

## 非熔化极气体保护焊〔TIG 焊〕综述

传统 TIG 焊由于其电极的载流力量有限，电弧功率受到肯定限制，使得焊缝熔深浅、焊接速度小，尤其是用于中等厚度的焊接构造时需要开坡口并要进展多层焊，因此其使用受到肯定限制。热丝 TIG 焊是于 1956 年在传统 TIG 焊根底上进展起来的一种优质、高效、节能的焊接工艺，其根本原理就是在焊丝送进熔池之前，对焊丝进展加热使其到达肯定的预热温度，最终实现高速高效焊接的目的。而对焊丝的加热不仅可以提高焊接速度，而且可以明显改善熔敷率，并且调整了焊接熔池的热输入量，加快了填充丝的熔化速度，降低了母材的稀释率，扩大了传统 TIG 焊焊接工艺方法的适应性和应用范围，具有较高的经济价值。目前，在国内外热丝 TIG 焊已经在压力容器、锅炉、高温阀门、高压管道、石扮装置、海洋采油设备、军械制造和航空航天工程等高端工业部门用于碳钢、低合金钢、高合金钢、不锈钢和镍基合金等重要焊接部件的焊接。也适用于钛合金、铝及其合金等材料的焊接。过去，围围着焊丝的加热方法及进一步提高其熔敷效率和扩大其适用范围，已开发出很多具体的热丝 TIG 焊方法，主要分类如图 1 所示。热丝 TIG 焊依据焊丝的数量可分为单丝和双丝两种；单丝时依据加热方法的不同分为电阻加热、电弧加热、高频感应加热三种；而且还开发出主要用于大厚板焊接的窄间隙热丝 TIG 焊、用于薄板堆焊和外表熔敷的超高速热丝 TIG 焊及型热丝 TIG 焊。

