

钛合金先进焊接技术研究现状*

孙文君,王善林,陈玉华,黄永德,柯黎明

(南昌航空大学航空构件成形与连接江西省重点实验室,南昌 330036)

[摘要] 钛合金被誉为 21 世纪的智慧金属,因其性能优异,在高温、高强度结构和特殊接头的焊接方面发挥着关键作用,其先进焊接技术作为现今高端装备制造主流技术之一,受到广泛的重视。本文简要介绍了钛合金相关性能及主要应用领域,并针对激光焊接、电子束焊接和线性摩擦焊接这 3 种先进焊接技术,开展成形工艺优化、缺陷控制、组织演变规律以及力学性能分析等内容的综述。

关键词: 钛合金;先进焊接技术;成形工艺;缺陷控制;组织演变规律;力学性能

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.18.063



孙文君

硕士研究生,主要研究方向为钛合金电子束焊接。

钛是 20 世纪中期迅速发展起来的一种重要结构金属,因其密度低、强度高、耐热和耐蚀等优点,在提高结构效率、改善零件可靠性以及减轻装备质量等方面具有其他金属无法替代的优势。为满足现代航空航天

武器装备对战斗性能的要求,国防军工的开发与商售不断向着轻便、灵活方向发展,除了前沿的设计技术外,还必须采用性能优良的材料以及精湛的工艺制造技术,大量选用钛合金和提升钛合金先进应用水平就是重要措施之一。

欧美现今服役的各类轰炸机和军用运输机中钛合金用量已经稳定在 30% 以上,并且新机型的用钛量占比正在大幅提升^[1]。与此同时,作为一种优异的耐腐蚀结构材料,钛及其合金在化工生产中被大量使用,当前钛设备的使用开始从制碱工业逐步应用到精细化工领域,化工设备中发展最快的钛换热器,其用量最多,设备规格已从简单小型扩展到复杂多样^[2]。早在 20 世纪 60 年代,我国就已经开始对钛合金在船舶及海洋工程装备上的应用研究并做了大量工作,已基本形成牌号多样、性能各异、品种规格齐全的船用钛合金体系^[3]。由于钛合金自身所具备的特性,使其在舰船以及海工装备的应用上具有得天独厚的优势,是制造战舰、核潜艇和深潜器等高端装备必不可少的

海洋用材。除了工业体系用钛外,钛合金还是与人体生命和健康密切相关的特殊功能金属。在医疗领域,人体植入物大部分是钛合金功能部件。钛有非常好的“亲生物”性能,物化性质稳定,与人体组织无排斥反应,尤其是与人体骨骼相似,不会对生物机体产生毒副作用,在医疗手术中采用钛合金制造的人体骨骼、心瓣膜以及夹板等多种生物金属构件移植到人体中取得良好的治疗效果,医学界将其视为生物金属,外科植入物中的钛合金用量正以每年 5%~7% 的速度增长^[4],是非常理想的医用金属材料。目前,钛合金已被广泛用于航空航天、船舶工业、化学工业以及医疗器械等领域,全球各国政府开始认识到钛合金的重要性,继而不断研究开发其功用,并得到实际应用。

我国于 1956 年开始进行钛合金的研究,20 世纪 60 年代中期开始钛材的工业化生产并成功研制出 TB20 和 TB10 等型号合金^[5],直到 21 世纪初,我国钛合金种类和型号才发展相对完整。根据国家制造业整体升级换代的方针,钛合金的需求日益增

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51865035);航空科学基金项目(2017ZE56010);江西省重点研发计划(20192BBL50002)。

加,对其主要的装备生产也提出更高的要求。如果综合性能优良的材料是满足工业制造的基础,那么先进的焊接技术必然是其顶层设计,只有新型焊接方式才能在高端装备制造领域中占据有利地位。传统、低效、污染严重的制造技术已经无法满足现代工业的发展,而一体化、轻量化和智能化的生产方式是未来装备制造发展的趋势。

在航空航天领域,钛合金主要用于制造航空发动机和起落架等关键零部件,如图1所示。基于现代高推重比、高涵道比航空发动机的发展需要,整体化和轻量化的设计越来越受到青睐。例如发动机整体叶盘的制造技术,传统的制造技术是整体机械加工,但其加工量大、加工周期长、耗材量大,导致成本过高,所以钛合金装备的生产过程中,焊接是其制备的关键技术之一,而选择先进的焊接技术不仅可以满足整体叶盘的制造需求还方便对其进行维护,大大降低使用成本。

钛合金装备生产制造中最常用的焊接方法为电弧焊、电阻焊和钎焊,钛合金焊接性主要取决于焊接热循环、合金元素含量以及氧、氮、氢等杂质含量。钛合金的化学性质活泼,极容易与周围环境发生冶金反应,引起裂纹、气孔和焊接接头脆化等问题,传统的焊接技术很难满足现代工业对钛合金装备制造的发展要求。于是国内外研究人员对钛合金的焊接方法做了大量研究试验,激光、电子束和线性

摩擦焊等功能齐全的焊接方法相继诞生,这些先进的焊接方式将钛合金的焊接性能提升到一个新台阶。与此同时,还实现自动化和智能化的生产制造,其高效和无污染的特点也符合现代工业制造的生产要求。

激光焊接的能量密度高,可在大气环境下施焊,但由于激光能量利用率较低,穿透能力不如电子束焊接,周围气体杂质容易引起焊件缺陷,并且对非线性焊缝的适应性不如线性摩擦焊,所以自动化控制技术是激光焊接在航空航天制造工业中得以实现成熟运用的重要基础。航空航天结构中钛合金壁板与筋条焊接、进气道组件焊接和飞机蒙皮拼接等均以机械连接为主,但近年来激光焊接占比逐年增加,其中普遍采用T形接头双光束激光焊技术^[6]。与激光相比,电子束焊其能量转化率高,焊接稳定性好,真空环境对焊件起到有效保护作用,因此电子束焊接技术是国内制造飞机主次承力结构和机翼骨架等关键部位的主流技术之一,已经成为评价航空航天制造水平高低的重要依据^[7]。欧美国家制造航空航天大厚度钛合金核心部件同样选择电子束焊接技术,美国F-14战斗机的中央翼盒就是使用电子束焊接技术帮助战机减轻结构重量,并且第4代战机F-22机身段的钛合金电子束焊缝长度接近90m,最大焊接厚度达到25mm,前后梁更是首次采用热等静压钛合金铸件的电子束焊接结构^[8]。虽然先进的熔焊方式有诸多优点,可

