

铜合金带材气垫式热处理过程漂浮形态的数值模拟

石浩强, 李家栋, 赵鹏, 李勇

(东北大学 数字钢铁国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 基于东北大学中试气垫炉的几何模型和实验数据,建立了流固耦合模型,研究了气垫炉中带材漂浮形态的影响因素.结果表明:该模型能够准确模拟不同影响因素下铜带材在气垫炉内的漂浮形态.气垫压力、带材张力、带材厚度是带材漂浮形态的主要影响因素,改变带材上、下表面的气垫压力,带材变形量会明显减少或增大;薄带材的张力每增加一倍,带材的上、下喷嘴附近的最大变形减小为原来1/2;带材厚度每增加0.5 mm,在相同的带材表面气垫压力下,带材的最大变形量显著减小.气垫炉内温度是次要因素,炉温不同,但带材的表面上、下气垫压力相同,带材变形量近似相等.该数值模拟为研究气垫炉内带材悬浮过程中的变形机理提供了新的手段和思路.

关键词: 流固耦合模型;气垫压力;漂浮形态;带材张力;带材厚度

中图分类号: TG 155.1+2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)04-0024-09

Numerical Simulation of Floating Morphology of Copper Alloy Strip in Air Cushion Heat Treatment Process

SHI Hao-qiang, LI Jia-dong, ZHAO Peng, LI Yong

(State Key Laboratory of Digital Steel, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SHI Hao-qiang, E-mail: shihaoqiang283@163.com)

Abstract: Based on the geometric model and experimental data of the pilot air cushion furnace at Northeastern University, a fluid-structure coupling model was established to investigate the factors affecting strip floating morphology in the air cushion furnace. The results show that the model can accurately simulate the floating morphology of copper strips in air cushion furnace under different influencing factors. Air cushion pressure, strip tension, and strip thickness are the main influencing factors of strip floating morphology; the deformation of the strip will decrease or increase significantly when the air cushion pressures above and below the strip surface are changed. When the tension of thin strip is doubled, the maximum deformation near the lower and upper nozzles of the strip is reduced to 1/2 of the original value. When the thickness of the strip increases by 0.5 mm, the maximum deformation of the strip decreases significantly under the same surface air cushion pressure. The temperature in the air cushion furnace is a secondary factor. The furnace temperature is different, but the air cushion pressures on the surface and under the strip are the same, and the strip deformation is approximately the same. The numerical simulation provides a new method and idea for studying the deformation mechanism of strip suspension in air cushion furnaces.

Key words: fluid-structure coupling model; air cushion pressure; floating morphology; strip tension; strip thickness

高精度铜带在集成电路、电磁屏蔽、柔性印刷电路板等领域得到了广泛应用.随着交通运

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2019JZZY010401); 南宁市科技重大专项项目(20201041).

作者简介: 石浩强(1997—),男,河南洛阳人,东北大学硕士研究生;李家栋(1983—),男,辽宁营口人,东北大学副教授,硕士生导师,博士.

输、电子信息、电力、能源、航空航天及现代建筑业的快速发展,不仅扩大了高精度铜带的产品品种,而且对铜带材表面热处理质量提出了更高的要求^[1].在气垫炉中,铜带材不与炉内任何构件接触,因此可以生产出高性能、高表面质量、高合金化、晶粒细化的铜合金带材^[2-3].

带材漂浮形态的控制是气垫炉的关键技术之一,带材的漂浮形态对带材表面质量、对流传热系数具有重要影响,因此对漂浮形态影响因素的研究具有十分重要的意义.陈文修等^[4]通过理论分析与试验指出,动压喷嘴可以在带材表面形成射流冲击力来托举带材.Chang等^[5]通过壁面射流理论与试验研究了气垫炉内圆形喷嘴射流冲击板材,总结出压力系数经验公式,并验证了该公式.Ozmen^[6]通过试验得到了特定条件下双狭缝喷嘴射流冲击板材的压力系数.Kathuria等^[7-8]通过理论和试验研究,总结出了喷嘴结构参数、喷嘴压力,喷嘴入口速度和漂浮高度之间的关系式.侯帅等^[9-10]通过模拟狭缝喷嘴与圆形喷嘴射流冲击过程,得到不同喷嘴结构对喷嘴产生的气垫压力与对流传热的影响.王占军等^[11]通过对气垫炉中带材漂浮形态的模拟,得到了在不同边界条件及工艺参数下炉内的流场及压力分布.Hao等^[12]通过对流体冲击板材的研究,分别对固体、流体、接触面采用拉格朗日-欧拉法进行畸变与应力计算.宋晓娟等^[13]通过研究薄壳弹性理论与流体力学的基本方程,给出了浅拱形薄壳在流体作用下的变形与应力的变化规律.周小利等^[14]通过研究薄壳弹性理论与流体力学的基本方程,总结了圆柱壳在流体中流固耦合问题的关系式,讨论了相关参数的改变对圆柱壳变形和表面压力系数的影响.Cho^[15]研究了单个双缝喷嘴与塑料带材的流固耦合过程.Moretti^[16]通过研究长带材与多个喷嘴相互耦合的带材横向变形问题,得出通过调整喷嘴的倾斜角度对带材的横向变形量影响不大.

