

TiN 涂层轴承钢电子束辐照过程电子行为及温度特性研究

巩春志¹, 王雪松¹, 许建平², 吴厚朴¹, 田修波¹

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001

2. 黑龙江工程学院 材料与化学工程学院, 哈尔滨 150050)

摘要: 目的 研究辐照过程中电子行为及温度场的分布规律。方法 采用束斑直径为 60 mm, 平均能流密度为 12 J/cm², 脉冲时间为 3 μs 的电子束, 对表面有 2 μm 厚 TiN 涂层的 9Cr18 轴承钢进行强流脉冲电子束辐照模拟, 通过建立 Monte-Carlo 仿真模型, 揭示入射电子的平均分布特性及其辐照过程中不同时刻温度场形态。结果 通过仿真电子辐照行为, 发现在入射电子能量大于 25 keV 时电子能够穿透 TiN 层, 进入轴承钢基体中。由于两层物质密度差异, 导致在二者交界处轴承钢一侧存在电子能量沉积曲线尖峰, 入射电子能量大于 35 keV 时峰值已经超过涂层内部能量沉积系数最大值, 形成特殊的能量沉积形式。结合对辐照温度场的模拟仿真, 结果显示, 由于交界线处钢一侧能量沉积量大, 加热效率高。内部加热速度比表面更快, 减小了二者间的温度梯度。同时由于两层物质存在熔点差异, 在控制能量的情况下, 可以达到两层交界处轴承钢发生少量熔化, TiN 涂层不发生熔化的现象。结论 通过控制电子束能量, 控制温度场分布形态, 实现基体侧熔化, 而涂层不发生熔化的特殊改性现象, 这为提高涂层膜基结合力提供了新思路。

关键词: 强流脉冲电子束; 温度场; 薄膜; 数值模拟; 9Cr18

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.01.013

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)01-0109-07

Behavior of Electrons and Temperature Field of Bearing Steel with TiN Films Irradiated by Electron Beam

GONG Chun-zhi¹, WANG Xue-song¹, XU Jian-ping², WU Hou-pu¹, TIAN Xiu-bo¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Department of Materials and Chemical Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China)

ABSTRACT: To research distribution rules on behaviors of electrons and the temperature field in irradiation, bearing steel 9Cr18 with 2 μm thick TiN films on the surface irradiated by high current pulsed electron beam (HCPEB) were investigated by numerical simulation in the condition of beam diameter of 60 mm, average energy flow density of 12 J/cm², and electron beam pulse time of 3 μs. The average distribution features of incident electron and the temperature field form in different time of radiation were revealed by establishing a Monte-Carlo simulation model. The simulation results have demonstrated that the electrons could penetrate the TiN layer and reach the bearing steel substrate with a large acceleration voltage (>25 keV). There was a peak for electron energy deposition curve at bearing steel side near the TiN-9Cr18 interface due to the difference of material density. When the incident electron energy >35 keV, the peak value exceeded the max. energy deposition coefficient in the coating and formed a special energy deposition form. In combination with analog simulation, the result showed large energy deposition and high heating efficiency at the steel side of the boundary. The temperature rose more quickly in the interior zone than

收稿日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金 (E050803, U1330110)

作者简介: 巩春志 (1979—), 男, 助理研究员, 主要研究方向为等离子体放电特性。

通讯作者: 田修波 (1969—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为真空等离子体技术。

that on the surface. This decreased the temperature gradient between them. Meanwhile, if the deposition energy was suitable, a small amount of melting happened at bearing steel side while TiN film did not display any melting because of the difference of material melting point. Control of electron beam energy and temperature field distribution form achieves special modified phenomenon in which the coating will not be melt when the substrate side is melt. This may lead to a new way to improve the adhesion between deposited films and substrates.