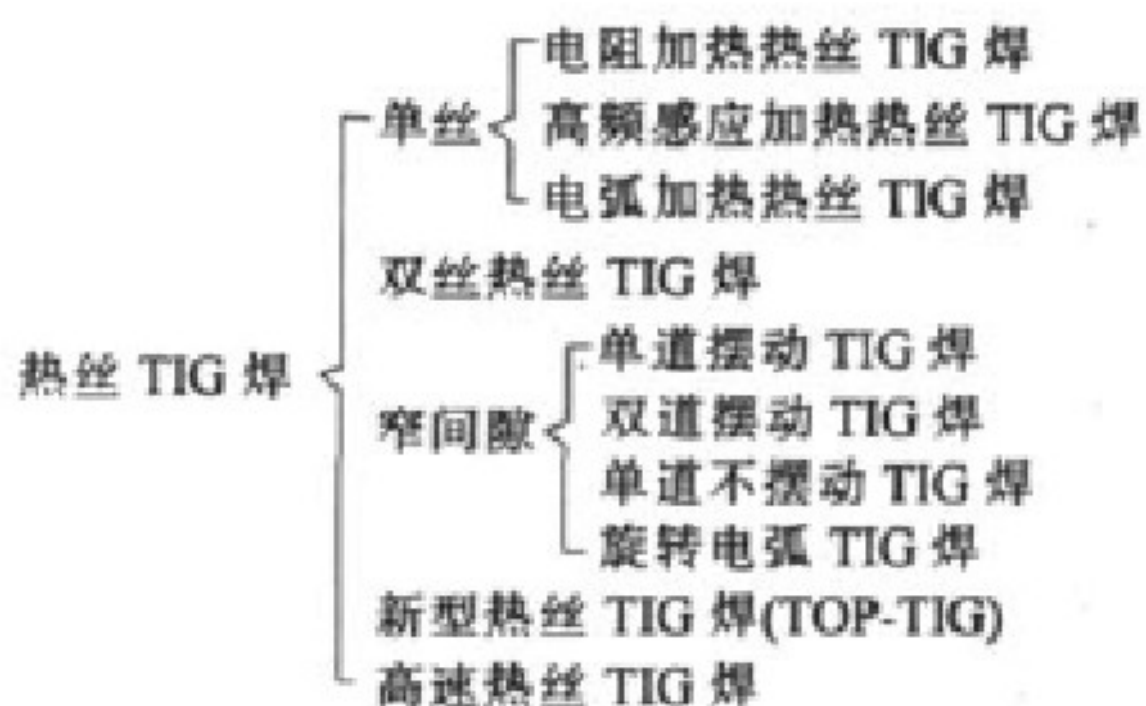


图 1 热丝 TIG 焊方法的主要分类

### 1 单丝热丝 TIG 焊

#### 1.1 电阻加热单丝热丝 TIG 焊

日本 Hori 等提出的热丝 TIG 焊装置中热丝的加热方式就是电阻加热，将热

丝电源的两极分别接在焊丝和工件上，利用电流流过焊丝所产生的电阻热来加热焊丝。

设焊丝的伸出长度为  $e$ ，焊丝的横截面积为  $S$ ，焊丝材料的电阻率为  $\rho$ ，焊丝的加热电流为  $I_w$ ，则在焊丝上产生的电阻热功率  $P_R$  为

$$P_R = (I_w^2 \rho e) / S$$

可看出，当焊丝的直径很大、焊丝材料的电阻率很低时，电阻加热的功率将达不到焊丝加热的预热温度，故此方法只适用于大电阻率、较细焊丝加热的情形。焊接电流与热丝电流波形匹配主要分为如表 1 所示的四种类型。相应的电阻加热热丝 TIG 焊可以分为 DC 式、AC 式、PH 式、HST 式等四种。而 DC 式电阻加热热丝 TIG 焊存在五大工艺问题，分别是磁偏吹、焊丝电弧现象、最优热丝电源参数调整困难、热丝送进位置波动以及熔化母材金属的力量受限制。而其中磁偏吹是 DC 式电阻加热热丝 TIG 焊工艺中最典型的问题。这个磁偏吹现象的发生主要是由于热丝电流所产生的自感应磁场而造成的。

PH 和 HST 式电阻加热热丝 TIG 焊均能有效地抑制磁偏吹现象的发生，其中当用 PH 式时，热丝电流处于峰值时才会消灭磁偏吹，调小脉冲的占空比，磁偏吹发生的时间削减，对焊接工艺的影响相应减小。而当承受 HST 式时，磁偏吹现象几乎是完全消逝。因此，目前有关电阻加热热丝 TIG 焊的争论几乎都集中于 HST 式电阻加热热丝 TIG 焊方法。HST 式对焊接电流与热丝电流波形之间的匹配关系要求格外严格。因此，HST 式电阻加热热丝 TIG 焊焊接电源与热丝电源的设计显得尤为重要。

之前电阻加热热丝 TIG 焊是承受双电源形式，即焊接电源和热丝加热电源二者是分开的、相互独立、分别掌握的。双电源式电阻加热热丝 TIG 焊焊接过程中焊接参数与热丝参数是分别调整，焊接过程的不稳定性会使焊接参数实时变化，而热丝参数并未发生相应的变化，必将对焊缝成型产生不利影响。之后，国内外学者均提出了单电源式电阻加热热丝 TIG 焊，即焊接电源与热丝电源共用一个电源，是将 TIG 焊焊接电流的一局部分流作为焊丝加热电源。承受单电源式能很好地适应 HST 式的进展。