本文采用Ansys Workbench中的网格划分(ICEM CFD)、流体仿真(Fluent)及稳态静力学分析模块,对铜带材在气垫式热处理过程中漂浮形态进行了数值模拟研究分析,获得了不同气垫压力、带材张力、带材厚度及气垫炉内温度等因素对漂浮形态的影响,以期模拟结果对气垫炉中带材漂浮形态的研究及实际生产提供一定的指导.

1 铜带材漂浮模拟仿真平台的建立

1.1 带材在气垫炉内稳定漂浮的机理

带材进入气垫炉后,受到上、下喷箱中喷嘴喷出的高速气流作用,在带材与喷嘴之间形成气垫压力,托举带材悬浮于空气中,宏观上满足式(1).由于上、下喷箱是交错分布的,所以带材的漂浮形态受到气垫炉排布方式的影响,在气垫炉内,带材大致呈现出正弦形态,为保证带材在炉内悬浮过程中不与上下喷嘴接触而刮伤,带材向上、向下的最大变形量应满足式(2),式(3).

$$P_1 - P_2 = G. \quad (1)$$

式中: P_1 为带材下表面的气垫压力; P_2 为带材的上表面的气垫压力; G 为带材的自身重力.

$$h - h_1 > 0, \quad (2)$$

$$h + h_2 < H. \quad (3)$$

式中: h 为带材的漂浮高度; h_1 与 h_2 分别为带材向下、向上的最大变形量; H 为气垫炉上下两个喷嘴的间距.

1.2 气垫炉虚拟仿真平台的建立

基于中试气垫炉建立虚拟仿真平台,图1为东北大学中试气垫炉照片.采用NX1.0绘制气垫喷嘴模型,使用ICEM CFD进行非结构化网格划分,如图2所示.由于喷箱由多个并列排布,故在Z轴方向两侧的矩形面采用平移周期性网格,以便简化模型及减少计算时间.模型网格最大尺寸设为40 mm,喷孔等局部位置模型结构比较复杂,需适当减小网格尺寸,以得到更好的网格质量,故尺寸设为10, 4, 2 mm.以上参数形成的网格质量大于0.4;非结构化网格的质量达到0.3以上即可满足Fluent仿真计算的要求.



图1 东北大学中试气垫炉

Fig. 1 Pilot air cushion furnace at Northeastern University

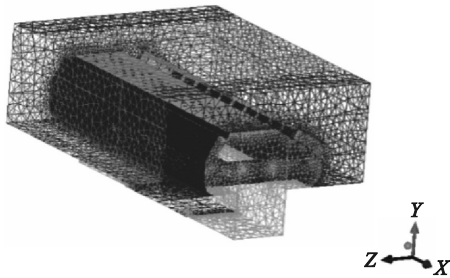


图2 气垫炉喷嘴模型

Fig. 2 Air cushion furnace nozzle model

2 流固耦合模型

2.1 流固耦合模型的建立

带材在气垫炉内受到来自上、下喷嘴不同的射流冲击力而呈现出不同形态,因此将 Fluent 计算获得的压力数据导入 Static Structural 中进行漂浮形态分析.建立的流固耦合模型如图 3 所示,通过查阅文献及结合本问题的实际情况,模型的边界条件设置为:整体施加重力场;带材一侧设为固定约束,另一侧设远端约束与均匀张力;上、下表面分别导入相应漂浮高度的气垫压力 Fluent 数据.

2.2 流固耦合模型验证

带材形态模拟结果由 Static Structural 模拟计

算后获得,如图 4 所示.实验带材漂浮形态是通过现场炉内拍摄的漂浮录像抓取获得,如图 5 所示,子标题中 10-20 的含义为上风机频率为 10 Hz,下风机频率为 20 Hz.

