass (b)

拟不同堆拉系数条件下的轧制过程, 并分析堆拉系数对第 2 道次轧件的影响。同时, 由于轧制不稳定直接影响轧件精度, 并且轧辊对轧件的压力越大, 电机的负荷越大, 内部金属越容易挤破表面氧化层与轧辊进行直接接触, 从而加剧轧辊的磨损。因此, 以上分析主要涉及第 2 道次轧件的尺寸及受力状况的变化规律。

2.2 堆拉系数对轧件宽度的影响

不同堆拉系数对第 2 道次轧件的最大宽度和最小宽度的影响如图 7 所示。随堆拉系数的增大, 金属的横向流动速度减小, 沿轧制方向的流动速度增加, 轧件宽度减小。由图 7 可见, 沿轧制方向前后道次的堆拉系数调整对最大、最小宽度的影响规律相同, 整体呈线性变化。在增量为负时, 轧件对前后道次影响的敏感程度较低, 其中前道次较后道次

调整带来的宽度变化平均多出 0.06 mm。在增量为正时, 前道次调整带来的宽度变化较后道次更加明显, 最大宽度平均多出 0.16 mm, 最小宽度平均多出 0.2 mm。当堆拉系数增量为 -0.02 时, 在前道次的影响下, 最大宽度为 105.6 mm, 最小宽度为 94.4 mm; 当堆拉系数增量为 0.03 时, 最大宽度和最小宽度分别为 105.4 和 94.1 mm。后道次堆拉系数增量为 -0.02 时, 最大宽度和最小宽度分别为 105.7 和 94.5 mm; 在堆拉系数增量为 0.03 时, 最大宽度和最小宽度分别为 105.3 和 93.8 mm。前后道次堆拉系数对轧件宽度影响各不相同的原因: 轧件的塑性变形主要在轧辊中性面后的后滑区产生, 后道次调整直接影响前滑值和后滑值, 而前道次的调整只是缓解了金属的流动阻碍, 并非直接作用于变形过程, 所以, 对宽度的影响整体小于后道次的调整。

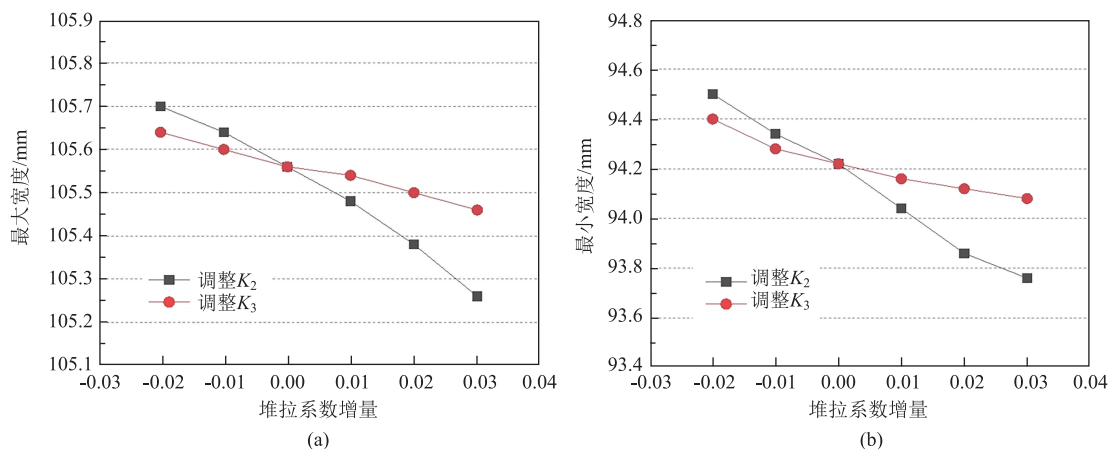


图 7 不同堆拉系数下第 2 道次轧件宽度变化

(a) 最大宽度 (b) 最小宽度

Fig. 7 Width changes of rolled piece in the second pass with different stacking coefficients

