TIG堆焊技术研究进展

李玉龙，禹业晓
(南昌大学 机电工程学院机器人及焊接自动化重点实验室，江西 南昌 33003)

摘要：介绍了钨极氩弧焊(TIG)堆焊的工艺原理、特点；对比了TIG堆焊与手工电弧堆焊、火焰堆焊、等离子弧堆焊、激光堆焊、摩擦堆焊等其他堆焊方法；TIG堆焊具有保护效果好、电弧稳定、飞溅少、容易获得优质，可靠焊接质量的优点。总结了TIG堆焊在金属零部件制造、修复和改性中的应用；指出了TIG堆焊中存在的问题和发展方向。

关键词：TIG堆焊；原理；制造；修复；表面改性
中图分类号：TG455　　**文献标识码**：C　　**文章编号**：1001-2303(2012)12-0070-07

Research and development of TIG deposition technology

LI Yu-long, YU Ye-xiao
(Key Lab of Robot & Welding Automation, Mechanical & Electrical Engineering School of Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The principle and application of the TIG deposition was reviewed in this paper. The characteristic, process principles of TIG deposition were introduced; the comparison of TIG deposition and other welding deposition methods such as manual arc welding, flame overlaying, plasma arc welding, laser welding, friction surfacing deposition were conducted. TIG deposition has the advantages of good protection effects, arc stability, less spatter, easy of getting good quality and reliable welding quality. The application of the TIG deposition in metal parts manufacturing repair and surface modification was also summarized. Several existing problems and development direction were put forward.

Key words: TIG deposition; principle; manufacturing; repair; surface modification

0 前言

堆焊是用焊接方法在零件表面熔覆一层具有特定性能材料的工艺过程。其目的不是为了连接零件，而是为了使零件表面获得具有耐磨、耐腐蚀、耐高温和抗氧化等特性的熔敷金属；或是为了恢复或增加零件尺寸而进行的焊接过程。堆焊作为一种经济、有效的表面改性方法，是现代材料加工与制造业不可缺少的工艺手段。它是焊接领域中的一个重要分支，在矿山、冶金、农机、石化等工业部门的零件制造和修复中应用广泛[1-2]。目前堆焊方法众多，且在制造业的推动下不断有新的堆焊技术开发并在诸多行业得到应用，按热源不同分为手工电弧堆焊、火焰堆焊、TIG堆焊、MIG堆焊、等离子弧堆焊、激光堆焊、摩擦堆焊等。其中钨极氩弧焊(TIG)采用惰性气体-氩气保护，可避免堆焊层中出现气孔等缺陷，具有保护效果好、电弧稳定、飞溅少、容易获得优质可靠焊接质量的特点，广泛应用于有色金属、特殊合金钢和一些特殊材料的堆焊。

收稿日期：2012-05-08
基金项目：江西省青年科学家(井冈之星)培养对象计划资助项目(2010DQ01000)
作者简介：李玉龙(1978—)，男，辽宁义县人，副教授，博士，主要从事钎焊、特种连接、光纤智能金属结构方面的科研和教学工作。

1 TIG堆焊与其他堆焊方法对比

堆焊作为焊接的一个分支，通过将堆焊合金熔覆在金属材料或零部件表面，以获得特定的表面层性能和表面尺寸，是金属晶内结合的一种熔化焊焊接方法。堆焊既然是熔焊，因此凡是属于熔焊的方法都可以用于堆焊。堆焊方法的发展也随着生产发展的需要和科技进步而发展，目前已有很多种堆焊方法。如应用比较广泛的手工电弧堆焊、氧-乙炔火焰堆焊、钨极氩弧堆焊；以及近年来研究比较多的等离子弧堆焊、激光堆焊等高能束堆焊；还有一些其他堆

焊方法如埋弧堆焊、摩擦堆焊等。

手工电弧堆焊具有设备简单、使用可靠、操作方便灵活、成本低、适于现场堆焊的优点,广泛应用于各种机械工程和制造部门。西华大学章友谊等人[3]在 45 钢基体表面堆焊 CHR237 和 CHR207 两种堆焊焊条,然后对所获得的堆焊接头的显微组织和显微硬度进行分析,用微动磨损试验机考察其基材和堆焊层金属的微动磨损性能,以便为生产实践提供参考。金陵石化建筑安装工程公司的曲桂英等人[4]采用直焊道手工电弧堆焊方式对换热器管板进行双金属层堆焊,工艺上通过采取相应措施降低了母材稀释率,并防止裂纹产生,焊后通过消除应力退火减小了变形量,降低了焊后应力,又可保留堆焊层的耐腐蚀性,达到工业应用要求。