KEY WORDS: HCPEB; temperature field; thin films; numerical simulation; 9Cr18

TiN 涂层具有高强度、高硬度及高抗氧化性的特点,被广泛应用于表面装饰和金属表面强化等领域,对 TiN 涂层表面状态和性能进行改进及提高涂层结合力等问题是目前研究的热点。强流脉冲电子束(high current pulsed electron beam, HCPEB)作为一种高能密度热源^[1],被广泛用于材料的表面处理。该技术通过强电流、短脉冲时间的电子束辐照作用于材料表面,快速升温 and 冷却,起到特殊的表面改性作用。近年来有学者利用强流脉冲电子束对金属表面涂层进行改性工作:Rotshtein 等^[2]对不锈钢表面铜涂层进行了电子束辐照,提高了涂层表面的纳米硬度和抗磨能力;Cai 等^[3]利用强流脉冲电子束对 CoCrAlY 热障涂层进行表面处理,提高了涂层的硬度与耐腐蚀性能;王忠等^[4]利用强流脉冲电子束对 NiCoCrAlY 涂层进行辐照处理,使其疏松的涂层表面重熔,变得致密平整。Anthoy 等^[5]将强流脉冲电子束技术应用在硬质合金刀具 TiN 涂层上,使其耐磨性能提高约两倍;Weigel 等^[6]对钢基体 TiAlN 涂层进行了脉冲电子束处理,发现辐照过程促进了膜基界面的原子扩散,提高了涂层的膜基结合力。大量实验表明强流电子束辐照对表面涂层性能的提升有积极作用。由于处理过程时间短、难以直接观察监测微观过程等原因,电子束在涂层结构中的行为规律和能量作用模式等机理问题没有得到解决。

涂层结构中电子行为可以通过数值仿真的方法获得。针对多层结构中电子的穿透效应和能量损失,利用 Monte-Carlo 方法已经有较好的仿真结果^[7-8]。HCPEB 改性的本质是电子束辐照基体产生强烈的热力耦合,因此可以通过热力场模拟来研究改性的效果。Markov 等^[9]首先建立了强流脉冲电子束轰击温度场物理模型;Proskurovsky 等^[10]给出了材料表层温度变化过程及应力状态。由于表面涂层必然对电子运动过程产生一定影响,其电子束辐照过程温度场分布将不同于纯材料,分析存在一定困难。文中将利用数值模拟的方式,耦合多层结构对电子行为影响,获得电子能量沉积分布特性,以表面 TiN 涂层的 9Cr18 轴承钢强流脉冲电子束辐照工艺为例,对过程中电子行为及温度场变化规律进行研究,有助于深层次了解辐照过程中发生的电子运动和温度场变化规律。

1 计算模型

1.1 Monte-Carlo 模型

若电子在靶材中运动主要受到库仑力的作用,会引起电离、激发、韧致辐射、电子散射等作用^[11]。这些作用会改变入射电子的运动方向,引起入射电子的能量损失。Monte-Carlo 方法通过对电子与物质相互作用进行随机模拟,来统计并获得电子在靶材中沉积能量的分布。

考虑到电子束能谱宽度受强自电磁场影响^[12],根据文献[13]的研究,随着入射距离的增加,电子束能谱展宽。本加工过程电子源电子加速能量相对不大,小于 50 kV,同时电子枪距离加工工件很近,电子运输对电子能谱宽度的影响很小。根据文献[13]的研究结论可知,在电子束能谱宽度较小时,其对轴向电子剂量分布没有明显影响,因此在仿真过程中选取电子束能谱宽度 0 kV,即每个仿真电子能量相同。为减少计算量,在利用蒙特卡罗方法计算电子的输运过程中必须采用压缩历史法^[14],把真实的随机运动划分为若干阶段,将多次随机碰撞合并为一次,作为一步处理。仿真过程包括电子由电子源产生并射入靶材,在靶材内部根据各种相互作用发生的概率进行碰撞、散射和能量损失处理。同时,修正电子的运动方向、模拟产生新的粒子并不断重复。采用 CASINO 软件对大量模拟粒子行为的统计处理,获得粒子行为的平均分布情况,如图 1 所示。文中进行 Monte-Carlo 仿真,对钢表面的 2 μm 厚 TiN 涂层结构进行电子入射模拟研究。

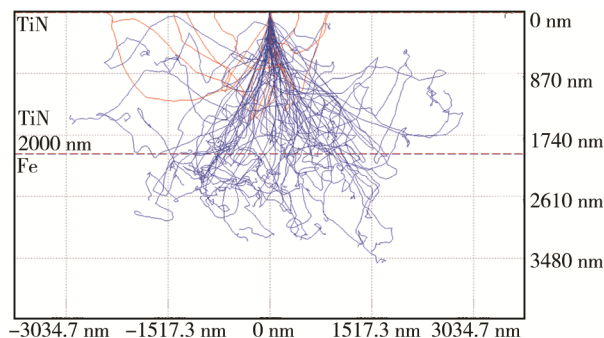


图 1 Monte-Carlo 仿真电子行为
Fig.1 Simulation of behavior of electrons by Monte-Carlo

1.2 热传导加热模型

电子束与材料的热相互作用主要是热传导,电子束表面加工过程可以用内热源热传导模型进行描述。假设材料性质均匀^[15],各向同性。三维柱坐标下,电子束能量分布关于轴心对称,如图 2 所示,因此可将温度场简化为二维轴对称模型。

