

瞬间液相扩散焊与钎焊主要特点之异同

张贵锋, 张建勋, 王士元, 邱凤翔

(西安交通大学 焊接研究所, 西安 710049)

摘 要: 从焊接进程、凝固、氧化物的破碎、中间层与钎料的区别、接头组成、脆性相的形成与消除、压力的作用、接头强化机理等方面总结分析了瞬间液相扩散焊与钎焊的区别。强调指出了下述关键点: (1)中间层的选取是获得两种不同焊接方法接头的首要前提; (2)在钎焊中侧重点是润湿性, 它是保证接头获得一定强度的首要前提与主要手段; (3)在瞬间液相扩散焊过程中, 除了润湿性之外, 更为关注的是降熔元素的扩散。中间层中降熔元素向母材的持续扩散是 TLP 接合中液态区增宽、破碎氧化膜、等温凝固、均匀化现象的本质原因; 降熔元素向母材的充分扩散及由此而出现的中间层成分的合理改变是 TLP 焊接成败的命脉。

关键词: 瞬间液相扩散焊; 钎焊; 异同

中图分类号: TG454 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2002)06-92-05



张贵锋

0 序 言

瞬间液相扩散焊(Transient liquid phase bonding, 简称 TLP 焊接或 TLP 连接)是由 D. S. Duvall 等人于 1974 年首次汇总了它的应用并用相图解释了其金属学原理^[1]。国内许多文献也称其为过渡液相扩散焊或扩散钎焊, 此外其英文名称还有 Transient liquid phase diffusion bonding, Transient liquid phase brazing; Diffusion brazing; TLP brazing 等多种名称。在日本被译为液相扩散接合、过渡液相扩散接合、迁移液相扩散接合, 其中液相扩散接合一词较为多用。TLP 焊接与钎焊操作步骤相似, 如均需有待连接母材表面间放入熔点低于母材的第三种材料(在 TLP 中常叫中间层—Interlayer; 在钎焊中常叫钎料—Filler metal); 然后加热、保温。简单地将两者的区别归为扩散的充分程度不同; 凝固的方式不同; 最终所得接头的成分、组织的不连续程度不同这三点^[2], 尚欠细致全面与深入。文中试图对这两种焊接工艺的各种细微差别从优缺点、应用、过程、机理等方面进行较为全面的总结与对比分析。

1 优缺点及应用范围

与钎焊相比 TLP 焊接具有如下优点: (1)TLP 接头在等温凝固完成后具有明显不同于母材与填充金属的成分, 并在一定情况下最终的显微组织中分辨

不出填充金属^[1~3]; (2)TLP 接头比一般硬钎焊接头的强度高^[3]; (3)TLP 接头的重熔温度高于钎焊接头而耐高温性能好; (4)TLP 焊接容许母材表面存在一定的氧化膜^[4], 有一定的“自清净”能力。TLP 焊接工艺的上述优点决定了它可用于一般钎焊难以胜任的场合: 对力学性能要求高(不低于母材); 服役温度高的耐热合金的焊接; 接头形式只许采用对接形式(钎焊采用搭接); 特别是在先进材料的连接^[5](如单晶材料、先进陶瓷、金属基复合材料)等场合, 其应用前景更为广阔。但 TLP 焊接也存在对中间层要求严、端面粗糙度要求严、焊接时间长等美中不足。

2 焊接进程

一般常将 TLP 进程分为三段^[6]: 液相生成(利用中间层的熔化或中间层与母材的共晶反应); 等温凝固; 成分及组织的均匀化。Tuah—Poku 等人将 TLP 分为四步^[7,8]: 中间层的溶解; 液态区的均匀化及增宽; 等温凝固; 均匀化。Y. Zhou 等人^[4]将 TLP 接合进程做了更为细致的划分, 指出液态的增宽可进一步细分为加热过程中的增宽(自中间层熔化温度 T_m 到焊接温度 T_B 期间)和等温阶段(T_B)的增宽; 并指出当 T_m 到 T_B 期间温升很慢时, 有可能在温度到达 T_B 前即开始了凝固过程。显然, 这里所说的液态区增宽是由于已熔化的中间层中的降低熔点的元素(Melting point depressant elements, 简称 MPD 元素), 扩散入母材并达到某一共晶浓度后, 引

