

高能束流焊接技术在航空发动机耐热材料中的应用*

Application of High-Energy Beam Welding Technology in Heat-Resistant Material of Aeroengine

山东大学材料液态结构及其遗传性教育部重点实验室 李亚江 夏春智
莫斯科鲍曼国立技术大学材料科学系 U.A.Puchkov
俄罗斯乌兰乌德飞机厂北京代表处 陈谦



李亚江

教授,博士生导师,从事先进材料与特种焊接技术研究。主持完成国家自然科学基金和省(部)级科研项目十多项,获教育部自然科学一等奖1项、省科学技术奖4项,获国家发明专利8项,发表论文180多篇。

高温合金是指在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温下能承受一定应力并具有抗氧化或抗腐蚀能力的合金,分为铁基高温合金、镍基高温合金和钴基高温合金^[1-2]。20世纪40年代,用

* 国家自然科学基金资助项目(50874069)。

我国高能束流焊接技术经过半个世纪,特别是近20年的迅速发展,逐渐形成了自己的研发体系。国内众多研究者进行的一系列基础理论和应用研究为高能束流焊接技术的发展奠定了基础。

高温合金作涡轮叶片的第一批涡轮喷气发动机取代了活塞式发动机,随后涡扇喷气发动机取代了涡轮喷气发动机,从此航空工业进入了新的历史时期。高温镍基合金在发动机中的用量日益增加,现在已经用到发动机总重量的40%,在某些新式军用发动机中已用到总重量的50%~60%。高温合金主要用于制造航空、舰艇和工业用燃气轮机的高温部件,还用于制造航天飞行器、火箭发动机、核反应堆、动力设备等。

航空发动机的特点是体积小、功率大、工作条件严酷,特别是转动件在不同温度、载荷、环境介质(空气、燃气)下工作,须用比强度高、耐热性好和抗腐蚀能力强的材料制造,对其制备技术具有很高的要求。高能束流焊接技术以其高能量密度、高熔透性、焊接变形区小及易于控制等优

点在航空领域得到广泛应用。20世纪80年代以后,西方国家研制的高水平、高性能航空发动机已经广泛采用了高能束流焊接技术^[3]。高推重比航空发动机的发展,对涡轮盘强韧性、疲劳性能及耐久性等方面的要求更严格,对其焊接技术提出了更高要求。

高温合金及其焊接特点

高温结构材料在航空航天、核工程、能源动力、交通运输、石油化工、冶金等领域有广泛应用。在先进航空发动机中高温合金用量已超过50%,已经成为支撑现代航空航天、国防军工及国家重大工程持续发展的基础。特别是航空发动机性能的改进与材料性能的提高密切相关。世界各先进国家都将高温结构材料列为高性能结构材料中的重点发展

对象^[1-2]。

航空发动机由于结构复杂、尺寸精度高和力学性能要求苛刻等原因,其结构制造中采用了各种先进的焊接技术。焊接结构件在喷气发动机零部件总数中所占比例已超过50%,焊接工作量已占发动机制造总工时的10%左右。此外,在飞机结构中,F111的机翼支承梁(钢结构)和狂风、F14的钛合金中央翼翼盒、机翼盒形梁及整体壁板结构等重要的结构上采用了焊接技术。F22后机身前后梁采用了热等静压钛合金铸件的电子束焊接结构。

高能束流加工技术是利用高能密度束流(激光束、电子束、等离子弧)作为热源,对材料或构件进行特种加工的技术,包括焊接、切割、打孔、喷涂、表面改性和精细加工等。我国高能束流加工技术研究起步于20世纪60年代,相对于其他国家来说并不晚,但由于受到社会环境的影响发展缓慢。改革开放后国内逐渐认识到高能束流加工技术的重要性,从国家“八五”计划开始,将高能束流加工技术列入重点发展方向。近年来世界各国的高度重视,无疑将为我国高能束流焊接技术的发展带来新活力,也是赶超先进工业国的重要