## 1.2 高频感应加热单丝热丝 TIG 焊



范成磊等提出高频感应加热热丝 TIG 焊方法，其原理如图 3 所示。承受高频感应加热设备，借助高频交变的磁场，在焊丝上形成高密度的涡流，从而到达加热焊丝的目的。与传统热丝 TIG 焊接相比，其特点是：①加热速度快，热丝效率高，低耗环保；②通过对高频输出电流的掌握可以准确地掌握焊丝温度；③没有焊丝电流磁场的干扰，消退了磁偏吹现象，可以确保焊接质量；④通过转变输出振荡频率，利用高频感应集肤效应，可以掌握感应加热的深度；⑤高频感应加热更好地消退焊丝外表所吸附水分对焊缝的不利影响；⑥适用于各种金属材质的焊丝，特别是低电阻率焊丝的加热。但其缺点是长时间接触高频对人身体安康不利，还有就是高频感应加热的设备比较昂贵。高频感应加热热丝 TIG 焊在铝、镁及其合金等低电阻率材料的热丝 TIG 焊焊接中发挥着巨大优势。

### 1.3 电弧加热单丝热丝 TIG 焊

吕世雄等提出电弧加热热丝 TIG 焊方法，其原理如图 4 所示。此方法的优点是：热丝效率很高；设备简洁、本钱低；不存在磁偏吹和高频；适用于全部材质的焊丝，特别是有色金属。缺乏之处就在于施焊过程中电弧加热焊丝局部有微弱的弧光。

## 2 型热丝 TIG 焊 (TOP-TIG)

TOP-TIG 焊接工艺是由法国 SAF 公司领先开发的，实属 TIG 焊焊接领域的一项重要的重要的创，其原理如图 8 所示。SAF 公司开发此工艺的主要目标是：提高机器人焊接速度；研制出适合焊接机器人的紧凑焊枪；不抑制机器人焊接性能发挥；自动更换电极，便利操作。

与传统热丝 TIG 焊的设计理念不同，TOP-TIG 焊方法是直接利用电弧柱辐射热和等离子区的高温熔化填充焊丝。与传统的冷丝 TIG 焊相比，可成倍地提高熔敷率，加快焊接速度。与常规的 MIG/MAG 焊相比，焊接速度提高了，并且焊缝质量更优，焊接过程也不产生飞溅，经济性能良好。TOP-TIG 焊接方法除了上述优点之外，还大大简化了焊接附属设备，无需添加单独的热丝电源，而需对焊枪进展重设计，使焊丝在送进熔池之前通过焊接电弧区。所以 TOP-TIG 焊工艺的关键部件就是与送丝系统一体化的焊枪的设计。而这种焊枪的构造使得 TOP-TIG 焊接过程中消灭了类似 MAG 焊短路过渡和颗粒过渡的过渡模式。TOP-TIG 焊主要用于厚度为 3mm 以下薄板件的装配。



### 3 超高速热丝TIG 焊

ShiUeguri 等对电源系统进展了重设计, 整个系统只有一个电源, 并利用电弧电流的一局部作为焊丝加热电流。承受此电源系统, 焊速可以提高到一般冷丝 TIG 焊的两倍以上。Shinozaki 等基于脉冲加热的热丝 TIG 焊系统开发出超高速热丝 TIG 焊。首先, 他们利用超高速热丝 TIG 焊装置在板厚为 2mm 的 S304 不锈钢板上进展堆焊, 争论焊丝的熔化现象及焊丝温度分布状况。焊丝的熔化现象是用高速摄影拍摄得到的, 而焊丝的温度分布则是通过辐射测温装置测得的。争论结果说明, 主要受热丝电流影响的焊丝温度分布和焊丝熔化位置是影响该焊接工艺获得优良焊接质量的重要因素, 并得到了保证焊缝成形与焊接质量的适宜的焊接工艺参数范围。日本巴布日立工业公司与 Shinozaki 教授进展共同争论, 利用超高速热丝 TIG 焊, 已实现平板堆焊的最大速度为 7m/min, 角焊缝的焊接速度最大可到达 5m/min。这与传统的焊接方法相比, 焊接速度可提高 10 倍左右。随后, Shinozaki 等人利用一样的争论方法与手段对一般碳钢和钛合金的超高速热丝 TIG 焊焊接工艺进展了争论, 并提出热丝温度分布简化估算方法。并证明白热丝 TIG 焊可用于具有不同电阻率材料的焊接。

