

电磁调控轧辊的热力胀形行为及高效控制方法

杨庭松, 黄敦亮, 孙文权, 何安瑞
(北京科技大学 高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 为研究辊形电磁调控技术(roll profile electromagnetic control technology, RPECT)的热力胀形行为,采用有限元方法分析了不同电流密度及频率下综合辊凸度、热力贡献辊凸度以及力凸度占比等随接触区热量的变化规律,探究了接触区热量与热力胀形能力的映射关系及其成立条件.结果表明,在接触区热量的中低取值范围内,同一接触区热量所对应的热力调控能力不会受磁参数影响,故提出将接触区热量作为输入参数与调控能力之间桥梁的RPECT高效控制策略.该策略通过提升磁参数来快速达到接触区的目标温升效果,进而获取目标调控能力.以20 μm 的辊缝凸度需求为例,经原始与高效控制策略间的对比发现,新策略的调控时间可有效地缩短至原调控时间的19.57%.

关键词: 辊形电磁调控技术;热力胀形行为;接触区热量;调控能力;高效控制策略

中图分类号: TG 156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2024)05-0660-08

Thermal-Force Bulging Behavior and Efficient Control Method of Electromagnetic Control Roll

YANG Ting-song, HUANG Dun-liang, SUN Wen-quan, HE An-ru

(National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Corresponding author: YANG Ting-song, E-mail: tsyang324@163.com)

Abstract: To study the thermal-force bulging behavior of roll profile electromagnetic control technology (RPECT), the variation laws of the comprehensive roll crown, the thermal-force contribution roll crown and the ratio of the force crown with the heat of contact zone under different current densities and frequencies were analyzed by finite element method, and the mapping relationship and establishment condition between the heat of contact zone and the thermal-force bulging ability were explored. The results show that, within the range of the middle and low values of the heat of contact zone, the thermal-force control ability corresponding to the same value of the heat of contact zone cannot be affected by the magnetic parameters. Therefore, an efficient control strategy of RPECT can be proposed, which takes the heat of contact zone as the bridge value between the input parameter and the control ability. The strategy can quickly achieve the target temperature rise effect of the contact zone by increasing the magnetic parameters, and then obtain the target control ability. Taking the roll gap crown requirement of 20 μm as an example, the comparison between the original and the efficient control strategy shows that the control time of the new strategy can be effectively shortened to 19.57% of the original control time.

Key words: roll profile electromagnetic control technology; thermal-force bulging behavior; heat of the contact zone; control ability; efficient control strategy

作为一种新兴的板形控制技术,辊形电磁调控技术(roll profile electromagnetic control technology, RPECT)可在感应磁场的作用下,借助电磁调控

轧辊的内约束机制和电磁棒的热胀形机制,产生热力混合驱动的电磁调控辊形,进而调节冷轧机的辊缝形状,最终实现板形控制目标.面向板形

控制需求,调控能力与调控时效是辊缝形状即时调控的关键管控点^[1-2]. RPECT可通过电磁棒的多区配置来满足凸度可控、位置灵活的辊缝形状调控需求,应对高阶板形问题.面对时效性需求,该技术的力驱动机制可以在短时间内快速构建,并产生力贡献辊形.由此,明晰电磁调控轧辊的热力胀形行为、分配热力胀形占比是提升RPECT适用性的关键所在.

关于RPECT,学者已经开展了大量的研究.杜凤山等^[3]首次提出了RPECT,并设计制造了辊形电磁调控实验平台,为该技术的发展奠定了基础.Liu等^[4]设计开发了电磁调控元件,并给出了电磁棒的全封闭和半封闭结构形式,其研究成果有效地提升了RPECT的可行性.Feng等^[5]基于RPECT原理开发了嵌套式支撑辊.王海军等^[6]探究了轧辊非均质特性对RPECT的影响规律,并给出了相应的非均质处理策略.以上研究促进了RPECT的发展,但尚未讨论电磁调控轧辊的即时调节方法.目前,RPECT能够产生百微米的调控量,但其调控时效与需求时效之间尚存在一定差距.为此,本文从RPECT的热力胀形行为入手,探究调控过程中热力辊形构成,构建驱动源与调控效果间的映射关系,通过参数化影响分析,提出RPECT的高效控制策略,进而为RPECT的板形控制应用提供新方法.