起母材表层区熔点降低的结果。这种情况下,母材的溶解是间接性的溶解,(为区别于一般意义上的溶解,作者称其为“液化”)。值得指出的是,明确地提出将中间层处于液态的过程细分为液态区增宽与等温凝固两个不同阶段,对于正确理解 TLP 焊接过程的机制、选中间层及确定规范具有很大的帮助与启示价值,如确定规范时,不能片面地只注意到等温凝固的时间,而应综合考虑使液态区增宽与等温凝固合起来的总时间较短为好。

3 中间层与钎料的区别

3.1 钎料

在钎焊中,润湿性是保证接头获得一定强度的首要前提与主要手段,因此首先应基于润湿性来设计或选择钎料的成分。依相图若钎料能与母材相互溶解或形成化合物,则液态钎料能较好地润湿母材^[2],故钎料成分的选择范围较宽一些。

3.2 中间层

作为 TLP 的中间层,应具备以下条件^[8]:(1)熔点低于母材;(2)与母材间的润湿性好;(3)不形成有害的金属间化合物;(4)完成等温凝固快;(5)成分均匀化快。显然对中间层的要求比对钎料要求高。为此,从成分角度考虑,主组元应尽量与母材相同;合金元素中首先应含有 MPD 元素;并要求 MPD 元素应具有以下功能:在母材中扩散迅速^[1]、在母材中的溶解度较大^[2](利于向母材扩散)、含量适中以兼顾熔点的降低与均匀化的难易^[1,4]、使母材表面“液化”显著^[9]、有一定“自钎剂”作用、不形成稳定的有害相^[1]、中间层溶化后 MPD 元素应以自由态存在,以利于其迅速扩散入母材。另外应含有可使焊缝区满足特殊性能要求(如抗高温氧化性能、抗腐蚀性能、抗低温脆断性能等)的合金元素。从开发制备成型角度考虑,非晶箔带具有能提高溶质(MPD 元素)的极限溶解度、薄且成分均匀、熔化区间窄、无需粘结剂的优点,有取代以粉末、电镀、喷涂等方式预置中间层的趋势。

4 母材与中间层/钎料的相互作用

无论钎焊或 TLP 接合都要求中间层或钎料溶化后能与母材发生良好的润湿。在钎焊中,润湿是铺展、填缝的前提,润湿性不好,即使是预置的中间层也会从界面间流出而球聚于焊缝之外;TLP 接合中亦然。但钎焊的侧重点在于“润湿”,而 TLP 接合中的侧重点在于“MPD 元素向母材中的扩散”。钎焊

中母材与钎料的作用同时兼有母材向钎料中的溶解和钎料向母材中扩散的双向传质现象。

文献[2]指出,TLP 接合过程中,母材的溶入不起主要作用,这是因为在恒温条件下,母材的溶解是有限度的。无疑 TLP 接合中传质过程最大的特点在于“MPD 元素向母材中的扩散”,且扩散须是快速的、明显的、持续的扩散。MPD 元素扩散较快的原因一方面在于中间层在焊接温度下处于液态;另一方面作为 MPD 元素一般人为有意识地选用小原子半径的元素。MPD 元素向母材中的扩散贯穿整个焊接全过程,正是 MPD 元素的持续扩散才使得液相区先增宽,至最大宽度后开始出现等温凝固转而缩窄,直至等温凝固完成,并最终在固相状态下实现均匀化。可以说,TLP 焊接的命脉就在于 MPD 元素的浓度是否可通过扩散入母材而降至足够低。

它们的共同特征是母材的溶解有一定的特殊性,即液态金属体积小,固态金属的溶解或“液化”对液态金属内部的浓度影响很大^[4]。

5 氧化物破碎及分散机理

钎焊中氧化膜靠与钎剂的系列反应,生成低熔点可溶性的盐或低熔点复合物溶于钎剂之中,并被液态钎料随液态钎剂一起排出而实现去膜的。TLP 接合过程中不放钎剂(可避免钎剂夹杂及清洗腐蚀性钎剂),在真空或保护气氛下进行。TLP 容许母材表面有一定氧化物存在^[4],这也是 TLP 具有生命力的原因之一。在此将其破碎机理随焊接进程的进行可归纳为以下几种机制。