### 4 结论

不同的热丝 TIG 焊方法具有不同的特点, 也具有不同的适用范围。这些从热丝 TIG 焊根本原理而进展起来的方法扩大了热丝TIG 焊在工业领域中的应用范围, 尤其是在大厚板构造与薄板构造焊接中发挥了其优质、高效、节能等优点。而对于 HST 式电阻加热热丝 TIG 焊、窄间隙热丝 TIG 焊、超高速热丝 TIG 焊来说, 它们仍存在些技术与工艺难点, 也存在很多理论争论热点。这三种热丝 TIG 焊的争论具有很大的理论与现实应用意义, 从而得到了广泛的重视。并且随着微型机、数字化掌握理论、质量掌握等技术的进展, 热丝 TIG 焊方法将向着多元化、数字化、自动化和智能化方向进展, 其在高端工业领域的应用也将进一步扩大。



# 等离子焊综述

## 1. 概述

等离子弧焊制造于 1953 年，英文学名为“Plasma Arc Welding”，缩写为 PAW，由钨极氩弧焊进展而成，是该领域内的一项重大技术创。等离子弧焊与原始的 TIG 焊相比，具有优质、高效、经济等优点，早在上世纪 60 年月初已成功用于金属制品生产。近 20 年来，等离子弧焊技术获得了进一步的进展，并成为现代焊接构造制造业中不行缺少的周密焊接工艺方法，在压力容器、管道、航天航空、石扮装置、核能装备和食品及制药机械生产中得到普遍的推广应用，可以焊接一般优质碳钢、低合金钢、不锈钢、镍基合金、铜镍合金、钛、钽、锆及其合金和铝及其合金等金属材料。

为充分发挥等离子弧焊方法的潜在优势，增加其工艺适应性，进一步扩大应用范围，已开发出各种等离子弧焊工艺方法，如微束等离子弧焊、熔透型（弱等离子）等离子弧焊、锁孔型等离子弧焊、脉冲等离子弧焊、沟通变极性等离子弧焊、等离子弧钎焊和等离子弧堆焊等。可以预料，等离子弧焊必将在现代工业生产中发挥出愈来愈重要的作用。

## 2. 等离子弧焊的根本工作原理

等离子弧焊是早期对焊接电弧物理深入争论的最重要的成果之一。通过试验争论觉察，在任何一种焊接电弧中，都存在温度超过 3000℃的等离子区，但在自由状态的电弧中，这一区域的尺寸显得过小，且紧靠阴极，未能充分发挥其作用。TIG 焊自由状态电弧的形貌成锥形，大局部能量被散失，电弧的热效率很低，从而大大降低了焊接效率。为充分利用电弧的能量，自然萌发出将电弧柱进展压缩，使其能量集中的想法，并逐步形成了等离子弧焊的设计思想。

等离子弧是一种被压缩的钨极氢弧，或者说是一种受约束的非自由电弧。一般状况下，借助于水冷喷嘴的约束作用，等离子体电弧弧柱在压缩作用下形成压缩电弧，即等离子弧。等离子弧由特别构造的等离子体发生器产生，具有热压缩效应、机械压缩效应以及电磁压缩效应的特点。依据电极接电方式，等离子弧可以分为非转移型等离子弧和转移型等离子弧。