1 RPECT原理及热力胀形特性

1.1 RPECT原理

RPECT属于辊形柔性控制领域.此类技术致力于提供局部、多区、多变的板带轧机辊缝控制

能力.其控制源可划分为热源与力源,二者的调控特性存在差异.以热源驱动为核心的热辊形控制技术^[7-8]可控制轧辊的热凸度,而Variable Crown^[9]、Dynamic Shape Roll^[10]等力源驱动技术可借助内置液压元件来迫使轧辊受力胀形.前者对轧辊改造小,但时效性与稳定性会受热惯性影响而下降,并非辊缝形状控制的首选;后者具有时效性优势,但液压元件的引入降低了轧辊刚度,尚未进行大规模产业应用.综合考虑二者的优势,热力混合驱动的RPECT能够在保持轧辊刚度的同时,实现辊形快速调控.图1所示为RPECT的技术原理图.该技术的辊形调控依赖于电磁调控轧辊(electromagnetic control roll, ECR)及其调控元件.电磁棒(electromagnetic stick, ES)为热力胀形的核心驱动元件,其结构多采用分段式结构,包括用于产生热源的感应加热区和用于胀形的接触区.电磁棒与感应线圈(induction coil, IC)的组合体装载于轧辊中心通孔,如图1a所示.通以交流电的感应线圈可在感应区主体部分、接触区侧面以及轧辊内孔壁等3个区域产生感应磁场,进而形成如图1b所示的温度场.电磁棒热源区的热源水平远高于轧辊内壁热源区.电磁棒热源区向电磁棒接触区传热,构建电磁棒热胀形机制;轧辊内壁热源区向轧辊内壁传热,构建电磁调控轧辊的内约束机制.两机制的联合作用可促使电磁棒与轧辊的接触面上产生局部高压,并进一步产生力贡献辊形;同时,因内约束机制的小幅度温升,辊内也会形成热贡献辊形.两种辊形在调控过程中叠加作用,最终形成了如图1c所示的综合辊形.

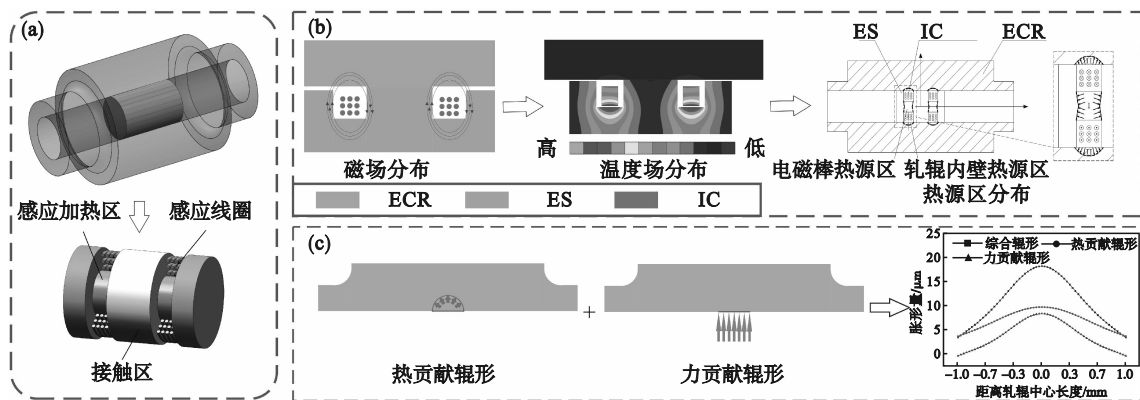


图1 RPECT的技术原理图

Fig. 1 Technical principle schematic of RPECT

(a)—电磁调控元件示意图; (b)—热源生成原理; (c)—辊形构成.

1.2 热力胀形特性

热力胀形的实质在于电磁调控轧辊与电磁

棒接触区的温升控制.从RPECT的技术原理出发,各调控元件间存在温升顺序性,并进一步导

致了热力胀形的时序特性.电磁棒是第一温升元件,也是主要温升元件.力贡献辊形会在电磁棒温升的基础上,先于热贡献辊形而快速形成,并在调控中前期占据主导地位;热贡献辊形虽能够随调控而增强,并逐渐与力贡献辊形共同支配综合辊形,但文献[11-13]研究表明辊面整体冷却、辊面分段冷却、辊内冷却均能够起到约束电磁调控轧辊温度场、削弱热贡献辊形占比的效果,且前两者不会对电磁棒温度场产生过多影响.这为增强 RPECT 的可控性与稳定性提供了基础.同时,研究^[14-15]也表明,RPECT 的辊形调控能力基本满足辊缝形状控制需求,而其时效性还需进一步探究.由此可见,加强力贡献辊形的快速响应机制是 RPECT 满足板形控制时效需求的关键所在.

1.3 热力胀形指标构建

考虑 RPECT 原理及其热力胀形特性,热力胀形的关键在于电磁棒温升效果,故提出电磁棒接触区输入热量 Q_c 作为接触区温升水平的评价指标.

$$Q_c = Kl r^2 (t_c - t_0). \quad (1)$$

式中: K 为接触区温升计算系数, $K = \pi c \rho$; c 为电磁棒接触区材料的比热容, $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$; ρ 为电磁棒接触区材料的密度, $kg \cdot m^{-3}$; l 为接触区长度, m ; r 为接触区半径, m ; t_c 为接触区平均温度, $^\circ C$; t_0 为接触区初始温度, $^\circ C$.

为评价热力胀形情况,提出综合辊凸度 C ,热贡献辊凸度 C_h ,力贡献辊凸度 C_f 和力凸度占比 η_f 的概念,其计算公式见式(2)和式(3).

$$\left. \begin{aligned} C &= C_h + C_f, \\ C_h &= C_{h-center} - C_{h-edge}, \\ C_f &= C_{f-center} - C_{f-edge}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\eta_f = \frac{C_f}{C_h + C_f}. \quad (3)$$

式中: $C_{h-center}$ 为热贡献辊形的中间位置胀形量, μm ; C_{h-edge} 为热贡献辊形的边部位置胀形量, μm ; $C_{f-center}$ 为力贡献辊形的中间位置胀形量, μm ; C_{f-edge} 为力贡献辊形的边部位置胀形量, μm .