氧-乙炔火焰堆焊因所用设备简单,可随时移动,操作工艺简便、灵活、成本低而得到广泛应用。杜学铭等人[5]对碳化钨条氧-乙炔火焰堆焊制备金属基碳化物陶瓷复合耐磨堆焊层进行了研究,结果表明基体金属较好地浸润了碳化钨颗粒,碳化钨颗粒与基体结合性能良好,堆焊层具有较好的抗磨粒磨损性能。

等离子弧堆焊技术作为材料表面强化手段之一,具有能量密度大、弧柱温度高、一次熔深大、热影响区小、焊接变形小、焊接质量高等突出优点。王晓峰等人[6]通过钛合金和硼合金粉末之间的高温冶金反应,在普通碳钢表面制备了 TiB2 金属陶瓷层。天津大学的赵书远[7]采用正交设计方法确定等离子弧粉末堆焊工艺参数并进行堆焊。所得到的等离子堆焊层使得石油钻杆接头表面具有优良的耐磨性,为石油钻杆接头延长使用寿命、降低成本、修复旧接头开辟了一个新途径。

激光堆焊作为高能束焊的典范可以实现热输入的准确控制,焊接速度高,冷却速度快,热畸变小,厚度、成分和稀释率可控性好,成为国内外学者的研究热点,近十几年来得到了迅速发展。戚文军用激光堆焊方法在 Q235 钢基体表面制备工程厚度的 WC 梯度焊层[8]。上海交通大学的彭行金采用激光和等离子两种方法堆焊修复万向接轴叉头虎口表面,综合对比两种工艺,激光堆焊得到的组织、抗冲击性、拉伸强度等性能较优[9]。

埋弧堆焊具有生产率高、劳动条件好、堆焊金属成分稳定等优点,在大、中型零部件的修复和耐磨衬里的制备过程中得到广泛应用。皖北煤电集团公司[10]利用埋弧堆焊技术修复因锈蚀磨损的千斤顶活柱,节约了成本,提高了效益。刘均海[11]以 TiFe 粉、铬粉、镍粉、铁粉、胶体石墨等合金粉粒为原料,利用埋弧堆焊技术在 Q235 钢表面合成了 TiC 颗粒增强铁基复合涂层。涂层平均显微硬度为 601 HV,约是碳钢基体的 3 倍。

摩擦堆焊具有耗能低、污染小、效率高、加工质量好等优点,具有表面耐磨、抗腐蚀要求的材料都可以使用摩擦堆焊技术来获得基本无稀释、结合完整性极高的堆焊层,在耐磨件的制造与修复方面应用前景广阔,对于发展面向循环经济的绿色再制造技术具有重要意义[12]。近年来,G.M.Bedford[13]探讨了摩擦堆焊技术在硬质合金耐磨层方面的应用和发展,并深入分析摩擦堆焊技术特有的碾压锻造效应对堆焊层微观组织的影响:堆焊层的组织得到细化,大尺寸的沉淀强化物也得到有效细化,焊敷层的显微硬度显著提高,因而耐磨性能也同样得到提高。

手工电弧堆焊和氧-乙炔火焰堆焊生产效率低、劳动条件差、对焊工技术水平要求高;埋弧焊稀释率高;激光、等离子弧等高能束焊以及摩擦堆焊具有工艺设备复杂、生产成本高的缺点。而钨极氩弧焊相对成本低、劳动条件好、堆焊质量优良广泛应用于机械行业各种零部件的制造和修复中。魏琪等人采用马氏体时效钢 TIG 模具堆焊金属粉芯焊丝堆焊制造热锻模具。经测试,该金属粉芯焊丝的焊接工艺性能和熔敷金属力学性能优良,所制造的热锻模寿命高于 3Cr2W8V 钢模[14]。金属熔覆成型(SMD)是通过钨极氩弧焊制造渐近成形零件的制造工艺,针对用传统制造方法难以成形,而在制造过程又因金属材料损失造成巨大浪费的 Ti 合金而言,其优势明显。Bernd[15]以 Ti-6Al-4V 为熔覆金属进行堆焊制造,结果表明与其他制造方法成型的零件相比,SMD 成型零件具有更优的机械性能。

2　钨极氩弧堆焊(TIG 堆焊)

TIG 堆焊是在惰性气体的保护下,不需要施加外部压力,利用钨极与焊件间产生的电弧热熔化母材和填充焊丝,形成堆焊层的焊接方法。焊接开始时,采用高电压击穿处于钨极和底板之间的绝缘气体。当电流通过保护气体的电离而传导时,就产生了电极电弧。当电流稳定地通过电极传导的时也保证了电弧的稳定。底板金属和焊丝都被电弧热所熔