非转移型等离子弧的电极接负极，喷嘴接正极，电极与喷嘴之间产生等离子弧，工件不接电；转移型等离子弧电极接负极，工件接正极，等离子弧在电机与



工件之间产生。国内的等离子弧焊接有混合型等离子弧，即非转移型等离子弧和转移型等离子弧同时存在，电极接负极，喷嘴与工件接正极。

等离子弧焊接多使用惰性气体氩气作为工作气和保护气，利用产生的高温等离子弧做焊接热源，通过加热并熔化焊材以及母材金属，使熔化的焊材熔敷在母材上，同时熔化的焊材与母材之间发生简单的冶金作用而形成焊接接头。一般状况下，等离子弧焊接有以下几种分类方法。依据操作方式的不同，等离子弧焊接分为手工等离子弧焊接和自动等离子弧焊接；依据焊接工艺，等离子弧焊接可分为脉冲等离子弧焊接、小孔型等离子弧焊接、微束等离子弧焊接、熔化极等离子弧焊接、热兹等离子弧焊接等；依据焊透母材的方式，等离子弧焊接可分为穿透型等离子弧焊接和熔透型等离子弧焊接。

### 3. 等离子弧焊接特点

等离子弧作为一种钨极氢弧，由于受到水冷喷嘴的压缩，在机械压缩效应、热压缩效应以及电弧自身的电磁压缩效应下，使等离子弧具有能量密度更加集中、温度更加高、焰流速度更加大，而且刚直性更好的特点。

鉴于等离子弧的以上特点，等离子弧焊接相对于钨极氢弧焊而言，具有以下优点。

(1) 电弧能量密度大，熔透力量强，因此焊缝深宽比大，截面积小；(2) 焊接速度快，薄板焊接变形小，厚板焊接时热影响区窄；(3) 电弧方向性强，挺度好，稳定性好，电弧简洁掌握；(4) 钨极内缩在喷嘴内部，不能与工件接触，可以杜绝焊缝夹钨，焊缝质量高；(5) 可以产生稳定的小孔效应，通过小孔效应，可以正而焊接获得良好的单面焊双而成形。

等离子弧焊接的缺点：

(1) 焊接时需要保护气和等离子气两股气流，使焊接过程掌握和焊枪构造简单化；

(2) 焊接过程中，需掌握的工艺参数较多，对焊接操作人员的技术要求较高，尤其是程序化掌握的自动等离子弧焊接。

### 4. 等离子弧焊工艺方法的进展

近年来，为适应不同焊件的工艺要求，等离子弧焊工艺方法得到了很大的进展，并开发出了多种等离子弧焊工艺方法。它们已在各工业部门得以推广应用。



#### 4.1 微束等离子弧焊

微束等离子弧焊亦称微弧等离子焊，其常规的焊接电流范围为  $0.1\sim 25\text{A}$ ，以产生直径很细的等离子弧而得名，可用于壁厚范围为  $0.01\sim 1.5\text{mm}$  的箔材和微型零部件的焊接。微束等离子弧焊作为一种周密焊接法广泛应用于检测仪表和微电子器件制造行业。微束等离子弧焊最大的特点是可在极低的电流下（最小极限电流为  $25\text{mA}$ ）维持稳定的电弧，甚至可以用来焊接几克重的微型零件，且可保证优异的焊接质量。在很多应用场合，微束等离子弧焊由于设备投资低，其技术经济指标优于激光束焊，已成为一种值得大力推广的经济、周密的熔焊方法。

#### 4.2 锁孔型等离子弧焊

锁孔型等离子弧焊亦称穿透型等离子弧焊，它是利用高速、高温的等离子气流将焊接熔池穿透，并在底部形成小孔，随着等离子弧的前移，焊接熔池利用其本身的外表张力将小孔熔合，形成酒杯状焊缝横截面外形。这样可以一次行程完成单面焊双面成形的焊缝。在焊接不锈钢、高合金耐热钢、镍基合金和钛合金时，焊缝正反面均能到达令人满意的成形，外表均整美观。目前已成为上列材料焊接的首选焊接工艺方法，在某些工业兴旺国家，对于质量要求较高的不锈钢压力容器主焊缝，甚至在产品施工图样上强制性规定必需承受等离子弧焊。可见，锁孔型等离子弧焊已被该领域的工程技术人员公认为最先进的优质焊接法，并已取得成熟的生产阅历，