5.1 中间层熔化前的升温过程中

在此阶段的氧化膜分散与破碎机制应同于一般固态扩散焊。(1)焊接初期表面局部凸起处因压强被压溃,材料的塑性流变可引起氧化膜的破碎^[5]。但这种机械破碎仅出现于微观凸起部位,且 TLP 接合所施加的压力远小于固态扩散焊时的压力,故它的贡献量并不会很大,即从微观角度看,经初期加压实现紧密接触的面积占总面积的比例极小。(2)氧化物与金属基体的线膨胀系数不同引起的氧化膜龟裂;并为液态钎料渗过这些裂缝并沿氧化膜—合金界面流动而抬起并去除氧化膜创造了条件^[10]。(3)氧化物在金属中的溶解^[11];对于对氧有较大溶解度的母材,如钛及其合金等材料,在真空与高温环境下,因基体对氧的溶解度大氧化物将不稳定而分解,氧原子较快地扩散入母材,氧化膜在扩散的初期就消失,氧化膜的影响并不大^[12,13]。这种氧化物溶解是通过间隙原子(氧)向金属中扩散而发生的,厚度

为 x 的薄膜的溶解时间与 x^2/D 成正比 (D 为扩散系数)^[11]。(4)氧化膜的球化与聚结^[11]:高温下相对稳定的氧化物发生球化或聚结,留滞于空洞表面或已相互接触的界面处;同时伴随着氧化膜聚集的进行氧原子也向母材中扩散,借助于氧的扩散使夹杂物减少。氧化膜薄时最终残留夹杂物少;焊接时间长时扩散较多夹杂物亦减少^[12]。球化是借薄膜过多的表面能造成的扩散实现的,氧化膜很薄时,球化进行得较快^[11]。如铁、铜、304 不锈钢类材料属此种情况。严格限制氧化膜的厚度是控制夹杂的关键之一。(5)高温真空条件下母材中 C、Si、Mn 等微量元素的还原反应消除氧化膜。文献[10]在研究 1Cr18Ni9Nb 的高温真空钎焊去膜机理时指出,母材表面上氧化膜开裂的原因是氧化膜被 C 所还原(需 900 °C 以上);1 000 °C 以上氧化物才可能挥发排除;而 Cr_2O_3 和 Fe_3O_4 分解为 Cr 和 Fe 是即便是在真空下也是很难实现的。碳素钢上氧化膜的消失是靠 C 与 Si 的还原反应^[14]。

5.2 液态中间层出现后的过程中

这一方面的报道极为鲜见,仅中尾嘉邦等人通过其试验观察指出:中间层熔化后,随着 MPD 元素向母材中的扩散,母材表层被液化,液相区增宽,使氧化膜从母材基体上剥离下来,呈片状平直地漂浮于液态之中;随后呈平直状漂浮于液态之中的氧化膜在液态之中局部发生弯曲;当某处的氧化膜弯曲至一定程度时即在该处出现氧化膜破裂,随时间的延长破裂处越来越多,这样使氧化膜呈断续状分布,避免了氧化膜成片状连续分布,通过多处且继发的破裂最终实现了氧化膜的破碎^[15,16]。中国学者在研究铝的接触反应钎焊时也观察到类似的现象,即在铝的氧化膜下出现的由铝与中间层材料形成的液态共晶“潜流”,促使氧化膜的破碎和分散^[17]。确保夹杂物在分布密度方面尽量稀疏、在形态方面避免连续并呈片状、在大小方面小至足够尺度是成败关键之一。另外,采用感应加热时电磁搅拌也会有利于氧化膜的破碎,但尚无人对此进行专题研究。

可见,氧化膜的去除方式首先取决于母材本身特性,如对氧的溶解度,合金元素的还原能力等;其次取决于氧化物的特性,如热稳定性、热膨胀系数、硬脆程度等;再次与焊接条件及焊接规范有关,如真空度、温度、压力、搅拌等。

