

基于温度控制的中低合金钢线材轧线生产 M2 高速工具钢的有限元模拟与可行性分析

徐乐钱¹, 刘 宇¹, 甄 玉², 李 朋¹, 姚 健³

(1. 上海大学 (浙江) 高端装备基础件材料研究院, 浙江 嘉兴 312100; 2. 中天钢铁集团有限公司, 江苏 常州 213000;
3. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 为探究在中低合金钢线材轧制产线上生产 M2 高速工具钢的可行性, 采用 Gleeble-3500 试验机对连铸 M2 高速工具钢进行高温拉伸性能测试, 并采用有限元分析软件 Deform 中的 Shaperolling 模块, 对某特殊钢厂的中低合金钢高速线材生产线进行建模, 模拟分析该产线轧制 M2 高速工具钢的温度及轧制力。结果表明: 连铸 M2 高速工具钢合理的热加工温度范围为 800~1200 ℃, 通过适当降低轧制速度、调整精轧机前水箱冷却强度、控制轧件进入精轧机的温度以及加大精轧机段的水冷强度等方式, 使工艺具备可行性。此外, 由于轧制 M2 高速工具钢所需的轧制力远高于中低合金钢, 所以还需要对轧机载荷能力进行校核。

关键词: M2 高速工具钢; 中低合金钢线材; 轧制力; 轧制生产线; 粗轧; 精轧

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.024

中图分类号: TG335

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 10-0154-07

Finite element simulation and feasibility analysis on M2 high-speed tool steel produced by a temperature-controlled medium-low alloy steel wire rod rolling line

Xu Leqian¹, Liu Yu¹, Zhen Yu², Li Peng¹, Yao Jian³

(1. Zhejiang Institute of Advanced Materials, Shanghai University (Zhejiang), Jiaxing 312100, China;

2. Zenith Steel Group Co., Ltd., Changzhou 213000, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of producing M2 high-speed tool steel on a medium-low alloy steel wire rod rolling production line, the high-temperature tensile performance tests on continuous-cast M2 high-speed tool steel were tested by testing machine Gleeble-3500, and the Shaperolling module in the finite element analysis software Deform was used to model the high-speed wire rod production line of medium-low alloy steel in a special steel plant. Then, the temperature and rolling force of M2 high-speed tool steel in this production line were simulated and analyzed. The results show that the reasonable range of hot processing for M2 continuous-cast high-speed tool steel is 800–1200 ℃, and it is technologically feasible to appropriately reduce the rolling speed, adjust the cooling intensity of the water tank in front of the finishing mill, control the temperature of the rolled parts entering the finishing mill, and increase the water cooling intensity of the finishing mill section. In addition, since the rolling force required in rolling M2 high-speed tool steel is much higher than that of medium-low alloy steel, it is necessary to check the load capacity of rolling mill.

Key words: M2 high-speed tool steel; medium-low alloy wire rod; rolling force; rolling production line; rough rolling; finishing rolling

国内大多数特殊钢厂的棒线材轧制生产线都是以轴承钢、弹簧钢和齿轮钢等中低合金钢为主要产品定位^[1-2]。随着市场竞争的加剧, 各企业均在加

大产品结构调整幅度, 可否用设计定位中低合金钢的棒线材轧制生产线来生产高合金钢产品, 是许多企业正在考虑的问题。

Z 厂优特钢线材轧钢厂主要生产小规格的中低合金钢线材, 随着产品升级, 计划在该产线上生产 $\Phi 6.5$ mm 的 M2 高速工具钢。利用 Deform 商业软件建立轧制模型, 从工艺和设备载荷两个方面进行了

收稿日期: 2022-12-09; 修订日期: 2023-03-16

作者简介: 徐乐钱 (1990-), 学士, 工程师

E-mail: xlbk@126.com

可行性评估。

1 中低合金钢与高合金钢轧制产线区别

1.1 产线布局差异

将 Z 厂的中低合金钢线材生产线与国内 D 厂的

高合金钢线材生产线进行对比分析，其中 Z 厂线材生产线的规格范围为 $\Phi 5.5 \sim \Phi 25.0$ mm，其流程图如图 1 所示。该生产线的坯料尺寸为 160 mm×160 mm，轧制 $\Phi 6.5$ mm 线材时的终轧速度为 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，其主要生产冷镦钢、齿轮钢、帘线钢和弹簧钢等中低合金钢。