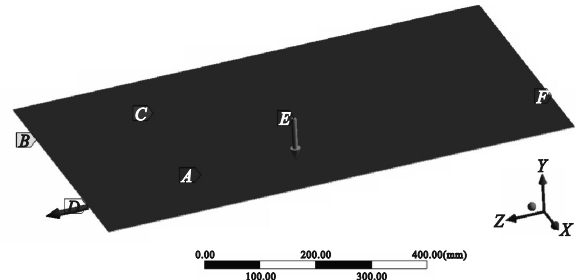


图3 带材流固耦合模型

Fig. 3 Strip fluid-structure interaction model

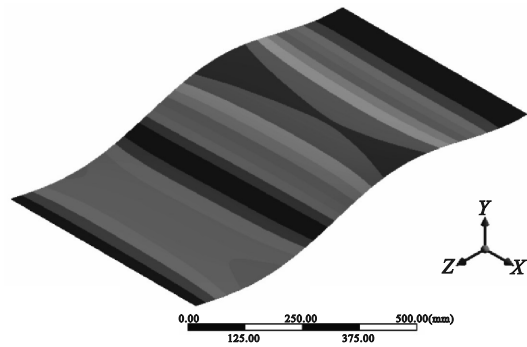


图4 带材形态模拟结果

Fig. 4 Strip morphology simulation results

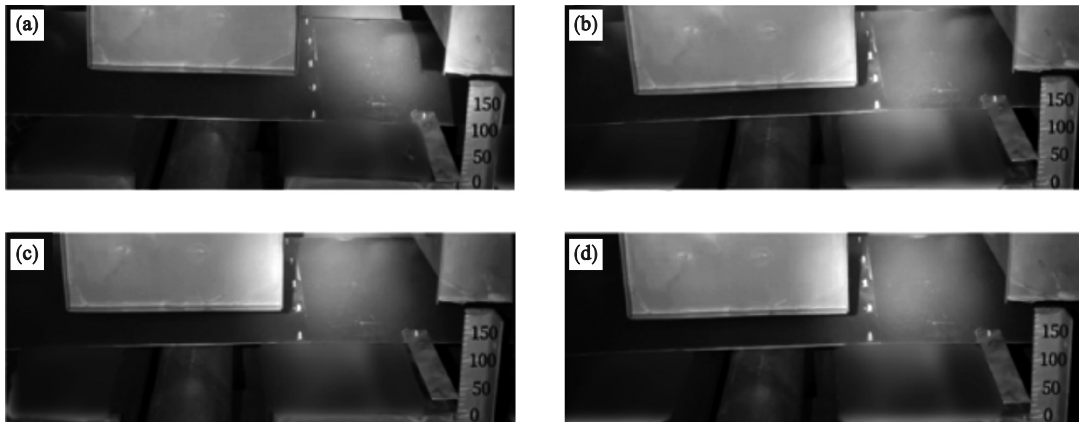


图5 1 mm 厚配重 50 kg 带材漂浮形态

Fig. 5 1 mm thick counterweight 50 kg strip floating morphology

(a)—10-20; (b)—20-30; (c)—35-40; (d)—50-50.

由图 5 可以看出,带材的漂浮形态与气垫炉上、下风机的频率及施加在带材两端的张力相关.随着气垫炉上、下风机频率增大,带材向上、向下的变形量增加.若气垫炉上、下风机频率的差值过大,则会使得带材在气垫炉内出现上下翻滚的现象,从而导致带材漂浮不稳定.因此要选

用合适的上、下风机频率以提高炉内带材漂浮的稳定性.随着施加在带材两端张力的增大,气垫炉内的带材不易出现较大的变形,合适的气垫张力会使带材形成正弦形态,有利于带材形态漂浮稳定.由图 4 和图 5 可知,带材的变形方式相似,所建立的带材流固耦合模型与实际情况相符.

3 结果分析及讨论

3.1 带材漂浮形态影响因素

影响带材漂浮形态的主要因素有气垫压力分布、带材张力与带材尺寸,因此需要对这些因素进行详细的模拟分析.在流固耦合分析中,需

要将 Fluent 计算得到的不同漂浮高度的压力数据导入 Static Structural.带材的漂浮高度及上、下循环风机风速的选择需要满足上、下喷嘴距离带材的高度之和为 200 mm,且上、下喷嘴施加于带材的气垫压力差与带材自身压力相等.分析使用的 Fluent 模拟结果如表 1 所示;流固耦合模型如图 6 所示.

表 1 应用于流固耦合的带材压力数据
Table 1 Strip pressure data for fluid-structure interaction

组别	带材规格	下、上喷嘴高度/mm	下、上喷嘴风速/(m·s ⁻¹)	带材下表面气垫压力/Pa	带材上表面气垫压力/Pa	带材压力差/Pa	带材自身压力/Pa
1	0.5 mm 铜带材 3-3, 27 °C	90-110	20.52-17.10	191.59	126.43	65.17	61
2	1.0 mm 铜带材 3-3, 27 °C	90-110	27.37-0.94	360.88	244.54	116.34	122
3	1.0 mm 铜带材 3-3, 27 °C	90-110	20.52-17.10	191.59	5.43	139.17	122
4	1.5 mm 铜带材 3-3, 27 °C	90-110	20.52-17.10	191.59	19.66	171.93	183
5	0.5 mm 铜带材 3-3, 600 °C	80-120	34.20-30.78	191.71	128.35	6.35	61