化形成熔池。当电弧和熔池建立之后，焊炬就开始运动，而电弧就持续的熔化焊丝形成熔覆层。焊接时保护气体从焊枪的喷嘴中连续喷出，在电弧周围形成保护层隔绝空气，保护电极和焊接熔池以及临近的热影响区，以形成优质的堆焊层[16-20]。焊接时，使用难熔金属钨或钨合金制成的电极基本上不熔化，所以容易维持电弧长度的稳定。填充焊丝在电弧前方添加，堆焊薄板件时，还可采用脉冲电流以防止烧穿焊件。一个典型的TIG堆焊过程如图1所示。

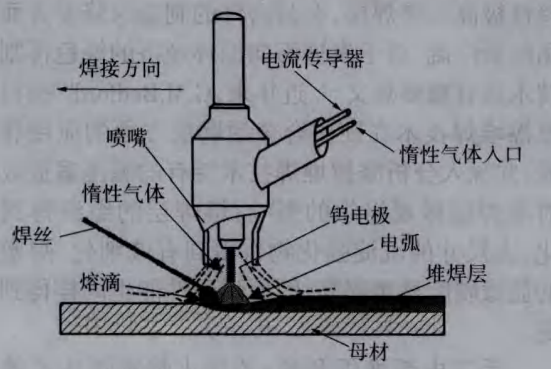


图1 TIG堆焊过程[18]

Fig.1 Deposition process using the TIG[18]

TIG堆焊的优点[1,16]：

(1)不存在电极熔化对弧长的影响，焊丝从侧面向电弧送进，焊接电流不受影响。

(2)节省贵重金属材料，可实现在普通材料上熔覆高性能(耐磨、耐高温、耐蚀等)的堆焊层。

(3)焊接工艺性能好，电弧燃烧稳定，无飞溅，可获得组织致密、性能优越的堆焊层。

(4)堆焊工艺参数一经确定，堆焊质量易于保证，堆焊可靠性高，且易于实现自动化。

3 TIG堆焊的应用

3.1 制造新零件

采用堆焊技术制造机械零件时，不仅可发挥零件的综合性能和金属材料的工作潜力，还能节约大量的贵重金属。采用熔焊成形制造新零件具有许多优点：制造零件的尺寸、质量以及形状几乎没有限制；产生的废料很少，后续机械加工的工作量也很小；熔焊成形的零件化学成分均匀、韧性好、材料晶粒尺寸细小均匀，不会出现大型铸件所存在的宏观偏析，并可以在逐层堆焊过程中进行逐层热处理，使零件充分的淬透和回火；更重要的是，可以在熔焊的过程中采用不同的材料以满足特殊的设计需要；熔焊成形对设备的要求较低，无需制造模具，因而可以大幅度节约投资和生产时间。

TIG熔焊成形是将快速成形工艺与焊接技术相结合而产生的。自1992年英国Rolls-Royce公司联合Cranfield大学开发出基于GMAW/GTAW的焊接RP系统用于制造航空发动机的Ni基和Ti基合金零件[21-22]，该项技术迅速工业化并被推广应用。目前TIG堆焊已广泛应用于机械、军工、航空航天等部门。机械行业的水轮机叶片基体材料为碳素钢，在可能发生的气蚀部位堆焊一层不锈钢，使之成为耐气蚀的双金属叶片；在金属模具制造中，基体要求强韧，选用价格相对便宜的碳钢、低合金钢制造，而刃磨要求硬度高、耐磨，采用耐磨合金堆焊模具刃磨部位，可以节约大量贵重合金的消耗，提高模具的使用寿命[23]。兵器制造业中的弹带焊接是在弹体的指定位置焊接一层圆环形纯铜或铜合金或者软铁堆焊合金。哈尔滨工业大学的磨安祥[24]针对TIG堆焊铜弹带过程中容易出现难熔合，热裂纹倾向大，尤其是泛铁造成堆焊层硬度急剧增大，使炮膛寿命下降等问题，选用软铁(即含碳量小于0.04%的工业纯铁)代替铜作为堆焊弹带的堆敷材料，进一步优化弹带的焊接工艺，降低材料成本。这种方法不仅消除了铜钢焊接时由于界面差异带来的可焊性差的影响，还填补了国内软铁堆焊弹带技术的空白。从经济角度看，软铁价格仅约为铜合金的1/6，使弹带生产价格大幅降低。这对我国国防事业的发展具有重要的意义。在航天方面，Rolls-Royce已经将该技术应用于生产Trent800、Boeing777航天发动机零部件[25]。