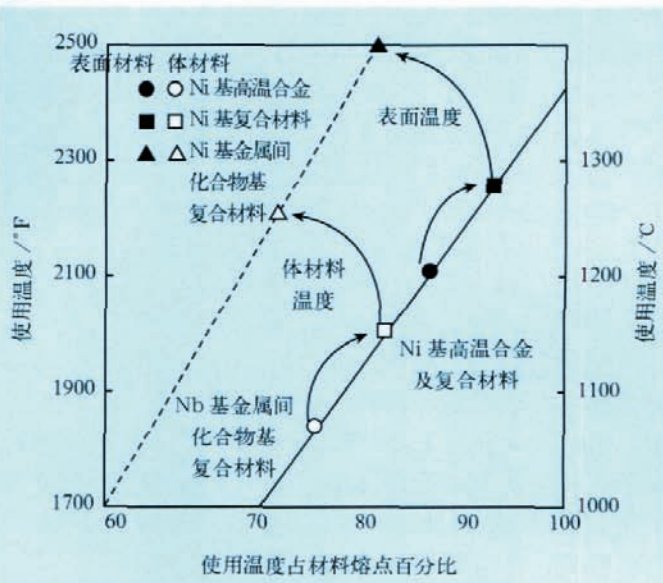
机遇^[4-5]。

航空发动机热端部件,特别是涡轮、涡轮部件在高温、高转速及复杂应力作用下工作,不但要求具有较好的高温强度,较高的抗高温氧化及抗热腐蚀性能,还要求基体材料具有较高的蠕变持久性能、疲劳性能及优异的组织稳定性。这些部件通常采用Fe、Ni或Co基高温合金制造,其中镍基高温合金的使用量最大^[1,6]。镍基高温合金的焊接主要存在2个问题^[7-10]:一是合金组元复杂,对杂质敏感性大,容易形成低熔点物质,焊缝凝固时形成单相奥氏体柱状晶而促使杂质偏析,同时合金的线膨胀系数大而产生较大应力,因此镍基高温合金存在热裂纹敏感性;二是镍基高温合金焊接时,焊缝金属凝固时的组织偏析以及脆性

相的析出致使焊后接头力学性能下降,特别是焊缝的塑性降低。镍基高温合金中主要合金元素含量对合金焊接性会产生一定的影响^[11]。合金使用温度与使用温度占其熔点百分比之间存在函数关系^[12]。通过试验可知,将2种具有不同耐高温与力学性能的材料结合,可以充分发挥2种材料的耐高温与良好的力学性能优势。

在航空发动机的研制和生产中,先进焊接技术已经成为主导工艺之一。它的进步与发展不仅能减轻飞机、

发动机的重量,而且还为飞机、发动机结构设计新构思提供技术支持,促进飞机、发动机性能的提高。国内航空发动机研发中,先进焊接技术



合金使用温度与使用温度占熔点百分比的关系

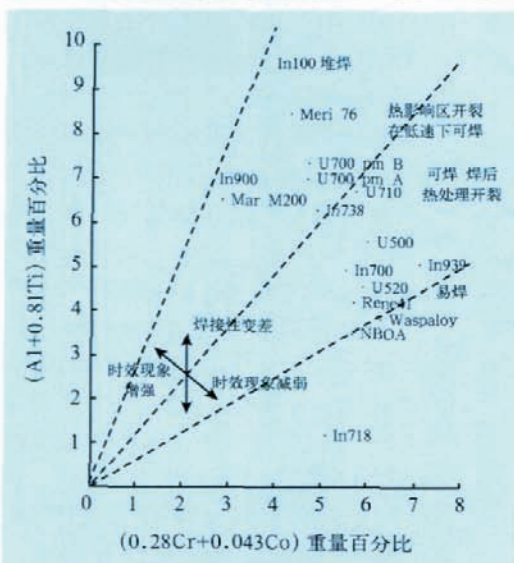
已取得很大的进步,许多新工艺,如EBW、LW、IFW、SPF/DB、PAW等得到应用。但是国产材料成分、状态控制及焊接工艺仍需积累经验和数据,为设计及制造的改进提供依据。

高能束流焊接技术的应用

高能束流焊接技术包含了以电子束、激光束和等离子弧为热源对材料或构件进行焊接加工的各类工艺方法。属于高功率密度的热源有:电子束、激光束、等离子弧、复合热源(激光束+电弧)等,功率密度达到 $10^5 \text{W}/\text{cm}^2$ 以上(见表1)^[13]。

