

研究金属材料表面强化的意义与研究现状

1.1 金属材料表面强化的意义

铝合金、模具钢、45 钢、合金结构钢等金属材料,广泛应用于机械、航天、航空、船舶、汽车等领域。为提高金属材料的机械性能,在工程应用中一般对材料工作表面进行表面处理。常用的表面处理方法有表面喷涂、阳极氧化等,但这些常用的方法对形状复杂的零件处理时,难以获得与基体结合紧密的改性层。电子束表面处理技术的出现,很好地解决了这一难题。

表面强化是改善材料表面性能的一种有效方法。目前,适用于铝合金等金属材料表面强化的主要有化学转化膜处理、金属涂层处理、离子注入、激光处理等技术。但这些表面强化方法存在着明显的缺陷:化学转化膜处理技术包括阳极氧化法和化学氧化法,铝合金的阳极氧化膜和化学氧化膜存在质地软、耐磨性差、厚度薄、硬度低、承载场合容易破坏等缺点,目前仅在装饰涂层方面有所应用;金属涂层处理技术有电镀和化学镀,这两种方法费时费力,用完的电解液对环境有较重污染;离子注入技术,可获得具有特殊性能的表面合金层,但表面粗糙、易产生微裂纹;激光处理技术耗能较高,设备昂贵,处理效率低,难以广泛推广。

电子束表面处理技术是电子束(功率密度为 $10^6 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$)在极短的时间内使金属表面或内部材料迅速加热熔化,并借助于冷态基体迅速冷却的工艺,能获得一般冷却速度下无法得到的化合物,如形成新的亚稳定相、过饱和固溶体、微晶等,使得材料的表面硬度、抗腐蚀性、耐磨性、热强性等一系列力学、物理、化学性能得到极大提高。电子束具有能量密度高、易于控制和调节等优点,在继电子束焊接和熔炼之后,开始在材料表面处理中得到引人注目的发展。

电子束处理是一种选区域处理,其工作过程类似于电子束焊接。从电子枪阴极表面发射的电子束直接轰击需要处理的工件表面,瞬间的能量转换和沉积使“表面层”温度急剧升高,而“基体”仍保持“冷态”,电子束结束照射加热区域的热量迅速向基体扩散,表面层的温度急剧下降,从而表面得到强化,形成特定的加热、冷却过程,类似于常规的热处理过程。

电子束表面强化技术是利用高能量密度的电子束对材料进行表面快速加热和快速凝固而获得优异表面强化层的一种工艺,主要包括电子束表面淬火(电子束相变硬化)、电子束表面熔凝处理、电子束表面合金化、电子束表面熔覆和电子束表面非晶化等。经表面强化处理的表层一般具有较高的硬度、强度以及优良的耐腐蚀和耐磨性能。

目前,国内外对金属材料表面强化的研究主要集中在用激光技术的表面淬火、表面熔凝处理、表面合金化和表面陶瓷化技术的研究,以及脉冲电子束表面强化和表面添加丝状和块状合金材料形成熔合金层的研究,研究高能扫描电子束表面熔凝处理和表面合金化具有一定的现实意义和应用价值。

