

抑制感应钎涂中基体热效应的涂层材料优化

赵梦琪, 石秋生, 陈 林, 杨冠军

(西安交通大学材料科学与工程学院 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 为抑制感应钎涂层的基体热效应, 以涂层感应重熔过程为研究对象, 建立二维有限元模型, 研究了涂层材料和厚度对感应重熔温度场的影响规律。在本研究条件下得出以下结论: 当 Ti49Zr49Be 涂层厚度为 0.1~0.5 mm 时, 涂层熔化界面的推移方式受涂层厚度影响显著, 随着涂层厚度的增加, 基体敏感深度和高于敏感温度的持续时间均减小; 相较于高熔点 Ni71CrSi 镍基涂层, 低熔点 Ni65CrP 镍基涂层重熔过程中的基体敏感深度较浅、持续时间较短; 相较于相同熔点的 Ni65CrP 镍基涂层, Ti49Zr49Be 钛基涂层重熔过程中的基体敏感深度较浅、持续时间较短。因此, 降低涂层材料熔点、适当增加涂层厚度, 均有利于减小热影响深度、缩短热影响时间, 从而抑制感应钎涂过程中的基体热效应。

关键词: 感应重熔; 涂层特性; 有限元法; 温度分布; 数值模拟

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)06-0506-08

引用格式: 赵梦琪, 石秋生, 陈林, 等. 抑制感应钎涂中基体热效应的涂层材料优化[J]. 中国材料进展, 2023, 42(6): 506-513.

ZHAO M Q, SHI Q S, CHEN L, *et al.* Optimization of Coating Materials to Suppress Substrate Thermal Effects in Induction Brazing[J]. Materials China, 2023, 42(6): 506-513.

Optimization of Coating Materials to Suppress Substrate Thermal Effects in Induction Brazing

ZHAO Mengqi, SHI Qiusheng, Chen Lin, YANG Guanjin

(State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To suppress the substrate thermal effects in induction brazing, a two-dimensional finite element model was established to study the induction remelting process of the coating. The influence of the coating materials and thickness on the temperature field was investigated. Under the present conditions, the following conclusions were drawn: when the thickness of the Ti49Zr49Be coating was between 0.1 and 0.5 mm, the movement of the coating melting interface was significantly affected by the coating thickness. With an increase in coating thickness, both the sensitive depth of the substrate and the duration above the sensitive temperature decreased. Compared to the high-melting-point Ni71CrSi nickel-based coating, the low-melting-point Ni65CrP nickel-based coating exhibited a shallower sensitive depth and shorter duration during the remelting process. Similarly, compared to the Ni65CrP nickel-based coating with the same melting point, the Ti49Zr49Be titanium-based coating showed a shallower sensitive depth and shorter duration during the remelting process. Therefore, reducing the melting point of the coating material and appropriately increasing the coating thickness are both beneficial in reducing the sensitive depth and duration, thereby suppressing the substrate thermal effects in induction brazing.

Key words: induction remelting; coating characteristics; finite element method; temperature distribution; numerical study

1 前 言

近年来, 表面技术发展迅猛, 其中热喷涂技术^[1]由于具有投资少、操作简单、效果明显等特点, 已被广泛应用于要求耐磨、耐蚀等零件表面的修复和强化。但是, 由于热喷涂涂层存在着结合强度低^[2]、孔隙率高^[3]等缺点, 因而可以采用涂层重熔工艺^[4]来提高涂层与基体的结合强度^[5]。

收稿日期: 2021-04-01 修回日期: 2021-06-16

基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0012-0107)

第一作者: 赵梦琪, 女, 1996 年生, 硕士研究生

通讯作者: 杨冠军, 男, 1977 年生, 教授, 博士生导师,

Email: ygj@mail.xjtu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202104004

常见的涂层重熔技术有很多,其中激光重熔^[6]设备造价很高,火焰重熔^[7]和整体重熔加热^[8]对工件的热影响区及变形影响都很大。而感应重熔具有加热速度快、生产效率高的特点^[9],是改善涂层与基体结合的有效途径。感应重熔是利用感应线圈中的交变磁场在基体表面产生涡流,涡流产生的热量熔合金涂层,从而使涂层与基体实现冶金结合的技术^[10-13]。利用感应加热的集肤效应,即加热仅发生在工件表面的薄层区域,可以最大限度地减少涂层重熔对工件的热损伤,在提高热喷涂生产效率、减少对工件的热损伤和变形、改善操作者的劳动环境等方面具有明显的优势^[14]。