同样无法避免与杂质元素发生反应产生冶金缺陷。线性摩擦焊作为一种先进的固态连接技术,它使两焊件在连接端面方向上做周期性往复摩擦运动,摩擦产热使接触界面及其周围材料达到热塑性状态而实现固态连接,没有施加外部热源,所以不易产生接头冶金缺陷。同时其热影响区极窄,比起熔焊组织更均匀细化,不仅具有摩擦焊技术^[9]稳定的可靠性和良好的接头性能等优点,同时还突破传统轴向摩擦焊对焊件形状的限制^[10],已成为新型航空发动机整体叶盘制造与修复的关键技术。本文主要针对激光焊接、电子束焊接和线性摩擦焊接这3种先进的焊接技术,讨论钛合金的焊接接头成形及缺陷控制、组织与性能相关性的研究情况,并对钛合金的先进焊接技术进行展望。

钛合金焊接技术研究现状

1 激光焊技术

激光焊接中光束能够聚焦在极小空间内,可以对金属、非金属甚至是在异种材料间实现快速和大深比的焊接工艺,并且激光可以穿过透明介质对密闭空间内的材料进行焊接^[11],图2为TC4钛合金焊缝宏观形貌。

激光脉冲能量、激光离焦量以及焊接速度等工艺参数是影响激光焊接质量的主要因素,只要工艺参数控制合理,TC4钛合金焊接性能可以达到GB3233-87K级焊缝要求^[12]。李



图1 航空发动机和起落架示意图

Fig.1 Schematic diagram of aero-engine and landing gear

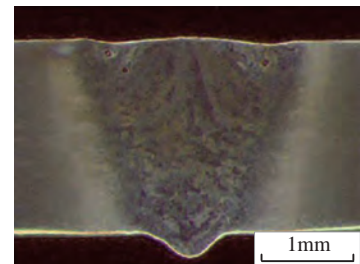


图2 TC4钛合金焊缝宏观形貌

Fig.2 Macro-morphology of laser welded joint for TC4 titanium alloy

明军等^[13]研究焊接工艺参数变化对焊接接头成形的影响,研究表明,使用碟片激光器焊接薄板 TC4 钛合金,离焦量的改变对焊缝成形影响较大,在负离焦量下焊缝形貌接近“酒杯”形,而在正离焦量下焊缝形貌更容易接近“I”形,随着激光的热输入量改变,受高温等离子体和金属蒸汽的影响,熔宽尺寸随之改变。

Akman 等^[14]采用脉冲 Nd-YAG 激光焊接技术研究脉冲能量对 TC4 钛合金焊缝熔池的影响。结果表明,穿透深度确定后,峰值功率等于每脉冲宽度的脉冲能量。当峰值功率增加过大时,工件温度会超过 TC4 钛合金的蒸发点,导致材料表面形成弹坑。为增加无弹坑的穿透深度,脉冲宽度要在恒定峰值功率下增加,而脉冲宽度增大时,焊缝熔池宽度也会在相同的熔透深度下增加。

Squillace 等^[15]研究焊接速度对激光焊接 TC4 钛合金焊缝显微硬度的影响。结果表明,在不同的激光功率水平下,焊缝显微硬度的平均值随焊接速度的增加而增加^[16]。原因与提高焊接速度会降低热输入量有关,这一现象导致冷却速度增加。

因此,激光焊接只要选择适合的成形工艺,TC4 钛合金焊接接头可以取得良好的力学性能结果^[17-19],钛合金焊接接头的抗拉强度基本可以达到母材强度^[19],如表 1 所示,焊缝硬度接近母材^[19],如图 3 所示。

焊缝是裂纹萌生的首选部位,最大的应变和应力值发生在焊缝上表面相对应的位置,疲劳寿命与焊缝长宽比值之间有明显关系,即随着比热的增加,焊缝长宽比值减小。同时,在标距长度内,熔合区扩展和马氏体组织含量增加,体现出 TC4 钛合金的缺口敏感性,即热输入量越低,接头的长宽比越低,疲劳寿命越长^[20]。

激光焊接钛合金具有较高的能量密度,尤其是能够产生“小孔效应”使焊缝宽度减少,降低变形量。张可

荣等^[21]根据 TC4 钛合金激光焊接熔深特性,构建微米级精度并适用于小孔尺度的计算模型,得出小孔形貌及瞬态温度分布特征。通过分析小孔温度分布及特征尺寸,得出影响激光焊接小孔形貌或温度分布最大的工艺参数取值范围,该计算模型对改善激光焊接钛合金接头成形及组织性能起积极作用。通过利用 OM、XRD、SEM 和 TEM 等手段研究激光焊接 TC4 钛合金接头显微组织特征,分析得出,焊缝熔合线附近晶粒为粗大柱状晶,焊缝中心晶粒为等轴晶;晶内由初始 α 和针状马氏体 α' 构成网状组织;热影响区为分布不均匀的块状 α 和原始 β 以及针状马氏体 α' 组织^[22]。

钛合金因为激光特性焊后组织不均匀,接头各区域(焊缝、热影响区、母材)在组织性能上存在很大差异,这会导致焊接接头在超塑性变形过程中不均匀变形,使焊件力学性能、可靠性和服役寿命受到不同程度的影响^[23],而采用置氢方法能够

改善钛合金激光焊接接头超塑性变形的组织均匀性。不同的置氢量对 TC4 钛合金激光焊接接头变形均匀性和组织均匀性有不同的影响,随着置氢量的增大,组织均匀化系数越大,组织均匀化程度越高。在相同置氢量的情况下,变形温度的升高或初始应变速率的降低均会使均匀化程度上升^[24]。

激光焊接 TC4 钛合金成形较好,但在焊缝熔合线附近容易产生气孔,气孔是激光焊接过程不稳定导致的,对组织相关性有一定影响,从而影响钛合金焊接质量。李坤等^[25]针对小孔型气孔采用摆动焊接抑制其产生,分析表明,在焊接时摆动光束可以有效抑制钛合金小孔型气孔的产生,与光束未摆动相比,光束摆动焊接的小孔稳定性明显增加。

TC4 钛合金薄板通过激光焊接后,存在焊接变形和残余应力的问题,所以控制变形和减少残余应力是提高 TC4 钛合金焊接质量的方法之一。激光焊接中线能量对变形和残

表1 TC4钛合金超窄间隙接头的拉伸强度

Table 1 Tensile strength of TC4 titanium alloy ultra-narrow gap joint

功率/W	焊速/(m·min ⁻¹)	送丝速度/(m·min ⁻¹)	拉伸强度/MPa	断裂位置
2000	0.9	3.0	878	焊缝中心
1800	0.9	3.0	798	熔合区
2000	0.9	4.2	688	熔合区
2000	0.7	3.0	893	焊缝中心

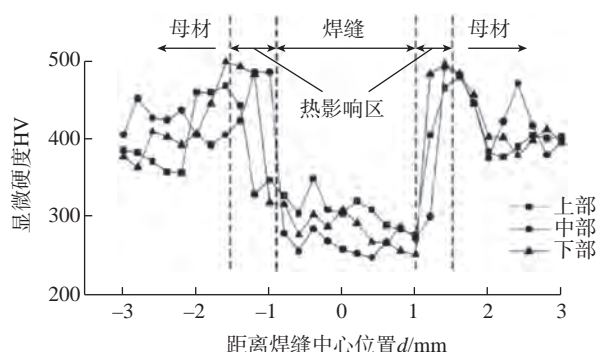


图3 TC4钛合金焊接接头的显微硬度分布

Fig.3 Microhardness distribution of the laser welded joint for TC4 titanium alloy