6 母材表面的准备

6.1 母材表面粗糙度对钎焊接头性能的影响

文献[2]指出当钎料与母材的相互作用较弱时,

钎料在抛光表面的铺展面积小于在钢刷刷过表面的铺展面积;当钎料与母材的相互作用较强时,因表面细槽被液态钎料迅速溶解而不复存在,表面细槽的特殊毛细管作用不能表现出来。川胜一郎^[18]对 SS-41 钢的对接钎焊接头强度研究指出,表面粗糙度的影响比使接合间隙在 0.05~0.5 mm 范围变化的影响还要大;表面粗糙度存在一最优值,过粗过细都会因影响钎料的铺展填缝。

6.2 母材表面状态对 TLP 接头性能的影响

在 TLP 焊接中粗糙度有一临界值^[4]。TLP 焊接中所采用的中间层,常以预置的方式加入,虽可避免液态中间层的宏观铺展、填缝过程(仍存在微观铺展、填缝现象)^[17],但粗糙度一旦超过临界值,致命的原因在于 MPD 元素总含量及扩散进入母材的距离变大,导致有脆性相残留。全面分析其原因可认为粗糙度增加带来以下弊端:(1)间隙难以被液态金属填充而影响了界面间的紧密接触;(2)使滞留于母材表面凹坑中的液态金属厚度增加,导致要使这些凹坑中的液态金属完全等温凝固所需的时间大大增加(等温凝固所需时间正比于液态金属厚度的平方);(3)因待焊母材表面积的增加而使表面氧化膜的总量随之增加。在更高温度或更大压力时,获得特别清洁的表面就变得不那么重要了。原子活性、表面凹凸点变形以及对于杂质元素溶解度的增加,都有助于使表面污染层分散^[11]。顺便指出 TLP 在端面准备方面比一般固态扩散焊要求低的原因有两方面:液态中间层能润湿并进一步填满界面凹凸不平处;另在一定程度内还容许表面有氧化物存在。

7 TLP 焊接中压力的特殊作用

普通钎焊过程一般不加压。TLP 连接过程中须施加压力,对压力的作用可归纳为以下几个方面。

7.1 缩小间隙并挤出残留中间层

扩散的时间取决于所要求的均匀程度、中间层的原始厚度和焊接温度^[11]。当液态中间层宽度较小且中间层中 MPD 的相对含量也较小时,需扩散进入母材的 MPD 的量及其扩散过程中所经历的路径长短都变小,等温凝固所需的时间便可缩短。因此,在保证中间层能与母材发生充分作用的前提下,应尽可能保持最小的间隙。为此经常施加适当的压力^[4]。当未扩散入母材的 MPD 元素在钎缝中形成脆性相时,加压有利于挤出残留的脆性相^[19,20]。

7.2 加压对润湿性和铺展速度的影响

钎料铺展面积增大实质上是钎料的表面积增大,表面能增加的宏观结果,可认为是压力所做的机

机械功转化为相应的表面能的增加量,从而改善了液态的润湿性。在中间层润湿性较差与温度不允许过高情况下,压力改善润湿性、加快铺展速度及促进紧密接触、排除多余液膜的作用将更为必要和突出。如在复合材料制备中的“加压浸渍工艺”便是利用提高液相压力来改善润湿性的^[21];在陶瓷 TLP 连接中加压可迅速使有限的液相均布铺展,同时减少界面孔洞数量与孔洞体积^[22]。

7.3 压力的破膜、保护及其它作用

在升温阶段,加压可使局部表面凸起部位被压平,等效于改善了表面粗糙度;同时发生塑性流动的部位氧化膜得以机械破碎;并得以使这些部位基体的缺陷密度增加,有利于促进扩散。在陶瓷的 TLP 扩散连接过程中,加压更成为必不可少的一项工艺措施^[22~23],加压挤出的液相可封闭空气向焊接面内部的侵入,并可使破碎的氧化膜随液相被挤出界面。在加入中间层的量一定的情况下,加压还可以消除等温凝固末期的缩松与孔隙。