H Wang和R Kovacevic[26]使用变极GTAW焊接技术研究了5356铝合金的快速成形，研究表明：基体的预热、弧长和热输入量的控制是成形的三个重要因素。其中弧长控制是金属沉积过程的关键因素，原因在于：在长时间的熔焊堆积过程中，弧长的变化不可避免，弧长的变化会导致从电弧输入热量的变化，进而导致熔焊沉积过程的不稳定；弧长的变化导致焊丝熔滴过渡的不稳定，进而影响熔焊沉积的质量。在对高65.1 mm，底部和顶部直径分别为75.5 mm和47 mm，壁厚为4.5~4.8 mm的渐缩管堆焊成形时，高度、厚度和直径误差分别为1.7%、4.3%和2.1%，获得了成形较好的渐缩管，如图2所示。

文献[27]建立了基于TIG堆焊技术的熔焊快速成形系统，包括焊接电源、TIG焊枪、送丝机构、数

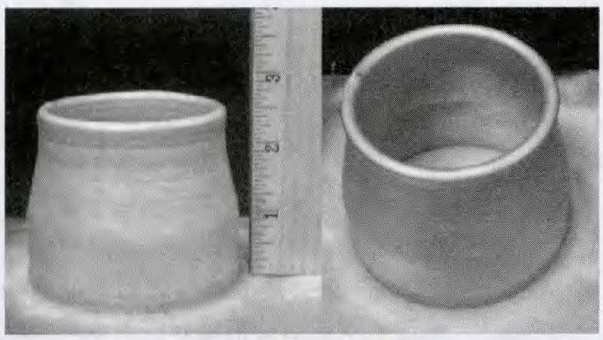
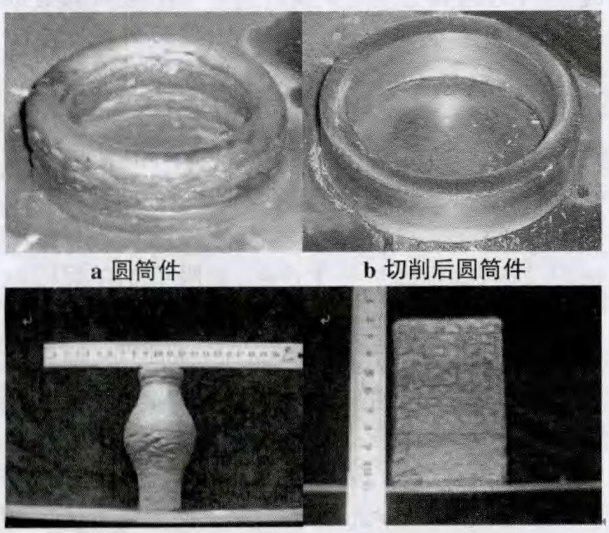


图 2　渐缩管成型件[26]

Fig.2　"Pipe reducer"shape part[26]

控机床、工控机和电压电流采集卡等。用 TIG 焊机进行堆焊成形,数控机床控制焊机的行走并进行后续的切削加工,工控机采集焊接过程中的成形数据进行反馈控制。针对低碳钢 TIG 堆焊成形过程中热量积累导致工件边缘塌陷的问题建立了电压反馈模糊控制系统。结果表明,在电压反馈模糊控制系统的辅助下进行堆焊可获得成形较好的圆筒、墙体和花瓶工件。在 TIG 堆焊的基础上对圆筒工件进行了数控切削加工,获得了高精度的成形工件,如图 3 所示。



a 圆筒件　　b 切削后圆筒件

c 花瓶件　　d 墙体件

图 3　堆焊快速成型工件[18,27]

Fig.3　Samples deposited using the TIG[18,27]

3.2　修复旧零件

修复零件是目前我国 TIG 堆焊技术的主要应用形式。在生产实践中,机器设备零部件(轴类、工模具、轧辊、农机零件、采掘机件等)经过一段时间运行后总会发生磨损、腐蚀等,使其工作性能和工作效率下降,甚至失效。利用堆焊方法能很快修复这些零部件,延长其使用寿命。据统计[28],堆焊金属总量的 72.2%用于零件的再修复工作。修复所花费用比制造或购买新机件的费用低很多,如果修复及时,可以减少设备停机运行的损失,且修复零件的使用寿命也比新产品长。因此,广泛采用堆焊工艺修复旧零件,对节约材料、节省资金、弥补配件短缺等具有重要的意义。