1.2 电子束表面强化处理技术的特点

电子束表面强化技术的发展为金属表面强化提供了一个新的有效方法和手段。电子束表面强化技术有如下特点。

(1) 电子束快速加热可以得到超微细组织,提高材料的强韧性。处理过程在真空中进行,可以减少表面的氧化。

(2) 电子束的能量利用率高,可对材料进行局部处理,节约能源,表面淬火是自行冷却,不需要冷却介质和设备。

(3) 电子束能快速进行表面合金化,在极短的时间内完成常规热处理几小时甚至几十小时的渗透效果。

(4) 电子束工艺参数可控,因此可以控制材料表面强化层的位置、深度和组织性能。电子束技术能对复杂零件的表面进行处理,用途广泛。

电子束表面处理技术与常用的表面处理技术相比,具有以下优点。

(1) 工件变形小:在电子束表面处理过程中,电子束对工件局部区域进行表面处理,而整个工件并未进入高温状态,能量总量少。

(2) 清洁:加工处理在真空环境下进行,空气中的杂质和有害气体对工件的表面处理质量影响较小,加工中不会引入其他元素。

(3) 处理方式灵活,能够实现精加工:由于扫描电子束可实现面域扫描,扫描面积大小可精准调控,因此可用来加工传统工艺难以加工的精密零件和微细仪器。

(4) 能量使用效率高,节约能量:电子束电热转换效率可达90%以上,耗费能量很少。

除此之外,电子束表面处理技术还有易实现高精度控制,加工重复性好,能在客观上节省贵重金属的使用,缩短周转时间等可观的经济效益。

1.3 电子束表面处理技术与其他高能束的比较

电子束、离子束和激光束均属高能束范畴,高能束热处理是指当高能束发生器输出的功率密度可达 10^3 W/cm^2 以上的能束,定向作用在金属的表面,使其产生物理、化学或相结构转变,从而达到金属表面改性的目的。电子束表面处理技术具有功率密度高、作用时间短、加热面积可根据需要任意选择、热影响区小、工件变形小、冷却过程无需冷却介质可控性好

等共同优点。高能束之间的比较如表 1.1 所示。

表 1.1 电子束与激光束表面处理工艺的比较

项 目	电 子 束	激 光 束
能量效率	约 90%	约 10%
气氛条件	在真空中进行	在空气中进行(但有时需辅助气体)
防止反射	不需要防止反射	需防止反射,反射率约为 90%
束偏转	通过调节偏转线圈的电流可选择任意图形	利用反射镜使激光束偏转
对焦	控制聚束透镜的电流进行对焦	移动工作台进行对焦
设备运行费	1(以电子束设备运行费为 1)	7~14(电、激光气体、辅助气体)

在处理过程中,电子束和激光束处理只注入能量,而离子束注入则在沉积能量的过程中,同时可改变材料表面的化学成分。

总之,高能束独特的加热方式及其特点,给材料表面处理带来了新的理念。

1.4 电子束表面处理技术的分类

从不同的工艺或技术角度出发,可对电子束表面处理技术进行分类。

1.4.1 按照电子束能量注入方式分

1. 连续型电子束

电子枪发射的电子束是连续固定的,材料表面所获得的能量主要由电子束与材料表面的作用时间及对入射电子束的控制来确定,适用于功率不是很高、处理区域较规则的工件。连续型下束包括电子束集中聚焦下束、电子束扫描下束两种方式。

2. 脉冲式电子束

脉冲式电子束表面处理区域的大小与在时间、空间上对电子束能量的控制有关,而改性层的深度还受到电子束功率密度的影响,适用于高功率、大束斑、复杂零件的特殊位置处理等场合。

1.4.2 按照表面处理效果分

1. 电子束表面淬火

表面淬火一般是指表面层加热温度超过相变温度但未达到熔点,利用电子束表面处理冷却速度极快的特性,使材料处于奥氏体状态的时间极短,晶粒来不及长大,获得金相组织为超细晶粒的改性层;从而提高材料表面层的硬度、强度、耐磨性及耐疲劳性等机械性能,也称“表面强化”。

2. 电子束表面熔凝处理

若电子束平均功率密度在 $10^6\sim10^9\text{ W/cm}^2$ 的范围内,通过控制一定的轰击作用时间,可使金属受轰击表面达到相变温度或熔点以上,表层所获得的热量通过工件自身的热传导迅速传递给“基体”,使加热表面快速冷却,冷却速度可达 $10^4\sim10^6\text{ }^\circ\text{C/s}$,获得“自淬火”的效

果。表层加热温度超过相变但未及熔点温度时,相变过程中工件处于某种状态的时间很短,晶粒来不及长大,故可获得金相结构为超细晶粒的组织,同样,当表面温度超过熔点时,熔化薄层在极短时间内经历凝固过程,亦可获得细化均匀的超细组织,从而使材料表层的强度、硬度、耐磨性及耐疲劳性等方面的性能大大提高。电子束熔凝处理在真空环境中进行,具有真空脱气的效果,因此表层熔凝质量很好。同时加工的零件表面无需黑化预处理,处理时不需要保护任何气体,使用成本低。