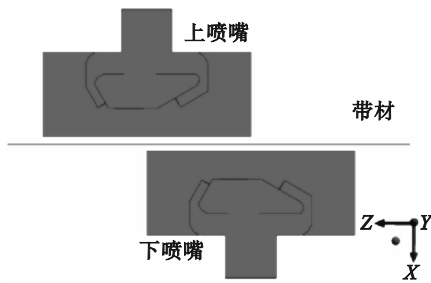


图 6 流固耦合模型

Fig. 6 Fluid-structure interaction model

3.1.1 气垫压力对漂浮形态的影响

选用表 1 中的第 2 组和第 3 组进行流固耦合模拟分析气垫压力分布对漂浮形态的影响.两组除了上、下喷嘴的风速不同外,其他影响因素均

相同,带材的边界条件设置如下:整体施加重力场 $g=9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,位于 Z 轴负方向带材侧面设为固定端约束,另一侧设为远端约束控制 5 个自由度,仅留下 Z 轴方向自由度;同时施加均匀带材张力为 $F=1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,带材的上、下表面分别导入相应漂浮高度的气垫压力 Fluent 数据,并设置为流固耦合面,在计算过程中开启大变形模型 (large deflection).大变形模型综合了带材在发生变形后刚度矩阵的重建,使得受力符合实际情况,提升了计算精度,故对于非线性计算的案例中应当开启大变形模型.第 2 组和第 3 组在两种压力条件下的带材变形结果如图 7 所示.

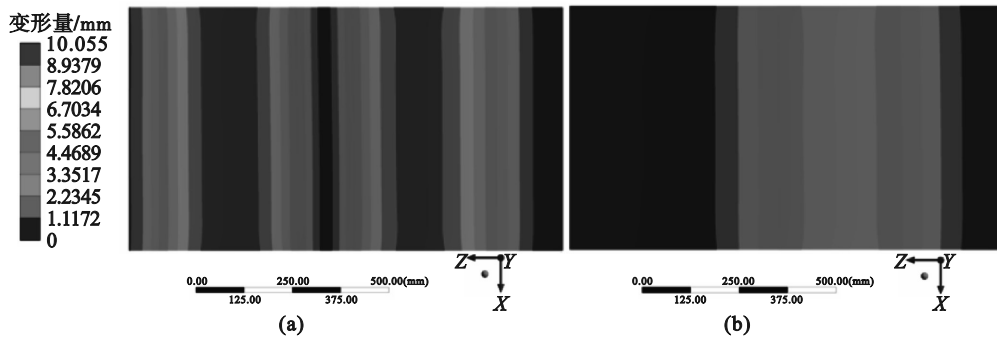


图 7 第 2,3 组压力分布对带材变形影响模拟结果

Fig. 7 Second and third groups of pressure distribution affect the deformation of strip to simulate the results

(a)—第 2 组; (b)—第 3 组.

从流固耦合结果可以看出,图 7a 中带材在上、下喷嘴中心位置形成的向上、向下最大变形量为 10.06 mm,带材呈现正弦形态;图 7b 中带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为

6.70 mm,在上喷嘴中心位置形成的向下最大变形量为 1.12 mm,仅在下喷嘴处产生较大变形,上喷嘴处并未发生明显变形.通过对比分析,在其他影响因素相同的情况下,带材上、下表面

受到的气垫压力越大,带材向上、向下的变形也越大.总之,气垫压力能够有效地控制带材形态,通过调节带材上、下表面的气垫压力,可以合理地控制带材的变形量,从而防止带材与喷嘴接触而划伤,同时有利于带材在气垫炉中的漂浮稳定与对流换热.

3.1.2 带材张力对漂浮形态的影响

气垫炉前、后的张力辊组会给气垫炉内热处理的带材施加以合适的张力,从而能够合理地控制带材形态并使其保持漂浮稳定,其数量级约为 $1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.使用表 1 中的第 1 组数据进行流固

耦合模拟,分析带材张力对漂浮形态的影响.本组数据仅选用不同的带材张力,其他影响因素均相同,带材的边界条件设置如下:整体施加重力场 $g=9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,位于 Z 轴负方向的带材侧面设置为固定端约束,另一侧设置为远端约束控制 5 个自由度,仅留下 Z 轴方向自由度,同时施加均匀带材张力 $F=1, 2$ 和 $4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,带材的上、下表面分别导入相应漂浮高度的气垫压力 Fluent 数据,并设置为流固耦合面,在计算过程中开启大变形模型.3 种不同张力下带材的变形结果,如图 8 所示.