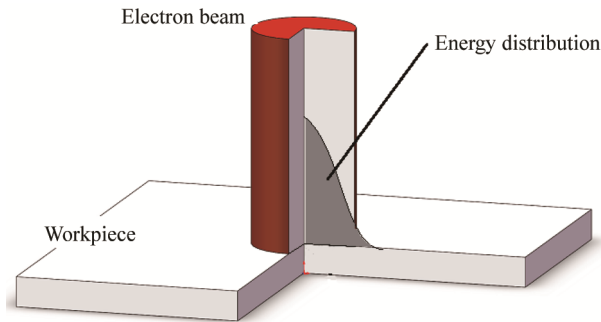


图 2 强流脉冲电子束表面改性模型
Fig.2 Surface modified by HCPEB

采用有限差分法进行二维对称温度场模拟。热导方程可以描述为^[16]

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\kappa(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + W(z, r, t) + L_m$$

(1)

初始条件:

$$T(z, r, 0) = T_0$$

(2)

边界条件:

$$-\kappa(T) \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial z} \Big|_{z=0, L} = 0$$

(3)

$$-\kappa(T) \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial r} \Big|_{r=0, R} = 0$$

(4)

式中: T 为工件温度; T_0 为环境温度; ρ, c, κ 分别为材料的密度、比热容和热传导系数,且 c, κ 为温度的函数; L, R 分别为厚度和半径; z, r 为柱坐标参量; W 为电子束辐照过程中单位体积材料在单位时间内吸收的能量; L_m 为相变潜热项。

强流电子束经过长距离传输后,横截面电流密度分布通常满足高斯分布^[17],计算时忽略固态相变对温度的影响,熔化潜热用温度补偿法处理^[18]。各项热力学参数见表 1。

表 1 热物性参数
Tab.1 Thermal characteristic

	$\lambda/(W \cdot m \cdot ^\circ C^{-1})$	$C/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C)$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$
9Cr18	29	$415 + 0.43T - 3.7 \times 10^{-4}T^2$	7.66×10^3
TiN	11	$668.55 + 19.77 \times 10^{-2}T - 14.26 \times 10^{-6}T^2 - 10.86 \times 10^6 T^{-2}$	5.43×10^3

相变潜热采用补偿法进行处理。即将潜热的吸收和释放换算为相应的温度补偿值,再与节点的温度进行叠加。采用交替隐式差分法对方程(1)进行求解。对有 TiN 涂层的 9Cr18 钢平板表面进行电子束辐照过程进行仿真,束斑直径为 60 mm,平均能流密度为 12 J/cm²,脉冲时间为 3 μs。对该平面进行均匀矩形网格划分,尺寸为 0.1 μm×10 μm。

2 结果与讨论

2.1 热传导加热模型

如图 1 所示,靶材内部电子不断与原子核和核外电子发生碰撞,发生运动方向的改变和能量损失。电子束作用于有 2 μm 厚 TiN 涂层结构的轴承钢基体上时,电子能量在靶材内部的能量损失关于深度与径向分布情况见图 3,横坐标 0 表示电子束中轴心,纵坐标 0 表示靶材表面,膜基界面用横线标出。可以看出随着入射电子加速电压的增加,其穿透能力逐渐增强,当加速电压达到 25 keV 左右时,电子穿透 TiN 涂层,进入基体中。当电子穿透涂层后,在两层结构内的能量损失程度有所差异。在涂层与基体交界面上,云图等高线形状被破坏。相比于涂层结构中,钢基体中的能量等高线沿深度方向发生了压缩,膜基界面钢侧出现能量沉积集中区域,说明在钢中电子碰撞能量损失更严重。为更详细了解电子能量沉积规律,以电子束轴心线作为参考,将能量沉积系数与深度关系曲线绘制出来,如图 4 所示。

与之前结论相同,随入射电子动能的增加,其穿透能力增强。在能量小于 25 keV 时,电子在 TiN 涂层中能量就损失完全,未进入钢基体中。当电子能量大于该阈值时,能量在膜基界面处产生一个沉积峰值。随着电子能量逐渐提高,界面能量沉积峰越来越明显,在 35 keV 时,峰值已经超过涂层内部能量沉积系数最大值,形成特殊的能量沉积形式。这种现象的产生是由于膜基之间原子质量存在差异,TiN 中两种主要原子的原子量都小于基体中主要元素 Fe。根据 H. J. Fitting 等^[19]的研究结果,多层结构中,电子由原子较轻的膜层进入原子较重的基体中,由于电子与重原子碰撞能量损失较大,会出现能量沉积突增的现象,同时也证实了模拟的正确性。