余应力的影响较大,随着激光焊接线能量降低,纵向残余应力增大,而横向残余应力会减少;在临界焊透标准以上焊接时,线能量越大而角变形越小;在焊件被完全穿透焊接时,线能量对角变形的影响作用下降^[26]。徐建新等^[27]运用 ANSYS 软件分析激光焊接钛合金薄板的实际焊接温度场以及应力场的变化和残余应力的分布,得到焊接熔合区存在较大的残余拉应力的结果。李兴霞等^[28]针对 TC4 钛合金 CO₂ 激光深熔焊的特点,通过均匀体热源模型、双椭球热源模型和组合热源模型,对焊缝残余应力进行数值模拟与试验,试验说明均匀体热源模型的上下表面纵向残余应力分布均匀,而双椭球热源模型和组合热源模型的上表面残余应力显著高于下表面残余应力,表现出残余应力沿厚度方向的变化。

从国内外研究来看,激光焊接大多集中在对钛合金薄板的研究方面,很少有对厚度钛合金的研究,这是因为激光束的最高功率只有 10⁷W/cm²,能量转换效率不高,一般小于 10%,最大可焊厚度受到限制,而且激光在焊接铝和铜等高反射性及高导热性金属材料时,焊接性会因受激光而改变,有焊接局限性。如果在实施中能量至高能量的激光束焊接时,工艺要求复杂,还需利用等离子控制器消除熔池周围的离子化气体以保证出现清晰焊道。同时,由于焊道快速凝固,可能产生气孔及脆化现象。

2 电子束焊接

电子束焊接是一种高能密度(功率密度可达 10⁵~10⁹W/cm²)的熔焊方法,即用高电压把电子在真空中加速(可达光速的 0.3~0.7 倍),当电子束撞击并穿透焊缝表面时,动能转化为热能,使其内表面熔化,进而气化形成小孔。当电子束移动,小孔周围金属熔化向后流动,填充小孔并凝合形成焊缝,4 种典型焊缝形貌^[29]如

图 4 所示。由于真空电子束的能量转化率非常高,特别适合大厚度钛合金焊接,能一次性完成焊透 100mm 以上的厚度,焊缝深宽比值大,焊后组织性能优异,所以电子束焊接有着其他熔焊方法不具备的独特优势。

TC4 钛合金厚板电子束焊后,母材显微组织为等轴初生 α 相和层片状 α + β 所构成的典型双态组织。焊缝区的显微组织为网篮状马氏体组织 α',焊缝上部粗大的原始 β 柱状晶界明显,下部原始 β 晶粒尺寸较小且晶界不明显。近焊缝热影响区显微组织为少量等轴初生 α 和针状马氏体 α',而近母材热影响区显微组织为等轴初生 α 和含针状 α 的转变 β 组织。接头焊缝区和热影响区显微硬度偏高,近焊缝热影响区显微硬度达到峰值。此外,焊缝不同深度处显微硬度差异明显,随着熔深位置增加,焊缝区的显微硬度会越来越高^[30-32]。

龚玉兵等^[33]通过控制热输入的方法研究 TC4 钛合金厚板电子束焊接接头的组织演变规律,采用中等热输入,焊缝上部和中部形成晶间 α 相和粗大的魏氏组织,并且上部晶粒尺寸均大于中部和下部,在熔深和熔宽各方向都存在组织的不均匀性。当增加焊接热输入时会导致晶粒和组织粗化,但这能够减少不均匀性;降低热输入会促使晶粒和组织细化,从而增大组织不均匀性。焊缝组织不均匀性会产生较大的力学性能梯

度,焊缝组织越粗大,抗拉强度越小,如图 5 所示。

真空电子束的工艺参数对焊接质量的影响至关重要,电子束焊接束流和焊接速度都能够精确调整,改变电子束聚焦位置可以实现熔深控制,恰当选择焊接热输入的大小与焦点位置以保证焊缝成形良好。通过优化电子束焊接过程的工艺参数,获得实现精确调节聚焦参数使焊缝深宽比较好的功率和焊接速度的期望值,在其他条件不变的情况下,增加焊接深度可以通过加大功率或降低焊速来完成^[34]。采用振动束流制备的接头可大幅度降低咬边深度,热影响区较窄,并且接头具有良好的缺口韧性(高 10%~15%)和较高的伸长率(高 20%~30%),其原因是振动束流使焊缝得到很好的混合和散热,促进更均匀的显微组织演变^[35]。

由于电子束焊接工艺参数的改变对焊缝的相组成没有影响,却使得焊缝形状及其显微组织分布发生改变,产生焊缝显微组织梯度,焊缝夹角越大,随焊缝深度变化马氏体针尺寸梯度越大^[36]。大厚度钛合金电子束焊接的温度梯度较大,并且狭窄的熔焊区域会造成焊接接头残余应力变化剧烈且分布复杂,而焊接残余应力是造成结构件应力腐蚀以及疲劳强度降低的重要因素,对其准确评价是焊接构件寿命评估的基础^[37]。焊件上表面纵向应力在焊缝和热影响区呈现较大的拉应力,上表面横向

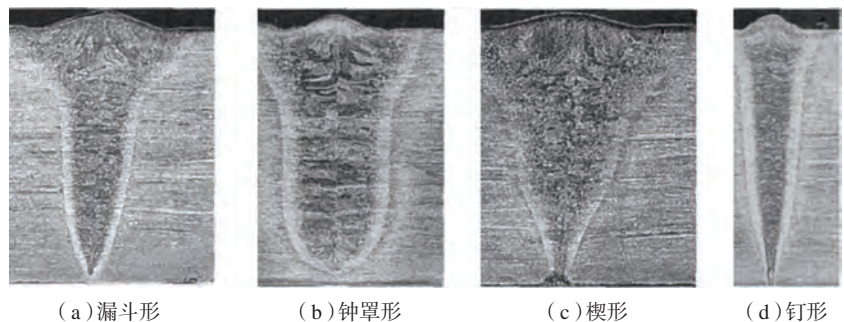


图4 4种典型电子束焊缝形貌

Fig. 4 Four typical weld bead shapes of electron beam welding

残余应力幅值较低,且整体呈现压应力分布;焊件下表面的横纵应力整体上为压应力,且横纵应力总体特征相似^[38-40]。在焊缝体积不变的情况下,最大等效残余应力随焊缝锥度的降低而减少;当锥度大于 6.5° 时,应力会急剧增大。但在锥度不变的情况下,最大等效残余应力因焊缝体积增大而减小,当梯形焊缝中位线长度大于 1.5mm 时,最大等效残余应力的变化趋势也变得平缓^[41]。钛合金电子束焊接接头的损伤容限性能优异,不仅具有良好的焊接工艺特性,而且焊后接头的断裂韧性优于母材,疲劳裂纹扩展抗力也比母材更高^[42]。