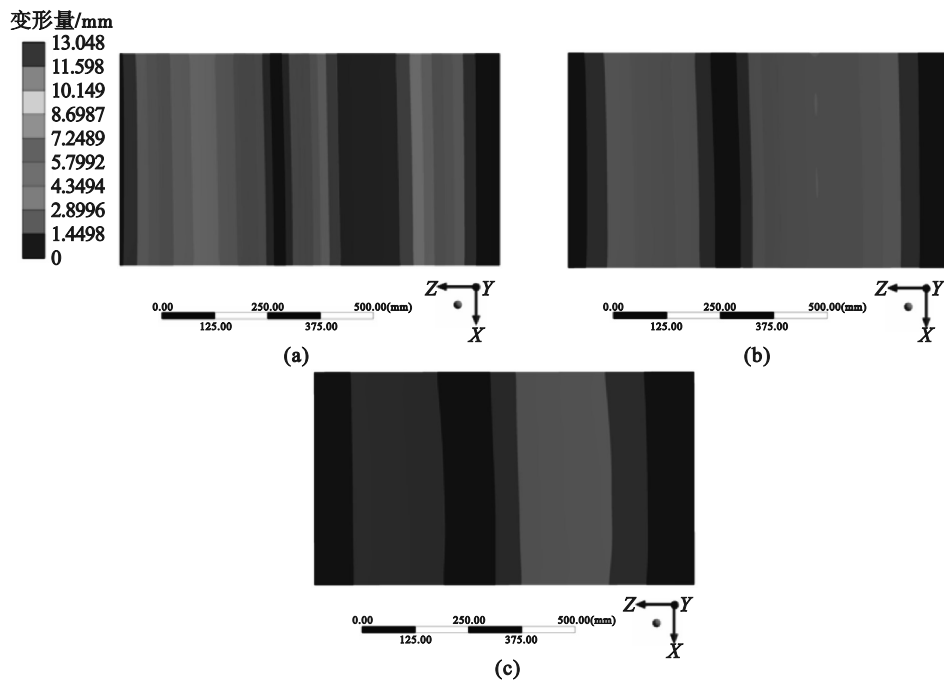


图 8 第 1 组带材张力对带材变形影响的模拟结果

Fig. 8 First group of strip tension affects the simulation results of strip deformation

(a)— $F=1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$; (b)— $F=2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$; (c)— $F=4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.

从流固耦合结果可以看出,图 8a 中带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为 13.05 mm ,在上喷嘴中心位置形成的向下最大变形量为 10.15 mm ;图 8b 中带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为 7.25 mm ,在上喷嘴中心位置形成的向下最大变形量为 5.78 mm ;图 8c 中带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为 4.35 mm ,在上喷嘴中心位置形成的向下最大变形量为 2.90 mm .通过对比分析发现,带材所受到的张力越大,其向上、向下的变形量就越小,随着带材张力每增加一倍,带材的变形量近似减少为原来的一半.带材在气垫炉内需要克服自身重力及施加在带材两端的张力才能产生变形,在相同的带材压力条件下,增加带材两端的张力,带材

发生向上、向下的弹性变形就更加不易,因此可以通过改变带材张力来控制薄带材的形态.

3.1.3 带材厚度对漂浮形态的影响

带材进入气垫炉后,受到来自上、下喷嘴射流冲击力的作用而发生变形,但越厚的带材在受到相同的气垫压力时变形越困难.选取表 1 中第 1 组、第 3 组和第 4 组数据进行流固耦合模拟,分析带材厚度对漂浮形态的影响.带材的厚度分别为 $0.5, 1.0, 1.5 \text{ mm}$,选取的 3 组模拟数据除了带材厚度不同外,其他影响因素尽量保持一致,并满足上、下喷嘴施加于带材的压力差与带材所受压力相等;第 3 组模拟数据的带材上表面压力有些差异,故仅研究下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量.边界条件设置如下:整体施

加重力场 $g=9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,位于Z轴负方向的带材侧面设置为固定端约束,另一侧设置为远端约束控制5个自由度,仅保留Z轴方向自由度,同时施加均匀带材张力 $F=1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,带材的上、下表面

分别导入相应漂浮高度的气垫压力Fluent数据,并设置为流固耦合面,计算过程中开启大变形模型.3种不同厚度带材的变形结果如图9所示.