1 电子束焊接

电子束焊(EBW)是利用加速和聚焦的电子束轰击置于真空室或非真空中的焊件所产生的热能进行焊接的方法,是一种较普遍采用的高能束流焊接方法。电子束焊接方法在我国发展缓慢,直到1984年应用于涡轴8发动机关键受力旋转件——功率轴才有了突破性进展^[14]。



镍基超级合金的焊接性^[10]

目前电子束焊已在核工业、航空航天工业、精密加工以及重型机械等工业部门得到了广泛应用。高温合金电子束焊接有可能产生的热裂纹主要是焊缝金属的凝固裂纹、液化裂纹和热影响区的沿晶微裂纹^[15]。

近年来,电子束焊的研发和推广非常迅速,电子束加速电压由 20 ~ 40kV 发展为 60kV、150kV 甚至 300 ~ 500kV,其功率密度也由每平方米几百瓦发展为几千瓦、十几千瓦甚至数百千瓦。在工业中,实际应用的电子束焊接设备的功率密度一般小于 120kW,加速电压在 200kV 以内。采用电子束焊可以成功地焊接固溶强化型高温合金,也可以焊接电弧焊难以焊接的沉淀强化型高温合金。对某些液化裂纹较敏感的高温合金应采用较小的焊接热输入,而且应调整焦距,减小焊缝弯曲部位的过热。

镍基高温合金(如 GH4169)作为航空发动机高温部件中使用的主要材料,常常处在高温等服役环境中。北京航空制造工程研究所马翔生等^[14]对高压压气机整体转子制造中使用的 GH4169 高温合金电子束焊的试验研究表明,GH4169 高温合金的电子束焊的焊接性良好,室温及高温下焊缝与基体的瞬时拉伸强度相近。零件焊接加工精度高,地面试车结果表明,焊接后的零件达到了设计要求。GH4133 合金中的 Al 和 Ti 含量达到 4% 左右,具有热裂倾向。对发动机涡轮盘材料电子束焊接头长期高温服役后的性能进行的研究表明^[15],GH4133 合金涡轮盘经长期

高温服役后合金晶粒严重长大,性能下降。采用低焊速、小热输入焊接时,焊缝及热影响区沿晶裂纹的严重程度相对减轻。经长期试车考验的涡轮盘修复焊缝及热影响区沿晶裂纹无明显扩展,所以涡轮盘修复后的焊接接头有一定的安全使用寿命,这有利于降低发动机的使用成本。

北京航空制造工程研究所王亚军等^[16]对 GH4169 与 GH907 异种

避免异种金属焊接区应力分布的复杂性。并尽量减小待焊接件的拘束度,减小冷作硬化和时效处理后的高硬度对高温合金的影响,减小金属凝固过程中焊缝承受的拉伸应变,提高材料的抗裂能力。最终确定波纹管与相配零件均可采用固溶状态的 GH4169 合金,焊接后整体进行时效处理,使波纹管达到使用强度,同时消除焊接应力。



北京航空制造工程研究所研制的高压电子束设备

材料的电子束焊的焊接性进行了试验研究。GH907 合金的熔点(1335℃ ~ 1400℃)高于 GH4169 (1260℃ ~ 1320℃)合金,通过选择合理的工艺参数及接头形式,得到了满意的 GH4169/GH907 异种材料电子束焊接头。

首都航天机械公司对 GH4169 合金波纹管组件进行了焊接性试验^[17]。尽量采用同种金属焊接,以

北京航空航天大学张海泉等^[18]对发动机涡轮盘材料 GH4133 合金电子束焊接头疲劳裂纹扩展行为进行了试验研究。由于力学不均匀性的影响,位于修复接头焊缝和热影响区的疲劳裂纹向母材偏转扩展;力学不均匀性与裂纹偏转导致裂纹扩展的驱动力下降,使得焊接区的表观疲劳裂纹扩展速率低于母材。对 GH4133 高温合金电子束焊修复的焊接接头热影响区微裂纹行为进行的试验研究表明^[19],熔合区附近的热影响区产生大量液化裂纹和沿晶扩展的固相微裂纹,通过改善焊缝成形和控制焊接热输入有助于减小这两类热影响区微裂纹的倾向。