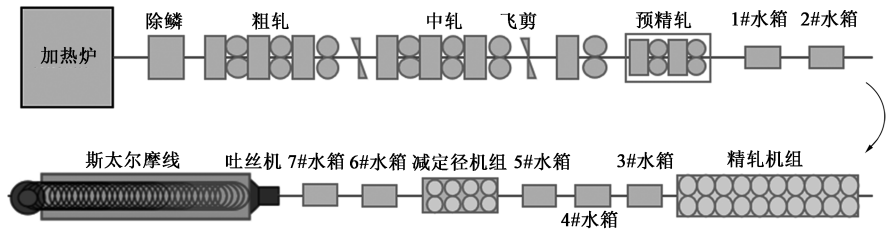


图 1 中低合金钢线材生产线流程图

Fig. 1 Flow chart of production line for medium-low alloy steel wire rod

国内 D 厂高合金钢线材生产线的规格范围为 $\Phi 6 \sim \Phi 24$ mm，其流程图如图 2 所示。该生产线使用的坯料尺寸为 150 mm×150 mm，轧制 $\Phi 6.5$ mm 线材

时的终轧速度为 $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，其主要生产工具钢和不锈钢等高合金钢。中低合金钢生产线与高合金钢生产线的差异如表 1 所示，其中，RSM 为减定径机组。

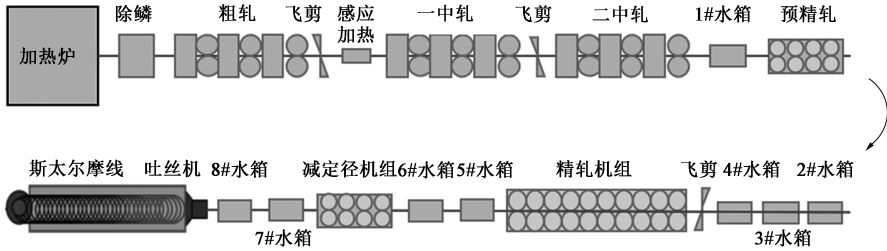


图 2 高合金钢线材生产线流程图

Fig. 2 Flow chart of production line for high alloy steel wire

表 1 中低合金钢与高合金钢生产线的差异

Table 1 Difference of production lines between medium-low alloy steel and high alloy steel

生产线	轧机布局	飞剪及感应加热	水箱
中低合金钢	6+6+6+10+RSM	粗轧无感应	预精轧前
	6 至 7 架之间脱开式	加热、无飞剪	无水箱
高合金钢	6+6+6+4+10+RSM	粗轧配备感应	预精轧前
	全连轧式	加热、有飞剪	有水箱

高合金钢的塑性加工温度区间窄^[3]，粗轧及中

轧区域由于轧制速度慢，轧件温降快，易导致轧件表面开裂及劈头现象^[4]。因此，高合金钢生产线在粗轧区配备感应加热设备，以便及时补热，粗轧后配备飞剪以避免后续轧制发生劈头；精轧由于轧速较快，需要控制轧制过程中的温升，以防止轧件心部温度过高导致塑性降低^[5]。

1.2 工艺差异

以轧制 $\Phi 6.5$ mm 线材为例，中低合金钢生产线的精轧区使用 8 架轧机，高合金钢生产线的精轧区使用 6 架轧机，两条生产线的工艺差异如表 2 所示。

表 2 中低合金钢与高合金钢生产线的工艺差异

Table 2 Process difference of production lines between medium-low alloy steel and high alloy steel

生产线	坯料尺寸/ (mm×mm)	轧线总 道次数	$\Phi 6.5$ mm RSM 前 使用道次数	RSM 前平均 延伸系数	精轧区平均 延伸系数	终轧速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
中低合金钢	160×160	32	26	1.29	1.26	100
高合金钢	150×150	36	28	1.24	1.18	52

注：中低合金钢生产线精轧区为 19#~28#轧机，共 10 架次，轧制 $\Phi 6.5$ mm 线材时使用 19#~26# 8 个机架；

高合金钢轧线精轧区为 23#~32#轧机，共 10 架次，轧制 $\Phi 6.5$ mm 线材时使用 23#~28# 6 个机架。

粗轧、中轧和精轧各道次的延伸系数如图 3 所示。

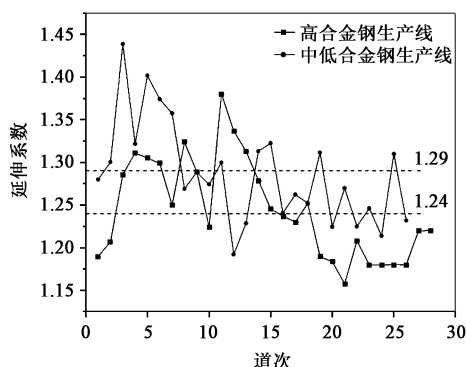


图 3 中低合金钢和高合金钢生产线各道次延伸系数

Fig. 3 Elongation coefficient of each pass for medium-low alloy steel and high alloy steel production lines