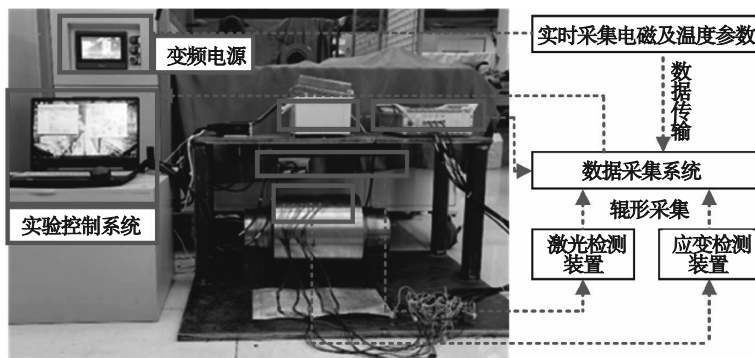


图3 辊形电磁调控实验平台

Fig. 3 Roll profile electromagnetic control experiment platform

2 RPECT 仿真模型及验证

因热力胀形过程的实验监测较为困难,故采用有限元方法对电磁调控轧辊的热力胀形行为进行分析.考虑到各电磁调控元件的回转体特性,本文建立电磁-热-力3场耦合的轴对称有限元模型,如图2所示.该模型包括电磁调控轧辊、电磁棒和感应线圈.为进行磁场分析,模型中的各元件外部设置空气单元,且其最远端单元设定为电势零点和磁势零点.单元类型采用二维4节点四边形单元,分析依托于电磁-热-机械耦合分析模块.电磁棒、电磁调控轧辊以及感应线圈分别与空气单元存在对流换热关系,其换热系数为 $0.03 kW \cdot (m^2 \cdot K^{-1})$ ^[16];电磁棒与电磁调控轧辊之间为接触换热,其换热系数为 $3 kW \cdot (m^2 \cdot K^{-1})$ ^[17].具体模型参数见表1.

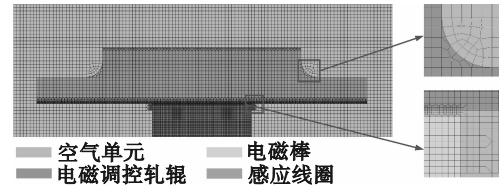


图2 辊形电磁调控仿真模型及其局部细化

Fig. 2 Simulation model of roll profile electromagnetic control and local refinement

表1 辊形电磁调控模型参数

Table 1 Model parameters of roll profile electromagnetic control

参数	取值	参数	取值
轧辊直径/mm	270	辊身长度/mm	300
轧辊内孔直径/mm	100	ES接触区直径/mm	100
ES接触区长度/mm	100	ES感应直径/mm	50
ES感应区长度/mm	50	ES边部区直径/mm	98
初始温度/ $^\circ C$	26	IC断面面积/ mm^2	169
电流密度/ $(A \cdot mm^{-2})$	3~6	电流密度基础值/ $(A \cdot mm^{-2})$	5
电流频率/Hz	50~800	电流频率基础值/Hz	400

根据上述模型参数,建立辊形电磁调控实验平台,如图3所示.该平台的数据采集系统搭载了激

光检测装置和应变检测装置,可以实时监控辊形的变化情况.同时,数据采集系统也能够采集变频电源的电流参数及电磁棒温度参数,进而实现 RPECT 调控过程的整体数据采集.基于辊形电磁调控平台开展辊形电磁调控实验,实验参数为:平均电流密度 $4 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$,电流频率 400 Hz ,持续调控时间 600 s .通过实验可获取实验结果与仿真结果,如图 4 所示.经对比,300 和 600 s 时刻的仿真结果与激光检测结果的差异值分别为 1.4 和 $1.7 \mu\text{m}$,仿真结果与应变检测结果的差异值分别为 2.2 和 $4.3 \mu\text{m}$.以上差异的原因在于,应变检测所采用的应变片易受调控过程的温度干扰而出现检测值波动,而仿真模型建立所需的边界条件较实验条件更为理想,故仿真结果与激光检测结果间也存在一定的差异.但从检测机理角度出发,电磁调控辊形的激光检测精度高于应变检测.若以激光检测结果为准,300 和 600 s 的仿真结果误差分别为 5.9% 和 3.8% ,均小于 10% .因此可判断,实验结果与仿真结果基本吻合,该模型具有一定的精度,可用于分析 RPECT 调控过程的热力胀形行为.