钛合金与异种金属焊接构件可具有多种性能,用途广泛,所以被越来越多的应用在高端制造业当中,特别是航空航天工业。但因异种金属的物化差异非常大,较难得到理想的焊接效果,所以需要采用特殊方法进行焊接。Tomashchuk^[43]使用铜为中间层,研究薄板 TC4 和 AISI316L 不锈钢板材的电子束焊接,发现焊接偏移量和焊接速度对接头性能会产生

影响,电子束流向钛合金一侧偏移会生成大量金属间脆性相,导致焊缝力学性能下降,而电子束流向钢侧偏移可以抑制脆性金属间化合物的形成,同时,当其他参数恒定,增加焊接速度也可以有效抑制脆性相的产生,提高焊缝的力学性能。

电子束焊接成形工艺控制不当时,容易产生钉尖缺陷,严重影响焊件的力学性能。通过研究钉尖缺陷的形成机理,解决钉尖缺陷的存在是十分必要的。石铭霄等^[44]采用正交试验法电子束焊接钛合金,焊后通过 X 射线对每条焊缝探伤,发现只有未熔透焊缝中存在呈圆形根部且不规则狭缝状的钉尖缺陷,利用显微手段分析研究其形成机理。结果表明,电子束脉动会导致高饱和蒸汽压金属蒸汽的产生,这是引起钉尖缺陷的主要原因。

电子束焊接虽然可以完成深熔焊接,但是电子束真空环境会造成焊缝金属元素的烧损,同时随着焊件厚度的增加,接头组织表现出更大的不均匀性,并且焊接接头缺陷越难控

制,对接头性能的影响加深,所以大厚度电子束焊接技术仍需深入研究,填补钛合金电子束焊接相关理论依据和研究数据的不足。

3 线性摩擦焊

线性摩擦焊对钛合金的研究主要集中在焊接成形工艺,焊接工艺参数对接头显微组织的影响非常大(图 6^[45]),在 TC4 钛合金线性摩擦焊接过程中,顶锻压力较低时,在焊缝中心区会生成 α -Ti 组织^[46]。不同焊接尺寸下 TC4 线性摩擦接头组织分布规律大致相同,但大尺寸焊件焊接时,接头热影响区厚度更大,且大尺寸焊件细晶区晶粒较大。另外,刹车后 TC4 钛合金接头中 β 相向 α 相转变时的取向具有选择性,这种现象也被其他研究人员通过对接头组织沿不同晶体学位向进行应变检测所证明^[47]。邢丽等^[48]采用正交试验法研究 TC4 钛合金线性摩擦焊工艺对焊缝成形的影响规律,结果表明,线性摩擦焊的宏观焊缝存在“X”型、“I”型以及“V”型,摩擦压力是主要影响焊缝成形的因素。摩擦压力

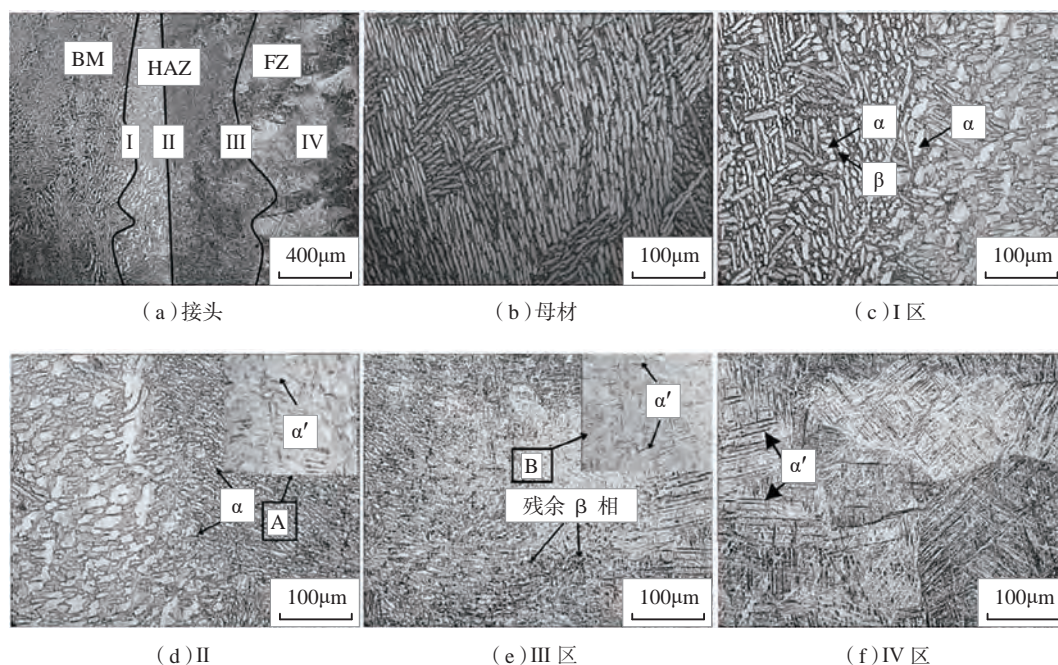


图5 接头不同区域显微组织

Fig.5 Microstructures in different areas of the joint

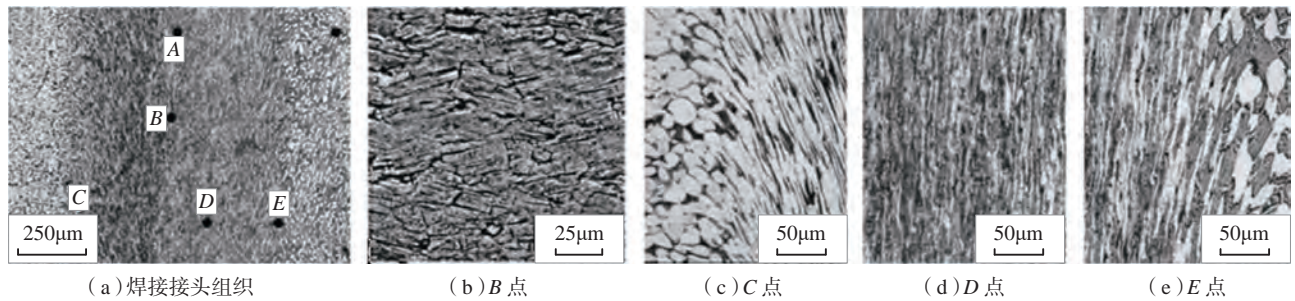


图6 TC4钛合金线性摩擦焊接头组织组织
Fig.6 Microstructure texture of linear friction welded joint for TC4 titanium alloy