中低合金钢生产线的平均延伸系数为 1.29, 精轧区的平均延伸系数为 1.26, 终轧速度为 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 高合金钢生产线的平均延伸系数为 1.24, 精轧区的平均延伸系数为 1.18, 终轧速度为 $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均延伸系数及终轧速度远低于中低合金钢生产线。高合金钢生产线粗轧区的延伸系数均控制在 1.32 以下, 中低合金钢生产线粗轧区有两个道次的延伸系数均达到了 1.4 以上。

2 建模及模型准确性验证

2.1 建模条件

Z 厂生产线产品以中低合金钢为主, 坯料为尺寸为 160 mm 的方坯, 轧制 $\Phi 6.5 \text{ mm}$ 成品共 26 道次 (不使用 RSM 机组), 粗轧为箱型孔, 中轧、预精轧和精轧均为椭圆/圆孔型, 为配合钢种组织性能要求, 精轧机组区采用正常冷却模式 (阀门开度为 50%, 水压为 2.2 MPa, 水流量为 $9.72 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$), 1#和 2#水箱开启控制进精轧温度, 3#~5#水箱开启控制吐丝温度, 终轧速度为 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2 建立有限元模型

鉴于 Z 厂轧制生产线日常批量生产 70#、80#高碳钢线材, 因此, 建模材料选择 Deform 材料库中的 SAE1078 碳素工具钢, 并据此对模型进行校核。原始连铸坯横断面的尺寸为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, 为塑性体, 由六面体网格组成; 轧辊为刚体, 表面温度取 80°C , 辊径及孔型根据轧制表设定; 钢坯高温段加热温度为 1150°C , 经轧制及水箱冷却, 精轧进口温度为 $840 \sim 860^\circ\text{C}$, 结合实际生产工艺将模型中钢坯的初始温度设定为 1150°C , 精轧进口温度设定为

850°C 。轧件与轧辊接触面的摩擦因数取 0.7, 轧制过程中轧件与轧辊产生接触换热, 换热系数取 $5 \text{ kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; 在道次之间轧件与空气发生热交换, 传热系数取 $0.02 \text{ kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; 水箱冷却时轧件与水发生热交换, 换热系数取 $4 \text{ kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 同时由于轧制变形对轧件做工, 使轧件温度升高, 功热转换系数取 0.9^[6]。由于轧机数量较多, 为方便模拟计算, 将轧机分为两部分进行模拟, 分别为 1#~18#轧机的粗轧至预精轧及 19#~26#轧机的精轧。

2.3 有限元模型模拟结果

SAE1078 碳素工具钢轧制模型的粗轧至预精轧的模拟温度变化结果如图 4 所示, 精轧的模拟温度变化结果如图 5 所示。

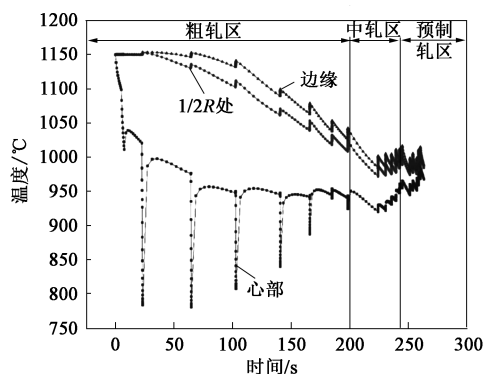


图 4 SAE1078 碳素工具钢粗轧至预精轧的模拟温度变化图

Fig. 4 Simulated temperature change diagram of SAE1078 carbon tool steel from rough rolling to pre-finishing rolling

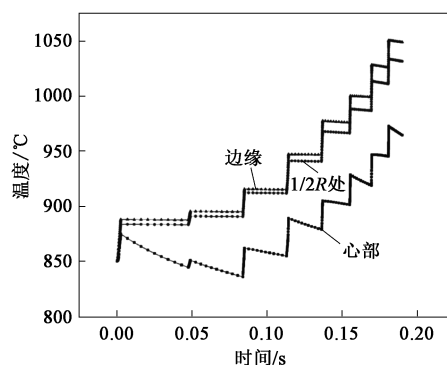


图 5 SAE1078 碳素工具钢精轧的模拟温度变化图

Fig. 5 Simulated temperature change diagram of SAE1078 carbon tool steel in finishing rolling