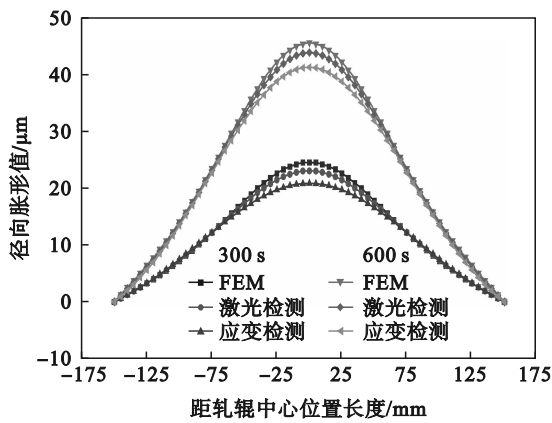


图 4 模型验证结果

Fig. 4 Results of model verification

3 结果分析

3.1 热力胀形调控能力分析

为探究 RPECT 的热力胀形行为及其控制方法,还需深入挖掘电磁棒接触区温升水平与 RPECT 热力胀形情况之间的关系.在 RPECT 的输入参数中,电流密度和电流频率是直接改变 RPECT 调控能力的参数,也是实现辊形快速调控的最佳参数.针对不同的电流密度和电流频率,提取接触区热量与热力胀形能力在调控过程中的变化情况,如图 5 所示.综合对比可发现,

RPECT 调控过程的接触区热量与辊凸度存在相似的变化规律,均能够随调控时间而持续增长.对于电流密度为 $3 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 或电流频率为 50 Hz 的低参数值工况,接触区热量与辊凸度随调控时间的变化趋势基本一致.若增加输入参数值,二者的变化趋势开始出现差异,且参数值越大,则差异越大.接触区热量主要反映了电磁棒接触区的热胀形能力,而未能反映轧辊的热胀形能力,图 5 的结果也表明,低参数值工况因电流输入弱,其所引发的轧辊温升弱于高参数值工况,即辊凸度中的力贡献辊凸度占比高、热贡献辊凸度占比低.由此可见,热贡献辊凸度占比的提升使得接触区热量的变化趋势开始区别于辊凸度变化趋势.考虑到外部冷却、内部冷却等手段均能够降低轧辊温度,此类手段的应用同样可以提升接触区热量与辊凸度的关联程度.整体上看,RPECT 的热力胀形能力可以借助接触区热量来表达,并以此为依据进行辊形快速调控.

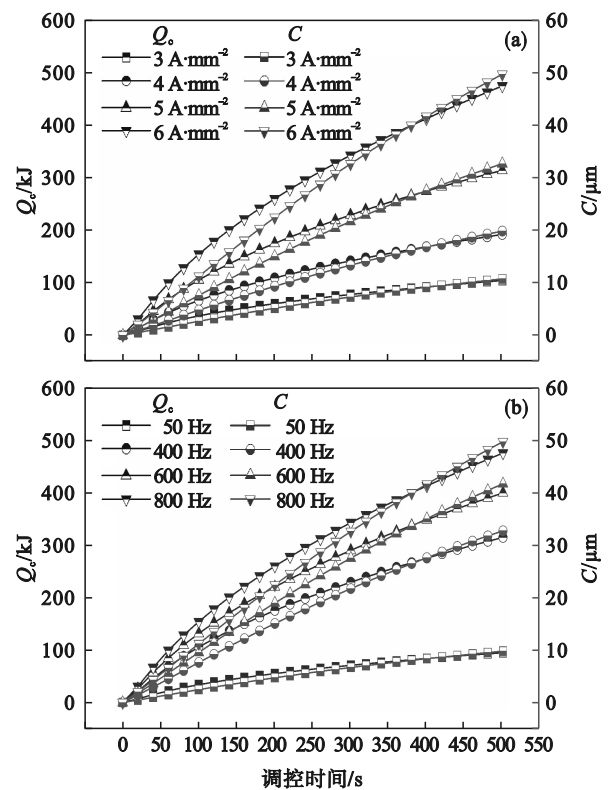


图 5 不同电磁参数下 Q_c 及 C 的变化情况

Fig. 5 Variation of Q_c and C under different electromagnetic parameters

(a)—电流密度变动; (b)—电流频率变动.

图 6 为不同电磁参数下 RPECT 热力胀形能力随接触区热量的变化情况.结果表明,无论是改变电流密度,还是改变电流频率,RPECT 调控过程的热、力贡献辊凸度随接触区热量的变化规

律均有不同,且均能够表现出两阶段变化特征.对于热贡献辊凸度而言,两阶段均存在凸度增长,但前一阶段增速大于后一阶段;对于力贡献辊凸度而言,两阶段增速关系则恰恰相反.值得注意的是,在力贡献辊凸度变化的第一阶段中,力凸度调控能力不随输入电流密度或电流频率而改变,即同一接触区热量下的力胀形能力相同.其原因在于,该阶段中的接触区热量普遍较低,且调控时长较短.此时辊内虽存在温度差异,但差异较小,仅表现为热贡献辊凸度的微小差异,还不至于造成各工况间的内约束机制差异.加之接触区热量相同,故力贡献辊凸度基本无差异.第二阶段经历了第一阶段的调控,辊内温升较前一阶段更强,辊内温度场已开始呈现两端扩散趋势,故热贡献辊凸度增速不及第一阶段;另外,第二阶段中轧辊内孔壁的温度较高,内约束机制增强,故力贡献辊凸度增速超过第一阶段.此外,由于不同电流输入参数下,同一接触区热量所对应的轧辊温升历程存在差异,最终使得不同电流输入下的力贡献凸度第二阶段变化曲线不再重合.