#### 4.3 熔透型等离子弧焊

熔透型等离子弧焊的工作原理与锁孔型等离子弧焊的区分在于：适当削减离子气的流量，并扩大喷嘴孔道直径，以降低等离子弧的压缩程度和穿透力量，产生一种所谓弱等离子弧。焊接过程中，焊接熔池的形成主要借助等离子弧热传导。熔透深度的掌握则通过调整能量参数（焊接电流、焊接速度）来实现。熔透型等离子弧焊的特点是可在相当宽的焊接电流范围内（ $25\sim 500\text{A}$ ）良好地操作。此外，等离子弧的稳定性和弧柱温度大大高于 TIG 焊，因此，可以相当快的速度（大于  $60\text{m/h}$ ）完成焊接过程，并保证焊缝的高质量。熔透型等离子弧焊已在制管、电工、电子器件、过滤器、航空器械、船舶和核能装置部件等制造行业得到广泛应用，并取得了可观的经济效益。

#### 4.4 直流脉冲等离子弧焊

为将锁孔型等离子弧焊也能适用于全位置焊，开发了焊接电流和离子气流



量同步脉冲的直流脉冲等离子弧焊（脉冲频率 1~20Hz）。这样，如同脉冲TIG 焊一样，可按要求严格掌握焊接热输入量，从而保证在立焊、仰焊位置亦能使焊缝良好地成形，大大提高了锁孔型等离子弧焊的工艺适应性，满足了很多大型焊件和管件在安装位置焊接的需要。在食品、饮料加工、石化工业中需建筑大量大直径薄壁容器和贮罐，由于这些薄壁容器的刚度很小，不适宜于卧式组装和焊接，而必需实行立式组装，这就要求在立焊位置焊接筒体的纵缝，在横焊位置焊接环缝，直流脉冲等离子弧焊在该制造行业已推广应用。

## 5. 结论及展望

等离子弧焊接技术进展至今仅仅经受了 60 余年，其最初在航空航天工业中得到重视，并且应用逐步加强。随着石油工业、汽车工业以及核电工业的进展，对于具有高焊接质量的等离子弧焊接技术将会得到更加广泛的应用。

随着高端装备制造工业的快速进展，等离子弧焊接技术将会有更大的提高和更快的进展。等离子弧焊接的电弧能量密度大，熔透力量强以及电弧方向性强，焊接速度快，效率高的特点将会得到更充分地发挥。在再制造技术领域中，由于先进技术方法的应用，程序化掌握的自动等离子弧焊接技术，不仅进一步提高了焊接效率，并且大大提高了焊接质量，因此，作为等离子弧焊接技术的进展方向，程序化掌握的自动等离子弧焊接技术在再制造工业中必定会得到更广泛的应用。



# 电子束焊综述

## 1. 电子束加工的争论现状及其进展趋势

电子经过集合成束。具有高能量密度。它是利用电子枪中阴极所产生的电子在阴阳极间的高压（25-300kV）加速电场作用下被加速至很高的速度（0.3-0.7倍光速），经透镜会聚作用后，形成密集的高速电子流。电子束焊是用会聚的高速电子流轰击工件，将电子束动能直接转化为热能，实现焊接。电子束焊正由于它的高能量密度，焊接速度快，加热范围窄，

热影响区小，加热冷却速度极快等优点而受到越来越广泛的应用。由于电子束加热过程贯穿整个焊接过程的始终，一切焊接物理化学过程都是在热过程中发生和进展的。焊接温度场打算了焊接应力场和应变场，还与冶金、结晶、相变过程密不可分，使之成为影响焊接质量和生产率的主要因素。因此，有必要对电子束焊温度场进展争论，这也是进展焊接冶金分析、应力应变分析与对焊接过程进展掌握的根底。