SAE1078 碳素工具钢轧制模型的温度模拟结果与实际测量结果以及相对误差如表 3 所示, 其中, 相对误差 = $| \text{模拟结果} - \text{实际测量结果} | / \text{实际测量结果}$ 。由表 3 可知, 模拟结果与实际测量结果相比,

表 3 温度模拟结果相对误差

Table 3 Relative errors of temperature simulation results				
参数	开轧温度/ ℃	飞剪处温度/ ℃	预精轧出口 温度/℃	精轧进口 温度/℃
实际测量结果	1048	962	991	952
模拟结果	1039	948	978	962
相对误差/%	0.86	1.46	1.31	1.05

相对误差在 1.46% 以内，说明模型较为准确。

3 M2 高速工具钢轧制模拟与工艺可行性分析

3.1 M2 高速工具钢的热塑性分析

M2 高速工具钢为高碳高合金钢，关于其模铸态及经过开坯锻造后轧态的高温力学性能已有很多研究^[7-10]，鉴于低合金钢生产线使用的坯料为 160 mm×160 mm 的 M2 高速工具钢连铸坯，相比模铸及轧坯其成分、状态均有差别。为摸索 M2 高速工具钢最佳的成形温度，从该连铸坯上取样并加工为 $\Phi 10\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ 的高温拉伸试样，采用 Gleeble-3500 试验机将试样加热至试验温度后进行高温拉伸力学性能测试。试验温度为 650~1250℃，应变速率为 $5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ，其抗拉强度与温度的关系如图 6 所示。由图 6 可知，M2 高速工具钢的抗拉强度随着温度降低呈上升趋势，当低于 800℃ 时抗拉强度急剧上升，增大了设备载荷，不利于轧制进行。其断面收缩率与温度的关系如图 7 所示，M2 高速工具钢热塑性良好的温度区间为 950~1150℃，当超过 1150℃ 时塑性快速下降，超过 1200℃ 时处于零塑性区。

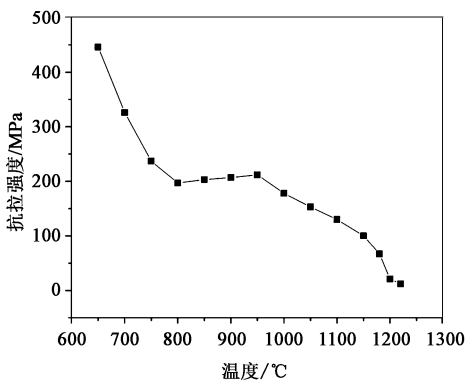


图 6 M2 高速工具钢的抗拉强度与温度的关系

Fig. 6 Relationship between tensile strength and temperature of M2 high-speed tool steel

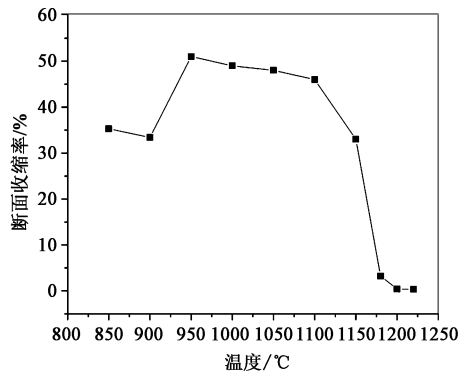


图 7 M2 高速工具钢的断面收缩率与温度的关系

Fig. 7 Relationship between reduction of area and temperature of M2 high-speed tool steel

3.2 中低合金钢生产线生产 M2 高速工具钢的粗轧至预精轧模拟

在已经建立的 SAE1078 碳素工具钢粗轧至预精轧模型上，将模拟材料切换为 M2 高速工具钢，孔型系统、边界条件等不变。考虑到 M2 高速工具钢的合金含量高，轧制温升高，因此，以不同的轧制速度 50、70 和 100 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 进行模拟，不同轧制速度下的 M2 高速工具钢的表面和心部温度如图 8、图 9 所示。