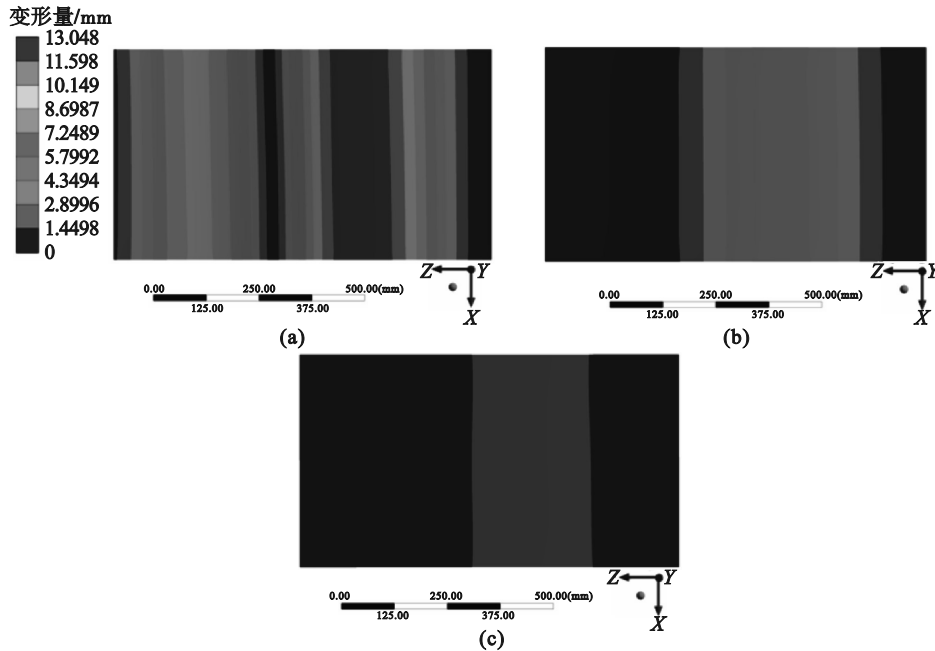


图9 第1组、第3组和第4组带材厚度对带材变形影响模拟结果

Fig. 9 Simulation results of the influence of strip thickness on strip deformation in groups 1, 3 and 4
(a)—0.5 mm; (b)—1.0 mm; (c)—1.5 mm.

从流固耦合结果可以看到,图9a中带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为13.05 mm;图9b中带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为7.25 mm;图9c中带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为2.90 mm.通过对比分析发现,带材越厚,其向上的变形量就越小,随着带材厚度每增加0.5 mm,带材的变形量有明显的减小.这是因为带材越厚,相同的下表面气垫压力需要抵消更大的带材自身重力,从而使得带材形成变形的难度增大.在气垫炉处理较厚的铜带材时,需要更大的喷嘴入口速度,以保证带材能稳定漂浮在合理高度及并实现良好的对流换热,从而获得高质量的铜带材产品.

3.1.4 气垫炉内温度对漂浮形态的影响

铜带材的常用热处理温度为600℃,因此,选用表1中第1组与第5组进行流固耦合模拟分析气垫炉内温度对漂浮形态的影响.边界条件设置如下:第1组炉温为27℃,第2组炉温为600℃,整体施加重力场 $g=9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,位于Z轴负方向的带材侧面设置为固定端约束,另一侧设置远端约束控制5个自由度,仅保留Z轴方向的自

由度,同时施加均匀张力 $F=1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,带材的上、下表面分别导入相应漂浮高度的气垫压力Fluent数据,并设置为流固耦合面,计算过程中开启大变形模型.2种不同炉温条件下,带材的变形结果如图10所示.

从流固耦合结果可以看到,图10a中带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为13.05 mm,带材在上喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为10.15 mm;图10b中带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为13.05 mm,带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为10.15 mm.通过对比分析发现,热处理温度由27℃增加到600℃,带材的向上、向下的变形并未发生明显变化.温度的升高改变了气垫炉内空气密度、比热容、黏度等物理参数,影响了气垫压力,进而对带材的变形量产生影响.因此,影响带材漂浮形态的关键因素还是气垫压力,在同样的气垫压力下,温度对于带材变形所产生的影响可以忽略,使得室温条件下研究带材漂浮形态的理论可以对高温条件下的研究提供很好的指导.

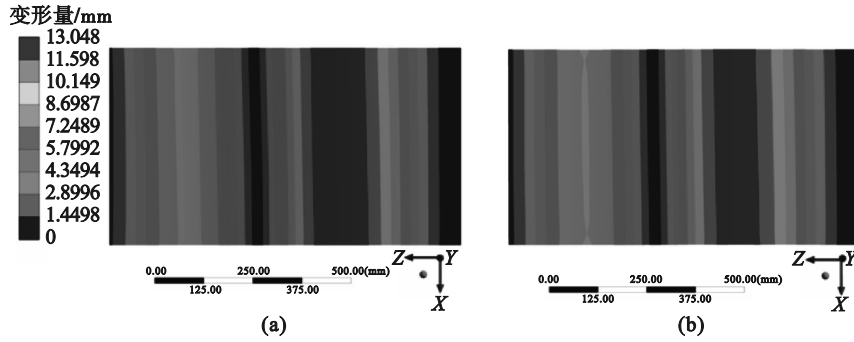


图 10 第 1 组和第 5 组气垫炉温度对带材变形影响模拟结果

Fig. 10 Simulation results of the influence of the air cushion furnace temperature on strip deformation in groups 1 and 5

(a)—27 °C; (b)—600 °C.