感应重熔技术获得了广泛应用,为进一步提高感应重熔涂层质量,采用数值模拟方法确定感应过程中温度场分布受到大量学者的关注。目前,国内外学者主要发展整体材料的感应重熔技术,如半固态金属感应重熔技术^[15];在涂层感应重熔方面的研究较少^[16,17],而对涂层感应重熔过程中的基体热效应鲜有研究。镍基合金涂层和钛基合金涂层是感应重熔技术中广泛最为应用的两种涂层。其中,镍基合金涂层致密性、导电性良好,具有优良的耐腐蚀、耐高温、耐磨损和耐疲劳等性能^[18,19],被广泛用于涂覆在零件表面,如镍基涡轮叶片。而钛基合金涂层的强度高、耐蚀性优良,具有较好的耐磨性能,在航天、航空、化工等领域也有着重要的应用^[20]。本文以涂层感应重熔过程为研究对象,建立二维有限元模型,研究涂层材料和厚度对感应重熔温度场的影响规律。以感应重熔 Ti49Zr49Be 涂层为例,首先研究了涂层厚度分别为 0.1, 0.3 和 0.5 mm 时的温度场分布规律,其次研究了重熔材料分别为高熔点镍基涂层 Ni71CrSi、低熔点镍基涂层 Ni65CrP、低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be 时涂层的温度场分布规律,从而得出涂层厚度及涂层材料对基体的热影响规律,通过优化材料特性来抑制基体热效应。

2 模型及网格划分

本研究采用 COMSOL Multi-physics 有限元软件研究涡轮叶片叶尖涂层感应重熔过程中涂层的温度场分布。涡轮叶片工件为典型的三维薄壁件,其壁厚仅为 5 mm,远小于感应热源的尺寸(直径>10 mm),因此感应加热过程可以近似为二维传热。涂层厚度设置为 0.1, 0.3 和 0.5 mm,基体宽度和厚度分别为 30 和 50 mm。

为捕捉感应重熔过程中的涂层熔化界面,涂层需要选用十分精细的网格,同时模型计算选用足够小的时间步长。当涂层部分网格尺寸<0.6 μm、计算时间<10⁻⁷ s 时,涂层熔化界面可以被精确追踪,满足计算要求。基体采用渐变网格,涂层/基体界面侧网格尺寸为 1 μm,远端网格尺寸为 50 μm。图 1 为有限元网格模型示意图。

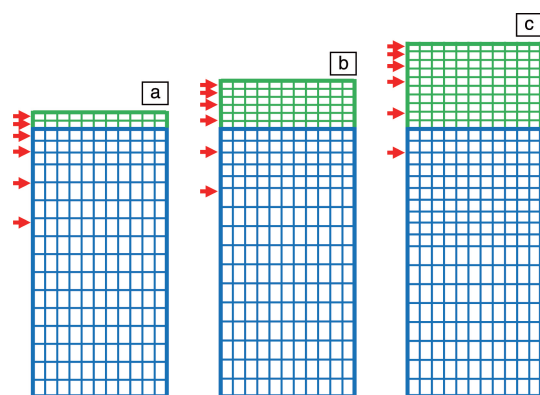


图1 3种厚度模型中模拟区域的计算网格:(a) 0.1 mm, (b) 0.3 mm, (c) 0.5 mm

Fig. 1 The calculation grid of the simulation area in three thickness models: (a) 0.1 mm, (b) 0.3 mm, (c) 0.5 mm

在感应重熔过程中,涂层/基体内部由于感应涡流产生大量焦耳热。计算过程中,涂层/基体内部的感应热可以近似为体热源,且体系内任一位置的体热源密度 q 可以表述为:

$$q = q_0 \cdot e^{-x/x_0} \quad (1)$$

其中, q_0 为涂层表面的热源密度, x 为到涂层表面的距离, x_0 为集肤深度。所施加的感应热源的热源密度由涂层表面向内部呈指数规律衰减,工件表面的热源密度(q_0)为 $7.13 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$,热源作用时间为 1.85 s,作用深度(x_0)为 1.5 mm。

本模型采用的初始和边界条件为:基体和预置涂层的初始温度为 298 K,基体和涂层两侧的边界条件设置为自然对流换热,基体的下表面为恒温边界条件。所施加的感应热源的热源密度由涂层表面向内部呈指数规律衰减。

基体材料选用 TC11 (Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr) 钛合金,其密度为 $4480 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,基体的 $(\alpha+\beta)/\beta$ 相变点温度为 1308 K,在本研究中作为基体敏感的代表性热影响温度参数。涂层材料分别选用高熔点镍基涂层 Ni71CrSi、低熔点镍基涂层 Ni65CrP 和低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be。

3 感应重熔不同厚度的涂层材料对涂层与基体温度场的影响

以厚度为 0.1, 0.3 和 0.5 mm 的钛基涂层 Ti49Zr49Be 为例,研究感应重熔不同厚度的涂层对基体的热影响,结果如图 2 所示。所施加的感应热源的热源密度由涂层表面向内部呈指数规律衰减,感应加热功率为 55 kW,感应加热频率为 180 kHz,热源作用时间为 1.85 s,集肤深度为 1.5 mm。整个感应加热过程,依次发生涂层