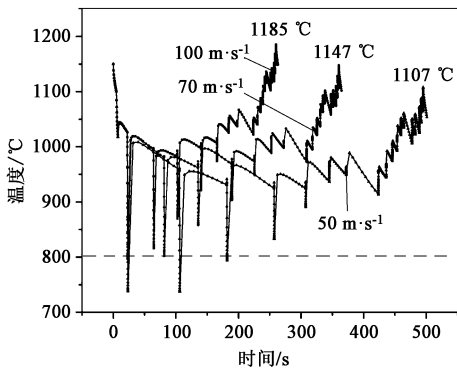


图 8 粗轧至预精轧不同轧制速度下 M2 高速工具钢的表面温度

Fig. 8 Surface temperature of M2 high-speed tool steel at different rolling speeds from rough rolling to pre-finishing rolling

从图 8 和图 9 可以看出：终轧速度为 100 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，M2 高速工具钢的心部温度最高达 1222℃，处于其热加工零塑性区，轧制变形过程中有产生裂纹的风险；终轧速度为 70 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，心部温度为 1179℃，表面最低温度在 800℃ 以上；终轧速度为 50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，心部温度虽为 1137℃，但粗轧前 3 道次的表面温度低于 800℃，变形抗力急剧增大，不利于轧制的顺利进行。因此，从 1#~18#架轧机的计算结果分析，在中低合金钢生产线上轧制 M2 高速工具钢时将终轧速度设为 70 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 是可行的。

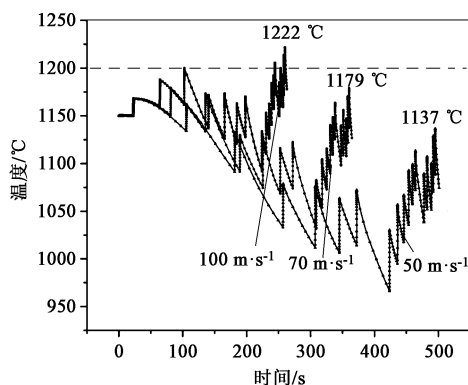


图 9 粗轧至预精轧不同轧制速度下 M2 高速工具钢的心部温度

Fig. 9 Core temperature of M2 high-speed tool steel at different rolling speeds from rough rolling to pre-finishing rolling

3.3 中低合金钢生产线生产 M2 高速工具钢的精轧区域模拟

该轧线精轧机组有 10 架轧机, 按照中低碳钢工艺设计, 轧制 $\Phi 6.5$ mm 线材时使用 8 架轧机。通过调节精轧前 1#和 2#水箱的开度来控制轧件进精轧的温度, 精轧区轧制过程中, 轧件的冷却由精轧区水冷总阀控制。鉴于产线为全连轧, 由前模拟结果可知粗中轧区域降速 30% (终轧速度为 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 为可行工艺, 为摸索精轧区最佳轧制工艺, 在终轧速度为 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的前提下, 分别模拟不同精轧进口温度 (850、900 和 950 °C) 及不同程度精轧区冷却 (正常冷却模式, 阀门开度为 50%, 水压为 2.2 MPa, 水流量为 $9.72 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$; 强冷模式阀门开度为 100%, 水压为 2.4 MPa, 水流量为 $16.70 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) 的情况下 M2 高速工具钢的温升情况。正常冷却情况下, 不同精轧进口温度下 M2 高速工具钢的轧制温升如图 10 所示。

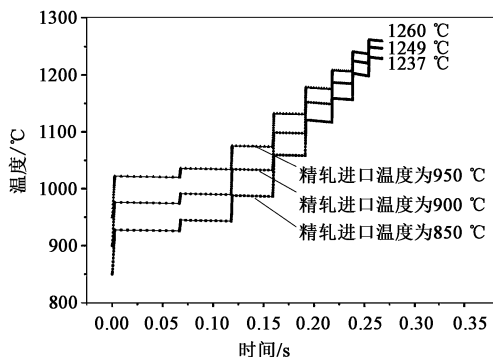


图 10 正常冷却模式下不同精轧进口温度时 M2 高速工具钢的心部温升

Fig. 10 Core temperature rise at different finishing rolling import temperatures of M2 high-speed tool steel under normal cooling mode

正常冷却情况下, M2 高速工具钢轧件在以 950 °C 进入精轧时心部温度为 1260 °C; 在以 900 °C

进入精轧时心部温度为 1249 °C; 在以 850 °C 进入精轧时心部温度为 1237 °C。3 种进精轧温度情况下, 精轧区轧制心部的温度均超过 1200 °C, 不利于 M2 高速工具钢的生产。