(a) Maximum width (b) Minimum width

2.3 堆拉系数对轧制过程的影响

轧制过程中, 不同堆拉系数条件下第 2 道次的轧制力变化如图 8 所示。 K_2 调整后, 轧制力曲线整

体呈离散状态。因曲线前半段为连轧关系, 堆拉系数不同, 导致机架间的堆拉力不同, 后半段为自由轧制。但由于 K_2 是根据第 1 道次的轧辊转速进行调

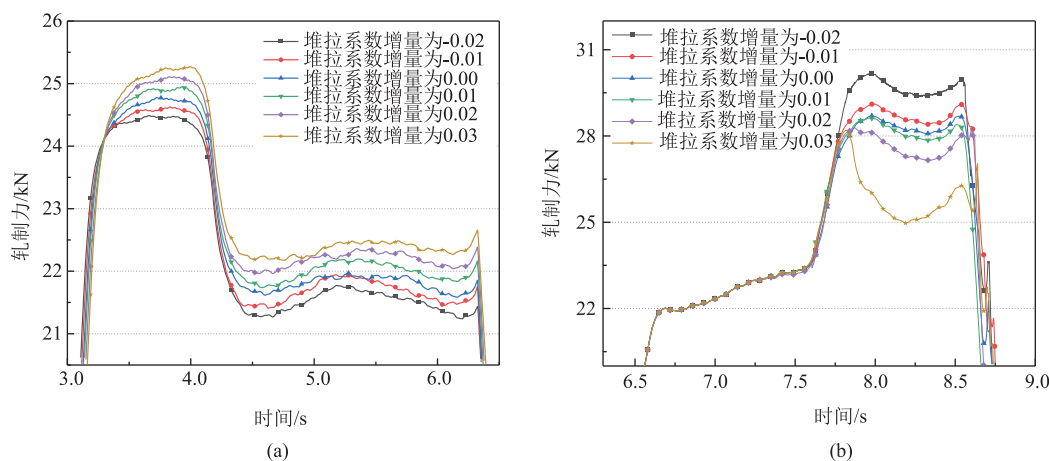


图8 不同堆拉系数条件下第2道次轧制力变化

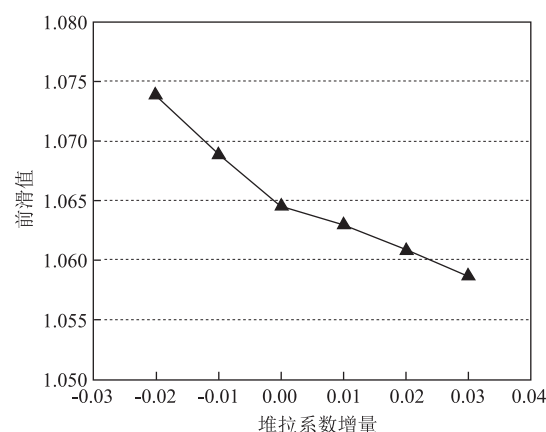
(a) 调整 K_2 (b) 调整 K_3

Fig. 8 Changes of rolling force in the second pass with different stacking coefficients

(a) Adjustment of K_2 (b) Adjustment of K_3

整的,这使得轧件的宽度和面积也产生了一定变化,因此,在后半段也呈离散分布。对 K_3 调整后,轧制力曲线在后半段呈离散状态,因为轧件首先在第2道次中自由轧制,轧制力没有区别,随着第3道次轧辊的逐渐咬入,连轧关系建立,轧制力开始发生变化。其中,随着 K_3 的增大,第2道次的轧辊轧制力呈下降趋势,产生原因为机架间堆力的减小使轧件的轧制变形区缩短,前滑值增加,堆拉系数每增加 0.01,轧制力平均减少 0.98 kN,最大与最小轧制力之差为 4.9 kN。轧制力的减小缓解了轧辊对轧件的压力,使得新鲜金属基体不易与轧辊表面直接接触,改善了粘辊现象。

随着第1道次轧辊转速的减小, K_2 增大,第2道次的轧制力呈小幅上升趋势。该轧制力的变化趋势与增大 K_3 时一致,同为通过改变堆拉系数来增加前后张力进而缓解机架间堆力,但两种调整方式带来的轧制力变化趋势却完全相反。其中, K_2 每增大 0.01,轧辊轧制力上升 0.51 kN。该轧制力上升的原因在于前滑值减小,如图9所示,该道次前滑值的变化与轧制力的变化规律相同。由于第1和第2道次机架间产生的力为堆力,在轧件上的作用方向与轧制方向相同,而堆拉系数与堆力呈负相关,随着堆拉系数增量由 -0.02 变为 0.03,金属纵向流动受到的推力减小,轧件的堆积现象缓解,在稳定轧制区域内,轧件的高度有所下降,使得轧件与轧辊接触的中性角减小,接触弧长变短,从而导致轧件在 1~2 道次间的前滑区减小、后滑区增加。