增幅相比振幅增幅更小会有利于得到成形良好的焊缝,而在其他条件相同的情况下,缩小振幅可以得到较窄的焊缝区,同时也会导致焊缝塑性金属的流动性下降,虽然增大频率以匹配大振幅能够提升热输入,但热量流失加速,不利于获得成形良好的焊缝。

与熔焊相比,线性摩擦焊无须担心冶金缺陷的产生,可在大气环境下进行,焊接过程能够有效挤出摩擦早期形成的氧化物,接头成形良好。采用三维热机械耦合有限元法模拟 Ti-6Al-4V 钛合金的线性摩擦焊过程。研究焊接参数(包括振动频率、振动幅度、摩擦压力和顶锻压力)对材料流动行为的影响。数值模拟结果表明,材料流速随摩擦时间的增加而增大,随着顶锻时间的增加而减小;在摩擦阶段,增加振动频率、振动幅度和摩擦压力,向摩擦表面边缘流动的材料会增多;合理的轴向缩短量有利于将氧化物从变形部分挤出。当垂直于振动方向的摩擦表面尺寸为 11.8mm,且振动幅度小于 2.5mm 时,轴向缩短量在摩擦阶段和顶锻阶段分别大于 4mm 和 0.65mm 可以实现线性摩擦焊的自清理机制^[49]。另外,热处理后 TC4 钛合金线性摩擦焊接头组织和力学性能测试结果表明,TC4 钛合金线性摩擦焊接头经过热处理后,接头的室温和高温抗拉强度达到母材的 97% 以上,TC4 钛合金室温和低温冲击

性能略高于母材,它的室温低周疲劳性能与母材相当,都具有良好的综合力学性能^[50-51]。

残余应力是焊件在焊接过程中因变形受到约束而产生的结果,其中,焊缝金属熔化后再凝固、冷却收缩受到约束而产生的热应力最为显著,是残余应力的主要部分,焊接结构件的力学性能会因其存在而受到严重影响。TC4 线性摩擦焊接头的残余应力场同时存在拉应力区和压应力区。垂直焊缝横截面方向的残余应力分布特征为焊缝中心为残余压应力至焊缝两端过渡为残余拉应力;而平行焊缝纵截面方向上的残余应力主要表现为中心段存有较高的拉应力逐渐向焊缝两端下降为压应力^[52]。

线性摩擦焊特殊的焊接原理使焊接界面加热及受力均匀,非轴对称截面的焊接比熔焊的适应性更强,在实心零件焊接质量上比其他焊接方法都提升一个台阶。Maio 等^[53]基于 ABAQUS 运用隐式积分法模拟 TC4 线性摩擦焊过程,摩擦焊接过程中即使焊件接触界面温度低于焊件熔点,仍然可以促进相变发生,通过模拟获得的温度变化图与试验结果基本相同,所以该模型能够预测线性摩擦焊过程中的热力变化特征。

线性摩擦焊加工工艺与传统叶盘整体加工工艺相比,可实现不同材料或同材料不同组织状态叶片与轮盘的连接,可以得到双合金或双性能

整体叶盘,同时对叶盘损伤区域可进行快速修复。张传臣等^[54-55]进行 TC4/TC17 异质钛合金线性摩擦焊试验研究,结果表明,线性摩擦焊接头界面结合良好,焊缝区在焊接过程中受到应力场和温度场作用促使摩擦界面温度高于 β 相变温度,随后的冷却过程中发生相变再结晶将界面两侧组织细化,部分组织产生等轴化甚至球化现象,再结晶边缘区域位错密度远超界面组织过渡区,TC17 侧焊缝中形成再结晶 β 晶粒,TC4 侧形成典型的魏氏组织,焊缝两侧的热力影响区产生明显的变形,组织均被拉长。图 7 (a) 和 (b) 分别为德国 MTU 和英国 Rolls-Royce 公司通过



(a) 德国 MTU 制造的整体叶盘



(b) 英国 Rolls-Royce 公司制造的整体叶盘

图7 线性摩擦焊接技术制造的整体叶盘
Fig.7 Integral blade disk manufactured by linear friction welding

线性摩擦焊技术制造的发动机整体叶盘^[56]。

采用数值分析方法对下一代民用航空发动机叶盘生产所需的类型进行建模。建立可用于预测 TC4 钛合金热力学特性的线性摩擦焊有限元模型。为进行模型验证和试验,利用中试装置对 TC4 钛合金进行试验研究,用热电偶检测焊缝温度,推断焊接过程中普遍存在的传热效应。测量表明,顶锻速率对临界过程变量(振幅、频率和压力)的敏感性与模型的预测是一致的。产生的闪光取决于振动幅度与外加载荷的比值大小,当这个比值较大时,会产生波纹形态,其中机械工作速率与闪光形成的焓平衡。稳态时,热影响区的温度梯度随顶锻速率的增加而增大,在一定的顶锻速率下,焊缝温度随压力的增加而降低^[57]。

TC4 钛合金线性摩擦焊接头典型微观缺陷主要有微孔和三叉形貌两种。微孔是摩擦界面未完全融合导致的结果,孙权^[58]针对不同的线性摩擦焊工艺参数,采用有限元模拟的方法观察变化的微孔缺陷尺寸,归纳其弥合规律后发现微孔缺陷弥合对温度最敏感,在摩擦焊接过程中采用相对较高的焊接压力和周期振动频率并增进顶锻压力,可以帮助材料提高焊接温度,消除微孔缺陷的产生,从而促进微孔缺陷的弥合。而三叉形貌是摩擦焊接振动方向上飞边分离导致的缺陷,焊接过程中摩擦压力和摩擦剪切力的变化造成三叉形貌状态的改变,摩擦压力及顶锻力有使三叉形貌枝叉“闭合”的趋势,而摩擦剪切力有使三叉形貌枝叉“张开”的趋势^[59-60]。

国内的研究虽然实现了钛合金线性摩擦焊的有效焊接,但还存在着许多问题。如焊缝边缘及拐角处有未熔合缺陷,这种缺陷产生的原因主要是摩擦表面摩擦热不均匀和散热条件不同,往往缺陷附近

存在夹渣,这是摩擦过程中氧化物未被充分挤出造成的;由于线性摩擦焊是摩擦面相对快速振动和塑性金属快速挤出的过程,当接头某区域塑性变形能力不能满足这种变形要求时,常出现接头碎裂或掉块现象,特别是在冷却阶段,如果材料塑性不足,在热应力作用下也容易出现裂纹,严重时接头会自动断开^[61]。线性摩擦焊对待焊金属的性能要求严格,因此要实现大范围的应用推广还需要进行更多的研究工作。

钛合金焊接技术展望

当前,全球工业制造格局深度调整,工业 4.0 概念的提出,促使各国必须提升产业竞争力,而全面发展先进装备制造是实现中国制造向中国品牌转变的重要途径,特别是包含航空航天、生物医疗和国防军事装备制造技术,既是国家安全战略的有力保障,也是国家经济发展的迫切需求。在此背景下,钛合金的研究应用成为现代装备制造的核心,同时装备制造的轻量化与可靠性也需要先进焊接技术长久、有效和稳定的支持。由于尖端钛合金装备的需求持续增加,这就要求不断提高焊接质量,优化工艺,降低成本,进一步研究各类钛合金材料的焊接性能,完善焊后热处理方法,来提高钛合金结构件的焊接质量。

