

# 快速扫描电子束加工技术及其在航空制造领域的潜在应用

Rapid Scanning Electron Beam Processing Technology and Its Potential Application in Aviation Manufacturing Industry

北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室 余 伟 王西昌 巩水利 毛智勇



余 伟

北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室工程师,毕业于西北工业大学材料学院。主要研究方向为新材料新结构的电子束加工技术,承担并完成了多项预研及重点型号攻关任务。

电子束加工是利用高能量密度的电子束对材料进行加工处理的方法,电子束作为一种热源,通过调整其能量密度、束斑直径、束流作用时间和材料本身的热物理特性,可以产生加热、熔化和汽化等多种加热效

快速扫描电子束加工技术在国外已经相当成熟,在航空航天、汽车、医疗等方面的应用也越来越广泛。国内众多研究单位进行的一系列基础理论和应用研究为快速扫描电子束加工技术的发展奠定了基础,尤其是近几年随着控制技术的发展,快速扫描电子束加工技术在国内发展迅速,已经逐渐应用到工程实践中,进一步推动了国内精密制造技术的发展。

果。电子束加工包括焊接、打孔、热处理、表面加工、熔炼、镀膜、物理气相沉积、雕刻以及电子束曝光等,其中电子束焊接是发展最快、应用最广泛的一种电子束加工技术。电子束加工的特点是功率密度大,能在瞬间将能量传给工件,而且电子束的能量和位置可以用电磁场精确和迅速地调节,实现计算机控制。因此,电子束加工技术广泛应用于制造加工的许多领域,如航空航天、电子、汽车、核工业等,是一种重要的加工方法。

近年来,随着电磁场控制技术的发展,并结合电子束在磁场中易控的特点,开发了一种新型的电子束加工方法——快速扫描电子束加工技术。

这种通过电磁场的控制实现电子束的快速偏转扫描的方法越来越显出其技术的优势,在航空航天制造领域中获得了广泛的应用。

## 快速扫描电子束加工技术原理与特点

快速扫描电子束加工技术的原理如图1所示,就是通过对电子枪偏转线圈和聚焦线圈的控制,使电子束在工件上按特定的轨迹、速率和能量快速偏转而实现快速扫描电子束加工。由于电子束几乎没有质量和惯性,可以实现非接触的偏转,而且通过电压控制,可以在不同的位置切换时控制束流通断,这样,束流就可以

在构件的不同位置以极高的频率切换。由于材料的热惯性,通过束流与材料的相互作用,在这些位置上就会同时产生冶金效果,实现电子束的扫描加工。如果在不同的束流之间改变聚焦位置或者束流强度,则可以实现多功能加工技术,如多束流加工技

术和复杂信号控制程序精确控制电子束流,使其按照某种特定的方式、特定的规律、一定的速度和能量作用于材料表面,并在材料表面形成金属的微小熔池。一旦材料开始形成熔池,电子束将通过磁场的扫描控制被迅速转移到其他位置,而熔化的液态

保护等优点,是高性能复杂粉末冶金件的理想快速制造技术。

## 快速扫描电子束加工技术的国内外现状

### 1 多束流加工技术

电子束扫描技术早在 20 世纪 70 年代就已经用于消除电子束焊接缺陷,但是由于控制技术的限制,最近才开始用于多束流焊接和其他加工技术。德国 Steigerwald、PTR 和 Pro-beam 等公司都进行过相关研究,主要是在束流偏转设备方面;Aachen 大学的焊接研究所在这方面的研究也比较多,主要是在多束流的束流品质、能量分配及加工过程中热、力、冶金的相互作用方面。英国焊接研究所的 Oliver Nello 等人设计和建立了可编程偏转系统,该系统具有使电子束在 X、Y 轴快速偏转并以相似的速度调节电子束焦点(Z 轴)的能力,可用于电子束多束流焊接过程应力变形控制的研究。