白津生[29]采用新型 THS-HL1 和 THS-HL2 焊丝对夏利轿车大型铜合金模具进行了补焊,该模具可以整体不预热进行冷焊,通过锤击使变形减至最小。采用的 TIG 堆焊工艺可使堆焊层的材质和机械性能达到原设计要求,成功解决了铜合金模具堆焊的技术难题,获得了良好的效益。安徽安庆船用柴油机厂的杨敏[30]采用氩弧堆焊对厂内某零件的热锻模进行了修复。焊后加工到要求尺寸,经超声和渗透着色检验,无裂纹、气孔、夹渣等焊接缺陷。修复零件使用两年多,未发现问题,节省了成本,具有重要的工业应用价值。

轧钢设备上重要的部件——夹送辊因在高温下工作易出现龟裂和磨损等问题,要求轧辊表面应具有较好的硬度、高温耐磨性、抗热疲劳性、耐冲击等性能。为提高夹送辊的使用寿命,通常在表面堆焊一层满足上述性能的硬面材料来修复夹送辊,提高轧辊的使用寿命。王清宝[31]通过模拟夹送辊的堆焊,找到裂纹,对其盖面和纵截面形貌观察分析,研究了裂纹产生和扩展的机理。

Wilson[32]采用 TIG 堆焊对 AISI P20 和 VP50IM钢制聚合物注塑模具进行了修复,分别在 AISI P20 钢上堆焊一种相同材质 AWS A5.28-96 ER80S-B2 焊丝和在 VP50IM 钢上堆焊两种焊丝:相同材质的 AWS A5.28-96 ER 80S-B2 焊丝和不同材质的 A5.28 - 96 ER 80 S-B6 焊丝。在相同的振幅直流电和不同的热输入下得到了堆焊熔敷层。研究了精抛后的堆焊层质量,发现其与化学元素组成、微观结构和硬度有关。

为延长核反应堆使用寿命,需要用焊接方法来修补和替换因辐照降解的零部件。M.Koshiishi[33-34]等人采用 TIG 焊方法研究了受辐照的 304 型不锈钢的焊接性。当焊接热输入小于 1 MJ/m 时,即使焊接热输入只有 0.4 MJ/m 时,试样也没有焊接缺陷,可以获得良好的堆焊层;而当焊接热输入大于 1 MJ/m 时,在基体母材的晶粒边界会形成氦泡,导致出现

焊接裂纹。

3.3 堆焊改性

近年来随着现代表面工程技术的发展，国内外都非常重视改善零件表面性能以满足工作条件的特殊要求。如采用 TIG 堆焊工艺制造双金属新零件。即对零件的基体与表面堆焊层选用具有不同性能的材料制造，以满足工作条件的技术要求，使工件表面层具有较高的耐磨、耐蚀等特殊性能，同时保持了基体的韧性、降低了生产成本。这种零件的基体和堆焊合金层因具有不同的性能，能够使母材和表面金属承受不同的载荷或发挥其不同的理化特性，做到物尽其用，充分发挥材质的潜力，既可节约大量的贵重金属，又可大幅度提高零件的使用寿命。

Co 元素可参与金属间化合物的析出，同时也促进其他金属间化合物的析出，从而影响强化相析出的数量、形态和分布，随 Co 的增加会大大提高堆焊层的硬度。北京工业大学的李文静等人[35]通过调整焊丝中 Co 元素的含量，分析了 Co 对堆焊层硬度和红硬性的影响。结果表明，Co 元素具有很强的时效硬化作用，随着熔敷金属中 Co 的增加，硬度和红硬性显著提高。

江苏大学的雷玉成[36]等人用 TIG 重熔方法对 4020 钢表面耐空泡腐蚀堆焊层进行改性。与传统磨削表面加工对比，TIG 表面重熔可以延迟相变，延长吸收空泡冲击的时间，减缓空泡腐蚀，同时抑制了片层状马氏体的裂纹发展，避免了大的物质剥落。

M.Eroglu[37]采用 TIG 电弧热源将 4140 钢及其表面预置的高碳铬铁粉末熔化、冶金结合来实现 4140 钢的表面改性。结果表明，改性后的 4140 钢表面硬度和耐磨性得到大大提高。Dyuti S 采用 TIG 焊在普通碳钢表面熔融预置的钛铝混合物粉生成 TiAlN 熔覆层。该涂层比普通碳钢基板具有更好的机械和抗氧化性能，可以代替传统的陶瓷涂层应用于化工厂和汽车行业的零部件以防止高温氧化和磨损[38]。

AISI8620 钢是一种广泛应用于工业领域的材料，改善其材料表面来提高其耐磨性将会带来巨大的经济效益。Osman 等人[39]采用 TIG 方法用 SiC/C 粉末对 AISI8620 钢进行了改性研究。结果表明，当 SiC/C 粉末中含 C 量较低时，获得的复合结构耐磨性和硬度性能得到较大改善。该方法可以替代目前应用的其他表面改性方法。