这种特殊的能量沉积形式对于电子束加热过程有较大的影响。在电子束辐照过程中,电子能量在靶材内部沉积,以热量的方式传递给靶材,形成加热现象,而界面能量沉积峰的出现,可能会引起不规则温度场和温度梯度的出现。

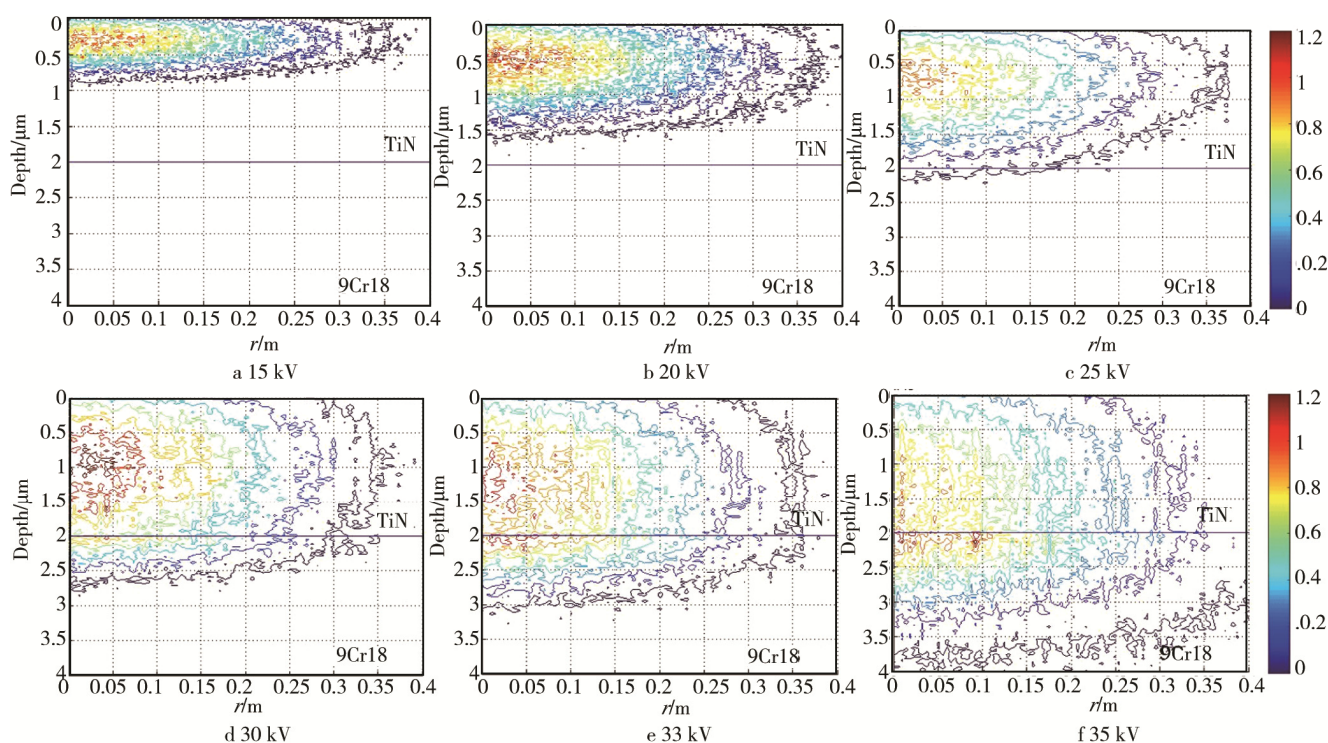


图3 不同加速电压下的电子能量分布

Fig.3 Nephogram of electrons energy with different acceleration voltage

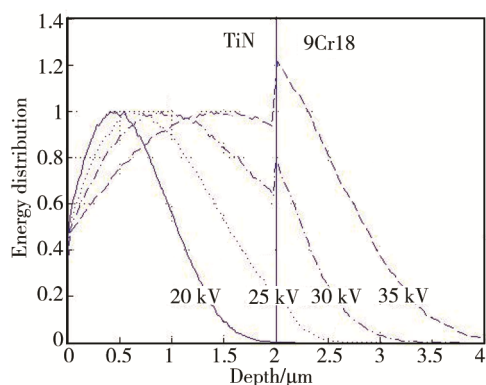


图4 不同加速电压下的电子能量沿深度沉积曲线

Fig.4 Curves of energy deposition changes over depth with different acceleration voltage