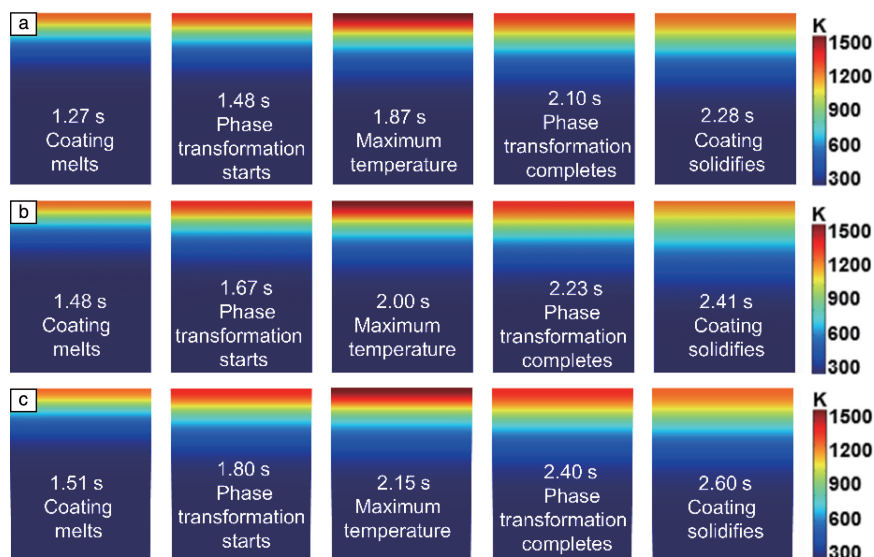


图 2 不同厚度 Ti49Zr49Be 涂层体系的温度场分布(感应加热功率 55 kW, 加热时间 1.85 s, 感应加热频率 180 kHz): (a) 0.1 mm, (b) 0.3 mm, (c) 0.5 mm

Fig. 2 Temperature distribution of Ti49Zr49Be coating systems with different thicknesses under the following conditions (induction heating power of 55 kW, heating time of 1.85 s, and induction heating frequency of 180 kHz): (a) 0.1 mm, (b) 0.3 mm, (c) 0.5 mm

熔化、基体开始相变、加热到最高温度、基体结束相变、涂层凝固等多个事件。随着涂层厚度的增加, 涂层发生熔化及基体发生相变的时间均延后, 且热影响区深度增加。

图 3 为不同厚度的涂层熔化过程中的温度场分布, 可以看出不同厚度的涂层熔化时, 固液界面的推移方式不同。当涂层厚度为 0.1 mm 时, 熔化界面从涂层/基体界面处向涂层表面单向推移; 当涂层厚度为 0.3 mm 时, 熔化界面分别从涂层/基体界面、涂层表面向涂层内部双向推移, 最后熔化位置位于距离涂层表面 0.23 mm 处; 当涂层厚度为 0.5 mm 时, 熔化界面变为从涂层表面向涂层/基体界面单向推进。

为了更加准确地描述 3 种涂层厚度下固液界面的推移情况, 提取了不同厚度下涂层熔化过程中固液界面的位置随时间的变化曲线, 如图 4 所示。当涂层厚度为 0.1 mm 时, 固液界面从涂层/基体界面处向涂层表面推移, 整个熔化过程历时 0.17 s; 当涂层厚度为 0.3 mm 时, 1.48 s 时固液界面先在涂层/基体界面处形成, 1.52 s 时涂层表面处也有固液界面形成, 随后同时向涂层内部发生双向推移, 直至 1.58 s 时固液界面重合, 熔化结束, 共历时 0.10 s; 当涂层厚度为 0.5 mm 时, 1.51 s 时涂层表面形成固液界面, 随后不断向涂层内部推进, 直至 1.74 s 时固液界面推至涂层/基体界面处, 熔化结束, 历时 0.23 s。

为研究涂层厚度对基体的热影响, 提取了涂层/基体界面处的温度随时间的变化曲线, 如图 5 所示。结果表

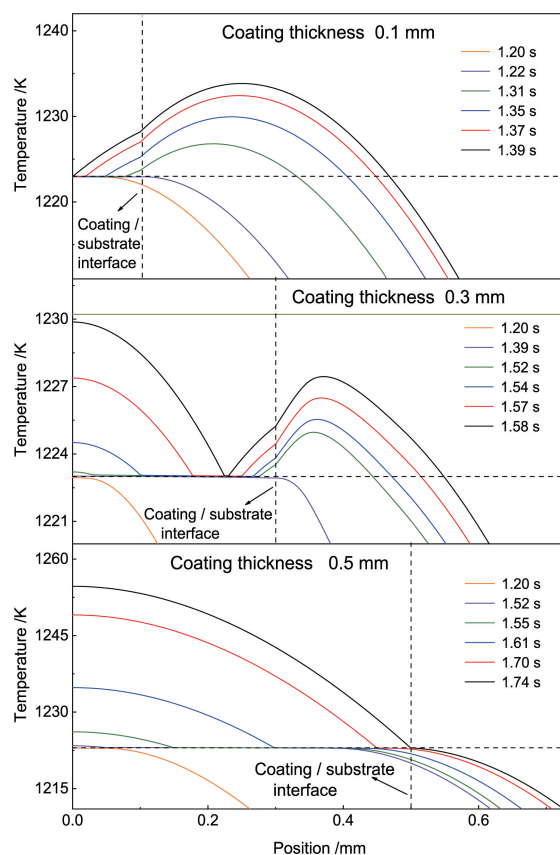


图 3 不同涂层厚度下不同时刻的温度沿涂层厚度方向的分布(位置 0 对应涂层表面, 纵向虚线表示涂层/基体界面位置)