图7为不同电流密度和电流频率下力凸度占比随接触区热量变化情况.与图6数据变化原因

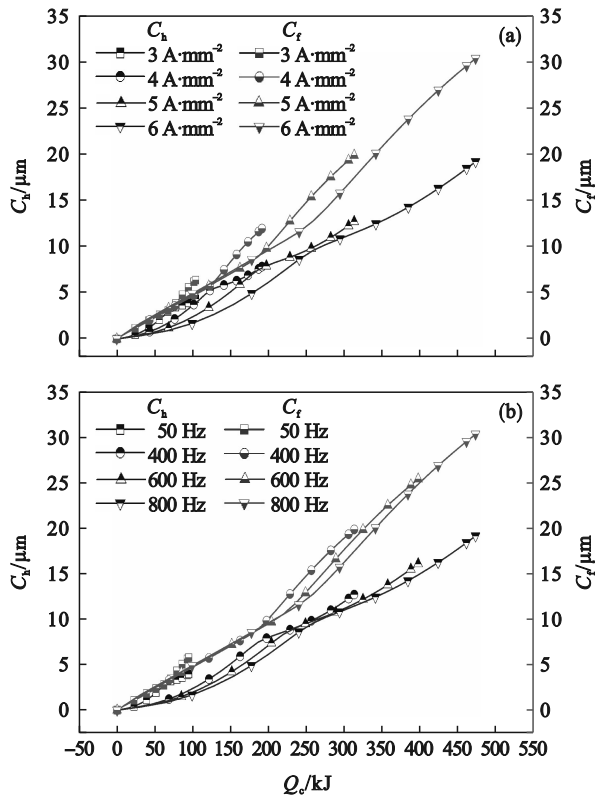


图6 不同电磁参数下热力胀形能力随 Q_c 变化情况
Fig. 6 Variation of thermal-force bulging ability with changing Q_c under different electromagnetic parameters
(a)—电流密度变动; (b)—电流频率变动.

相同,力凸度占比也存在两阶段变化.第一阶段表现为力凸度占比随接触区热量提升而降低,第二阶段则随接触区热量提升而增大.值得关注的是,电流密度或电流频率越大,则力凸度占比下降幅度越小.由此可见,若在调控前期使用更高的电流密度或者电流频率,一方面能够获得更强的力贡献辊凸度及力凸度占比,另一方面又能够大幅度提升RPECT目标辊形的构建速度.若进一步结合轧辊温度控制,则更有利于获得较高调控能力、即时响应及快速稳定的力贡献辊形.

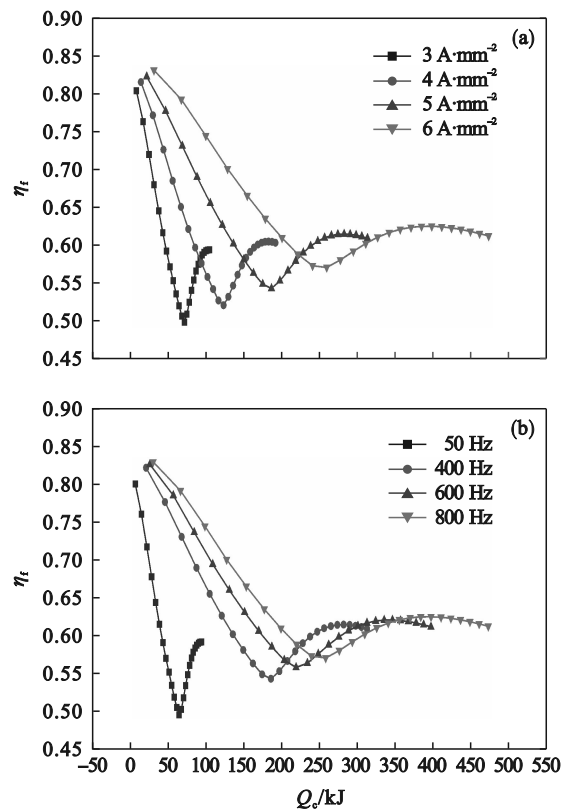


图7 不同电流密度和电流频率下 η_t 随 Q_c 变化情况
Fig. 7 Variation of η_t with changing Q_c under different current densities or frequencies
(a)—电流密度变动; (b)—电流频率变动.

3.2 元件温度场分析

基于3.1节分析结果,电流密度变动下的热力胀形行为与电流频率变动时具有相同的变化规律.其原因在于,电流密度变动或电流频率变动主要影响了感应热源的温升程度,故其对接触区温升具有相似的作用效果.由此,元件温度场分析仅以电流密度变动工况为例.根据图5结果,若需接触区热量达到100 kJ,则电流密度为3~6 A·mm⁻²的工况所需调控时间依次为480, 186, 100, 66 s.图8为接触区热量为100 kJ时不同电流密度工况的电磁棒温度场分布情况.结果表明,

接触区热量为 100 kJ 时各工况的接触区温度分布情况基本一致,而调控时间大幅缩短.结合图

6a 结果,此时各工况的力贡献辊凸度基本一致,胀形能力基本相同.