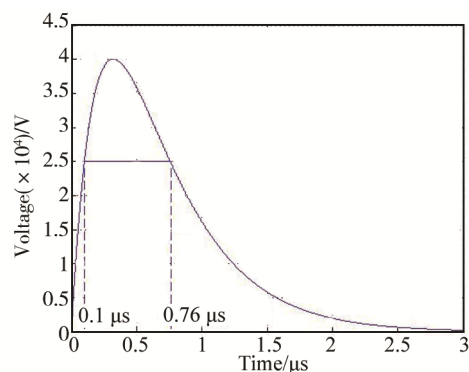


图5 电压脉冲

Fig.5 Voltage pulse

2.2 电子束辐照涂层结构温度场仿真分析

本小节对单次电子束辐照的升降温过程进行模拟计算。在如图5所示加速电压脉冲情况下,注意到在0.1~0.76 μs内,电子获得动能超过25 keV,即能够完全穿过TiN涂层。

获得不同加热时间的温度场分布形式见图6,横坐标0表示电子束中轴心,纵坐标0表示靶材表面,膜基界面用横线标出。电子束的加速电压随时间上升,引起电子射程随时间增加,温度场随时间向靶材内部延伸。当加速电压超过电子穿透涂层阈值即0.1 μs时,在热传导和电子能量传输的作用下,钢基体

被加热升温。由于TiN涂层与9Cr18钢的热参数有较大差异,使加热速度不同,引起了温度等高线在穿越涂层时发生如图6c的弯折,温度梯度发生改变。同时注意到当电子完全穿透TiN涂层的时间段,即图6b到图6d范围内,涂层内部温度场发生变化。TiN涂层内部高温区出现如图6c中1800℃的闭环线,其余温度下的等高线接近表面的部分也发生相同趋势的向轴心收缩,此时涂层内部局部温度已经高于涂层表面。这种现象在0.76 μs后即电子结束穿透行为后消失,如图6e所示。

