

电子束焊接过程中的瞬态热-力效应

Transient Thermal-Mechanical Effects in Electron Beam Welding

北京航空航天大学机械工程学院 张彦华 段小雪 王 庆



张彦华

工学博士,北京航空航天大学教授,主要从事焊接结构断裂控制与完整性工程分析等方面的教学与科研工作。

电子束焊接过程中,材料在高能束流集中轰击下温度急剧上升,发生熔化和汽化。由此引起的热扰动迅速波及到热影响区,导致热影响区的温度也立即上升到峰值温度。这种迅速的能量沉积使被焊材料热力响应具有明显的突发性,从而产生强大

电子束焊接具有高强度和高瞬态性的瞬态传热特征,在快速瞬态热传导机制下,导致在电子束焊接热源附近产生显著的动态冲击特性。深入研究电子束焊接的瞬态热-力行为对于保证电子束焊接质量具有重要意义。

的冲击载荷。这种载荷以冲击波的形式在材料内部传播,其作用类似于高速碰撞、爆炸轰击。

电子束焊接的热冲击对材料的组织性能有较大的影响,并产生较大的冲击热应力,在完成焊接的同时对热影响区附近材料造成热冲击损伤。热冲击损伤劣化了材料的性能,对结构的使用构成潜在的危害。因此,在重要构件的电子束等高能束加工中必须对材料的抗热冲击损伤的能力进行评估。

在一般传热分析中,广泛采用 Fourier 定律描述热流量与温度分布之间的本构关系。研究表明,经典的 Fourier 定律不能对涉及到超短响应、大温度梯度和低温环境等极端情况下的热量传递规律作出合理的

解释。建立在 Fourier 定律基础上的传热分析难以对高能束加工过程中出现的瞬态传热及相关的非定常热物理现象作出合理的分析。为此,人们将热传导现象划分为 Fourier 效应和非 Fourier 效应。把遵守 Fourier 定律的热传导现象称为 Fourier 效应,而利用 Fourier 定律不能圆满解释的现象称为非 Fourier 效应。根据瞬态响应程度的强弱,2 种效应下的非稳态热传导过程分别称为弱瞬态热传导和快速瞬态热传导。相应地,对 2 种效应进行的分析分别称为 Fourier 分析和非 Fourier 分析。

快速的电子束加热或冷却是产生热冲击现象的前提,对热冲击问题更进一步的动态处理应该在考虑

到热变形加速度的同时还必须涉及动态的温度效应。所以,在电子束焊接中也应该引进非 Fourier 分析,才能使电子束焊接热 - 力问题的数学描述更接近于实际的物理现象,为电子束焊接工艺分析提供理论基础。

电子束焊接物理机制

电子束焊接与普通熔焊最大的区别在于焊接过程中匙孔的产生。匙孔的出现使得电子束能量可以直接深入到材料内部,而不是通过金属导热向材料厚度方向传播。

在电子束冲击到材料上与材料交互作用过程中,高能量密度的电子束冲击到材料表面将在很薄的薄层产生能量沉积,一部分转变为材料的内能,另一部分转变为使材料变形的动能。当材料的内能超过材料的熔化热或汽化热时,材料将出现熔融或汽化。

在电子束焊接过程中,当电子束轰击在可熔材料工件表面时,如果达到一定的能量密度,将产生一个熔池。在电子束流中心位置,熔化的材料将产生一定的蒸汽压力。在蒸汽压及静水压力的共同作用下,熔化的液体金属将在工件表面形成一个凹陷的熔池。当电子束能量密度继续提高,被轰击工件表面温度相应提高,饱和蒸汽压也随之增大,熔化材料进一步升温 and 汽化,形成强烈的蒸

汽流,蒸汽流的反冲作用将液态金属排向四周,压迫熔池下凹形成一个被薄层液体包围的蒸汽充满式小孔,束流穿过小孔通道对熔池底部进行连续的冲击,在熔化与汽化挖掘作用下形成一个细长的薄层空腔,即匙孔。通过这个小孔,电子束能量可以深入到工件内部。

为保证连续焊接所需的能量转换,匙孔中的各种力发生复杂的交互作用,在液体层表面维持力系的动态准平衡,以保持连续开放的匙孔。来自内层的蒸汽压力向外作用在匙孔壁上,其反作用力是静水压力和熔化液层的表面张力,这一平衡系力图阻止熔化金属向孔内塌陷。此外,金属熔体流动的结果在固液界面产生与熔化材料重力平衡的摩擦力,力图扯平界面而防止熔化金属在自重下收缩。随着电子束向前移动,熔化金属在 Marangoni 效应驱动下流向熔池后沿,形成一个拖尾熔池,熔池后沿的熔化金属通过与基体的热传导逐渐凝固而形成深而窄的焊缝。