4 TIG 堆焊存在的问题和发展方向

TIG 堆焊方法由于焊接热循环带来了残余应力，引起复杂的几何变形，常常造成产品几何尺寸不能满足要求。有时还会因焊接本身的冶金特点及其组织变化，在堆焊层造成局部或全面的堆焊层剥离。Mughal 和 Klingbeil 研究了堆焊成形中的残余应力和变形，通过采取适当的措施以控制或降低堆焊后的变形量，保证产品的几何尺寸，充分发挥异种材料各自的优点[40-41]；如何降低稀释率是堆焊中不可忽视的另一问题，稀释率的大小决定着堆焊层的质量和贵重合金的利用率，稀释率越低意味着堆焊层合金成分被母材成分冲淡越小，其合金纯度也越高，堆焊层性能越好。清华大学的董巍对直流 TIG 电弧粉末堆焊层稀释率高的问题采用弱规范和辅助冷源对母材冷却的方法来降低稀释率[42]；近年来堆焊过程的环保问题得到人们越来越多的关注，焊条研制中烟雾大、易产生气孔、飞溅和脱渣困难等问题急需解决。堆焊过程还会出现未熔合、孔洞、夹杂等组织缺陷，一般可通过调整工艺参数得到有效改善。TIG 堆焊方法因承载电流能力有限，焊接效率较低，因此在如何保证其焊接质量好、可控性高等优点的基础上，提高其焊接效率是目前的研究重点。

目前已有许多学者或研究机构研究和发展了钨极 TIG、A-TIG、热丝 TIG 焊等高效 TIG 工艺方法和设备。A-TIG 是基于 TIG 焊技术的焊接新工艺，继承了 TIG 焊焊接质量好的优点，又可以大幅度增加焊缝熔深，提高焊接生产率，克服了 TIG 焊因单道焊熔深小、焊接生产率低以至应用场合受限制的缺点。A-TIG 开始是应用于金属钛的焊接，随后用于钢的焊接[43-44]。Kobayashi 等人[45]提出了双钨极氩弧焊的方法，与传统 TIG 焊相比，双钨极氩弧焊能显著降低电弧压力，从而可以进一步提高焊接速度和焊接电流，极大地推进了钨极氩弧焊向着优质高效的方向发展。现在研究比较热门的是热丝 TIG 焊，填充金属丝在被送入熔池之前，通过电加热使之达到一定温度，也就是对焊丝进行预热，其主要优点是显著提高 TIG 堆焊的熔敷率[46]。近年来，还有研究者采用变极性 TIG 焊实现了有色金属零件的快速成型，如美国 Southern Methodist 大学实现了铝合金的金属零件的快速制造[47-48]。此外，除了采用电弧作为热源熔化焊丝进行堆焊成型，还有学者通过综

合两种焊接方法的优点开发了激光-TIG 和激光-MIG 焊接方法,采用两种热源来熔化焊丝进行金属零件的快速制造[47-51]。

参考文献:

[1] 王　娟.表面堆焊与热喷涂技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004:1-50.

[2] 唐景富.堆焊技术及实例[M]. 北京:机械工业出版社,2011:19-28.

[3] 章友谊,屈金山,李　娟,等.手工电弧堆焊接头组织及微动磨损性能研究[J].热加工工艺,2007,36(3):13-16.

[4] 曲桂英,刘长林.换热器管板的手工电弧堆焊及热处理[J].机械设计与制造工程,2001,30(3):78-82.

[5] 杜学铭,卜智祥,李爱农.碳化钨条氧-乙炔火焰耐磨堆焊工艺的研究[J].船海工程,2002(2):35-38.

[6] 王晓峰,单平,王惜宝,等.等离子弧堆焊 TiB2-金属陶瓷涂层的组织及性能[J].焊接学报,2005,26(7):33-36.

[7] 赵书远.等离子弧粉末堆焊在石油钻杆接头修复中的应用研究[D].天津:天津大学,2005.

[8] 戚文军,何艳兵,刘　斌,等.激光堆焊镍基碳化钨梯度焊层及耐磨机理分析[J].焊接学报,2002,23(1):57-60.

[9] 彭行金.万向接轴叉头激光堆焊修复技术的基础研究[D].上海:上海交通大学,2007.

[10] 王　强,孟荣艳. 埋弧堆焊法修复液压千斤顶活柱[J].煤炭技术,2009,28(2):24-26.