不同时间温度与深度之间的变化关系曲线见图7,划线部位为膜基交界处。根据温度变化可以清楚地看到当电子穿透交界层后,涂层内原本较大的温度

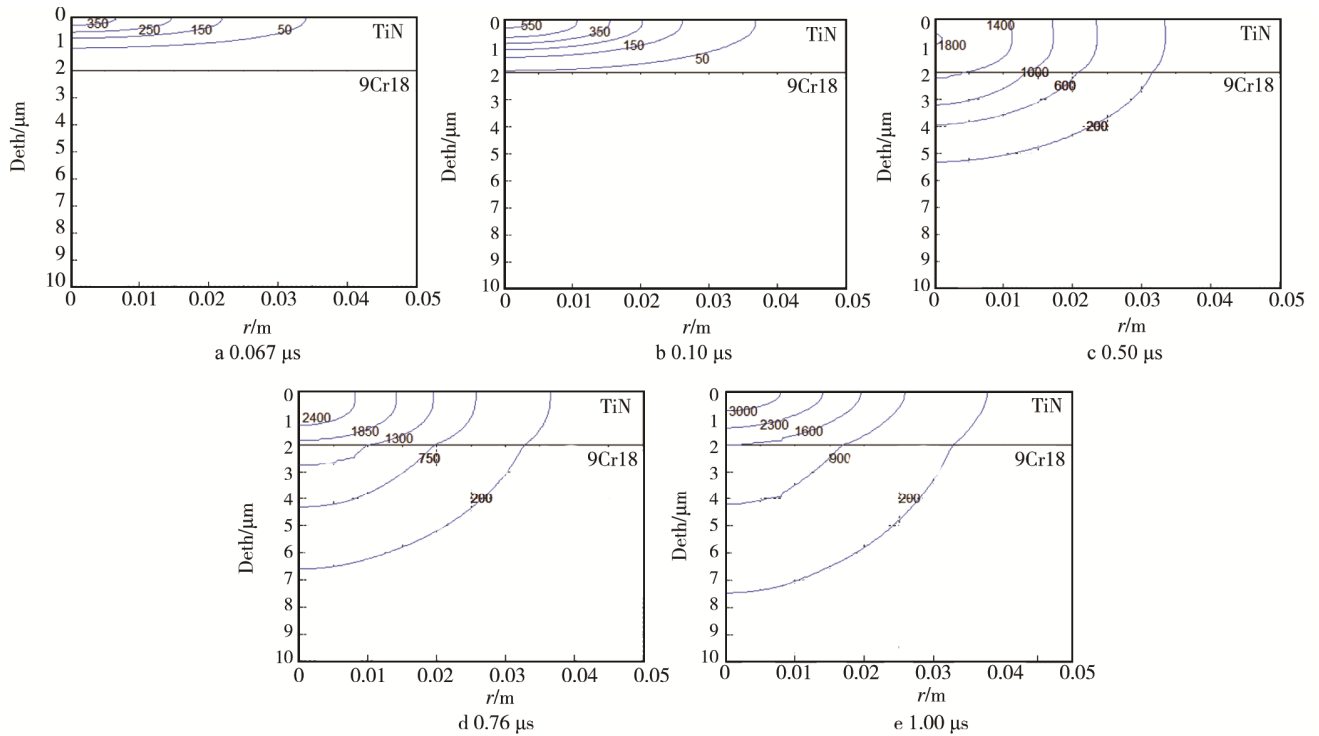


图 6 不同时刻温度场形态
Fig.6 Temperature field form of different time

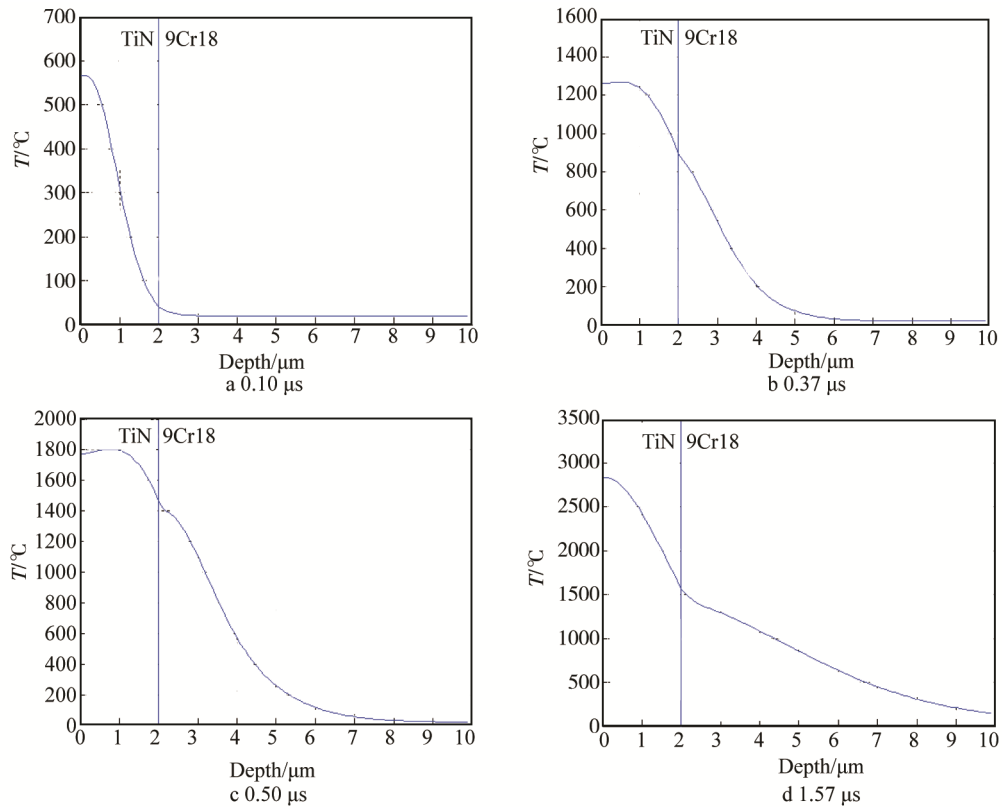


图 7 不同时刻温度沿深度变化曲线
Fig.7 Curves of temperature changes over depth of different time

梯度逐渐减小,膜层内部温度上升速度比表面处快,表面与交界面的温度差逐渐减小,在 0.37 μs 后,出现了膜层内部温度超过表面温度的反常现象。结合之

前的电子能量沉积模拟结果分析,由于电子穿透涂层后,会在交界面产生能量沉积峰值,当该峰值达到一定程度时,就会影响整个电子束加热过程。在电子束

加速电压较大时,交界面的能量沉积峰值超过涂层内部电子束能量沉积系数,这说明此时电子束在交界处对钢基体的加热效率比膜层表面的加热效率更高,引起膜基之间温度梯度减小,热传递效率下降,接近膜基交界处的涂层部分能量损失减少。同时膜层内部电子能量沉积系数呈现内部高于表面的现象。在热传导和加热效率的双重作用下,引发了涂层内部温升速度快的反常现象,并最终引起这种特殊的温度场分布。随着时间推移,加速电压下降,这种温度分布情况也逐渐消失,如图7d所示,恢复正常的温度梯度分布。