Fig. 3 Temperature distribution along the thickness direction of the coating at different moments for different coating thicknesses (position 0 corresponds to the coating surface, and the vertical dashed line represents the coating/substrate interface)

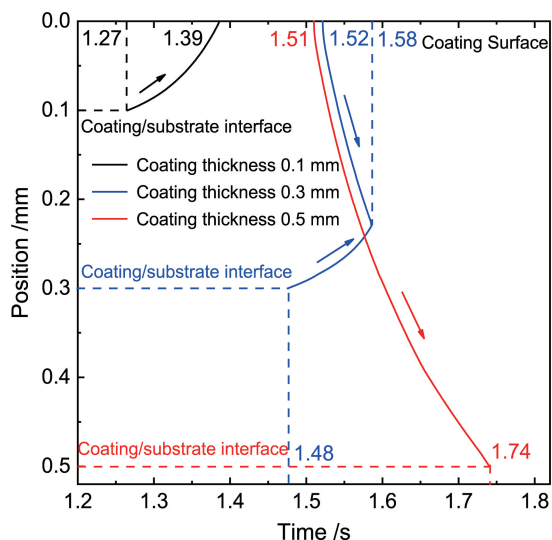


图4 不同涂层厚度下涂层内部固液界面位置随时间的变化(位置0对应涂层表面,横向虚线表示涂层/基体界面位置)

Fig. 4 The variation of the solid-liquid interface position with different coating thicknesses over time (position 0 corresponds to the coating surface, and the horizontal dashed line represents the coating/substrate interface)

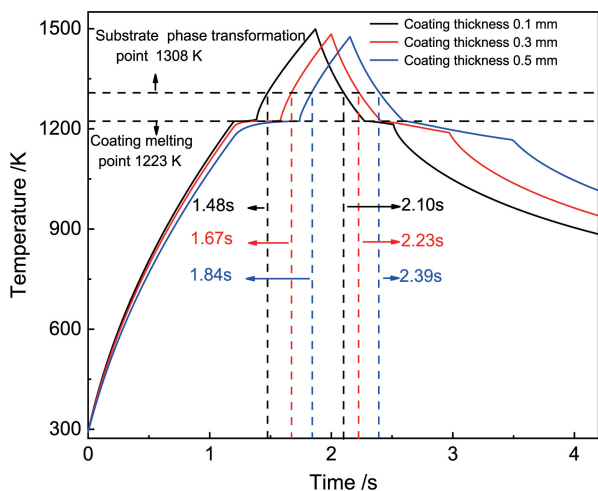


图5 不同涂层厚度下涂层/基体界面处温度随时间的变化

Fig. 5 The temperature variation of the coating/substrate interface over time for different coating thicknesses

明,在不同涂层厚度条件下,涂层/基体界面温度都会超过基体敏感温度。当涂层厚度为0.1 mm时,在1.48~2.10 s内涂层/基体界面温度高于基体敏感温度,持续0.56 s;当涂层厚度为0.3 mm时,在1.67~2.23 s内涂层/基体界面温度高于基体敏感温度,持续0.62 s;当涂层厚度为0.5 mm时,在1.84~2.39 s内涂层/基体界面温度高于基体敏感温度,持续0.55 s。

图6为不同涂层厚度条件下基体热敏感区深度和持续时间对比图。结果表明,基体热敏感区深度和持续时

间均随涂层厚度的增加而减小。当涂层厚度分别为0.1, 0.3和0.5 mm时,基体热敏感温度区深度分别为0.94, 0.76和0.67 mm,基体敏感温度区分别为0.62, 0.56和0.55 s。

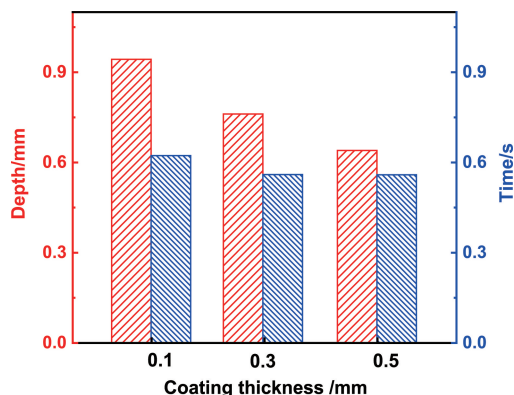


图6 不同厚度涂层的基体热敏感温度区深度和持续时间

Fig. 6 Comparison of depth and duration of substrate thermal sensitive temperature zone under different coating thickness