北京工业大学白韶军^[20]采用钨极氩弧与电子束复合的双枪电子束焊接方法(EBW+TIG),对

表1 几种高能束流的功率密度

热源		最小加热面积 /cm ²	功率密度 / (W·cm ⁻²)	正常焊接温度 /K
高能束流	等离子弧	10 ⁻⁵	射流 10 ⁴ ~ 10 ⁵ 束流 10 ³ ~ 10 ⁶	18000 ~ 24000
	电子束	10 ⁻⁷	连续 10 ⁶ ~ 10 ⁹ 脉冲 10 ⁷ ~ 10 ¹⁰	—
	激光束	10 ⁻⁸	连续 10 ⁵ ~ 10 ⁹ 脉冲 10 ⁷ ~ 10 ¹³	—

Inconel718 等高温合金进行的焊接研究表明,双枪电子束焊接方法通过独立控制焊缝金属熔透及熔融的搅拌作用,可以有效地控制焊缝形态和组织性能,可以有效抑制热影响区液化裂纹等缺陷的产生。与常规电子束焊接方法相比,EBW+TIG 复合技术由于第二束流的作用,可以有效地控制焊缝形状。

西北工业大学对一种在航空领域具有应用前景的新型高温合金 IC10 的焊接性进行了试验研究^[21]。IC10 合金是我国目前为高推重比高压涡轮导向叶片研制的一种新型定向凝固 Ni₃Al 基高温合金,这种合金具有足够的持久强度和良好的热疲劳性能,以及高的抗氧化和抗腐蚀能力,在航空领域有广阔的应用前景。IC10 合金采用电子束熔化焊时,具有较明显的焊接裂纹敏感性,针对这种高温合金电子束焊的基础研究仍需进一步加强。

2 激光焊接

激光焊(LW)是以聚焦的激光束作为能源轰击焊件所产生的热量进行焊接的方法。激光焊接虽然在焊接熔深方面比电子束焊小一些,但由于可免去电子束焊真空室对零件的局限,无需在真空条件下进行焊接,故其应用前景更为广阔。激光焊可用于发动机壳体、机翼隔架等飞机零件的生产,以及对航空涡轮发动机叶片的修复等。

中国科学院力学研究所虞钢等^[22-23]采用激光焊技术对 K418 高温合金和 42CrMo 合金钢进行了

焊接研究。涡轮增压器转子的焊接是发动机制造的一项关键技术,而涡轮增压器转子一般是由镍基铸造高温合金 K418 涡轮盘和合金调质钢 42CrMo 涡轮轴焊接而成,其中 K418 合金的 Al、Ti 含量高,42CrMo 的碳当量高,两者焊接时具有淬硬倾向,易形成焊接裂纹,焊接难度很大。虞钢等对 K418 和 42CrMo 异种材料的激光焊接工艺进行深入研究,在热裂纹形成机理分析的基础上,提出了预防热裂纹的方法,通过优化工艺参数和后热处理有效地抑制了低熔点、脆硬的 Laves 有害相的形成。优化后的激光焊接工艺在满足焊接接头强度要求的同时(焊缝抗拉强度高于 42CrMo 钢母材),极大地提高了焊接效率,为提高发动机性能提供了重要的技术支持。

激光焊可焊接各类高温合金,包括电弧焊难以焊接的高 Ti、Al 的沉淀强化高温合金。高温合金激光焊的力学性能较高,接头强度系数可达 90%~100%。华中科技大学熊建钢等对高温合金 GH140 进行的激光焊接研究表明^[24-25],GH140 合金为固溶强化型 Fe-Ni-Cr 基合金,高温强度及抗氧化性、抗燃气腐蚀性强,广泛用于现代航空、航天发动机零部件制造。这类合金的激光焊接技术已成功应用于航空航天工业。激光焊接 GH140 高温合金可获得深宽比大、组织细密、热影响区窄的焊缝,并且焊缝及热影响区无裂纹等焊接缺陷。

西北工业大学激光焊研究室的刘金合课题组与西安航空发动机公司^[26],联合对航空发动机前后冷气导管用薄壁(0.2mm) Inconel625 高温合金进行了 CO₂ 激光焊的试验研究。结果表明,激光焊的焊缝平整均匀、热影响区小,焊缝抗拉强度达到母材的 95% 以上。地面试车表明前后冷