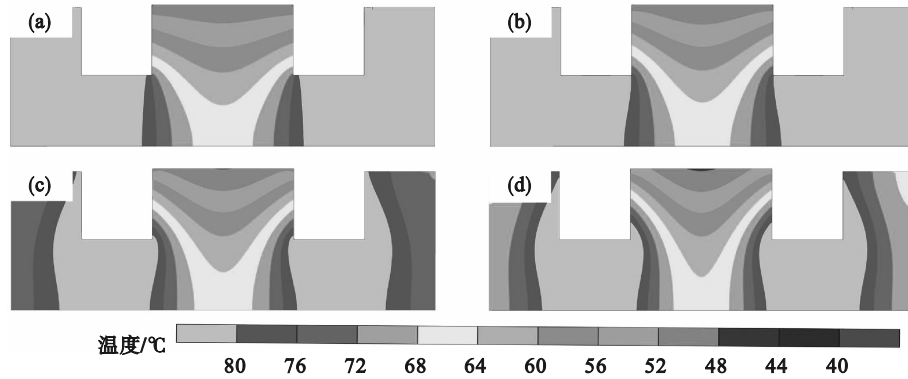


图 8 接触区热量为 100 kJ 时不同工况的电磁棒温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of ES under different working conditions when the heat of the contact zone is 100 kJ

(a)— $3 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ (480 s); (b)— $4 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ (186 s); (c)— $5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ (100 s); (d)— $6 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ (66 s).

若需接触区热量达到 300 kJ,仅电流密度 5 和 $6 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的工况能够实现,且需调控时间分别为 480 和 250 s.图 9 为接触区热量 300 kJ 时不同电流密度工况的电磁棒及轧辊温度场分布情况.结果表明,此时的电磁棒接触区温度分布情况基本一致,但轧辊温度完全不同.因前者调控时间约为后者的 2 倍,电流密度为 $5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的辊内温度高于电流密度为 $6 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的工况.由此产生了图 6a 的结果,因二者内约束机制差异,前者的力

贡献辊凸度大于后者.综合对比图 8 与图 9 不难看出,若需达到某一轧辊胀形目标值,采用更大的电流输入参数值,有利于短时间内获取目标值所需的接触区热量.同时,这种方法所造成的轧辊温升较小,力凸度占比高.此外,若仍采用较低的电流输入参数值来实现目标,则可借助轧辊温度控制手段进行辊温约束.辊温控制手段对胀形能力的影响已于文献[4, 12-13]中得以探讨,本文不再赘述.

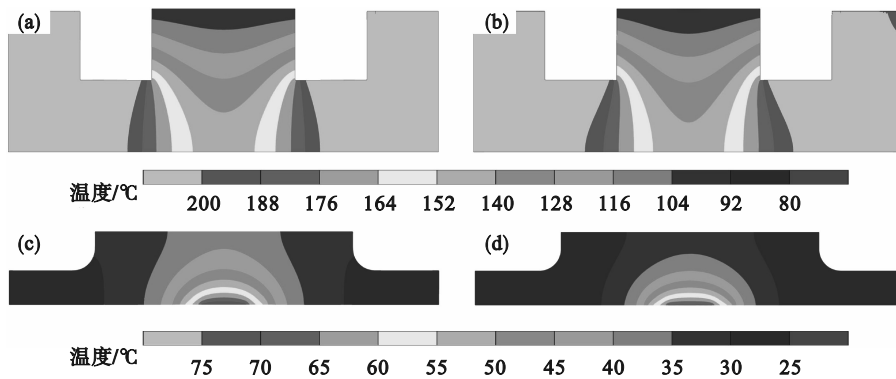


图 9 接触区热量 300 kJ 时不同电流密度工况的电磁棒及轧辊温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of ES and ECR under different current density when the heat of the contact zone is 300 kJ

(a)—电磁棒温度场 $5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ (480 s); (b)—电磁棒温度场 $6 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ (250 s);
(c)—轧辊温度场 $5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ (480 s); (d)—轧辊温度场 $6 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ (250 s).

3.3 热力胀形的高效控制策略

基于上述研究结果,提出快速驱动热力胀形的 RPECT 高效控制策略.在该控制策略中,优先采用较高的电流输入参数来驱动电磁棒短时间内获取较高的胀形温度,并于胀形能力达到需求后转入低参数控制.以辊缝调控需求 $20 \mu\text{m}$ 为例,单

个电磁调控辊的综合辊凸度调控量为 $10 \mu\text{m}$.根据图 5a 所示,若采用电流密度为 $3 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的电流密度输入,则需调控时间约为 460 s;若采用电流密度为 $6 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的电流密度输入,则调控时间基本降至 90 s.构建如图 10 所示的热力胀形高效控制策略,并以此进行热力胀形能力及元件温度场分析.