综上所述,增加涂层厚度可以减小热影响深度、缩短热影响时间,更有助于抑制基体热效应。

4 不同种类涂层材料对涂层与基体温度场的影响

涂层厚度取0.3 mm,以高熔点镍基 Ni71CrSi 涂层 ($T_m = 1408$ K)、低熔点镍基 Ni65CrP 涂层 ($T_m = 1223$ K) 以及低熔点钛基 Ti49Zr49Be 涂层 ($T_m = 1223$ K) 3种涂层为例,研究最高加热温度分别为1500和1323 K时的涂层和基体的温度分布规律。图7为两种加热条件下,3种涂层材料加热及冷却过程中涂层和基体的温度分布云图。本研究中,感应热源作用时间为1.85 s,作用深度为1.5 mm,基体的相变温度为1308 K。结果表明,涂层表面温度均呈现先升高后降低的趋势。图7a~7c分别为最高加热温度为1500 K时的 Ni71CrSi、Ni65CrP 和 Ti49Zr49Be 涂层体系的温度分布云图。结果表明,高熔点 Ni71CrSi 涂层体系先经历基体相变,后涂层熔化;而低熔点 Ni65CrP 和 Ti49Zr49Be 涂层体系先经历涂层熔化,后基体相变。另外,相比于同熔点的镍基 Ni65CrP 涂层体系,钛基 Ti49Zr49Be 涂层体系的基体相变深度较小。图7d和7e分别为最高加热温度为1323 K时的 Ni65CrP 和 Ti49Zr49Be 涂层体系的温度分布云图。与最高加热温度为1500 K相比,涂层熔化和基体开始相变时间不变,相变结束时间缩短。

图8为同一加热条件下,不同涂层材料熔化过程中温度在深度方向的分布曲线。可以看出涂层材料不同,熔化界面推移方式也不同。高熔点镍基 Ni71CrSi 涂层和

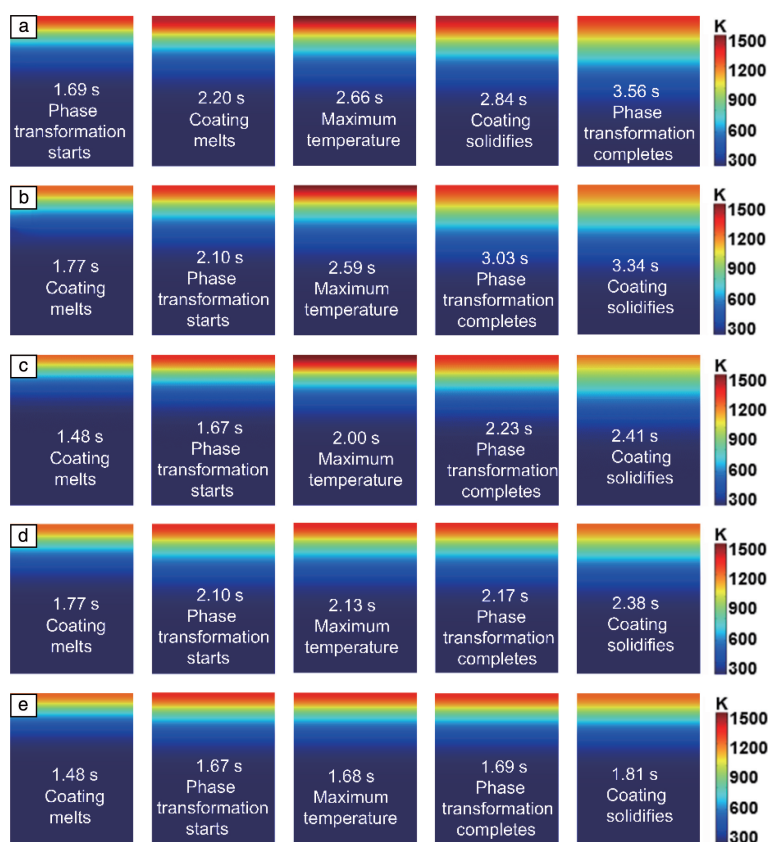


图 7 不同涂层材料、不同最高加热温度下涂层和基体的温度场: (a) 高熔点镍基 Ni71CrSi 涂层, 最高温度 1500 K; (b) 低熔点镍基 Ni65CrP 涂层, 最高温度 1500 K; (c) 高熔点钛基 Ti49Zr49Be 涂层, 最高温度 1500 K; (d) 低熔点镍基 Ni65CrP 涂层, 最高温度 1323 K; (e) 低熔点钛基 Ti49Zr49Be 涂层, 最高温度 1323 K

Fig. 7 Temperature field of coating and substrate under different coating materials and different maximum heating temperatures: (a) high melting point nickel based coating Ni71CrSi, with a maximum temperature of 1500 K; (b) low melting point nickel based coating Ni65CrP, with a maximum temperature of 1500 K; (c) high melting point titanium based coating Ti49Zr49Be, with a maximum temperature of 1500 K; (d) low melting point nickel based coating Ni65CrP, with a maximum temperature of 1323 K; (e) low melting point Ti based coating Ti49Zr49Be, with a maximum temperature 1323 K

低熔点钛基 Ti49Zr49Be 涂层的熔化界面均从涂层/基体界面处、涂层表面分别向涂层内部推进, 最终熔化位置分别位于 0.08 和 0.23 mm 处; 而低熔点镍基 Ni65CrP 涂层熔化界面则是从涂层/基体界面处向涂层表面单向推移, 最终熔化位置位于涂层表面。这是由于涂层材料的热导率、熔点、密度和熔化潜热等差异导致涂层表面处和涂层/基体界面处的反向热输入不同。