气导管使用状况良好,对于航空发动机的研制具有重要的推进作用。

3 等离子弧焊接

等离子弧焊(PAW)是借助于水冷喷嘴对电弧的拘束作用获得较高能量密度的等离子弧进行焊接的方法。我国的等离子弧焊接技术研究始于 20 世纪 60 年代,并在航空航天工业生产中得到成功的应用。例如,涡轮机匣毛坯组零件、火箭发动机壳体、钛合金高压气瓶等的焊接。

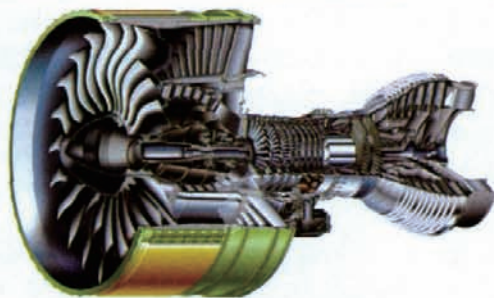
固溶强化和 Al、Ti 含量低的时效强化高温合金可以用等离子弧焊方法进行焊接,可以焊接薄板,也可以焊接厚板,可以填充焊丝也可以不填充焊丝。等离子弧焊以其高能密度、高焊接质量在航空材料的焊接中发挥着重要作用。高温合金等离子弧焊应控制焊接热输入,焊接头的力学性能良好,接头强度系数一般大于 90%。

哈尔滨工业大学闫久春等^[27]研究采用高频脉冲微束等离子弧焊接飞机发动机滤油网组件的端接接头。滤油网组件是飞机发动机上一个重要部件,它由双层不同丝径的滤网(内层是网径 0.13mm 镍合金,外层是网径 0.035mm 不锈钢)叠加而成。采用 TIG 焊接工艺时,焊接缺陷严重。采用高频脉冲微束等离子弧焊对发动机滤油网组件端接接头进行焊接,可得到焊缝成形良好的焊缝,焊接接头合格率达到 99% 以上。

空军第一航空学院郭必新等^[28]采用等离子弧焊接技术对燃烧室燃气腐蚀损伤的 GH132 高温合金进行焊接修复表明,焊接过程稳定,焊接速度快,热影响区小,成形美观,具有较高的生产效率。厚度为 6mm 合金的等离子弧焊接头力学性能与氩弧焊接头相当,但热稳定性及抗腐蚀能力明显高于氩弧焊接头。

高能束流堆焊

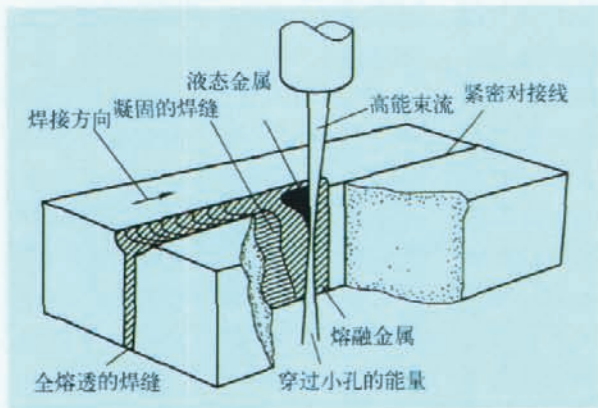
堆焊是指借助一定的热源手段



涡轮风扇发动机模型

在基体材料表面熔覆具有一定使用性能的合金材料,以赋予基体材料特殊性能或使零件恢复原有使用性能的工艺方法。高能束流堆焊(熔敷)技术是采用高能束流为热源在金属表面获得优异的耐磨、耐蚀、耐热等综合性能的表面改性技术,近年来受到普遍关注^[29-30]。目前,国内激光表面堆焊(熔敷)耐热合金的研究较为广泛,西北工业大学、北京航空制造工程研究所、中国有色金属研究院、清华大学、北京航空航天大学 and 南京航空航天大学等科研院(所)进行了这方面的试验研究^[31]。

例如,清华大学钟敏霖等对在高温合金 K403 基体上激光熔敷进行了试验研究^[32]。K403 合金广泛应用于 900℃ 以下涡轮工作叶片和 1000℃ 以下导向叶片,由于低熔点化合物的存在,这种合金的热裂纹敏感性很大。通过激光熔敷的试验研究表明,采用无硼、硅元素合金更易消除熔敷层裂纹,加入适量稀土