在国内,北京航空制造工程研究所“十一五”期间在国家自然科学基金(多束流电子束加工的热效应)的基础上搭建了多束流技术试验平台,开展了多束流扫描控制技术的研究,并用于电子束焊接过程中应力和变形的动态控制,降低了试件的焊接残余应力,从而减小最终变形。上海交通大学曾对扫描轨迹可控的电子束加工技术进行研究,初步实现了扫描方式的灵活控制,并尝试进行了一些相关的试验,但由于试验设备等条件的限制,比较侧重于理论方面的验证和控制平台的搭建,相应系统有待于进一步优化和完善,工程应用研究也有待于进一步的开展。

### 2 电子束“毛化”技术

自发明电子束“毛化”技术以来,英国焊接研究所在该领域开展了大量的研究工作,开发了成熟的电子束“毛化”设备,而且在工艺研究方面也取得了长足的进步。通过控制电

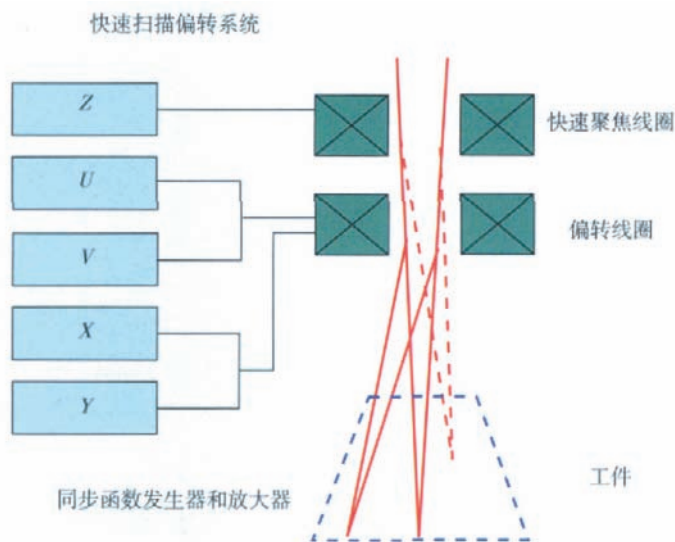


图1 快速扫描电子束控制原理

术、电子束“毛化”技术以及电子束快速成型技术等。

(1) 多束流电子束加工(Multibeam Technology)是指采用 2 束以上的电子束对材料或结构进行处理和加工的一种方法。多束流电子束可以由多个电子枪产生,也可以由 1 个电子枪通过电磁场的控制而产生。电子束在不同的位置快速移动,由于移动的频率很高从而产生多束的效果。本文所提到的多束流电子束都是指由 1 个电子枪通过电磁场控制而产生的多束。

(2) 电子束“毛化”技术(Electron Beam Surf-sculpt)是英国焊接研究所(TWI) Bruce Dance 等人近年来发明的一种新型电子束加工技术,它借助于电磁场对电子束的复杂扫描控制而在金属材料表面产生特殊的成形效果。其基本过程是在真空环境中,通过快速响应偏转线

金属在表面张力及金属蒸汽压力的共同作用下,向束流移动相反的方向流动,并在熔池后方快速冷却、凝固。随着束流的重复扫描,熔池前端的金属被继续转移到熔池后端,经过不断的堆积、冷却、凝固,逐渐形成一定形状和大小的“凸起”(毛刺),产生表面“毛化”的效果,而在熔池前端形成很小的凹坑或者凹槽状的“刻蚀”。

(3) 电子束快速成型技术(Electron Beam Melting, EBM)是一种集成了计算机、数控、电子束和新材料等技术而发展起来的先进制造技术。电子束在计算机的控制下按零件截面轮廓的信息有选择地熔化金属粉末,并通过层层堆积,直至整个零件全部熔化完成;最后,去除多余的粉末便得到所需的三维产品。与激光及等离子束快速成型相比,电子束快速成型技术具有能量利用率高、加工速度快、运行成本低、高真空