当工件与电子束相对运动时,小孔及周围熔化金属的旋转对称性就被破坏了,只保留了以电子束和速度矢量所确定的平面为对称面的平面对称性。电子束通过不断熔化运动方向竖直小孔壁上的金属,向熔池提供液态金属。在电子束后方一个区域,冷却到金属从液态转化成固态,

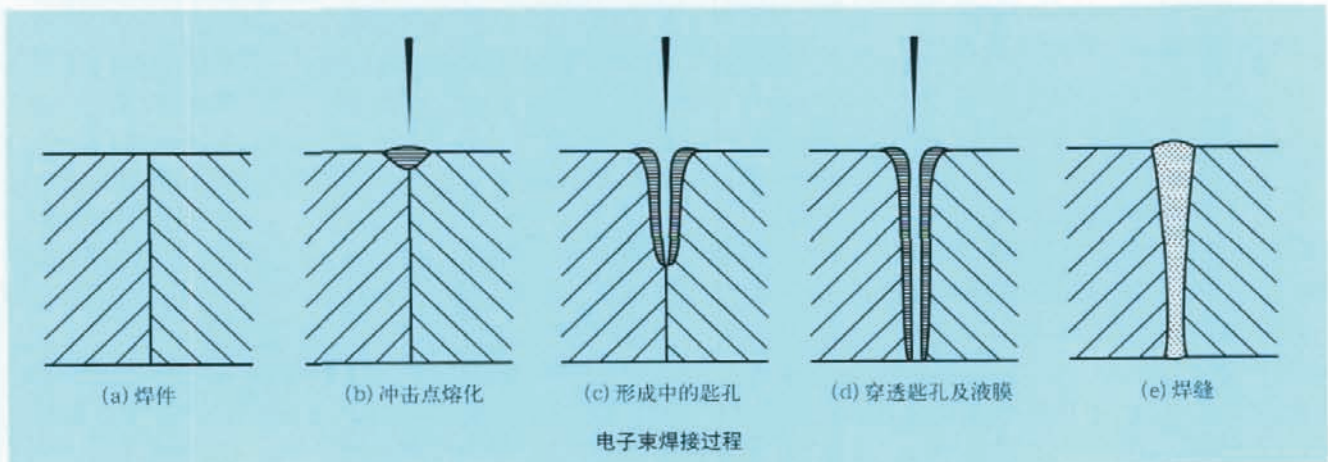
并形成焊缝。随着电子束与工件之间相对速度的增大,前沿熔化区垂直度和熔池的拖尾增大。熔化前沿与匙孔壁间的液体金属减少,而凝固前沿与小孔壁间的液体金属增多。小孔熔化前壁的金属处于过热状态,产生一定的压力,以维持小孔的存在。

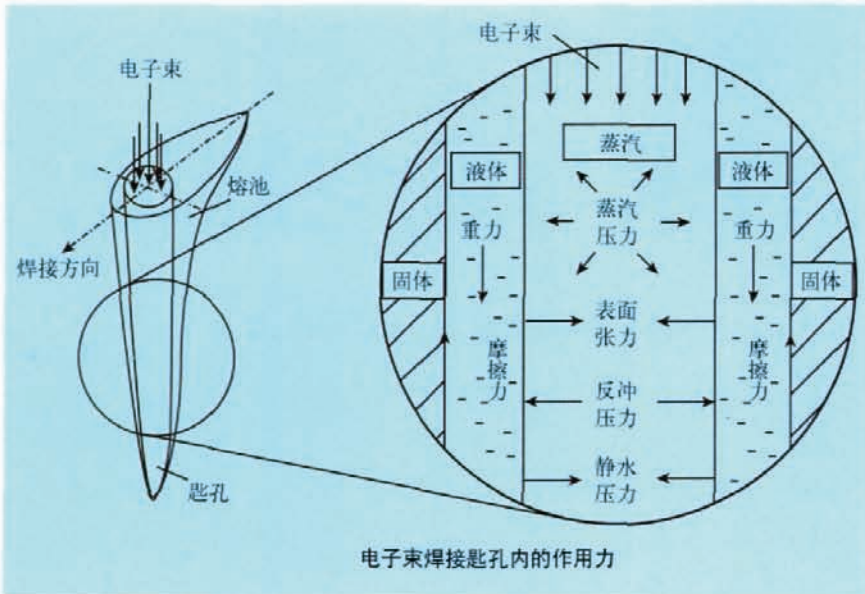
液态金属表面张力和蒸汽压与温度有关,熔池前沿附近的金属温度高,蒸发快,而后部金属温度低,蒸发慢,由此也引起蒸汽反作用的压强差。由于这些力作用,一方面熔池前端的液态金属沿着熔池切线方向绕过电子束,向熔池尾部流动;另一方面,在蒸汽压喷出小孔的反作用力的共同作用下,熔池尾部的金属在靠近小孔一侧有垂直向表面的流动,在靠近凝固金属一侧有垂直向材料内部的流动。这 2 个方向相反的流动起到了强有力的搅拌作用。