为描述涂层熔化具体时刻固液界面的分布, 提取了固液界面熔化位置随时间的变化曲线, 如图 9 所示。在涂层材料为高熔点镍基涂层 Ni71CrSi 时, 感应加热 2.20 s 时涂层表面处形成固液界面, 2.22 s 涂层/基体界面处也有固液界面形成, 随后不断向涂层内部推移, 2.48 s 时固液界面重合, 整个熔化过程历时 0.28 s。在涂层材料为低熔点镍基涂层 Ni65CrP 时, 固液界面从涂层/基体界面处向涂层表面单向推移, 感应加热 1.77 s 时先在涂层

表面处形成, 随后不断向涂层内部推进, 直至 1.96 s 时固液界面推至涂层/基体界面, 熔化结束, 共历时 0.19 s。在涂层材料为低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be 时, 感应加热 1.48 s 时涂层/基体界面处形成固液界面, 随后不断向涂层内部推进, 1.52 s 涂层表面处也有固液界面形成, 随后同时向涂层内部推移, 1.58 s 熔化结束, 历时 0.10 s。

图 10 为不同涂层材料、不同加热温度下基体表面温度随时间的变化曲线, 可以观察到基体表面的温度均先升高至涂层熔点, 产生等温平台, 再升高达到最高温度, 随后温度降低至涂层凝固点产生平台后继续降低, 在一定时间段内基体表面温度都会超过基体敏感温度。从图中可以看出, 当表面最高温度为 1500 K 时, 低熔点钛基 Ti49Zr49Be 涂层/基体界面处温度最先高于基体敏感温度, 其次是低熔点镍基涂层 Ni65CrP, 高熔点镍基涂层 Ni71CrSi 最后达到基体敏感温度, 基体高于敏感

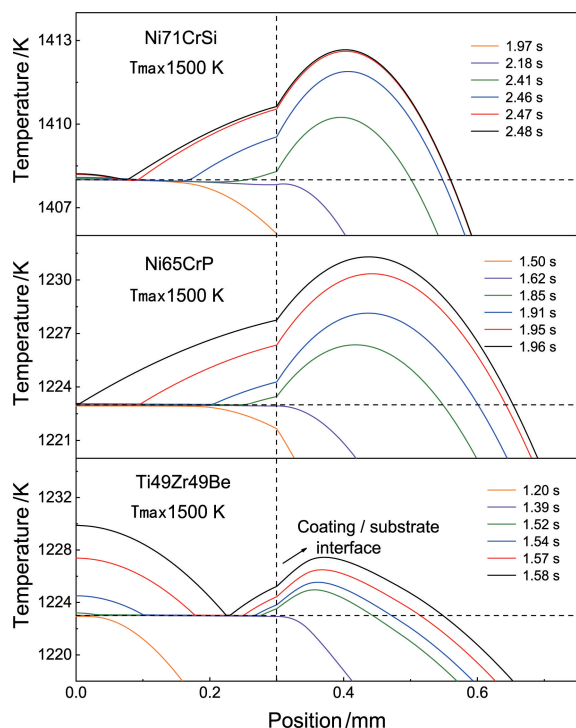


图8 不同时刻沿涂层厚度方向的温度分布(位置0对应涂层表面,纵向虚线表示涂层/基体界面位置)

Fig. 8 Temperature distribution along the coating thickness direction at different moments (position 0 corresponds to the coating surface, and the vertical dashed line represents the coating/substrate interface)

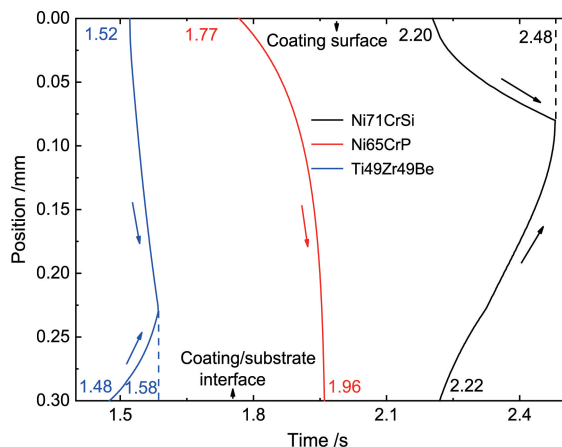


图9 不同涂层材料涂层熔化过程固液界面位置随时间的变化

Fig. 9 The temperature distribution in the depth direction at different moments in the melting stage of different coating materials

温度的持续时间分别为 0.56, 0.93 和 1.87 s。将表面最高温度降至 1323 K, 发现低熔点镍基涂层 Ni65CrP 和低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be 的温度高于基体敏感温度的时间均缩短, 分别为 0.07 和 0.02 s。

图 11 为不同涂层材料、不同加热温度下基体热敏感温度区深度随时间的变化曲线, 在表面最高温度为

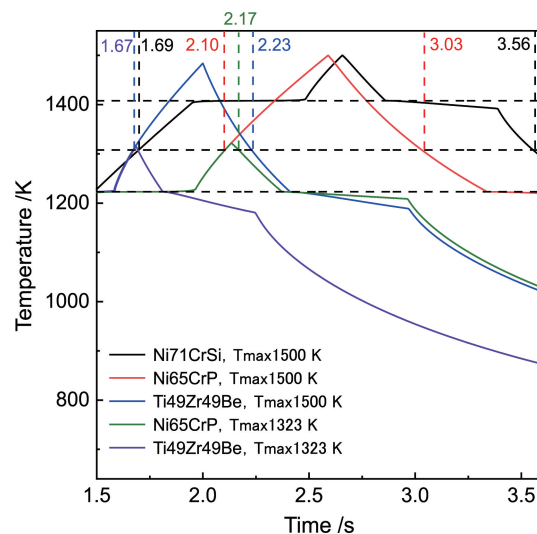


图 10 不同涂层材料、不同加热温度下基体表面温度随时间的变化

Fig. 10 Variation of substrate surface temperature with time under different coating materials and heating temperatures