图9 K_2 调整导致的前滑值变化Fig. 9 Changes in front slip value caused by adjusting K_2

3 实验过程及验证

SCR7000 连轧机组为连动机组,轧辊转速通过调整机架间各道次的速比实现。根据模拟计算结果,将堆拉系数增量为 0.01 和 0.02 分别对应的轧制线速度转化为速比,保持其他工艺参数不变进行轧制,在线观测当前轧制参数下各道次的电机电流和转矩等数据。电机的电流和转矩反映了当前道次轧辊的负荷以及轧制力的大小,并与轧制过程的稳定性直接关联。不同堆拉系数条件下第2道次的电机电流和转矩如图10所示,堆拉系数条件的改变使机架间堆拉力发生变化,对轧辊所产生的额外附加的力矩也随之变化,从而使电机载荷变化。该变化趋势与

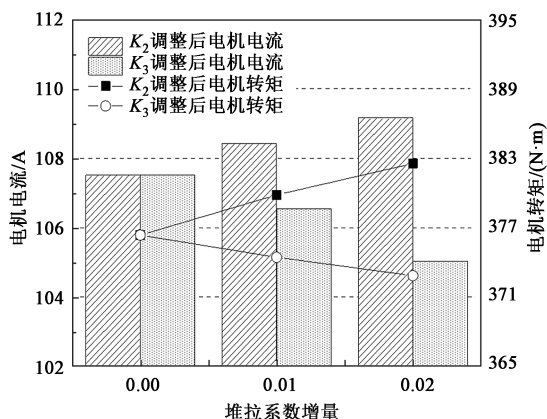
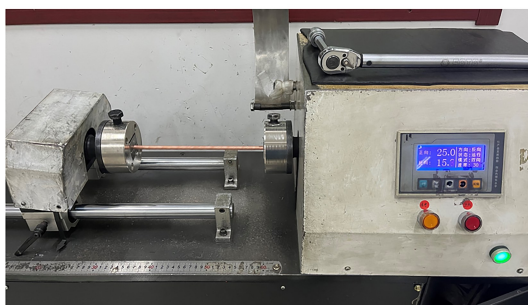


图 10 不同堆拉系数下第 2 道次电机的电流和转矩变化

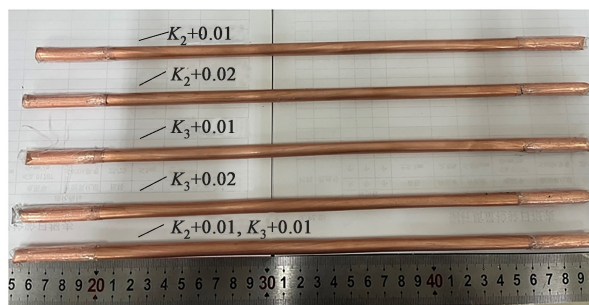
Fig. 10 Changes of current and torque for motor in the second pass with different stacking coefficients

模拟所呈现的轧制力的变化趋势一致。

通过扭转试验机（图 11a）对轧后铜杆进行正反 15 转扭转实验，并称量扭转后铜杆脱落的铜粉。



(a)



(b)

图 11 铜杆扭转试验机 (a) 及扭转后的铜杆 (b)

Fig. 11 Torsion testing machine for copper rod (a) and twisted copper rod (b)

表 3 不同参数下铜杆扭转后的铜粉含量

Table 3 Copper powder contents in copper rods after torsion under different parameters

工艺	铜粉含量/mg
现有工艺参数	3.000
$K_2+0.01$	2.875
$K_2+0.02$	2.800
$K_3+0.01$	2.892
$K_3+0.02$	2.820
$K_2、K_3$ 同时增大 0.01	2.795