钛合金激光焊接由于激光能量转化率较低且钛合金材料相对吸光率偏低等原因,导致无法焊接大厚度焊件,目前的实际应用局限于薄板材料,但活性激光焊作为一种新型激光焊接技术的出现,使钛合金激光焊接熔宽减少而熔深度增加,可实现大厚度钛合金材料有效焊接,弥补激光焊接的不足之处。

真空电子束焊接因为需要真空环境,所以设备规格受限,这就对焊件尺寸有严格要求。局部真空电子

束焊接设备是将焊缝区域置于小型真空室内,焊接时电子束在局部真空室内移动,对处于局部真空的焊件待焊区进行电子束焊接,这种方法不会限制焊件的规格和形状,同时又保留真空电子束焊接的性能,解决大部件的焊接问题。虽然局部真空电子束技术还无法满足焊接形状复杂的构件,但目前用于国防工业的钛合金结构件大部分为简单结构,这使得局部真空电子束焊接方法可以得到实际应用。

钛合金线性摩擦焊在焊接时,由于材料升温过快,变形严重,从而导致接头残余应力过大。目前,线性摩擦焊的焊后热处理工艺对钛合金接头微观组织与力学性能的影响研究还不充分,需要进行系统化的研究工作。

钛合金先进焊接技术飞速发展的今天,我国钛合金焊接技术仍有许多方向需要继续深化研究,以满足高端装备制造业对其日益增长的需求。随着新兴技术的不断创新,钛合金先进焊接技术以其低成本、低污染、高效率和高质量的优越特性,未来发展空间必然非常广阔。

结论

(1) 激光能量转化率较低,存在严重气孔缺陷,很难对大厚度焊件进行焊接,且激光焊接对高反射性材料有局限性,但在薄板焊接方面有其优势,通过优化工艺参数可使焊缝成形良好,焊缝性能接近甚至超越母材。

(2) 电子束能量转化率非常高,可对大厚度焊件进行有效可靠焊接,同时真空环境可以保护焊件不受外界气氛影响,焊接材料不受限制,电子束焊接可以精准调控工艺,焊后接头组织均匀,力学性能优异。

(3) 线性摩擦焊接头组织不易产生冶金缺陷,比熔焊组织更均匀细化,无须气体保护,焊接效率高,但对

材料的塑性要求严格,可进行线性摩擦焊接的材料有限。

参考文献

[1] 朱孝钦, 郜华萍, 牛存镇. 钛和钛合金在化学工业中的应用[J]. 云南化工, 1997(3): 50-52.

ZHU Xiaoqin, GAO Huaping, NIU Cunzhen. Application of titanium and titaniferous alloy in chemical industry[J]. Yunnan Chemical Technology, 1997(3): 50-52.

[2] 何春艳, 张利军. 国内外高温钛合金的发展与应用[J]. 世界有色金属, 2016(1): 21-25.

HE Chunyan, ZHANG Lijun. The development and application of high temperature titanium alloy at domestic and abroad[J]. World Nonferrous Metals, 2016(1): 21-25.

[3] 张文毓. 舰船有色金属焊接材料的发展与应用[J]. 中外船舶科技, 2010(1): 24-27.

ZHANG Wenyu. Development and application of ship nonferrous metals welding materials[J]. Shipbuilding Science and Technology, 2010(1): 24-27.

[4] WANG K. The use of titanium for medical applications in the USA[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 213(1-2): 134-137.

[5] 赵永庆, 葛鹏. 我国自主研发钛合金现状与进展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 51-56.

ZHAO Yongqing, GE Peng. Current situation and development of new titanium alloys invented in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 51-56.

[6] 王亚军, 卢志军. 焊接技术在航空航天工业中的应用和发展建议[J]. 航空制造技术, 2008, 51(16): 26-31.

WANG Yajun, LU Zhijun. Application and development proposal of welding techniques in aerospace industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(16): 26-31.

[7] 巩水利, 张雁, 柴国明. 高能束流焊接技术的发展及其在航空领域的应用[J]. 国防制造技术, 2009, 6(3): 12-15.

GONG Shuili, ZHANG Yan, CHAI Guoming. Development of high energy beam welding technology and its application in aeronautical field[J]. Defense Manufacturing Technology, 2009, 6(3): 12-15.

[8] 李亚江, 吴娜, PUCHKOV P U. 先进焊接技术在航空航天领域中的应用[J]. 航空制造技术, 2010, 53(9): 43-47.

LI Yajiang, WU Na, PUCHKOV P U.

Application of advanced welding technology in aviation and aerospace industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(9): 43-47.

[9] CHAMANFAR A, JAHAZI M, CORMIER J A. Review on inertia and linear friction welding of Ni-based superalloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(4): 1639-1669.

[10] 史耀耀, 段继豪, 张军锋, 等. 整体叶盘制造工艺技术综述[J]. 航空制造技术, 2012, 55(3): 26-31.

SHI Yaoyao, DUAN Jihao, ZHANG Junfeng, et al. Blisk disc manufacturing process technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(3): 26-31.

[11] 董智军, 吕涛, 雷正龙, 等. 激光焊接 TC4 钛合金组织性能研究[J]. 航天制造技术, 2013(1): 27-30.

DONG Zhijun, LÜ Tao, LEI Zhenglong, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded TC4 alloys[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013 (1): 27-30.

[12] 梁春雷, 李晓延, 巩水利. TC4 钛合金薄板激光焊接接头疲劳性能研究[J]. 材料工程, 2006(4): 48-50.

LIANG Chunlei, LI Xiaoyan, GONG Shuili. Study on fatigue property of laser welded joints of TC4 titanium alloy sheet[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(4): 48-50.

[13] 李明军, 陈和兴, 陈永城, 等. 焊接参数变化对 TC4 钛合金激光焊接成形的影响[J]. 应用激光, 2018, 38(4): 550-555.

LI Mingjun, CHEN Hexing, CHEN Yongcheng, et al. The influence of welding parameters change on laser welding formation of TC4 titanium alloy[J]. Applied Laser, 2018, 38(4): 550-555.

[14] AKMAN E, DEMIR A, CANEL T, et al. Laser welding of Ti-6Al-4V titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3705-3713.

[15] SQUILLACE A, PRISCO U, CILIBERTO S, et al. Effect of welding parameters on morphology and mechanical properties of Ti-6Al-4V laser beam welded butt joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(2): 427-436.

[16] SUN Z, PAN D, ZHANG W. Correlation between welding parameters and microstructures in TIG, plasma and laser welded Ti-6Al-4V alloy [C]// Proceeding of ASM International 6th International Trends in Welding Research Conference. 2002: 760-767.