强冷模式下, 不同精轧进口温度下 M2 高速工具钢的轧制温升如图 11 所示。

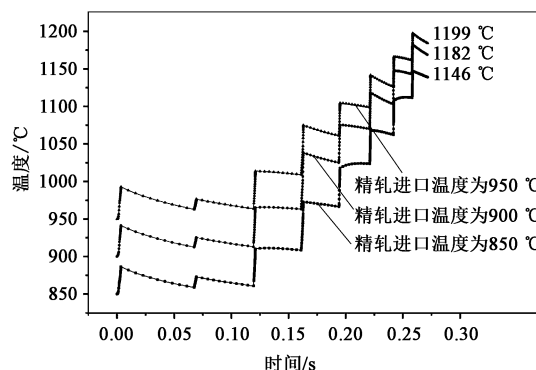


图 11 强冷模式下不同精轧进口温度时 M2 高速工具钢的心部温升

Fig. 11 Core temperature rise at different finishing rolling import temperatures of M2 high-speed tool steel under strong cooling mode

强冷却情况下, M2 高速工具钢轧件在 950 °C 进入精轧时心部温度为 1199 °C, 接近 1200 °C, 处于低塑性区; 在 900 °C 进入精轧时心部温度为 1182 °C; 在 850 °C 进入精轧时心部温度为 1146 °C。因此, 精轧区可行工艺方案为控制进精轧温度为 850~900 °C。

精轧区域轧制速度快, 变形速率快, 钢种的变形抗力大, 热导率低, 精轧区的温升更为明显^[11-12], 正常冷却时在 850 °C 进精轧情况下, SAE1078 碳素工具钢的精轧温升为 182 °C, 而 M2 高速工具钢的精轧温升高达 387 °C。因此, 为了降低高合金钢精轧区的温升情况, 加强精轧区冷却是必要的措施。

3.4 生产 M2 高速工具钢的工艺可行方案

综合以上计算分析, 在此中低合金钢线材生产线上轧制 M2 高速工具钢线材, 与常规的中低合金钢产品相比较, 必须将轧制速度降低 30%, 即终轧速度为 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 通过精轧机前冷却水调整控制进入精轧温度在 850~900 °C 区间内, 精轧区域冷却水开度由原来的 50% 调整至 100% 方可在温度控制上满足 M2 高速工具钢的轧制要求。最终确定可行工艺方案为: 轧制速度降速为 30%, 终轧速度为 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 1#和 2#水箱开启; 进精轧区温度为 850~900 °C; 精轧区水冷为阀门开度 100%, 强冷模式。

4 轧制力对比分析

轧线原产品种类主要为中低合金钢, 而 M2 高

速工具钢的合金含量高、变形抗力大, 为验证产线设备的能力, 对精轧区轧机未降速生产 SAE1078 碳素工具钢及可行工艺下 (降速 30%, 终轧速度为 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 精轧进口温度为 $850 \sim 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 生产 M2 高速工具钢的轧制力进行模拟计算。模拟结果如图 12 所示。M2 高速工具钢的轧制力较 SAE1078 碳素工具钢大幅度上升, 增幅如图 13 所示。

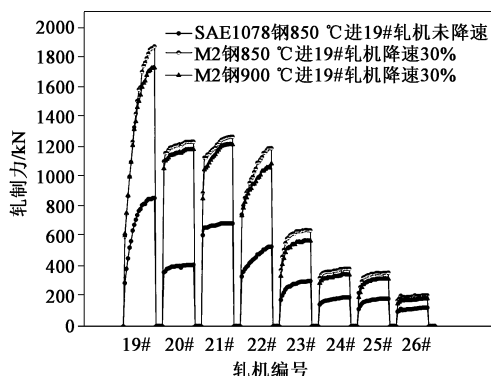


图 12 精轧区轧制 SAE1078 碳素工具钢及 M2 高速工具钢的轧制力对比

Fig. 12 Comparison of rolling forces between SAE1078 carbon tool steel and M2 high-speed tool steel at finishing rolling area

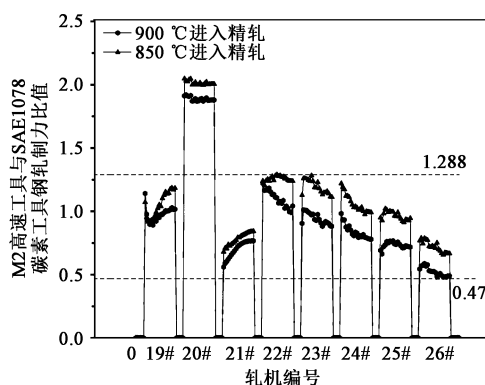


图 13 M2 高速工具钢与 SAE1078 碳素工具钢轧制力增幅对比

Fig. 13 Comparison of rolling force increase amplitude between M2 high-speed tool steel and SAE1078 carbon tool steel