高能束焊接过程的“小孔效应”特征

氧化物有助于减少或消除裂纹。该课题组还研究了在定向凝固镍基高温合金基体上激光熔敷 Inconel738 合金的工艺^[33],选择适当的制造工艺方法和激光熔敷工艺参数(激光功率 500W,扫描速度 0.25m/min,光斑直径 2mm)可以获得成形良好的无裂纹定向凝固组织。解决了在定向凝固镍基高温合金基体上进行 Inconel738 激光熔敷裂纹敏感性突

出的问题。

华中科技大学曾晓雁等^[34]对 GH4133 高温合金上激光熔敷 stelliteX-40 合金(Co 基)工艺进行了试验研究。GH4133 锻造高温合金用于锻造叶片的制造。通过优化激光熔敷工艺,可以得到符合尺寸要求、熔深浅、界面结合完整的熔敷层。时效处理后,熔敷层与 GH4133 基体的显微硬度保持一致,保证了叶片整体性能的均匀性。

在高能束流熔敷研究中,以激光熔敷的研究报道最多。熔敷材料范围很广泛,熔敷层的性能优良。但激光熔敷成本较高,设备维护较难,加上熔敷层控制等方面的因素,使得激光熔敷技术距离大规模的工业应用还有一段距离。相比之下,等离子弧熔敷及电子束熔敷能弥补激光熔敷过程中的一些缺点,有许多研究者开展了这方面的试验研究。

例如,中国科学院金属研究所胡状麒院士等^[35]研究了在 DZ22 定向凝固高温合金上真空等离子弧喷涂超声气体雾化 NiCoCrAlTaY 合金粉末的工艺,并对涂层的抗高温氧化性能进行了研究。在涂层表面生成了 8μm 左右的 Al₂O₃ 致密薄膜, NiCoCrAlTaY 合金粉末涂层表现出优良的抗高温氧化性能。

装甲兵工程学院徐滨士院士等^[36]对等离子弧堆焊镍基复合粉末进行了试验研究,该项研究通过向镍基合金基础粉末中添加不同含量的强化元素构成复合粉末,并在 Q235 钢表面进行等离子弧堆焊试验。通过试验研究确定了各种强化元素(如 Cr、Mn、W 等)的最佳配比。确定了堆焊层中的主要强化相,复合粉末堆焊层的硬度越高耐磨性越好,堆焊层的

硬度及耐磨性较基体都显著提高。

沈阳工业大学刘政军等^[37]对铁基 Cr-Ni-W-Nb 系高温合金粉末堆焊性能进行了研究。铁基高温耐磨堆焊合金成本低,部分场合可以替代价格昂贵的镍基和钴基等离子弧堆焊合金。研究表明堆焊层中 Cr 百分含量为 20% 时,堆焊合金层的常温及高温硬度、耐磨性具有最佳的性能,堆焊合金高温(760℃)抗磨料磨损性能与 stelliteNo12 钴基合金相近,可以替代钴基堆焊合金和镍基堆焊合金。

电子束技术用于表面堆焊高温合金的研究较少。胡传顺等^[38]对镍基高温合金 M38G 进行电子束表面熔凝的试验研究表明,电子束表面超快速熔凝处理技术作为表面改性的新方法用于耐热材料表面的快速凝固处理,可使材料表面熔凝层晶粒组织细化,表面熔凝层具有较好的抗高温氧化性能,具有良好的应用前景。

结束语

在材料科学与技术的发展中,航空材料一直扮演着先导和基础作用。航空发动机材料的发展也推动着动力产业和能源行业的推陈出新。我国高能束流焊接技术经过半个世纪,特别是近 20 年的迅速发展,逐渐形成了自己的研发体系。国内众多研究者进行的一系列基础理论和应用研究为高能束流焊接技术的发展奠定了基础。然而我国高能束流焊接技术在航空领域的应用水平与西方发达工业国家相比仍有差距。但随着飞机发动机对减重、提高性能的需要,先进焊接技术起着越来越重要作用。相信中国航空焊接/连接技术在需求牵引、技术推动的相互作用下,一定会取得快速进步。

注:本文有参考文献 38 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。(责编 金卯)