4 结论

(1) SCR 法热连轧粗轧各道次中轧件变形量大且变形主要集中在轧件表层，轧制渗透性较差，其

在轧制过程中轧件表面缺陷和轧制稳定性难以现场判定，但表面缺陷会在后续轧制过程中形成遗传，并附着在铜杆次表层中。在后续扭转拉拔过程中，这部分材料由于缺陷结合不牢固从而剥离形成铜粉，因此，可以通过铜粉重量来评估成品铜杆的质量。

图 11b 为不同堆拉系数下铜杆经扭转试验机扭转后的样品，对应的堆拉系数增量分别为 K_2 增加 0.01、0.02， K_3 增加 0.01、0.02，以及 K_2 、 K_3 同时增加 0.01。用胶带缠绕夹持端，防止因夹持造成铜粉的脱落，减少测量误差。扭转后脱落的铜粉含量如表 3 所示，可以看出，前后道次的调整均有效减少了铜粉的产生。其中，联立前后道次堆拉系数各增大 0.01 进行调整的方法最优，较单一道次增大 0.02 的调整方案，铜粉生成量平均减少了 0.015 mg，并且该方法对单道次机架的调整较小，优化后第 2 道次电机的电流与转矩分别为 104.9 A 和 371.2 N·m，电机的负荷最低，证明了调整堆拉系数匹配的有效性。

主要作用为轧件定形；现有工艺中，第 2 道次轧制的堆拉系数过低 (0.943)，导致金属流入体积与流出体积差距大，在机架间形成堆积，是造成轧制过程不稳定的主要原因。

(2) 在保持前后道次作用形式相同的情况下，不同道次堆拉系数的调整对轧制的影响不同。后道次调整对改善轧制力的效果较好，堆拉系数每增大 0.01，轧制力减小约 0.98 kN，因此，可通过增加后道次的堆拉系数来减小轧制力；前道次堆拉系数的调整对产品尺寸的影响较后道次更加显著，其中，堆拉系数每变化 0.01，宽度变化约 0.2 mm。在调整轧制工艺过程中应根据需求及工况，分别对前后道次轧机进行调整。

(3) 通过重新匹配机架间的堆拉系数进行的实验可知，电机电流及负荷降低约 2%~3%，轧后铜

杆的铜粉生成量较现有工艺减少约6.8%,证明了堆拉系数的匹配对轧制过程稳定性及轧件质量有显著影响。

参考文献:

- [1] 袁孚胜,王彤彤.我国铜杆线材市场现状及发展趋势[J].有色冶金设计与研究,2022,43(1):16-19,23.
Yuan F S, Wang T T. Current situation and development trend of copper rod and wire rod market in China [J]. Design and Research of Nonferrous Metallurgy, 2022, 43 (1): 16-19, 23.
- [2] 郑莲宝,徐勇,王松伟,等.水平连铸铜板坯冷轧带材表面缺陷问题研究[J].铜业工程,2023,179(1):57-65.
Zheng L B, Xu Y, Wang S W, et al. Surface defects of cold rolled strip of horizontal continuous casting copper slab [J]. Copper Engineering, 2023, 179 (1): 57-65.
- [3] 周朝晖,伍锡皇,吴才权.SCR9000铜杆生产线铸轮喷砂机的研制和应用[J].铜业工程,2023(5):84-87.
Zhou C H, Wu X H, Wu C Q. Manufacture and application of casting wheel sand blasting machine for SCR9000 copper rod production line [J]. Copper Engineering, 2023 (5): 84-87.
- [4] 刘青松,张龙,沈潮,等.张力轧制对大规格棒材心部组织致密性的影响[J].机械工程材料,2016,40(9):77-81.
Liu Q S, Zhang L, Shen C, et al. Effect of tension rolling on internal compactness of big size bars [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40 (9): 77-81.
- [5] 于康康,王松伟,宋鸿武,等.紫铜板带水平连铸坯“阴阳带”问题探析[J].铜业工程,2023(1):66-74.
Yu K K, Wang S W, Song H W, et al. "Yin-Yang Strip" problem of red copper strip horizontal continuous casting billet [J]. Copper Engineering, 2023 (1): 66-74.
- [6] 张宏涛.提高SCR生产线铜杆过线成功率的措施[J].世界有色金属,2021(13):134-135.
Zhang H T. Measures to improve the success rate of copper rods in SCR production line [J]. World Nonferrous Metals, 2021 (13): 134-135.
- [7] 洪慧平.连轧37Mn5钢棒材有限元模拟及孔型系统优化[J].计算机辅助工程,2013,22(1):418-421.
Hong H P. Finite element simulation of continuous rolling of 37Mn5 steel round bar and roll pass sequence optimization [J]. Computer Aided Engineering, 2013, 22 (1): 418-421.
- [8] 钟方友,余琪,陈飞龙.铜杆热连轧过程轧辊粘铜机理研究[J].中国金属通报,2021(10):145-146.
Zhong F Y, Yu Q, Chen F L. Research on copper-sticking mechanism of roll in hot continuous rolling of copper rod [J]. China Metal Bulletin, 2021 (10): 145-146.
- [9] 刘永.大尺度圆钢热轧成型缺陷控制数值模拟研究[D].秦皇岛:燕山大学,2012.
Liu Y. Research on Numerical Simulation of the Hot Rolling Deformation-defects Control in Large-scale Round Bar [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [10] 刘洋,彭艳,姬会爽,等.SCR连铸连轧铜杆表面铜粉形成机理及其质量控制[J].塑性工程学报,2021,28(7):97-103.
Liu Y, Peng Y, Ji H S, et al. Formation mechanism and quality control of copper powder on surface of copper rod in SCR continuous casting and rolling [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (7): 97-103.
- [11] Natalia V, Elmira F, Alexandr K. Big data as a tool for building a predictive model of mill roll wear [J]. Symmetry, 2021, 13 (5): 859-859.
- [12] 刘佩明,崔风平,徐宝杰.棒材自由规格减定径轧制技术[J].山东冶金,2003(4):39-40.
Liu P M, Cui F P, Xu B J. Schedule free and reducing sizing mill rolling of bar [J]. Shandong Metallurgy, 2003 (4): 39-40.
- [13] 王会廷,章静,阎军.张力对减定径轧制中轧件变形影响的有限元分析[J].钢铁研究,2008(1):26-29.
Wang H T, Zhang J, Yan J. Finite element analysis of tension effect on deformation in the RSM rolling process [J]. Iron and Steel Research, 2008 (1): 26-29.
- [14] 张春光,杨霄,陈林,等.大规格高速线材双机架减定径轧制变形分析及张力对尺寸精度的影响[J].塑性工程学报,2021,28(8):127-132.
Zhang C G, Yang X, Chen L, et al. Deformation analysis and effect of tension on dimensional accuracy of large-size high-speed wire rod during two-stand reducing and sizing rolling [J]. Journal of Plastic Engineering, 2021, 28 (8): 127-132.
- [15] 胡睿,隋凤利,奚铁,等.张力对连轧角钢轧制变形影响的有限元分析[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2012,29(2):116-120.
Hu R, Sui F L, Xi T, et al. Finite element analysis about tension effect on deformation during continuous rolling of angle steel [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2012, 29 (2): 116-120.
- [16] Sygut P, Klimecka-Tatar D, Borkowski S. Theoretical analysis of the influence of longitudinal stress changes on band dimensions during continuous rolling process [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2016, 61 (1): 183-188.
- [17] Nepryakhin Sergey O, Vodopyanova Olga V. Research into the effect of speed mismatch during continuous rolling on the process parameters [J]. Solid State Phenomena, 2021, 316: 208-213.
- [18] 宋宇,张丰收,皇涛,等.基于高温磨损的H13热作模具钢磨损规律和模型研究[J].塑性工程学报,2018,25(4):187-193.
Song Y, Zhang F S, Huang T, et al. Study on wear law and model of H13 hot working die steel based on high-temperature wear [J]. Journal of Plastic Engineering, 2018, 25 (4): 187-193.
- [19] Liu Y, Peng Y, Qu X B. Mechanism of and key technologies for copper bonding in the hot rolling of SCR continuous casting and rolling [J]. Applied Sciences, 2021, 11 (22): 11023.
- [20] Li X B, Jiang G M, Di J P, et al. Effect of cryogenic rolling on the microstructural evolution and mechanical properties of pure copper sheet [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 772: 138811.