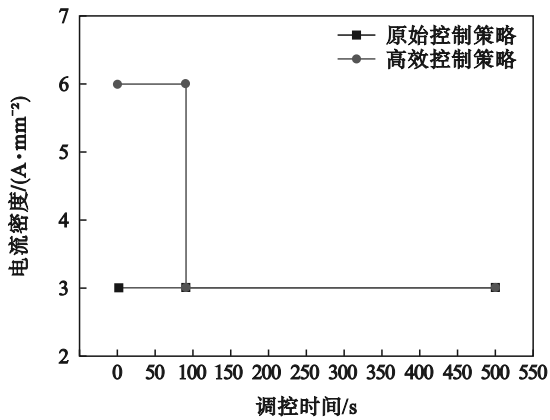


图 10 凸度目标为 10 μm 的 RPECT 热力胀形控制策略
 Fig. 10 Thermal-force bulging control strategy of RPECT when the target value of roll crown is 10 μm

根据图 10 所示的 RPECT 热力胀形控制策略,可获取调控过程中热力胀形能力的变化情况,如图 11 所示.结果表明,高效控制策略可在 90 s 时达到原始控制策略 460 s 时才具有的调控能力,调控时间缩短至原来的 19.57%.而高效控

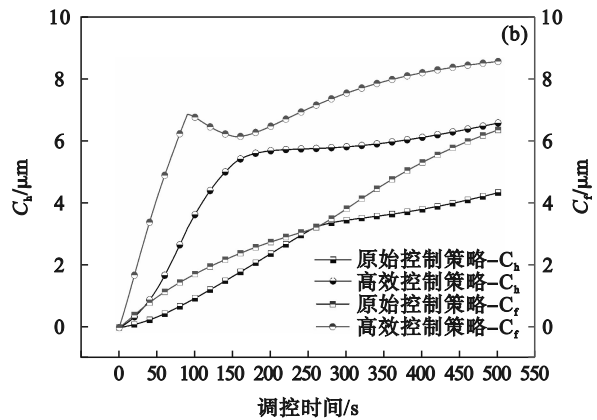
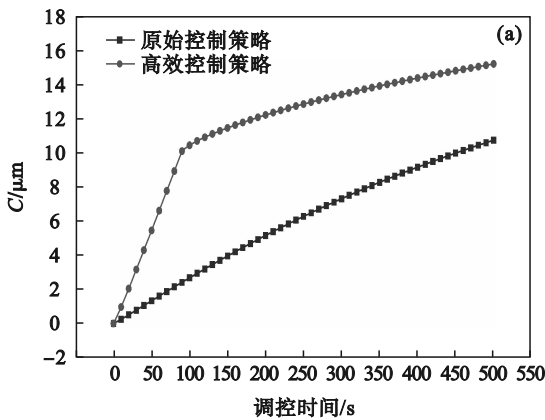


图 11 原始控制策略与高效控制策略的热力胀形能力
 Fig. 11 Thermal-force bulging ability of the original and efficient control strategies
 (a)—综合胀形能力; (b)—热力贡献凸度.

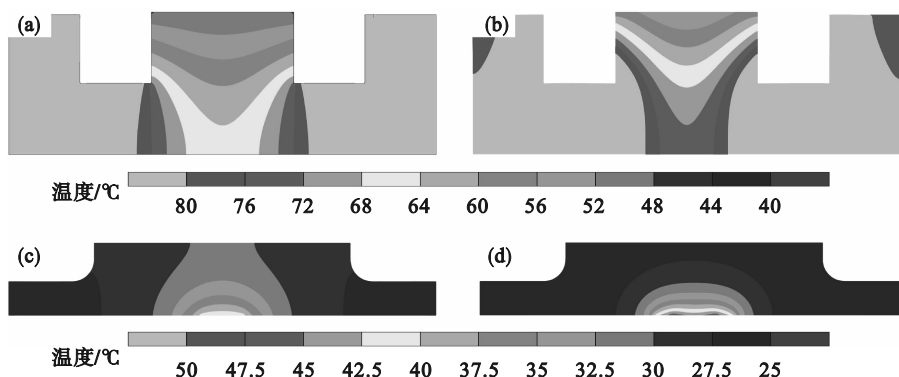


图 12 原始控制策略与高效控制策略的电磁棒及轧辊温度分布
 Fig. 12 Temperature distribution of ES and ECR of the original and efficient control strategies
 (a)—原始控制策略的电磁棒温度场; (b)—高效控制策略的电磁棒温度场;
 (c)—原始控制策略的电磁调控轧辊温度场; (d)—高效控制策略的电磁调控轧辊温度场.

制策略在 90 s 以后还会持续发挥作用,但辊凸度增幅略小于原始控制策略.此外,在热力贡献凸度方面可看出,90 s 时的高效控制策略与 460 s 时的原始控制策略中热力辊凸度的数值及比例存在差异.

为分析两控制策略中热力贡献辊凸度差异,获取 90 s 时高效控制策略与 460 s 时原始控制策略的电磁棒与轧辊温度场,如图 12 所示.结果表明,高效控制策略的接触区温度水平高于原始控制策略,而前者的轧辊温度水平弱于后者.其原因在于,二者调控时间差异造成原始控制策略的轧辊传入热量大于高效控制策略,即此时原始控制策略的热贡献辊凸度大于高效控制策略.为了在此基础上产生相同的综合胀形效果,故需提升高效控制策略的力贡献辊凸度,造成了图 11b 所示的差异.此外,若在此基础上对轧辊采用辊温控制策略,则能够对热贡献辊凸度进行约束控制,进一步增加力贡献辊凸度在综合凸度中的占比,最终促进 RPECT 辊形的高效控制.

4 结 论

1) RPECT热力胀形的实质在于电磁调控轧辊和电磁棒接触区的温度控制,其元件的温升顺序决定了热力胀形行为的时序特性.通过合理配置热、力贡献辊凸度的比例关系,能够实现短时迅速的辊形调节.