[17] 杨静, 程东海, 黄继华, 等. TC4 钛合金激光焊接接头组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(2): 260-262.

YANG Jing, CHENG Donghai, HUANG

Jihua, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V joints by laser beam welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(2): 260-262.

[18] 程东海, 黄继华, 林海凡, 等. TC4 钛合金激光拼焊接头显微组织及力学性能分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 104-106.

CHENG Donghai, HUANG Jihua, LIN Haifan, et al. Microstructure and mechanical analysis of Ti-6Al-4V laser butt weld joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(2): 104-106.

[19] 崔冰, 张华, 赵常宇, 等. 超窄间隙激光焊接 TC4 钛合金接头组织及性能研究[J]. 材料导报, 2018, 32(A02): 333-335.

CUI Bing, ZHANG Hua, ZHAO Changyu, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy joint by ultranarrow gap Laser welding[J]. Materials Review, 2018, 32(A02): 333-335.

[20] BOCCARUSSO L, ARLEO G, ASTARITA A, et al. A new approach to study the influence of the weld bead morphology on the fatigue behaviour of Ti-6Al-4V laser beamwelded butt joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(1-4): 75-88.

[21] 张可荣, 张建勋. TC4 钛合金激光深熔焊小孔形貌特征的有限元精细分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(6): 987-990.

ZHANG Kerong, ZHANG Jianxun. Numerical simulation for keyhole profile and their effect of TC4 titanium alloy during laser welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(6): 987-990.

[22] KABIR A S H, CAO X J, GHOLIPOUR J, et al. Effect of postweld heat treatment on microstructure, hardness, and tensile properties of laser-welded Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(11): 4171-4184.

[23] 郭隆, 白秉哲, 侯红亮. 置氢 Ti-6Al-4V 钛合金超塑性研究[J]. 稀有金属, 2009, 33(4): 467-471.

GUO Long, BAI Bingzhe, HOU Hongliang. Superplasticity of Ti-6Al-4V alloy processed by hydrogenation[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(4): 467-471.

[24] 江训焱, 陈溢平, 王明, 等. 置氢 TC4 钛合金激光焊接接头超塑变形组织均匀性分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(8): 28-32.

JIANG Xunyan, CHEN Yiping, WANG Ming, et al. Investigation on microstructural homogeneity in laser beam welding joint superplastic deformation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(8): 28-32.

- [25] 李坤, 王威, 单际国, 等. TC4 钛合金光纤激光摆动焊抑制小孔型气孔的原因分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 43-46.
- LI Kun, WANG Wei, SHAN Jiguo, et al. Analysis of key-hole-type pore suppressing in fiber laser welded TC4 titanium alloy with beam weaving[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(11): 43-46.
- [26] 何小东, 张建勋, 裴怡, 等. 线能量对 TC4 钛合金激光焊接残余应力和变形的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(5): 774-777.
- HE Xiaodong, ZHANG Jianxun, PEI Yi, et al. Effects of heat input on laser welding residual stress and distortion of TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(5): 774-777.
- [27] 徐建新, 明平伟. 钛合金焊接薄板残余应力有限元数值分析[J]. 中国民航大学学报, 2010(z1): 33-35.
- XU Jianxin, MING Pingwei. Finite element analysis of residual stress of titanium alloy welded sheet[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010(z1): 33-35.
- [28] 李兴霞, 王红玉, 张建勋. TC4 钛合金激光焊缝形貌与残余应力数值分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(12): 79-82.
- LI Xingxia, WANG Hongyu, ZHANG Jianxun. Numerical research on weld bead geometry and residual stresses with different heat source models in laser welding of TC4 titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(12): 79-82.
- [29] 王亚军, 付鹏飞, 关永军. TC4 钛合金电子束焊缝形状特征分类研究[J]. 航空材料学报, 2009(4): 53-56.
- WANG Yajun, FU Pengfei, GUAN Yongjun. Methods of studying welds shape of TC4 alloy with EBW[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009(4): 53-56.
- [30] 芦伟, 史耀武, 雷永平, 等. 厚壁 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的微观组织特征[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(1): 56-57.
- LU Wei, SHI Yaowu, LEI Yongping, et al. Microstructure characteristics of electron beam welded thick-wall TC4-DT joint[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(1): 56-57.
- [31] 李吉帅. 厚板钛及钛合金电子束焊接接头组织与性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- LI Jishuai. Study on microstructure and mechanical properties of high thickness titanium and titanium alloys plates jointed by electron beam welding[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [32] 顾宝兰, 丁大伟, 王丽, 等. 热处理对 TC4 钛合金电子束焊接件组织性能的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 85-89.
- GU Baolan, DING Dawei, WANG Li, et al. Effects of heat treatment on microstructure and properties of electron beam welded TC4 titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 85-89.
- [33] 龚玉兵, 王善林, 李娟, 等. 厚板 TC4 钛合金电子束焊接接头组织演变规律[J]. 焊接学报, 2017, 38(9): 92-96.
- GONG Yubing, WANG Shanlin, LI Juan, et al. Microstructure evolution of thick TC4 titanium alloy vacuum electron beam welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(9): 92-96.
- [34] KOLEVA E. Electron beam weld parameters and thermal efficiency improvement[J]. Vacuum, 2005, 77(4): 413-421.
- [35] KAR J, ROY S K, ROY G G. Influence of beam oscillation in electron beam welding of Ti-6Al-4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9-12): 4531-4541.
- [36] 彭周, 胡永刚, 陈国珠, 等. TC4 钛合金电子束焊接接头微观组织研究[J]. 材料工程, 2010(5): 47-50.
- PENG Zhou, HU Yonggang, CHEN Guozhu, et al. Micro-structures of TC4 alloy weld joints by electronic beam welding[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(5): 47-50.
- [37] DIETER R D. 焊接热效应-温度场、残余应力、变形[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- DIETER R D. Welding thermal effect-temperature field, residual stress, deformation[M]. Beijing: Mechine Industry Press, 1997.
- [38] 吴冰, 张建勋, 巩水利, 等. 厚板钛合金电子束焊接残余应力分布特征[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 11-13.
- WU Bing, ZHANG Jianxun, GONG Shuili, et al. Residual stress distribution of large thickness titanium alloy joints by electron beam welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 11-13.
- [39] 胡美娟, 刘金合. 钛合金电子束焊接和局部热处理后残余应力分布特征[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(5): 772-774.
- HU Meijuan, LIU Jinhe. Residual stress distribution of titanium alloy after weld and zonal heat treatment by electron beam[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(5): 772-774.
- [40] 黄国刚. 电子束流焊接残余应力及其对接头几何敏感性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- HUANG Guogang. Analysis of residual stress for electron beam welding and its sensitivity to joint geometries[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [41] 付玮, 黄国刚, 杨新华, 等. 焊缝形貌对电子束焊接残余应力分布的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(6): 53-56, 60.
- FU Wei, HUANG Guogang, YANG Xinhua, et al. Effects of weld profile on electron beam welding residual stress distribution[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(6): 53-56, 60.
- [42] 袁鸿, 余槐, 王金雪, 等. TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的损伤容限性能[J]. 材料工程, 2007(8): 17-19.
- YUAN Hong, YU Huai, WANG Jinxue, et al. The damage tolerance properties of the EBW joint for TC4-DT titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2007(8): 17-19.
- [43] TOMASHCHUK I, SALLAMAND P, BELYAVIAN N, et al. Evolution of microstructures and mechanical properties during dissimilar electron beam welding of titanium alloy to stainless steel via copper interlayer[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 585: 114-122.
- [44] 石铭霄, 张秉刚, 马纪龙, 等. 钛合金电子束深熔焊钉尖缺陷形成的影响因素[J]. 焊接学报, 2012, 33(12): 53-56.
- SHI Mingxiao, ZHANG Binggang, MA Jilong, et al. Affecting factors of forming spiking of titanium alloy electron beam deep penetration welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(12): 53-56.
- [45] KARADGEA M, PREUSSA M, LOVELL C, et al. Texture development in Ti-6Al-4V linear friction weld[J]. Materials Science and Engineering, 2007, 459(1-2): 182-191.
- [46] ROMREO J, MATTALLAH M, PREUSSA M, et al. Effect of the forging pressure on the microstructure and residual stress development in Ti-6Al-4V linear friction welds[J]. Acta Materialia, 2009, 57(18): 5582-5592.
- [47] DAYMOND M R, BONNET N W. Measurement of strain in a titanium linear friction weld by neutron diffraction[J]. Physical, 2003, 325(1-4): 130-137.
- [48] 邢丽, 朱蕾, 杨剑赞, 等. 焊接参数对 TC4 钛合金线性摩擦焊焊缝形成的影响[J]. 机械工程材料, 2014, 38(7): 43-45.
- XING Li, ZHU Lei, YANG Jianyun, et al. Effects of welding parameters on weld formation of TC4 titanium alloy by linear