[11] 刘均海,黄继华,刘均波,等.合金粉粒埋弧堆焊 TiC 颗粒增强铁基复合涂层[J].焊接学报,2010,31(12):101-104.

[12] 刘雪梅,姚君山,张彦华,等.摩擦堆焊技术研究进展[J].热加工工艺,2007,36(11):62-65.

[13] Bedford G M.Friction welding for wear applications[J].Met. Mater,1990(6):702-705.

[14] 魏　琪,栗卓新,李世敏,等.马氏体时效钢金属粉芯焊丝 TIG 堆焊模具制造技术研究[J].模具工业,2003(3):51-54.

[15] Baufeld B,Biest O V,Gault R.Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition:Microstructure and mechanical properties[J].Materials and Design,2010(31):S106-S111.

[16] 杨文杰.电弧焊方法及设备[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007:131-132.

[17] Madadi F,Ashrafizadeh F,Shamanian M.Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM [J].Journal of Alloys and Compounds,2012:71-77.

[18] Li Yulong,Zhang Hua,Hu RongHua.Development of a steel rapid prototyping system based on TIG welding deposition technology[C].Wuhan:Knowledge Acquisition and Modeling Workshop,IEEE International Symposium,2008:154-157.

[19] Song J L,Lin S B,Yang C L,*et al*.Analysis of intermetallic la yer in dissimilar TIG welding brazing butt joint of aluminium alloy to stainless steel[J].Science and Technology of Welding and Joining,2010,15(3):213-218.

[20] Lowke J J,Tanaka M,Ushio M.Arc modelling for prediction of weld depth variability in TIG welding[J].Australasian Welding Journal (Australia),2002,47:33-37.

[21] Ribeiro A F.3D printing with metals[J].Computing&Control Engineering Journal,1998(2):31-38.

[22] Ribeiro A F,Norrish J.Making compoents with controlled metal deposition[C].International Symposium on Industrial Electronics,Guimaraes,Portugal,1997(3):831-835.

[23] 王小范,姚建华,张群莉.激光表面堆焊技术的应用及展望[J].兵器材料科学与工程,2005,28(4):68-70.

[24] 磨安祥.软铁弹带 TIG 堆焊工艺及界面研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2011.

[25] 李　超,朱　胜,沈灿铎,等.焊接快速成形技术的研究现状与发展趋势[J].中国表面工程,2009,22(3):7-12.

[26] Wang H,Kovacevic R.Rapid Prototyping Based on Variable Polaurity Gas Tungsten Arc Welding for a 5356 Aluminium Alloy[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part B:Journal of engineering manufacture,2001,215(11):1519-1528.

[27] 李玉龙,张　华,张光云,等.基于 TIG 堆焊技术的低碳钢零件精密快速成形[J].焊接学报,2009,30(9):37-40.

[28] 单际国,董祖压,徐滨士.我国堆焊技术的发展及其在基础工业中的应用现状[J].中国表面工程,2002(4):19-22.

[29] 白津生,林嘉明,韩春兰.夏利轿车铜合金模具 TIG 堆焊工艺研究[J].焊接技术,1995(2):16-17.

[30] 杨　敏.5CrMnMo 热锻模的 TIG 堆焊修复[J].焊接,1993(7):27.

[31] 王清宝,栗卓新,史耀武.夹送辊堆焊裂纹及其产生机理[J].焊接学报,2010,31(3):93-96.

[32] Preciado W T,Bohorquez C E N.Repair welding of polymer injection molds manufactured in AISI P20 and VP50IM steels[J].Journal of Materials Processing Technology,2006(179):244-250.

[33] Nakata K,Oishi M,Koshiishi M,*et al*.Re-weldability of neutron-irradiated stainless steels studied by multi-pass TIG welding[J].Journal of Nuclear Materials,2002(307-311):1578-1583.

[34] Morishima Y,Koshiishi M,Kashiwakura K.Re-weldability of neutron irradiated Type 304 and 316L stainless steels[J].Journal of Nuclear Materials,2004,663-667.

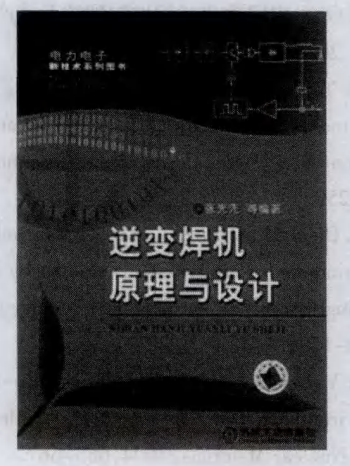
[35] 李文静,魏琪,朱学军,等.Co 元素对时效硬化工具合金 TIG 堆焊金属粉芯焊丝堆焊层硬度及红硬性的影响[J].焊接,2002(11):18-21.