1500 K 的条件下, 高熔点镍基 Ni71CrSi 涂层体系的基体热敏感温度区深度最大, 为 1.04 mm; 低熔点镍基涂层 Ni65CrP 次之, 为 0.96 mm; 低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be 最小, 为 0.76 mm。此外, 可以发现高熔点镍基涂层 Ni71CrSi 材料涂层冷却过程中曲线存在一个斜率变小的“缓冷时段”, 这是由于涂层熔点高于基体相变温度涂层凝固过程中释放的结晶潜热进一步延缓了基体发生相变的时间。当表面最高温度为 1323 K 时, 低熔点镍基 Ni65CrP 涂层和钛基 Ti49Zr49Be 涂层体系的基体热敏感温度区深度均降低, 分别为 0.18 和 0.07 mm。

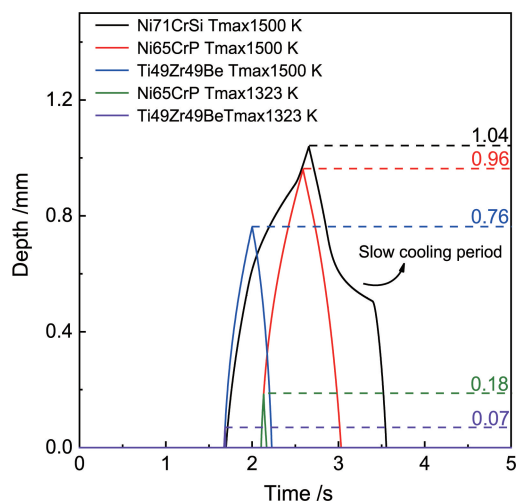


图 11 不同涂层材料、不同加热温度下的基体热敏感温度区深度随时间的变化

Fig. 11 The depth of thermal sensitive temperature zone changes with time under different coating materials and heating temperatures

综上所述,涂层材料的种类及熔点均会改变熔化界面的推移方式。在表面最高温度为 1500 K 的加热条件下,当涂层材料分别为高熔点镍基涂层 Ni71CrSi、低熔点镍基涂层 Ni65CrP、低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be 时,界面推移方式分别为从涂层表面、涂层/基体界面向涂层内部双向推移,从涂层/基体界面向涂层内部单向推移以及从涂层表面、涂层/基体界面向涂层内部双向推移。此外,该条件下高熔点镍基涂层 Ni71CrSi 的基体热敏感温度区深度和持续时间均大于低熔点镍基涂层 Ni65CrP,都大于低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be。当表面最高温度降低至 1323 K 时,低熔点镍基涂层 Ni65CrP 和低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be 的基体热敏感温度区深度和持续时间均减小,基体热敏感温度区深度分别为 0.18 和 0.07 mm,持续时间分别 0.07 和 0.02 s,该条件下低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be 应用效果最佳。

5 结 论

本研究旨在研究感应重熔涂层特性对基体的热影响,通过建立二维有限元模型,以高熔点镍基涂层 Ni71CrSi、低熔点镍基涂层 Ni65CrP、低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be 为对象,研究感应重熔涂层厚度及涂层材料对基体的热影响规律,提出工程应用中调控基体热影响的涂层材料选择和工艺优化方法。主要结论如下:

(1) 建立有限元模型,分析了感应重熔不同厚度涂层的温度场。结果表明,厚度分别为 0.1、0.3 和 0.5 mm 的钛基涂层 Ti49Zr49Be 的涂层熔化界面推移方式分别为从涂层/基体界面向涂层表面单向推移,从涂层表面、涂层/基体界面向涂层内部双向推移以及从涂层表面向涂层/基体界面单向推移。

(2) 基体高于敏感温度的时间和最大敏感深度均随着涂层厚度增加而递减,当涂层厚度分别为 0.1、0.3 和 0.5 mm 时,高于敏感温度的时间分别为 0.62、0.56 和 0.55 s,基体最大敏感深度分别为 0.94、0.76 和 0.67 mm。

(3) 分析了不同涂层材料感应重熔对基体的热影响规律,发现涂层材料的种类及熔点均会改变熔化界面的推移方式。在表面最高温度为 1500 K 的条件下,高熔点镍基涂层 Ni71CrSi、低熔点镍基涂层 Ni65CrP、低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be 的界面推移方式分别为从涂层表面、涂层/基体界面向涂层内部双向推移,从涂层/基体界面向涂层内部单向推移以及从涂层表面、涂层/基体界面向涂层内部双向推移。

(4) 在相同的加热条件下,3 种涂层的基体都存在热敏感温度区;高熔点镍基涂层 Ni71CrSi 的基体热敏感温度区深度最大、持续时间最长,分别为 1.04 mm 和