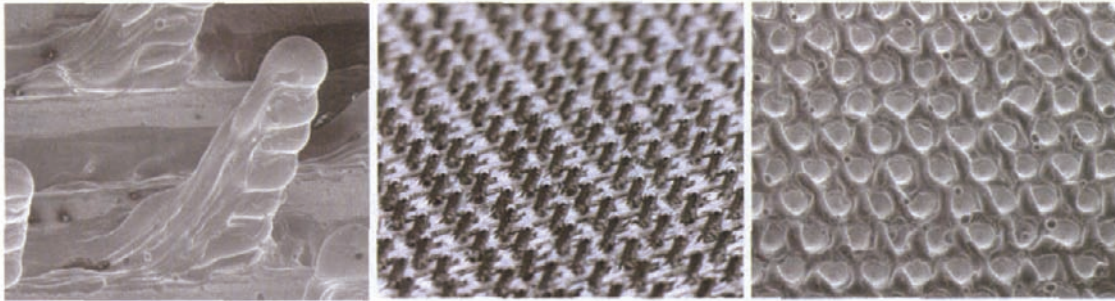


图2 几种典型的金属毛化表面

子束的工艺参数(包括电子束的加速电压、电流和聚焦),加上特殊的扫描波形,即可在不同的金属(如不锈钢、钛合金及铝合金等)上产生各种不同的表面,包括高宽比大的尖峰突起、蜂窝结构、无毛刺的孔穴、刀刃、通道、旋涡和网纹。

对任何纹理的结构,都可以通过改变尺寸、形状、入射角和特征分布来定制客户所需的表面。目前已经成功制备尺寸从 $10\mu\text{m}$ ~ $20\text{mm}$ 的毛刺。图2是电子束毛化的几种表面形貌。该技术不仅能够加工其他工艺无法实现的表面造型,而且在真空操作下可以避免表面污染。

在国内,有关电子束“毛化”技术的研究刚刚起步,北京航空制造工程研究所在现有电子束焊接设备和电子束加工技术的基础上率先开展研究,通过分析电子束“毛化”技术的原理,设计了快速偏转扫描线圈,搭建了电子束扫描控制系统,实现了电子束“毛化”技术,并在不同的金属表面产生不同的毛化形貌,见图3。

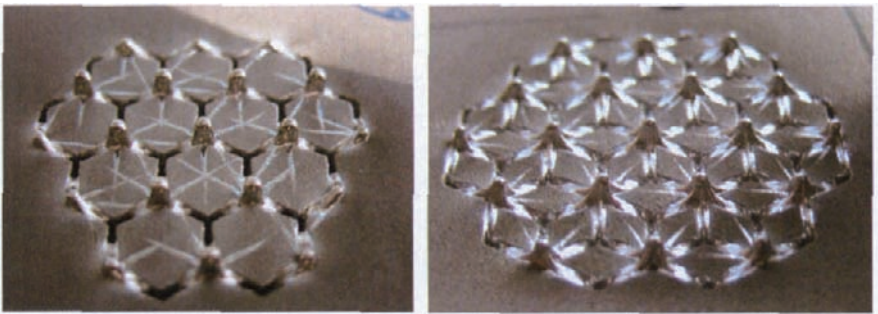


图3 北京航空制造工程研究所实现的电子束“毛化”技术

### 3 电子束快速成型技术

相对于激光及等离子快速成型,电子束快速成型出现较晚,但自2001年瑞典 Arcam 公司确立电子束快速制造技术以来,该技术凭借在粉末近净成型精度、效率、成本及零件性能等方面的独特优势,在国外很快成为研究前沿。美国北卡罗来纳州大学、英国华威大学、德国纽伦堡大学、波音公司、美国 Synergeering 集团、德国 Fruth Innovative Technologien 公司及瑞典 VOLVO 公司积极开展了相关研究工作。研究表明,EBM 能显著地减少生产时间并降低生产成本,尤其适合形状复杂金属部件的小批量生产,任何外表奇异复杂的金属部件都可以一次快速成型。其技术与设备被用于生产零部件的直接制造业,并在航空制造、汽车制造、医疗植入物及模具制造等领域均有出色表现。