电子束焊接作为一种高能束加工方法，在生产应用中具有重要地位。电子束焊温度场打算了焊接应力场和应变场，是影响焊接质量和生产率的主要因素。介绍了电子束焊温度场模型，在分析了点热源、线热源模型的根底上，指出点热源模型仍是研究焊接温度场的根底，同时介绍了其它几种考虑电子束小孔效应的温度场模型。争论了计算温度场的热源模式，给出以高斯函数分布和双椭圆体能量密度分布的两种热源模式。列举了热物理参数、相变潜热、熔池流淌等影响温度场的因素。认为基于解析解法的简单性和计算机的飞速进展，数值解法将在温度场研究中发挥更加重要的作用。电子束焊温度场模型对于焊接热过程的争论早在40年月就已经开头。Rosenthal分析了移动热源在固体中的热传导。之后，苏联的雷卡林又进展大量的工作。建立了如下的数学物理模型：

- (1) 热源集中于一点、一线或一面；
- (2) 材料无论在何温度下都是固体，无相变；
- (3) 材料热物性参数不随温度变化；
- (4) 焊接物体的几何尺寸是无限的。

然而这些都是系统性的论述我们应当在此根底上论述此技术在某些领域的应用，及其原理方法首先电子束焊热源模式焊接热过程的准确性在很大程度上依



赖于建立合理的热输入模式。在 高能束焊中用于推测温度场的最广泛的模型是点热源和线源模型，尤其是点源模型是迄今为止焊接温度场分析的根底。但是电子束焊作为一种高能束焊与一般电弧焊有明显的不同。电子束焊中束孔的形成，使得焊接加热方式发生了很大的变化。其主要的公式原理来源：

## 2. 高斯分布热源模型

高斯函数的热流分布是一种比点热源更切实际的热源分部函数，应用广泛，它将热源按高斯函数在肯定范围内分布，以往建立的很多温度场模型中都承受了高斯分布这种热源分布模式，其函数为 [8]: $q(r) = \frac{3Q}{\sqrt{3}} \exp(-\frac{3r^2}{a^2})$  式中， $q(r)$  为半径  $r$  处的外表热流；为热流分布函数； $Q$  为能量功率； $r$  为距热源中心的距离。电子束功率并非总是满足高斯模式，有些争论者在高斯模式根底上对其加以改进，增加电子束斑点加热中心区的比热流，相应转变加热边缘的比热流，同时保持热源输入的总能量与高斯模式一样。

随着世界制造业的快速进展，焊接技术应用越来越广泛，焊接技术水平也越来越高在飞机制造领域，作为下一代飞机制造的主要连接方法，先进焊接技术替代铆接技术已经成为了趋势电子束焊接主要用于变速箱齿轮、行星齿轮框架、后桥、汽缸、离合器、发动机增压器涡轮等部件的焊接目前各国在飞机制造、航空航天等领域广泛使用这几项技术。尤其在飞机制造领域，作为下一代飞机制造的主要连接方法，先进焊接技术替代铆接技术已经成为了趋势。首先是航空航天材料的革。高性能、多功能、复合化和高环境相容性是将来航空材料的进展趋势。随着科技的进展和对飞机、太空船等使用要求的提高，飞机机体和发动机材料结构经受了 4 个阶段的进展，正在跨入第五阶段即机体材料构造为复合材料、铝合金、钛合金、钢构造（以复合材料为主）、发动机材料构造为高温合金、钛合金、钢、复合材料。飞机制造中承受了各种焊接技术。焊接构造件在喷气发动机零部件总数中所占比例已超过 50%，焊接的工作量已占发动机制造总工时的 10% 左右。在汽车制造领域的应用电子束焊接主要用于变速箱齿轮、行星齿轮框架、后桥、汽缸、离合器” 发动机增压器涡轮等部件的焊接。焊接热处理强化或冷作硬化的材料是接头的力学性能不发生变化。同时，可以焊接内部需保持真空度的密封件、靠近热敏元件的焊件、外形简单

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：  
<https://d.book118.com/208006015044006105>