1.87 s;低熔点镍基涂层 Ni65CrP 的深度和时间次之,分别为 0.96 mm 和 0.93 s;低熔点钛基涂层 Ti49Zr49Be 的基体热敏感温度区深度最小、持续时间最短,分别为 0.76 mm 和 0.56 s。

(5) 当感应重熔表面最高温度为 1323 K 时,低熔点镍基涂层和低熔点钛基涂层的基体热敏感温度区深度和持续时间均减小,基体热敏感温度区深度分别为 0.18 和 0.07 mm,持续时间分别 0.07 和 0.02 s。

综合上述涂层厚度和材料特性对基体温度场的影响规律,增加涂层厚度、降低材料熔点,均有利于抑制基体热影响。

参考文献 References

- [1] LI C J, YANG G J, LI C X. Journal of Thermal Spray Technology [J], 2013, 22(2/3): 192-206.
- [2] 王豫跃,牛强,杨冠军,等. 材料研究与应用[J], 2019, 13(3): 165-172.
WANG Y Y, NIU Q, YANG G J, et al. Materials Research and Application [J], 2019, 13(3): 165-172.
- [3] 倪进飞,熊义,刘光明,等. 表面技术[J], 2020, 49(10): 81-88+98.
NI J F, XIONG Y, LIU G M, et al. Surface Technology [J], 2020, 49(10): 81-88+98.
- [4] 董天顺,郑晓东,李亚龙,等. 材料保护[J], 2018, 51(2): 95-99.
DONG T S, ZHENG X D, LI Y L, et al. Materials Protection [J], 2018, 51(2): 95-99.
- [5] 宋晓毓,刘新利,吴壮志,等. 中国材料进展[J], 2020, 39(9): 681-690.
SONG X Y, LIU X L, WU Z Z, et al. Materials China [J], 2020, 39(9): 681-690.
- [6] 赵运才,上官绪超,张继武,等. 表面技术[J], 2018, 47(3): 20-27.
ZHAO Y C, SHANGGUAN X C, ZHANG J W, et al. Surface Technology [J], 2018, 47(3): 20-27.
- [7] WANG Z G, OUYANG J H, WANG Y J, et al. Ceramics International [J], 2018, 44(17): 22027-22031.
- [8] 陈松,董天顺,李国禄,等. 焊接技术[J], 2016, 45(5): 76-79.
CHEN S, DONG T S, LI G L, et al. Welding Technology [J], 2016, 45(5): 76-79.
- [9] 吴勉,潘邻,童向阳,等. 表面工程与再制造[J], 2017, 17(Z1): 29-31.
WU M, PAN L, TONG X Y, et al. Surface Engineering & Remanufacturing [J], 2017, 17(Z1): 29-31.
- [10] SAHOO D K, PRADEEP A M V, MOHANTY B S, et al. Materials Today: Proceedings [J], 2020, 27(2): 1641-1650.
- [11] 孙浩,周明扬,屈晓妮,等. 中国有色金属学报 [J], 2017, 27(10): 1988-1995.

- SUN H, ZHOU M Y, QU X N, *et al.* The Chinese Journal of Non-ferrous Metals[J], 2017, 27(10): 1988-1995.
- [12] 杨建鸣, 秦义. 铸造技术[J], 2012, 33(4): 419-422.
- YANG J M, QIN Y. Foundry Technology[J], 2012, 33(4): 419-422.
- [13] 乔金士, 宣天鹏. 热加工工艺[J], 2013, 42(16): 14-18.
- QIAO J S, XUAN T P. Hot Working Technology[J], 2013, 42(16): 14-18.
- [14] 吴勉, 潘邻, 童向阳, 等. 材料保护[J], 2018, 51(6): 64-67.
- WU M, PAN L, TONG X Y, *et al.* Materials Protection[J], 2018, 51(6): 64-67.
- [15] 崔成林, 毛卫民, 赵爱民, 等. 中国有色金属学报[J], 2000(6): 809-814.
- CUI C L, MAO W M, ZHAO A M, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2000(6): 809-814.
- [16] 马凯, 冯力. 稀有金属材料与工程[J], 2023, 52(1): 111-118.
- MA K, FENG L. Rare Metal Materials and Engineering[J], 2023, 52(1): 111-118.
- [17] 孟莹, 朱小鹏, 杜鹏程, 等. 材料保护[J], 2018, 51(12): 82-89.
- MENG Y, ZHU X P, DU P C, *et al.* Materials Protection[J], 2018, 51(12): 82-89.
- [18] 李均明, 薛晓楠, 蔡辉, 等. 金属学报[J], 2010, 46(9): 1103-1108.
- LI J M, XUE X N, CAI H, *et al.* Acta Metallurgica Sinica[J], 2010, 46(9): 1103-1108.
- [19] SHI J Q, ZHANG T B, SUN B, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2020, 844: 156093.
- [20] 李婷. 低熔点轻合金表面激光熔覆 Ti-Ni-Al 合金分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- LI T. Analysis of Laser Clad Ti-Ni-Al Alloy Coating on the Light alloy [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- (编辑 吴 锐)