电子束焊接瞬态热力效应

电子束焊接过程中的力学效应是热响应的间接作用。材料的力学效应包括热应力、热激波、汽化喷射产生的反冲冲量等。

在电子束冲击下,能量沉积的不均匀引起的非均匀温度场导致材料的不均匀热膨胀,但在极窄脉冲的急剧加热下的这种热膨胀受到原来来不及完全膨胀的部分物质的惯性约束,从而产生内部应力,即冲击热应力。当电子束停止辐照后,材料与结





构将快速冷却,部分熔融区凝固,形成新的不均匀温度分布,亦产生热应力。由于温度平衡与时间有关,有时称这种热应力为准静态热应力。准静态热应力也将使结构产生整体性的膨胀变形。

热激波的形成机制有2种,一种是当熔融、汽化物质离开材料表面向外喷射时(对于汽化物质),喷射动能粗估为能量沉积与材料的升华能和汽化能之差,依据冲量守恒条件,必然对剩余的固态表面产生反冲,形成反冲脉冲压缩载荷;另一种就是上述热响应形成的冲击热应力。反冲压缩应力和冲击热应力的相对强弱与电子束类型、照射条件和材料物理特性密切相关,在一般情况下,反冲压缩应力强度大于冲击热应力。在这2种压力梯度的联合作用下形成物质的运动,并以波的形式在材料与结构内传播,这种压缩波即为热激波。

照射表面的熔融和汽化物质向外喷射时对剩余材料前表面产生反冲冲量,它不仅是产生热激波的基本机制之一。在喷射冲量作用下,结构将受到由此产生的脉冲冲击载荷的作用,引起结构的弹、塑性变形,激发结构的振动,足够大的冲击载荷将使结构发生屈曲。

热波能以有限速度传播,是延迟反应的直接结果,由于热量传播速度是有限的,在热扰动发生后的瞬时,热量只能传播到一个有限的区域内,从而存在一个热量传播到和未传播到的明显的分界线。由于热传导延迟,物体任意时刻的温度分布对空间坐标出现不连续性,体现了热量的波动传播机制,温度不连续性出现的位置为热波的波前位置,波前位置将固体分为若干部分,热量传播到的区域内各点的温度在初始值的基础上有所升高,而没有传播到的区域温度保持为初始温度。而经典的Fourier预测的固体中任何地方都会立即感受到热扰动,表明没有热传导延迟,即隐含着热量的传播速度无限大的假设,不存在热量传播到区域与未传播到区域之分。

根据不同焊接速度情况下高温合金电子束焊接瞬态温度场的数值模拟结果,在移动热源的前方区域,温度分布则存在显著的差别。焊接速度慢时,电子束前方的温度梯度小,因此对前方材料有较宽的预热区;而焊接速度快时,电子束前方的温度梯度大,反映出电子束前方区域的温度变化剧烈,对熔池前方材料具有显著的热冲击作用。

在电子束焊接瞬态热过程中,热

量传递所形成的热波和变形传递所形成的膨胀波可能存在不同步性。热波和膨胀波的波前通过点都要引起瞬时应力的阶跃。由于电子束快速加热的特点使得这2个波的波速存在差异,这样就导致被焊材料所产生的热冲击应力将会发生2次跃变,一次是由于电子束轰击边界上的热流扰动在物体内的传播所形成的温度波的波前通过所引起的;另一次跃变则是由于考虑了热变形加速度的影响而形成的膨胀波的波前通过所引起的。

2次应力跃变出现的顺序由热波与膨胀波波速的比值决定。膨胀波由热变形加速度引起,因此,膨胀波引发的应力波是一个峰值应力不变的无阻尼波。热波由边界热流扰动引起,热波具有瞬时薄层的衰减特性,因此,由热波引起的应力波部分是一个有阻尼的衰减波。随着时间的推移,由热波引起应力波的波前迅速衰减为零。

在电子束焊接过程中,任意时刻的膨胀波和热波引起的应力波波前处于不同的位置。在快速加热过程中,由于热传导速度的迟滞性,发生膨胀波先于热波传播。在热波的波前到膨胀波的波前这段距离内,虽然温度保持不变,但各点的热应力则处于尖峰状态,产生很强的冲击作用。2个应力跃变点之间的空间点均承受很高的峰值应力。电子束焊接热冲击对材料会产生损伤和破坏。

结束语

电子束焊接具有高强度和高瞬态性的瞬态传热特征,在快速瞬态热传导机制下,导致在电子束焊接热源附近产生显著的动态冲击特性。深入研究电子束焊接的瞬态热-力行为对于保证电子束焊接质量具有重要意义。

(责编 依然)