3.1.5 带材约束方式对漂浮形态的影响

气垫炉前、后的张力辊组会给气垫炉内热处理的带材施加以合适的张力,从而能够保持带材稳定并使其向前运动,但东北大学中试气垫炉的实验方法是静态分析,即带材一侧悬挂重物替代张力,另一侧将带材固定后进行实验数据采集,故需要对实验炉中带材的约束方式和对应的漂浮形态进行研究.选用表 1 中第 5 组进行流固耦合模拟,分析气垫炉内带材约束方式对其漂浮形态的影响.边界条件设置如下:整体施加重力场 $g=9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,① 位于 Z 轴负方向带材侧面设置为

固定端约束,另一侧设置为远端约束控制 5 个自由度,仅保留 Z 轴方向自由度,同时施加均匀带材张力 $F=1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,② 位于 Z 轴正方向的带材侧面设置为固定端约束,另一侧设置施加远端约束控制 5 个自由度,仅保留 Z 轴方向自由度,同时施加均匀带材张力 $F=1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,带材的上、下表面分别导入相应漂浮高度的气垫压力 Fluent 数据,并设置为流固耦合面,计算过程中开启大变形模型.2 种不同约束条件下,带材的变形结果如图 11 所示.

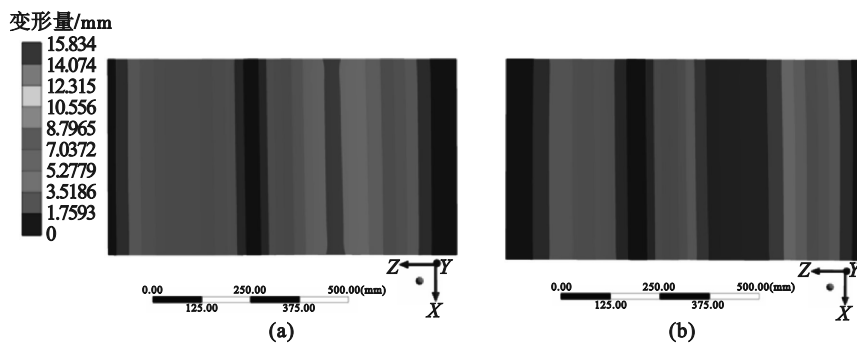


图 11 第 5 组带材约束方式对带材变形影响模拟结果

Fig. 11 Simulation results of the strip restraint method affects on the strip deformation in groups 5

(a)—Z 轴负方向固定约束; (b)—Z 轴正方向固定约束.

从流固耦合结果可以得到,图 11a 中带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为 13.50 mm,在上喷嘴中心位置形成的向下最大变形量为 8.80 mm;图 11b 中带材在下喷嘴中心位置形成的向上最大变形量为 15.83 mm,向下最大变形量为 7.04 mm.通过对比分析发现,固定端约束方式的不同对带材向上、向下的变形有一定的影响.由于带材变形实质是带材上、下表面压力克服带材自身重力及带材张力的综合结果,当带材变形位置靠近固定约束一端时,带材无法运

动,因此产生的变形量比施加带材张力时产生的变形量要小.因为实验气垫炉及 Static Structural 都无法模拟铜合金带材进入气垫炉内的实际漂浮形态,因此需要对 2 种带材的约束方式分别进行分析,以便对实际情况下的带材生产研究提供指导.

3.2 带材漂浮形态控制的综合分析

综合上述对带材漂浮形态各影响因素的分析结果,总结如表 2 所示.

表2 影响带材漂浮形态的因素总结
Table 2 Summary of factors affecting the floating morphology of the strip

影响因素	作用方式	板形控制应用
气垫压力	气垫炉喷嘴喷射的高速气流在带材表面形成气垫压力,托举带材悬浮在空气中并使得带材发生近似正弦形变形,是产生变形的关键	满足带材漂浮的前提下,通过调整带材的上、下气垫压力来控制带材的变形
带材张力	气垫炉前与炉后的张力辊组施加在带材前进方向两端的微张力	增大带材的张力可以降低带材的变形量,有利于薄带材的板形控制
带材材料、厚度	带材的材料和厚度由工厂的生产工艺确定,其通过改变带材的密度和刚度等物理参数来影响板形	对于较厚带材和刚度较高的带材无法形成合理的变形,可以调整其他影响因素
漂浮高度	控制带材在不同的漂浮高度,以获得不同的带材压力	气垫炉可以提供的气垫压力相对固定,通过改变漂浮高度可以更好地适配不同带材的要求,但要保持带材与上、下喷嘴的安全距离
炉内温度	由带材热处理工艺确定	炉温通过影响带材压力进而影响板形

综合分析以上影响因素对板形的影响,可以对气垫炉内带材的实际生产进行指导.例如,对于宽度 500 mm、厚度 1 mm 的铜带材,在某一生产工艺参数下未能发生明显变形或者发生较大变形时,可以通过调整上、下喷嘴入口的速度来改变带材上、下表面的气垫压力,以便获得良好的漂浮形态,从而获得高质量的铜带材产品.

4 结 论

1) 控制气垫压力可以有效控制带材变形,进而获得稳定的漂浮形态.铜带材下、上表面分别施加气垫压力为 360.887 2, 244.543 3 Pa,带材的下、上喷嘴附近最大变形量均为 10.055 mm;改变下、上表面气垫压力分别为 191.599 8, 52.427 51 Pa,带材的下、上喷嘴附近最大变形量分别为 6.703 4, 1.117 2 mm.