2) 低电流输入参数工况下,接触区热量可直接衡量RPECT的热力胀形能力;高电流输入参数工况的热力胀形描述需综合考虑轧辊温升影响,但这一影响可通过RPECT的辊温控制来减弱.在接触区热量较低的范围内,不同电流输入参数下同一接触区热量所对应的力贡献辊凸度相等,可通过对接触区热量的调节,实现不同调控参数间的等效.

3) 基于RPECT的热力胀形特性和接触区热量的映射关系,提出了快速驱动热力胀形的RPECT高效控制策略.以 $20\ \mu\text{m}$ 的辊缝凸度调控需求为例,该策略可将调控时间缩短至原时长的19.57%,且确保高效控制策略下的电磁调控轧辊仍具有预期的胀形能力.

参考文献:

- [1] 何安瑞,邵健,孙文权,等.板形控制理论与实践[M].北京:冶金工业出版社,2016.
(He An-ru, Shao Jian, Sun Wen-quan, et al. Theory and practice of shape control [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016.)
- [2] 徐乐江.板带冷轧机板形控制与机型选择[M].北京:冶金工业出版社,2007.
(Xu Le-jiang. Flatness control in cold strip rolling and mill type selection [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.)
- [3] 杜凤山,刘文文,冯岩峰,等.精密轧机的辊型电磁调控工艺参数[J].工程科学学报,2017,39(12):1874-1880.
(Du Feng-shan, Liu Wen-wen, Feng Yan-feng, et al. Roll profile electromagnetic control process parameters in precision rolling mill [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(12): 1874-1880.)
- [4] Liu W W, Feng Y F, Yang T S, et al. Analysis of the induction heating efficiency and thermal energy conversion ability under different electromagnetic stick structures in the RPECT [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 145: 277-286.
- [5] Feng Y F, Liu W W, Yang T S, et al. A flexible electromagnetic control technique for interference adjustment in large-size sleeved backup rolls [EB/OL]. (2019-05-21) [2022-08-08]. <https://doi.org/10.1051/metal/20181122>.
- [6] 王海军,刘文文,杨庭松,等.轧辊非均质特性对辊型电磁调控的影响分析[J].钢铁,2019,54(10):45-51.
(Wang Hai-jun, Liu Wen-wen, Yang Ting-song, et al. Analysis of influence of roller heterogeneity on roll profile electromagnetic control technology [J]. Iron and steel, 2019, 54(10): 45-51.)
- [7] 渠福泉,李旭,张宇峰,等.冷轧工作辊热凸度及其对板形影响[J].中国冶金,2022,32(4):84-93.
(Qu Fu-quan, Li Xu, Zhang Yu-feng, et al. Thermal crown of cold rolling work roll and its effect on strip shape [J]. China Metallurgy, 2022, 32(4): 84-93.)
- [8] 程志彦,张亚震,刘亚星,等.二次冷轧过程工作辊温度场计算及影响因素[J].塑性工程学报,2021,28(9):217-227.
(Cheng Zhi-yan, Zhang Ya-zhen, Liu Ya-xing, et al. Calculation and influence factors of temperature field of work roll in secondary cold rolling process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(9): 217-227.)
- [9] 李伟民,仇平.VC轧辊板形控制的力学原理[J].中国机械工程,2011,22(24):2990-2992.
(Li Wei-min, Qiu Ping. Mechanics principle of controlling trip shape by means of VC roll [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(24): 2990-2992.)
- [10] 刘志亮,李文强,王英杰.动态板形辊平整机板形控制机理模型研究[J].中国机械工程,2011,22(13):1624-1628.
(Liu Zhi-liang, Li Wen-qiang, Wang Ying-jie. Research on shape control model for DSR skin mill [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(13): 1624-1628.)
- [11] Liu W W, Feng Y F, Sun J N, et al. Analysis of thermal-mechanical problem in the process of flexible roll profile electromagnetic control [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 120: 447-457.
- [12] Yang T S, Wang Y W, Wang H J, et al. Research on an external adjustment method for RPECT roll profiles based on the segmented cooling principle [EB/OL]. (2021-12-20) [2022-08-24]. <https://doi.org/10.1051/metal/2021098>.
- [13] Hai Y, Yang T S, Wang H J, et al. Roll profile preset and control based on electronic temperature control technology [EB/OL]. (2022-08-18) [2022-10-03]. <https://doi.org/10.1051/metal/2022066>.
- [14] Yang T S, Chen Q F, Feng Y F, et al. Experimental validation and numerical simulation of flexible and microscale roll gap control technology [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120: 5741-5754.
- [15] Yang T S, Bai Y H, Hai Y, et al. Roll profile electromagnetic control characteristics under roll heterogeneity [J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2022, 29: 1927-1938.
- [16] Yang T S, Liu J Y, Ren X Y, et al. Research on roll profile electromagnetic control ability in optimal electromagnetic stick parameter [EB/OL]. (2021-04-21) [2022-05-07]. <http://doi.org/10.1051/metal/2021031>.
- [17] Stolbchenko M, Grydin O, Samsonenko V, et al. Numerical analysis of the twin-roll casting of thin aluminium-steel clad strips [J]. Forschung Im Ingenieurwesen-Engineering Research, 2014, 78(3): 121-130.