3. 电子束表面合金化

表面合金化是在基体表面涂上一薄层其他金属或合金纳米粉末材料,采用适当功率密度的电子束,适当延长电子束与表面的作用时间,使表面涂覆层熔化,而基体材料表面薄层也微熔,形成了涂覆材料与基体材料的冶金结合层(合金化层),从而达到表面合金化的目的。一般来说,合金化层具有一些特殊的性能,如高硬度、高耐磨、强抗蚀性等。

4. 电子束表面非晶态处理

与电子束表面淬火相似,区别在于进行表面非晶态时,电子束的平均功率密度较高,作用时间更短,冷却速度极快,使金属工件表面很薄的一层熔化,得到非结晶态的组织,使工件表面具有优异的抗腐蚀及抗疲劳性能。

5. 电子束表面退火

电子束表面退火所用功率较低,以降低材料的冷却速度。通过电子束表面薄层退火处理固态或液态的外延作用,消除材料表面的损伤,保证杂质不再分布。

6. 电子束表面纳米陶瓷化

表面纳米陶瓷化是采用电子束技术扫描添加陶瓷材料,达到改善基体表面的硬度、耐磨性和可加工性等目的,并保证基体的基本使用性能。此项技术目的是使基体与陶瓷材料互相作用,取长补短,制备出既有金属的强度和韧性,又有陶瓷的耐高温、耐磨损、耐腐蚀等优点的“复合”材料。

1.5 电子束表面处理技术的研究现状

1.5.1 脉冲电子束表面处理技术

电子束表面处理技术是在短时间内将大量的能量沉积在材料表面薄层中,使材料发生一系列的物理变化及化学变化,进而达到改性目的的一项技术。随着电子束技术在表面处理领域的实践应用,取得了一系列的显著成果,受到了世界各国的广泛重视。

与其他电子束加工技术相比,电子束表面处理强化技术是 20 世纪 70 年代发展起来的新的表面强化技术。Proskurovsky 等在电子束表面处理中做了大量实验和理论奠基工作。研究表明:电子束表面处理时能产生瞬态能量,并可以使金属材料引发快速熔凝、蒸发、增强扩散和能量膨胀等效应。

Archipoli 等采用高能脉冲电子束(high current pulsed electron beam, HCPEB)对 Al-Si 钢进行表面处理,发现处理区域形貌呈环带状分布,从束斑中心到边缘有三个不同形

貌的环带,出现这种情况的原因是由于高能电子束的能量分布近似高斯分布,导致中心区域的能量沉积速率高于束斑边缘。另一方面是由于距离束斑中心越远的区域其冷却速度越快,因此能量分布不均通常会导致束斑中心位置的熔坑直径和密度均大于束斑辐照边缘位置。

郝胜智等利用强流脉冲电子束对纯 Al 进行轰击实验,得到脉冲电子束(28 keV, 4.5 μ s)可使纯 Al 试样表面熔化,并出现环形山及熔孔等表面形貌,处理区域深度方向的显微硬度有明显提高。赵健闯等建立了 Al-Si-Pb 合金电子束处理的温度场和应力场的有限元模型,得到热应力的分布、最大熔深的位置及其最大深度,通过将模拟结果与实验结果比较,揭示了表面熔坑的形成机理,与横截面的显微硬度分布特征。金铁玉等利用强流脉冲电子束对齿轮进行表面强化处理,分析齿轮材料表面的组织与性能,通过实验前后材料表面的显微硬度、组织性能的对比,发现材料各方面的性能得到了明显的提高。

李生志等对 M2 高速钢表面进行电子束辐照处理,发现经过处理后的材料组织中马氏体晶粒细化、熔碳量增大以及晶格间出现残余奥氏体,材料的硬度有所提高、耐腐蚀性能得到明显的改善。丛欣等对 9SiCr 进行电子束淬火处理,大大提高了材料表面的硬度,其硬度高于高频淬火硬度 66~69 HRC,使齿状模具获得了较深的淬硬层,回火后仍保持了较高的硬度。电子束淬火组织中碳化物溶解程度大大高于常规淬火,并形成超细化马氏体,即隐针马氏体,经淬火后提高回火温度,可以避免开裂现象。