2) 控制带材张力可以有效控制薄带材的变形量.对于厚 0.5 mm 铜带材,带材张力分别设置为 $F=1, 2$ 和 $4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,带材的变形量会随着带材张力每增加一倍,近似减少为原来的 1/2.

3) 增加带材厚度可以产生较小变形量.在相同带材下表面气垫压力条件下,当带材的厚度分别为 0.5, 1.0, 1.5 mm 时,随着带材厚度的增加,带材的变形量显著减小.

4) 温度对带材的变形没有明显的影响.气垫炉炉温分别为 27, 600 °C,但具有近似相同的气垫压力,2 种条件下带材变形量相似,这使得在常温下关于带材漂浮形态的研究结果可以应用于高温环境.

参考文献:

- [1] 田军涛. 气垫式连续退火炉在高精度铜带生产中的应用[J]. 有色冶金设计与研究, 2009, 30(4): 38-41.
(Tian Jun-tao. Application of air-cushion continual annealing furnace in production of high precision copper strip [J]. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, 2009, 30(4): 38-41.)
- [2] 苏晓莉, 王业科. 铝合金大规格带材气垫炉连续固溶热处理机组[J]. 轻合金加工技术, 2011, 39(7): 29-32.
(Su Xiao-li, Wang Ye-ke. Domestic largest air cushion furnace in continuous solution heat treatment line for aluminum alloy strip [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2011, 39(7): 29-32.)
- [3] 干志成. 气垫炉[J]. 工业加热, 1986(4): 5.
(Gan Zhi-cheng. Air cushion furnace [J]. *Industrial Heating*, 1986(4): 5.)
- [4] 陈文修, 何英和, 刘非轼, 等. 气垫式金属板带材连续热处理炉内气体动力过程的研究[J]. 中南矿冶学院学报, 1987, 18(2): 145-150, 230.
(Chen Wen-xiu, He Ying-he, Liu Fei-shi, et al. A study of gas dynamics process in air cushion furnace of continuous heat treatment for metal plate-strip [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 1987, 18(2): 145-150, 230.)
- [5] Chang Y B, Moretti P M. Aerodynamic characteristics of pressure-pad air bars [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2000, 67(1): 256-277.
- [6] Ozmen Y. Confined impinging twin air jets at high Reynolds numbers [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, 35(2): 355-363.
- [7] Kathuria V, Ruhl S, Kaushik N, et al. An experimental investigation of the hover and forward speed aerodynamic characteristics of several tracked air cushion vehicle (TACV) models [J]. *Industrial Crops and Products*, 2012, 46(3): 274-283.
- [8] Hall J K, Kristoffersen Y. The R/H Sabvabaa: a research hovercraft for marine geophysical work in the most

- inaccessible area of the Arctic Ocean [J]. *The Leading Edge*, 2009, 28(8): 932-935.
- [9] 侯帅, 王超, 王坤, 等. 气垫炉缝隙喷嘴传热特性研究 [J]. 轻合金加工技术, 2012, 41(3): 45-48.
(Hou Shuai, Wang Chao, Wang Kun, et al. Study on heat transfer characteristics of slot nozzle in air cushion furnace [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2012, 41(3): 45-48.)
- [10] Hou S, Li Y, Wang Z D, et al. Study on floating force and heat transfer of circular nozzle in air cushion furnace [J]. *Industrial Furnace*, 2012, 35(1): 1-4.
- [11] 王占军, 张笑宇, 李贤君, 等. 气垫式退火炉内流场的数值模拟 [J]. 金属热处理, 2017, 42(1): 171-174.
(Wang Zhan-jun, Zhang Xiao-yu, Li Xian-jun, et al. Numerical simulation of flow field in air-cushion annealing furnace [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(1): 171-174.)
- [12] Hao Y J, Bai X J. Large deformation of elastic beam thin plate in transverse flow [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2009, 26(2): 304-307.
- [13] 宋晓娟, 白象忠. 浅拱形薄壳在流体作用下的变形与应力分析 [J]. 机械强度, 2011, 33(5): 690-695.
(Song Xiao-juan, Bai Xiang-zhong. Analysis on the small deformation of a thin arched shell in fluid [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2011, 33(5): 690-695.)
- [14] 周小利, 白象忠. 弹性圆柱薄壳在流体中的变形与内力分析 [J]. 工程力学, 2007, 24(5): 47-52.
(Zhou Xiao-li, Bai Xiang-zhong. Analysis on the deformation and internal force of an elastic thin cylindrical shell in fluid [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(5): 47-52.)
- [15] Cho H K. Flow-induced vibration of a web floating over a pressure-pad air bar [D]. Stillwater: Oklahoma State University, 2005.
- [16] Moretti P M. Lateral deflections of webs in air-flotation ovens [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2004, 71(3): 314-320.