这种特殊的温度场分布形式是由涂层的多层结构引起的。这对涂层电子束辐照工艺的制定有较大意义。据此制定适当工艺,可以减小涂层内部温度梯度,有助于减小加工过程中的应力水平。同时,由于可以控制涂层内部温度梯度,使涂层与基体的温差保持在较小的水平。TiN涂层熔点比钢基体高,通过这种温度场特性,可以在不改变涂层表面状态的情况下使金属基体产生软化甚至微量熔化,促进膜基界面原子的扩散,对提高TiN涂层的结合力有积极意义,这部分已经有学者进行过研究,证实了其可行性^[6]。同时也应该注意在大功率电子束辐照的情况下可能出现涂层内部比表面先熔化的可能性。这种情况下很可能导致涂层的结构遭到破坏,应该加以避免。

2.3 单侧熔化情况实例分析

对之前的结果进行分析,发现对涂层结构进行电子束辐照存在基体熔化而膜层不熔化的现象。这种情况可能对涂层的性能有较大影响。文中对9Cr18钢表面TiN涂层结构进行了数值仿真,探究该现象产生的可能性。对加速电压进行调整,使高压(>25 kV)的时间范围适当加大,以减小膜基之间温差,获得温度最高时刻的温度场情况,见图8,其中着色部分表示钢基体存在熔化部分,同时涂层处温度最高部分也未达到TiN的熔点,涂层状况未遭到破坏。

通过仿真发现,可以通过控制工艺参数,来达到这种特殊的单侧熔化效果。这种工艺既能保证涂层结

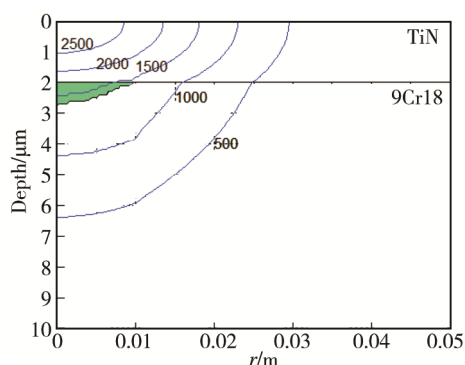


图8 单侧熔化熔池形态

Fig.8 Shape of one-side melting zone

构、表面状态等不因加热发生破坏,同时又能使膜基界面附近金属基体发生软化甚至产生微量熔化层,能够提高膜基界面原子扩散,有效提高结合力。需要注意这种工艺对工艺参数要求非常苛刻,参数区间较窄。温度过高容易造成涂层熔化,熔化区域过大可能会使液态金属冲破涂层,导致涂层破坏。同时涂层与基体之间在加热冷却过程非常容易产生残余应力,实验^[5]中也出现了涂层开裂失效的情况。

3 结论

通过对几种可能的控制手段进行仿真模拟,获得如下结果。

- 1) 在涂层多层结构中电子可能穿越TiN涂层范围,到达9Cr18钢基体,并在界面钢一侧产生能量沉积峰值。
- 2) 电子能量沉积峰会引起涂层内部特殊的温度场分布,在一定时间范围内使涂层内部温度梯度减小,甚至发生内部温度高于表面的现象。
- 3) 特殊温度场可能导致钢一侧熔化,TiN涂层不发生熔化的特殊改性现象,这对于提高膜基结合力有积极意义,但是对参数控制要求较高,不容易实现。

参考文献:

- [1] 郝胜智,吴爱民,钟溥,等.一种新型的材料表面改性装置-强流脉冲电子束(电子炮)[J].真空,2000(2):16—19.
HAO Sheng-zhi, WU Ai-min, ZHONG Fu, et al. New Equipment for Surface Modification of Material-High-current Pulsed Electron Beam System (Electron Cannon)[J]. Vacuum, 2000(2): 16—19.
- [2] ROTSHEIN V P, IVANOV Y F, MARKOV A B, et al. Surface Alloying of Stainless Steel 316 with Copper Using Pulsed Electron-Beam Melting of Film-substrate System[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(22/23): 6378—6383.
- [3] CAI J, GUAN Q F, HOU X L, et al. Isothermal Oxidation Behaviour of Thermal Barrier Coatings with CoCrAlY Bond Coat Irradiated by High-current Pulsed Electron Beam[J]. Applied Surface Science, 2014, 317: 360—369.
- [4] 王忠,梅显秀,王存霞,等.强流脉冲电子束辐照对NiCoCrAlY涂层结构和性能的影响[J].强激光与粒子束,2009,21(9):1400—1404.
WANG Zhong, MEI Xian-xiu, WANG Cun-xia, et al. Irradiation Effect of High Current Pulsed Electron Beam on Surface Structure and Mechanical Properties of NiCoCrAlY[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(9): 1400—1404.
- [5] ANTHOY J, PERRY J N, BULL S J, et al. The Effect of