高波等采用脉冲电子束对纯镁和镁合金进行表面处理,研究表明:随着凝固速率的增加,处理区域凝固失稳形成胞晶。当胞晶的生长速率达到一定值时,胞状晶向枝晶发生转变,且其转变具有规律:①随着脉冲次数的增加,出现长条状形态时胞状晶会互相融合;②距离束斑中心越远,胞状晶晶粒越细小。秦颖等研究认为,强流脉冲电子束表面处理过程中,在材料表面未熔化的处理条件下,应力状态主要有两种:①材料表层随温度场变化的准静态应力;②表面向内部传播的热弹性应力波。Markov 等首先建立了强流脉冲电子束轰击在金属材料内引发温度场的一维物理模型,并将模拟得到的结果与实验结果对比,发现两者较好的吻合。Gruzdev 等建立了脉冲电子束加热的物理模型,分析了持续脉冲、间接脉冲对温度场的影响,结果表明,使用脉冲电子束表面加热可以获得较厚的表面改性层。Chumakov 等研究了脉冲电子束对非均质材料的作用,建立了温度场和浓度场的数学物理模型,对非均质材料相之间的传热与传质过程进行了模拟,研究表明:工件的温度分布和浓度分布规律取决于材料的传质、相变潜热和外热源。

邹建新研究了脉冲电子束对材料表面强化处理,在各种处理模式下,强流脉冲电子束技术可有效地对金属及金属间化合物材料进行表面强化从而优化材料的性能。Perry 等研究了强流脉冲电子束对 TiN 涂层的影响,研究结果表明:经高能电子束处理后,TiN 涂层均出现了裂纹。在低能电子束处理后,用化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)方法得到的 TiN 涂层,在微观特性和切削性能上几乎没有变化;而用物理气相沉积(physical vapor deposition, PVD)方法得到的 TiN 涂层,出现了较大的变化,提高了刀具的抗磨损能力。

1.5.2 电子束表面强化仿真

Opreper 等对电弧固定时 TIG (tungsten inert gas welding) 焊接熔池进行了研究,在建

立二维焊接熔池的数学模型时,考虑了表面张力梯度、电磁力和浮力对液态金属流动和传热过程的影响。目前的仿真模型主要为固定热源的二维模型、运动热源的三维准稳态模型和运动热源的三维瞬态模型等三种。

Hoadley 等建立了激光移动热源表面熔覆二维熔池流场、温度场的有限元模型,建模时考虑了气体压力对熔池流体流动的影响,但没有考虑横截面流动换热情况,并预先确定熔覆层的高度。Zacharia 等建立了 TIG 焊熔池流场及传热过程的三维瞬态模型,采用了运动电弧,并用单元标子技术(marked element technique)跟踪了固液界面的瞬态发展,在对模型能量方程进行求解时考虑了局部瞬态相变的影响。Lan 等利用激光对厚度为 3.2 mm 的 6063 铝板进行表面处理,建立了三维准稳态熔池流体流动及传热模型,采用运动高斯热源,考虑了表面张力、浮力作为熔池流体流动的内驱动力。刘红斌等建立了脉冲激光作用熔凝的二维热流耦合模型,模拟结果表明:在熔凝过程中,熔池内存在一对方向相反的主环流和多个环流,熔池内的流速随温度的降低而减小。

曾大文等建立了二维准稳态激光熔覆熔池流场及温度场的数值模型,获得了激光熔覆熔池的自由表面形状、速度场及局部特征凝固参数,研究表明:表面张力系数和扫描速度对熔池自由表面形状和熔池内温度分布、速度分布有重要意义。郑炜等建立了运动电弧作用下脉冲 TIG 焊接熔池流场和热场动态变化过程的三维数学模型,研究表明:熔池流场、温度场及熔池形状随焊接电流的变化而发生周期性变化。张亚斌建立了电子束焊接熔池三维流动模型,采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)算法对模型控制方程进行求解,研究结果表明:在匙孔的搅动下,熔池内的流场具有明显的分区分层。熔池内流体的流动在水平方向和厚度方向上具有明显的不同,水平方向的熔池流动流场呈 V 形延后分布;液态金属随匙孔的移动沿焊接方向流动,近匙孔区的流动速度最大。