由图 12 和图 13 可知, 19# 及 21#~26# 轧机的轧制力增幅在 47.0%~128.8% 之间, 20# 轧机轧制力增幅达到 200.0%, 轧制力增幅过大, 必然对轧机的电机功率、传动系统及轧辊强度等提出更高的要求。因此, 为保证 M2 高速工具钢轧制的可行性, 需要对轧机、设备能力进行校核。

5 结论

(1) 应用有限元方法对线材轧制温度进行分析

是可行的, 模拟的温度结果与实际生产相符合。

(2) M2 高速工具钢在温度低于 $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时抗拉强度急剧上升, 在 $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上处于零塑性区。合理的轧制温度范围为 $800 \sim 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 轧制过程中温度低于 $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 会导致变形抗力急剧增大, 不利于设备正产运行; 温度高于 $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 由于 M2 高速工具钢处于零塑性区会导致轧制变形开裂。

(3) 中低合金钢产线在缺少感应加热等必要设备以及延伸系数大、轧速快的前提下生产 M2 高速工具钢, 通过合理降低轧制速度、严格控制进精轧温度范围和增大精轧区水冷等措施, 工艺上是具备可行性的。为同行业在轧线产品升级, 验证工艺可行性方面提供了借鉴。

(4) 用中低合金钢轧线生产 M2 高速工具钢, 虽在工艺上可行, 但由于其变形抗力大, 精轧区 M2 高速工具钢的轧制力较 SAE1078 碳素工具钢增加 47.0%~128.8%, 存在设备载荷不足的风险, 尚需对设备能力进行校核。

参考文献:

- [1] 滕曼. 优质棒材轧线的工艺流程及技术特点 [J]. 世界有色金属, 2016, (13): 1117, 119.
Teng M. High quality bar Ga Xian process flow and technical features [J]. World Nonferrous Metals, 2016, (13): 117, 119.
- [2] 崔艳. 国内棒材生产线生产工艺及设备综述 [J]. 中国重型装备, 2004, (1): 36~50.
Cui Y. The process and equipment description of the domestic bar production line [J]. China Heavy Equipment, 2004, (1): 36~50.
- [3] 邓玉昆, 陈景榕, 王世章. 高速工具钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
Deng Y K, Chen J R, Wang S Z. High-speed Tool Steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [4] 郝世风, 尤晓东, 何宁. M2 钢轧制劈头分析及工艺改进 [J]. 河北冶金, 2015, (8): 73~75.
Hao S F, You X D, He N, et al. Analysis about head cracks of M2 steel in rolling and process improvement [J]. Hebei Metallurgy, 2015, (8): 73~75.
- [5] 王正虎. M2 高速工具钢热轧中板工艺探讨 [J]. 特钢技术, 2010, 16 (3): 41~13, 66.
Wang Z H. Discussion on hot rolling process of M2 high speed tool steel plate [J]. Special Steel Technology, 2010, 16 (3): 41~43, 66.
- [6] 徐乐钱, 高宇波, 孟晓玲. mini 轧机轧制 AISI1015 钢轧件升温 and 应变的有限元模拟 [J]. 机械工程材料, 2021, 45 (2), 78~84.
Xu L Q, Gao Y B, Meng X L. Finite element simulation of temperature rise and strain of AISI1015 steel workpiece during mini