目前,国内航空航天、汽车及生物医学等领域对复杂结构及多孔结构有巨大需求,但由于电子束快速成型设备及工艺还不成熟,暂时无法满

足航空航天高性能复杂零件实际应用要求。清华大学进行过电子束选区快速成型技术研究,并购买了1台中压的国产电子束设备,将其真空室进行

改造,增加Z向工作台,安装铺粉系统,利用电磁场的控制使电子束按照预定的轨迹进行逐行扫描,从而实现简单的三维零件的快速成型。由于束流品质(如束斑品质、束流稳定性、聚焦效果等)的影响,电子束扫描控制的精度和灵活性还有待进一步提高,制作试件的质量检测和力学性能也正在研究中。

## 快速扫描电子束加工技术的应用

### 1 多束流电子束加工技术

多束流电子束加工技术主要应用于多束流焊接技术,用于提高焊接效率,减少焊接变形,改善难熔易裂

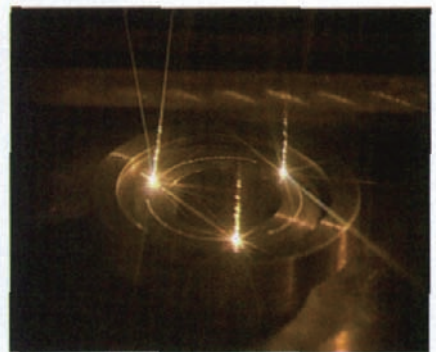


图4 三束电子束焊接齿轮

材料的焊接性、焊缝性能等。多束流电子束的应用可以方便、迅速(通过电磁场非接触地控制几乎没有质量的电子运动)地调节电子束加工过程中的热量分布,从而对其力学过程和冶金过程进行动态控制,减小应力和变形,防止焊接过程中的热裂倾向,形成高质量的加工部件。图4是

德国 Pro-beam 公司采用 3 束电子束同时焊接齿轮的实例,结果表明与单束电子束焊接相比,此种方式可以明显减小齿轮焊接变形,而且大大提高了加工效率。

另外,多束流电子束加工技术还可用于异种材料的连接:通过调节不同位置的停留时间,控制在不同区域的能量输入。例如,接头一边的材料熔化,而另一边的材料仍处于加热状态(扩散焊),这样就可以实现固态不完全熔化的异种材料的有效连接。可见,多束流电子束加工技术在多方面都有很大的应用潜力。

## 2 电子束“毛化”技术

英国焊接研究所正在研究将电子束“毛化”技术应用到金属与复合材料的连接技术上,将这种技术称为 Comeld 技术。该技术先通过电子束“毛化”在金属表面上形成毛刺,预处理后将复合材料置于金属上,通过加温、加压共同固化,即可得到这种金属和复材连接的 Comeld 接头,如图 5 所示。



图5 用于金属/复合材料连接的Comeld接头

根据 TWI 的研究,这种 Comeld 接头比传统的同尺寸接头能承受更高的载荷,断裂前吸收的能量也远高于后者,而且可以通过优化毛刺的结构及分布形式提高这种接头的韧性。此项技术在未来飞机金属与复合材料连接领域有着重要的应用。

另外,电子束“毛化”技术还可以用在金属材料的表面改性如涂层制备上,如图 6、图 7 所示。这种表面处理技术在促进基质与涂层的粘合方面具有非常广阔的应用前景。它可以通过增加表面粗糙度来增加涂层附着力,避免分层。毛刺的形状与尺寸可以影响涂层的微观组织,甚