闫忠琳等利用有限元分析软件,对电子束扫描纯镁板材表面加热过程中的温度场进行数值模拟,结果表明:基于电子束表面改性过程的内热源的一维物理模型仿真结果与实验结果相符合。王浩强等设定不同的冷却速度,分别模拟计算组织的转变量,同时制备相应冷却速度下的金相组织并进行观察和分析,结果表明:模拟计算的结果与观测的金相组织吻合程度较好。在不同的电子束工艺参数的条件下,对多晶硅温度场的变化进行数值模拟,结果表明:电子束熔炼多晶硅温度场数值模拟结果能更好地反映实验结果。郭绍庆等针对 35Ni4Cr2MoA 钢进行电子束相变硬化,建立了移动热源的温度场有限元仿真模型和加热过程奥氏体转变的数值计算模型,结果表明:所建的仿真模型可以合理地预测出具体电子束工艺参数条件下相变硬化层的轮廓。陈虎城等考虑了热辐射、潜热和热物性参数等因素,建立了三维瞬态温度场有限元仿真模型,对 45 钢电子束相变硬化进行了温度场和组织场的仿真计算,所得的仿真结果与实验结果相符合。

1.5.3 电子束表面强化微观组织的凝固与晶粒生长仿真

Anderson 等最先开始利用蒙特卡罗(MC)方法模拟晶粒生长,他们的基本思想是将二维或者三维模拟区域离散化,采用正方形微元将模拟区域划分为小的单元,然后进行初始化,给每个微元赋予一个随机数,其取值范围为 $1 \sim Q$,这些随机数相当于晶粒单元的取向,两个具有相异取向的微元之间在晶界,两个不同取向的微元之间被定义为一个晶界段。

Debroy 等用蒙特卡罗方法模拟焊接 HAZ 晶粒长大,他们首先将三维 MC 模型应用在

焊接热影响区的研究；他们还模拟了焊接接头的晶粒生长情况，以纯钛与 2.25Cr-Mo 钢为研究对象，用 3D 蒙特卡罗模型实时模拟了热影响区的晶粒生长，在模拟过程中建立模拟时间步与实际时间的关系。Spittle 等第一次采用蒙特卡罗方法定性地预测了合金成分和工艺参数对二元合金晶粒组织的影响，模拟了二维晶粒的形成，他们所建立的模型的基础是概率思想，方法是随机抽样，并且是在晶界能最低的基础上来计算晶粒长大的概率，利用该模型模拟的结果尽管与实验结果非常接近，但没有将宏微观传输过程的细节考虑在建模当中，并且缺少晶粒生长的物理机制。

Sankaran 等在模拟晶粒生长的过程中考虑了影响晶粒生长速度的因子，通过几何法形成 Voronoi 网格获得晶粒的初始形貌。20 世纪 50 年代初，著名数学家 Neuman 首先提出了元胞自动机 (cellular automata, CA) 模型。他把一个矩形离散成多个网格，就形成了格点，每一个格点可以看成是一个细胞基元，然后给它们赋予一个初始状态，状态值为 0 或 1，在网格中用空格或实格来表示。在事先规定的规则下，可以通过网格中的空格或实格的变动情况来描述细胞或基元的演化。Norman 等首先建立了一个 2D-CA 模型用于模拟枝晶生长，开创了二维元胞自动机在材料科学中应用的先河，该模型考虑了局部界面曲率、潜热和热扩散，定性地模拟了枝晶生长结构。Brown 等建立了二维 CA 模型，模拟了柱状枝晶在二元合金系中稳态生长的过程，讨论了合金成分和局部凝固时间对枝晶形貌的影响，合金成分、生长速度和温度梯度都会对枝晶形貌和枝晶臂间距有很大的影响。Brown 建立了三维 CA 模型，讨论了过冷度的大小对三维枝晶形貌的影响，随后，他们在三维元胞自动机模型的基础上，建立了三维的 CA-FD 的耦合模型，可以模拟合金在凝固过程中两相的生长过程。Rappaz 等把晶粒形核和晶粒长大的物理机制引入元胞自动机模型中，所构建的模型可以用来模拟合金在凝固过程中的晶粒形态的演变过程，在均匀温度场的条件下模拟了铝硅合金凝固的晶粒结构，并考虑了晶粒在模具表面和中心形核位置的异质连续形核、晶粒取向和枝晶尖端生长动力性，成功地预测了过冷度和合金成分对微观组织形成的定量影响。再现了从柱状晶到等轴晶的竞争生长，并得到了实验验证。