friction welding[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(7): 43-45.

[49] JI S D, WANG Y, LIU J G, et al. Effects of welding parameters on material flow behavior during linear friction welding of Ti-6Al-4V titanium alloy by numerical investigation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(5-8): 927-938.

[50] 张田仓, 李晶, 季亚娟, 等. TC4 钛合金线性摩擦焊接头组织和力学性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 53-57.

ZHANG Tiancang, LI Jing, JI Yajuan, et al. Structure and mechanical properties of TC4 linear friction welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 53-57.

[51] 马铁军, 杨思乾, 张勇, 等. TC4 线性摩擦焊接头的力学性能及组织变化特点[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 17-20.

MA Tiejun, YANG Siqian, ZHANG Yong, et al. Mechanical properties and microstructure features of linear friction welded TC4 titanium alloy joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 17-20.

[52] 张杰, 张田仓, 陆业航, 等. TC4 钛合金线性摩擦焊接头组织及残余应力分布特征[J]. 航空制造技术, 2015, 58(17): 127-130.

ZHANG Jie, ZHANG Tiancang, LU Yehang, et al. Microstructure and residual stress distribution in linear friction welding joint of TC4 alloy[J]. Aeronautical Manufacturing

Technology, 2015, 58(17): 127-130.

[53] MAIO L, FRANCO F, SQUILLACE A, et al. A simplified approach to numerical simulation of LFW process of Ti-6Al-4V alloy: investigation on friction and temperature[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 4(5): 1-12.

[54] 张传臣, 黄继华, 张田仓, 等. 异质钛合金线性摩擦焊接头界面行为分析[J]. 材料工程, 2011(11): 80-84.

ZHANG Cuanchen, HUANG Jihua, ZHANG Tiancang, et al. The analysis in linear friction welding joint interface behavior of dissimilar titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(11): 80-84.

[55] 张传臣, 黄继华, 张田仓, 等. 异质钛合金线性摩擦焊接头微观组织与显微硬度分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(4): 97-100.

ZHANG Chuanchen, HUANG Jihua, ZHANG Tiancang, et al. Investigation on microstructure and microhardness of linear friction welded joints of dissimilar titanium alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(4): 97-100.

[56] GARCIA A M M. Blisk fabrication by linear friction welding[M]. Rijeka: Intech Open Access Publisher, 2011.

[57] TURNER R, GEBELIN J C, WARD R M, et al. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: modelling and validation[J]. Acta Materialia, 2011, 59(10): 3792-3803.

[58] 孙权. 线性摩擦焊接头孔缺陷演化的数值模拟及弥合规律研究[D]. 哈尔滨: 哈

尔滨工业大学, 2014.

SUN Quan. Numerical simulation and bridging laws of welding pore during linear friction welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[59] 朱剑桥, 张彦华, 张田仓, 等. TC4 线性摩擦焊接头微观特征[J]. 焊接学报, 2013, 34(11): 88-92.

ZHU Jianqiao, ZHANG Yanhua, ZHANG Tiancang, et al. Microscopic feature of TC4 linear friction welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(11): 88-92.

[60] 朱剑桥, 张彦华, 张田仓, 等. 振幅改变对 TC4 线性摩擦焊接头微观缺陷特征的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(3): 105-108.

ZHU Jianqiao, ZHANG Yanhua, ZHANG Tiancang, et al. Microdefect characteristics in TC4 linear friction welding joints in relation to amplitude[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(3): 105-108.

[61] 陶军, 孙成彬, 张田仓. 钛合金线性摩擦焊接头缺陷形成机理分析[J]. 航空制造技术, 2009, 52(10): 139-142.

TAO Jun, SUN Chengbin, ZHANG Tiancang. Study on the formation mechanism of welding defects in linear friction weld of titanium alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(10): 139-142.

通讯作者: 王善林, 博士, 副教授, 主要研究方向为特种连接技术, E-mail: slwang70518@nchu.edu.cn.

Development of Advanced Welding Technologies for Titanium Alloys

SUN Wenjun, WANG Shanlin, CHEN Yuhua, HUANG Yongde, KE Liming

(Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aerospace Components, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330036, China)

[ABSTRACT] Titanium alloy was known as the intelligent metal in the 21 century. Because of its excellent properties, it played a key role in the welding of high temperature, high strength structure and special joints. As one of the mainstream technologies in the manufacture of high-end equipment, a great deal of attention is being paid today to its advanced welding technology. In this paper, the related properties and main application fields of titanium alloy were briefly introduced. Aiming at the three advanced welding technologies, such as laser welding, electron beam welding and linear friction welding, a review of forming process optimization, defect control, organization evolution rules and mechanical properties analysis were carried out.

Keywords: Titanium alloy; Advanced welding technology; Forming technique; Defect control; Microstructural evolution; Mechanical property

(责编 知舟)