- Rapid Thermal Processing (RTP) on TiN Coatings Deposited by PVD and the Steel-turning Performance of Coated Cemented Carbide[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 120/121: 337—342.
- [6] WEIGEL K, BEWILOGUA K, KEUNECKE M. Effects of Electron Beam Treatment on Ti(1-x)AlxN Coatings on Steel[J]. Vacuum, 2014, 107: 141—144.
- [7] 陈华, 汤文辉, 冉宪文, 等. 电子束辐照多层介质能量沉积规律的仿真研究[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(6): 501—506.
- CHEN Hua, TANG Wen-hui, RAN Xian-wen, et al. Simulation Study on Energy Deposition in Layered Target Irradiated by Electron Beam[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(6): 501—506.
- [8] KADRI O, IVANCHENK V N, GHARBI F, et al. GEANT4 Simulation of Electron Energy Deposition in Extended Media[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2007, 258(2): 381—387.
- [9] MARKOV A B, ROTSHTEIN V P. Calculation and Experimental Determination of Dimensions of Hardening and Tempering Zones in Quenched U7A Steel Irradiated with a Pulsed Electron Beam[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 1997, 132(1): 79—86.
- [10] PROSKUROVSKY D I, ROTSHTEIN V P, OZUR G E, et al. Physical Foundations for Surface Treatment of Materials with Low Energy, High Current Electron Beams[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 125(1/2/3): 49—56.
- [11] 杨海亮, 邱爱慈, 张嘉生, 等. 不同入射角度下强流脉冲电子束能量沉积剖面 and 束流传输系数模拟计算[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(5): 778—782.
- YANG Hai-liang, QIU Ai-ci, ZHANG Jia-sheng, et al. Simulation Calculation for the Energy Deposition Profile and the Transmission Fraction of Intense Pulsed Electron Beam at Various Incident Angles[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(5): 778—782.
- [12] 刘国治. 低阻抗二极管产生的强流电子束能谱分布的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 801—804.
- LIU Guo-zhi. Numerical Simulation on the Energy Spectrum of the Electron Beam Generated by Low-impedance Diode and the Influence of External Magnetic Field on Diode Impedance[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(8): 801—804.
- [13] 栾希亭, 邓永锋, 谭畅, 等. 非均匀磁场约束条件下的电子束空气等离子体特性[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 2032—2036.
- LUAN Xi-ting, DENG Yong-feng, TAN Chang, et al. Properties of Electron-beam Produced Air Plasma in Nonuniformmagnetic Field[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(9): 2032—2036.
- [14] 康盛伟, 王培, 郎锦义, 等. 电子束能谱宽度及角分布对蒙特卡罗方法模拟计算剂量分布影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2012, 21(1): 80—82.
- KANG Sheng-wei, WANG Pei, LANG Jin-yi, et al. Monte Carlo Calculation of the Impact on Dose Distribution by Width of Energy Spectrum and Angular Distribution of Electron Beam[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2012, 21(1): 80—82.
- [15] POGREBNJAK A D, BRATUSHKA S, BOYKO V I, et al. A Review of Mixing Processes in Ta/Fe and Mo/Fe Systems Treated by High Current Electron Beams[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 1998, 145(3): 373—390.
- [16] 鲍久圣, 杨志伊, 刘同冈, 等. 真空自由燃烧氦电弧温度场的数值模拟研究[J]. 真空, 2006, 43(4): 58—61.
- BAO Jiu-sheng, YANG Zhi-yi, LIU Tong-gang, et al. Numerical Simulation for Temperature Field of Free Combust Ion in Vacuum Due to Helium-arc[J]. Vacuum, 2006, 43(4): 56—61.
- [17] 董攀, 代志勇, 谢宇彤, 等. 强流电子束聚焦数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(8): 1970—1974.
- DONG Pan, DAI Zhi-yong, XIE Yu-tong, et al. Particle-in-cell Simulation on Focusing of Intense Electron Beam[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(8): 1970—1974.
- [18] 秦颖, 吴爱民, 邹建新, 等. 强流脉冲电子束表面改性的物理模型及数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(7): 701—704.
- QIN Ying, WU Ai-min, ZOU Jian-xin, et al. Physical Model and Numerical Simulation of Intense Pulsed Electron Beam Surface Modification[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(7): 701—704.
- [19] FITTING H J, CORNET N, SALH R, et al. Electron Beam Excitation in Thin Layered Samples[J]. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 2007, 159(1/2/3): 46—52.