赵玉珍利用晶界演化模型，将有限元软件求解出的固液界面当作晶粒开始生长的起点，依据晶粒生长的方向和温度梯度间的夹角来判断晶粒以何种方式生长，通过模拟晶界的移动，计算出每一个时间步长后，任一对相邻晶粒在晶界上的温度梯度的方向，然后，计算出晶向与温度梯度的夹角，确定出新晶界的位置。许林在原有二维元胞自动机模型的基础上，结合有限差分法和蒙特卡罗法，并通过将浓度场和温度场方程进行耦合，建立了三维 CA 凝固模型，实现对二元合金凝固微观组织演化进程进行实时计算。姜燕燕以焊接熔池凝固为基础，建立了二维 CA 模型，模拟了熔池边界附近微小区域柱状晶的生长，讨论了晶粒生长过程中基体材料的晶粒和浓度以及冷却条件对晶粒生长所产生的影响，研究温度梯度非均匀变化和不同温度梯度对柱状晶生长的影响。张世兴等将 MC 技术与晶粒生长模拟相结合，通过焊接实验，模拟出了纯铝焊接热影响区晶粒生长过程，利用实验和统计学的方法得到晶粒尺寸与温度间的关系。张敏等以晶粒形成原理和枝晶生长动力学等为基础，采用 CA 法，建立了焊接熔池凝固过程中的二维模型，对焊接熔池凝固过程柱状晶向等轴晶的转变过程进行了模拟。邓小虎等基于焊接冶金学原理，将元胞自动机 (CA) 法与蒙特卡罗 (MC) 法耦合，建立焊缝凝固微观组织演变模型，该模型利用 CA 法和 MC 法构建凝固形核和长大演变规则，同时利用耦合有限差分法来计算温度场和熔质场，再现焊缝凝固微观组织演变过程。

1.5.4 表面强化熔池内流体行为与动态凝固特性

1. 表面强化熔池内的流体行为

在表面热处理过程中,熔池内的流体行为对组织及性能有着至关重要的作用。杨黎峰等以计算流体力学与传热学原理为基础,建立了铝合金电阻点焊液态熔核流动行为和传热过程的轴对称有限元模型,并依据有限元法对铝合金点焊熔核形成过程中的温度场和速度场分布进行了数值计算。张亚斌等建立了铝合金 TIG 焊接温度场的计算模型,分析了焊接速度对温度场分布、熔池大小的影响。Dong 等的研究表明:不同的焊接参数引起温度分布的改变,并且影响到熔池液面 Marangoni 对流的强度和熔池的形状,由电磁力引起的内部对流有助于熔池深度的增长。

Kim 等通过数值模拟方法研究了激光熔凝过程中的弯曲表面形状、激光功率密度、材料的热物理性能以及熔池表面形貌的影响规律,并探索了火山坑形成的机理和对火山坑深度和边缘高度影响规律。Fan 等的研究表明:气体钨极电弧焊焊接熔池内的流体流动是由电磁力、浮力、电弧拖曳力和表面张力引起的,焊接熔池的上面和底面张力对熔池内的流动形式有重要作用。Kamel 等通过对连续激光焊接 AZ91 镁合金的计算结果表明:表面张力和浮力驱动流体进行热传递,熔池流体是从中心流向外侧的固液混合区并在熔池内形成两个涡流。Kamel 等对脉冲激光束对镁合金的作用进行了研究,发现材料的热物理性能对发生在熔池内的传质现象以及熔池形貌的形成有显著的影响,模型解决了层流流体的流动与传热耦合方程,证明在熔池中的流动行为,该模型考虑了浮力和 Marangoni 力的耦合作用,以及热物理特性与温度、辐射和对流热损失,研究表明:Marangoni 力显著改变了熔化和凝固过程中的特点,使熔池变宽而浅。Sarkar 等立的三维模型可以预测合金化过程中熔池内及在整个凝固合金截面内熔质的分布。