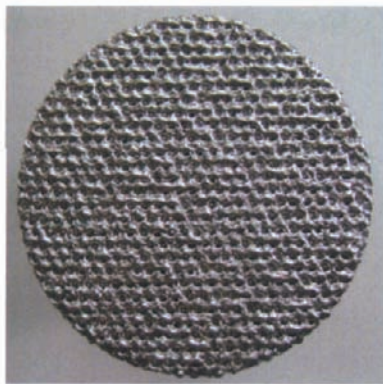


图6 电子束“毛化”钛合金表面

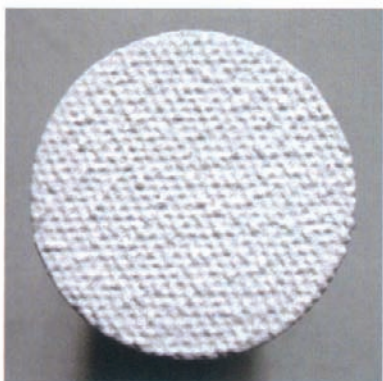


图7 喷涂涂层后的表面

至可以改变涂层表面上的裂纹生长机理。同时,凹入特征改善了同邻接部件的机械互锁,而突出特征有助于关节界面均匀分布应力。该技术的灵活性还可应用于定制特殊表面,例如,将突起特征排列在最大应力的方向,或者改变结构特征的密度使部件上应力均匀分布。由于该工艺在真空下完成,生成的表面非常洁净,有助于连接应用。

## 3 电子束快速成型技术

电子束快速成型技术一经面世即引起各国众多科研机构以及制造业界的高度重视,目前已有美国、德国、意大利及日本一些高技术公司和科研机构将该技术用于机械制造业以及航空航天、汽车和医疗植入器材等领域。美国 Calcam 公司采用电子束快速制造技术制备出了全致密、力学性能优于锻件的 Ti6Al4V 叶轮部件。瑞典 Arcam 公司采用电子束快速成型技术制造了特殊的钛合金点阵结构及复杂的发动机部件,见图 8

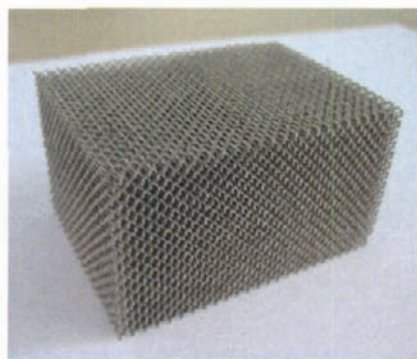


图8 电子束快速成型的点阵结构

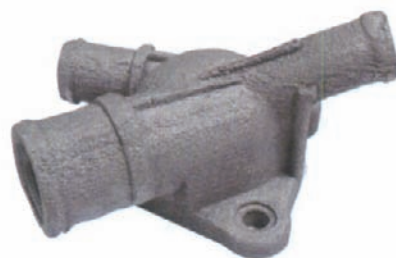


图9 电子束快速成型的发动机部件

和图 9。

国内在无法获得设备及相关技术的条件下进行自主开发研究,在钛合金电子束快速成型研究方面取得了较大的进展。西北有色金属研究院多孔材料国家重点实验室开展了电子束快速成型工艺的研究工作,在钛及钛合金复杂结构及多孔结构的电子束快速制造工艺、应力及变形控制方面积累了实践经验,并制造出复杂的钛合金叶轮样件。

## 结束语

快速扫描电子束加工技术在国外已经相当成熟,在航空航天、汽车、医疗等方面的应用也越来越广泛。国内众多研究单位进行的一系列基础理论和应用研究为快速扫描电子束加工技术的发展奠定了基础,尤其是近几年随着控制技术的发展和,快速扫描电子束加工技术在国内发展迅速,已经逐渐应用到工程实践中,进一步推动了国内精密制造技术的发展。

(责编 良辰)