[36] 雷玉成,冯良厚,赵晓军.TIG 表面重熔对堆焊层耐空泡

腐蚀的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术,2007,19(1):12-15.
[37] Eroglu M,Onalp S.Tungsten inert gas surface modification of SAE 4140 steel[J].Materials Science and Technology,2002,18(12):1544-1550.
[38] Dyuti S,Mridha S,Shaha S K. Surface Modification of Mild Steel Using Tungsten Inert Gas Torch Surface Cladding[J]. American Journal of Applied Sciences,2010,7(6):815-22.
[39] Celik O N,Ulutan M,Gasan H,*et al*.Effects of graphite content on the microstructure and wear properties of an AISI 8620 steel surface modified by tungsten inert gas[J].Surface & Coatings Technology,2011(206):1423-1429.
[40] Mughal M P,Fawad H,Mufti R.Parametric thermal analysis of molten metal droplet as applied to layered manufacturing [J].Heat Mass Transfer,2006,42(3):226-237.
[41] Klingbeil N,Beuth J,Chin R,*et al*.Residual stress-induced warping in direct metal solid freeform fabrication [J].International Journal of Mechanical Sciences,2002(44):57-77.
[42] 董 巍,单际国,谭稳达,等.Ni-Al 粉末直流 TIG 电弧堆焊层的稀释率及其控制[J].金属热处理,2007,32(7):41-43.
[43] 张瑞华.低碳钢 A-TIG 活性剂的焊接[J]. 焊接学报,2003,24(1):85-90.
[44] Vasudevan M,Arunkumar V,Chandrasekhar N,*et al*. Genetic algorit hm for optimisation of A-TIG welding process for modified9Cr-1Mo steel [J]Science and Technology of Welding and Joining,2010,15(2):117-123.
[45] Kobayashi K,Nishimura Y.Practical Application of High Efficiency Twin-arc Welding Method(SEDAR-TIG) for PCLNG Storage Tank[C].IIW Doc. 2005,1-9.
[46] 周矿先.引进全位置热丝 TIG 焊窄间隙焊接设备和工艺浅评[J].焊管,2001,23(1):20-22.
[47] Ouyang J H,Wang H,Kovacevic R.Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: Process control and microstructure[J].Materials and Manufacturing Processes,2002,17(1):103-124.
[48] Wang Huijun,Jiang Wenhui,Ouyang Jiahu,*et al*.Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW[J].Journal of Materials Processing Technology,2004,148(1):93-102.
[49] Choi D S,Lee S H,Shin B S,*et al*.Development of a direct metal freeform fabrication technique using CO_2 laser welding and milling technology[J].Journal of Materials Processing Technology,2001,113(1-3):273-279.
[50] Li Fuquan,Chen Yanbin,Li Liqun.Investigation of Surface Modification of Al Alloy by Laser-TIG Hybrid Melt Injection WC Powder[J].Chinese Journal of Lasers,2009,36(10):2722-2727.
[51] Chen Y B,Lei Z L,Li L Q,*et al*.Experimental study on welding characteristics of CO_2 laser TIG hybrid welding process[J]. Science and Technology of Welding and Joining,2006,11(4):403-411.

好书推荐，欲购从速！

《逆变焊机原理与设计》 书号:**0239** 定价:**45** 元



本书系统介绍了逆变焊机的原理及设计方法，共分为 5 章。

第 1 章介绍了焊机的发展过程：从弧焊发电机发展为逆变焊机，从晶闸管逆变焊机发展为 IGBT 逆变焊机，并向着数字化的方向发展。

第 2 章介绍了逆变焊机的主电路设计、功率开关器件的选用和计算，以及控制电路的设计。

第 3 章分析了各种焊接方法对焊机的要求。涉及了焊条电弧焊、TIG 焊、CO2 气体保护焊、脉冲 MIG 焊以及埋弧焊，并介绍了几种先进高效的焊接方法。

第 4 章分析了国内外典型焊机实例，分为主电路分析、单元电路分析以及焊接电流与电压的分析。

第 5 章以低飞溅软开关气体保护焊设计为例，给出了逆变焊机的设计实例及仿真过程。

逆变焊机的设计需要理论和实践的紧密结合，因而本书中尽量做到理论联系实际，书中给出了大量的实际资料数据、单元电路和电流与电压波形，可供读者参考选用。本书适合焊接设备的有关技术人员阅读，也可作为大专院校有关师生的参考书。

联系电话:028-83267908 联系人:黄秀艳