2. 表面强化动态凝固行为

极冷条件下的凝固行为会由于熔池内的流动特性而导致性能差异。Song 等对 AISI D3 工具钢进行电子表面硬化处理,研究表明:处理硬化层主要由马氏体、碳化物和残余奥氏体组成,过渡区域主要由回火索氏体组成,因此表面硬度得到显著提高;而且硬化层的硬度与电子束扫描速度有密切关系。Sohi 等利用电子束对球墨铸铁等温淬火前后分别进行表面熔凝处理,分析和比较电子束熔凝经过不同等温淬火温度(180℃、275℃、375℃)后试样的组织结构和硬度,电子束熔凝使球墨铸铁表面球状石墨消失或减少,并形成了非平衡组织,提高了表面硬度。Gulzar 等利用电子束对球墨铸铁和等温淬火球铁分别进行表面熔凝和镍合金化,通过 X 射线衍射仪和 EDS 分别分析了组织中相的组成和各元素的含量,探讨了电子束处理后表面微观组织和硬度的演变机理,研究表明:所有的试样经过电子束熔凝后表面硬度都有了大幅提高;处理后试样的表面形貌分为熔化区、热影响区、两者交界区和基体四个区域。熔化区球状石墨消失,形成了一种树枝状莱氏体组织,且其中心区域分布着大量细小薄层树枝晶;热影响区形成了针状马氏体,分布在球状石墨周围;两者交界区形成了奥氏体;基体组织为片状珠光体和球状石墨组织。通过 XRD 分析,电子束表面熔凝处理后试样的峰值大幅扩展。

刘志坚等对 45 钢进行脉冲电子束熔凝处理,研究表明:轰击区表面瞬态骤熔急

冷,形成了微晶或无序层;剖面组织区域分为熔凝区、马氏体区、热影响区和基体,熔凝区在极高的温度梯度下,具有自淬火效应。董闯等对纯铝及铝合金进行强流脉冲电子束表面重熔处理,处理后试样表面晶粒细化,甚至形成微晶、非晶态组织,最先熔化的位置是在近表面且最大熔化深度处,解释了表面火山坑状熔坑的形成机制。

1.5.5 电子束表面合金化

Mueller 等利用脉冲电子束表面强化处理技术在 BBC 钢表面制备了具有强氧化性的 MCrAlY 强化层,试验采用束斑直径为 $4\sim 10\text{ cm}$ 的光斑进行大面积处理,可以熔化的深度为 $10\sim 100\text{ }\mu\text{m}$,研究结果表明:强化层显微硬度及耐磨性以及在海水中的抗氧化性能都得到了大幅提高。Marginean 等利用高能电子束表面合金化技术在 Inconel 617 镍基合金表面制备了 WC-Co/Inconel 617 合金层,试样截面出现树枝状富钨区,由于表层强化相的出现及晶粒的细化合金层显微硬度得到了大幅提高,且耐海水腐蚀性能明显优于母材。Rotshtein 利用低能强流脉冲电子束表面合金化技术在钛表面制备了铝合金层,厚度大于 $3\text{ }\mu\text{m}$,研究结果表明:合金层的主要成分为由纳米 $\text{TiAl/Ti}_3\text{Al}$ 晶组成,显微硬度及耐磨性均优于基体材料,但在 TiAl 相处出现裂纹。AHMAD 等采用添加合金粉末的方法在低碳钢表面添加 Ni 和 SiC 粉末之后进行电子束熔凝处理,研究结果表明:在电子束熔凝过程中 SiC 颗粒熔化并分解成小微粒, Ni 和 Si 元素由于熔池驱动力的作用都扩散到基体材料中形成了新相,并且表面形成了非平衡马氏体组织,同时表面没有裂纹出现,与基体硬度相比,低碳钢合金化处理后表面硬度相比于基体提高了 5 倍。曹辉等利用强流脉冲电子束表面强化技术,在预先添加 TiN 合金粉末的镁合金 AZ91HP 表面进行轰击处理,研究结果表明:电子束脉冲轰击处理后可以得到厚度约为 $5\sim 10\text{ nm}$ 的合金层,同时在合金层中 N 的含量呈现梯度分布。