- rolling [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2021, 45 (2), 78-84.
- [7] 张德一, 吕立华. M2 高速钢热塑性变化研究 [J]. *重庆大学学报*, 1987, (2): 51-58.
- Zhang D Y, Lyu L H. A study of the change on M2 high-speed steel hot plasticity [J]. *Journal of Chongqing University*, 1987, (2): 51-58.
- [8] 孙淑华, 曲明贵, 白兴红, 等. 铸态 M2 高速钢的热变形行为 [J]. *材料热处理学报*, 2013, 34 (5): 47-50.
- Sun S H, Qu M G, Bai X H, et al. Hot deformation behavior of as-cast AISI M2 high speed steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, 34 (5): 47-50.
- [9] 曲明贵, 孙淑华, 王博, 等. 一种铸态含氮 M2 高速钢的热变形行为研究 [J]. *燕山大学学报*, 2014, 38 (2): 107-111, 117.
- Qu M G, Sun S H, Wang B, et al. Study on hot deformation behavior of an as-cast nitrogen bearing M2 high speed steel [J]. *Journal of Yanshan University*, 2014, 38 (2): 107-111, 117.
- [10] 迟宏宵, 徐辉霞, 方峰, 等. M2 高速钢的高温力学性能 [J]. *中国冶金*, 2016, 26 (1): 31-34.
- Chi H X, Xu H X, Fang F, et al. High temperature mechanical properties of M2 high-speed steel [J]. *China Metallurgy*, 2016, 26 (1): 31-34.
- [11] 谢英杰, 赵德文, 韩立涛, 等. 高速线材精轧的等效应变研究及温升计算 [J]. *钢铁*, 2009, 44 (1): 4.
- Xie Y J, Zhao D W, Han L T, et al. Research on effective strain in wire rod during rolling and calculation of temperature jump [J]. *Iron & Steel*, 2009, 44 (1): 47-50.
- [12] 曹杰, 刘雅政, 阎军, 等. 不同规格高速线材减定径轧制变形和温度分析 [J]. *精密成形工程*, 2010, 2 (2): 56-59.
- Cao J, Liu Y Z, Yan J, et al. Analysis on deformation and temperature of different size of high-speed wire and rod during reducing and sizing rolling [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2010, 2 (2): 56-59.

(上接第 94 页)

- [5] 王树飞, 陈岁繁, 何雄华, 等. 异形薄壁不锈钢隔热罩冲压成形数值分析 [J]. *塑性工程学报*, 2022, 29 (8): 19-27.
- Wang S F, Chen S F, He X H, et al. Numerical analysis of stamping forming for special-shaped thin-walled stainless steel heat shield [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 29 (8): 19-27.
- [6] Zhou J, Yang X M, Mu Y H, et al. Numerical simulation and experimental investigation of tailored hot stamping of boron steel by partial heating [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 1347-1365.
- [7] 王辉, 廖旭洲, 蔡继文, 等. AZ31B 镁合金电流辅助旋压回弹角预测及工艺参数优化 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (8): 29-34.
- Wang H, Liao X Z, Cai J W, et al. Prediction on springback angle and process parameter optimization in electro-assisted spinning for AZ31B magnesium alloy [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (8): 29-34.
- [8] 王慧怡, 王岫鑫, 刘学. 汽车发动机罩的神经网络-强繁殖 NSGA-II 算法冲压参数优化 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (7): 100-106.
- Wang H Y, Wang Y X, Liu X. Parameter optimization on stamping of neutral network-strong reproduction NSGA-II algorithm for automobile engine hood [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (7): 100-106.
- [9] 周邦新, 赵文金, 苗志潘, 等. 改善锆-4 合金耐腐蚀性能的研究 [J]. *核科学与工程*, 1995, (3): 242-249.
- Zhou B X, Zhao W J, Miao Z P, et al. Study on improving corrosion resistance of Zr-4 alloy [J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 1995, (3): 242-249.
- [10] 刘雪. 环形燃料组件定位格架外条带及栅元模具设计与工艺开发 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- Liu X. The Design and Process Development of the Moulds for Outer Strip and Cell of the Spacer Grid for Annular Assembly [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [11] 张小民. 某铝合金成形极限的分析研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- Zhang X M. Analysis and Research on the Forming Limit of a Zirconium Alloy [D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [12] Lei C Y, Mao J Z, Zhang X M, et al. A comparison study of the yield surface exponent of the Barlat yield function on the forming limit curve prediction of zirconium alloys with M-K method [J]. *International Journal of Material Forming*, 2021, (14): 467-484.
- [13] 赵申坤, 姜潮, 龙湘云. 一种基于数据驱动和贝叶斯理论的机械系统剩余寿命预测方法 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54 (12): 115-124.
- Zhao S K, Jiang C, Long X Y. Remaining useful life estimation of mechanical systems based on the data-driven method and bayesian theory [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54 (12): 115-124.
- [14] 许文超, 王登峰. 考虑材料-结构-工艺参数的铆接质量多目标优化设计 [J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32 (2): 497-507.
- Xu W C, Wang D F. Multi-objective optimization design of riveting quality considering material-structure-process parameters [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32 (2): 497-507.
- [15] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6 (2): 182-197.
- [16] 王茜, 张粒子. 采用 NSGA-II 混合智能算法的风电场多目标电网规划 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31 (19): 17-24.
- Wang Q, Zhang L Z. Multi-objective transmission planning associated with wind farms applying NSGA-II hybrid intelligent algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31 (19): 17-24.