况军等采用强流脉冲电子束表面合金化技术在 AZ31 镁合金表面制备了一层合金层,同时分析了 Al 元素对合金层形成相的影响,研究结果表明:电子束轰击 AZ31 镁合金表面 Al 粉后可以得到典型的熔坑形貌,较之基体材料耐磨性能提高了 6 倍左右。石其年等利用电子束表面合金强化技术在 45 钢表面合金化处理,采用预先添加合金粉末的方式在 45 钢表面添加了耐磨性能较好的合金粉末,而后进行了电子束熔凝处理,研究结果表明:电子束合金化处理后强化层的硬度及耐磨性能大幅提高。刘科等采用电子束扫描表面强化技术对铝合金表明进行合金化处理,首先采用压制粉末的方法将纳米 Al-Fe 合金粉末压制在细槽中,并对合金粉末进行电子束扫描熔凝处理,研究结果表明:合金层出现 Al-Fe 金属间化合物,硬度及耐磨性能大幅提高。

陆斌锋等对低合金钢表面电子束原位合成 M_7C_3 耐磨层进行了研究,通过电子束加热工艺和粉末配比的优化,表面形成了复合层,硬度比母材提高了 2.3 倍,耐磨性能提高了 5.2 倍。彭其凤利用电子束局部熔化对球墨铸铁表面进行硼合金化处理,对电子束合金化后球墨铸铁表面的显微组织、硬度进行分析,并初步探讨了电子束工艺参数对合金化层深度和宽度的影响。王英等采用电子束表面合金化技术对 ZL109 铝硅合金进行了表面强化处理,研究结果表明:ZL109 铝硅合金电子束表面合金化处理后,形成具有网状骨骼的亚共晶组织,生成了 AlNi_3 、 Al_3Ni 、 $\text{Fe}(\text{AlCr}_2)$ 等新相;处理后硬度大幅提高,达到基体硬度的 $4\sim 6$ 倍,与高镍铸铁基本相当。

1.5.6 电子束多道扫描相变硬化的研究

目前,国内外关于多道扫描相变硬化的研究多集中在激光扫描的研究中。Ritesh 基于传热学和相变动力学,建立了激光多道扫描相变硬化有限元仿真模型,探讨了搭接率对硬化层均匀性的影响,研究表明:搭接率为 5 mm 时能达到合理均匀的硬化层厚度。Giampaolo 对 AISI1070、AISI1040 和 AISI420B 进行激光多道扫描相变硬化实验,研究表明:不同材料表面存在不同的回火软化现象与材料的组织结构相关。Soundarapandian 通过数值模拟计算和实验研究搭接率和电子束工艺参数对 AISI57 的影响,研究表明:合理的搭接率和电子束工艺参数可以减弱表面硬度的不均匀性。

Markov 分别采用高功率半导体电子束对 U7A 钢进行抛光实验,研究表明:U7A 钢表面的搭接处附近的硬度值存在明显的回落现象。Song 采用高能电子束对 AISI D3 工具钢进行表面相变硬化实验,研究表明:搭接处的显微组织主要由回火索氏体组成,电子束扫描速度为表面硬度值的重要性能指标。周湘等通过散焦电子束对 Cr12MoV 模具钢进行表面强化处理,研究表明:搭接率为 10%~20%时,模具钢处理层的晶粒显著细化,硬度和耐磨性得到显著的提高。