7.4 压力存在一最佳范围

在固态扩散焊中,增加压力可降低温度的影响;并加大蠕变速度与蠕变量,从而可以缩短实现紧密接触所需时间,故在不出现明显宏观塑性变形的前提下增加压力可提高接头性能。但在 TLP 接合中,压力过小,其应有的作用不能发挥出来。压力过大一方面会迫使低熔点组分在达到钎焊温度之前就从接头中挤出去,使熔融中间层的粘度增大,难以填满界面间的间隙^[11];另一方面剩余的液态中间层过少,不足以与母材产生一定程度的相互作用(润湿、填坑、溶解、扩散),导致接头性能变差。可见与固态扩散焊不同,TLP 接合中,压力存在一最佳范围,其值由焊接时间、温度、表面粗糙度、中间层的扩散性能等因素综合决定。总之导入合适的压力对破碎氧化膜、提高接头的致密性、挤出脆性相、缩短焊接时间是有益的。

8 凝固机制

钎焊接头是在连续冷却过程中结晶的,属非平衡条件下的结晶。TLP 接合中,液态中间层是在等温条件下进行凝固的,属平衡条件下的结晶。对 TLP 焊接而言温度只是一表象,实际上任一位置处凝固的开始时刻及结束时刻都由该处液态中间层中的 MPD 的瞬时浓度决定的,当 MPD 的瞬时浓度随其扩散的减小而进入液-固两相区时等温凝固即开始。当最深的凹槽中的中心部位处的 MPD 的浓度减小进入固相区时,全部等温凝固过程结束。提前

降温都会导致凹槽处或装配间隙较大处有液态钎料残留,成为钎焊接头(多含脆性相)。故粗糙的表面和不均匀的装配间隙都是不允许的。

9 接头的组成及均匀化

钎焊接头常由三个区域组成:界面区、扩散区、钎缝中心区,其中钎缝中心区的成分接近钎料^[2]。对 TLP 接头,若中间层主组元与母材主组元不同或主组元相同而含量差异较大时,当等温凝固已完成而均匀化尚未充分进行时,接头组织由界面区、扩散区组成(钎缝中心区消失)^[11],此时某些易扩散的 MPD 元素的浓度应优先于母材组元达到均匀化,这为判别接头是由两种焊接方法之中哪一种获得的提供了一条较易操作的区分途径。对于经典的 TLP 当等温凝固已完成且均匀化进行得很充分时,接头由与母材相近的组织组成。

应当指出,TLP 焊接区成分与组织的均匀化是十分缓慢的。分析其原因有两方面的因素:其一是在均匀化阶段,中间层已全部变为固态使原子的扩散速度本身要降低;其二此时 MPD 元素的浓度梯度变小。成分与组织的均匀程度可视需要而终止,此时尽管 MPD 元素的分布存在一浓度梯度,但其最大浓度若低于允许值而使接头成为无脆性相的固溶体也是可行的,并非定要强求与母材一致^[4,11]。成分的均匀是前提;组织均匀是成分均匀的结果。

10 接头中脆性相的形成与消除

无论 TLP 焊接还是钎焊,填充材料的成分本身是接头中形成脆性相的内因(如钎料中本身含有脆性相或钎料中某些组元与母材作用后形成脆性相),焊接规范(如间隙、时间、温度)是外因。TLP 因其凝固过程为平衡状态下的等温凝固,MPD 元素经扩散入母材使其在中间层中的浓度已降至足够小而不至于形成脆性化合物,则可避免出现脆性相,否则同理也会在焊缝中心区出现脆性相。缩小间隙、延长时间、导入压力都是消除中间层导致的脆性相的途径。

11 接头强化机理

钎料与母材多数情况下虽系晶间结合,但与钎料自身的强度相比,钎焊接头的强度大于钎料自身的强度。钎焊接头的强化靠下面两种机制:钎焊接头的根本特征是借助金属溶解作用产生的金属键

合, 钎料溶解少量母材而形成金属化合物或固溶体(钎料的合金化), 凝固时借助相临原子间的引力使接头成为一体, 就象一块固态金属结合在一起一样^[24]。另一方面, 极薄的钎料承载时会产生“拘束强化”效应。

TLP 接合接头强度接近或等同于母材的内部机制可分为两种情况: 当均匀化过程进行得很充分时, 显微组织中中间层已难以分辨出, 形成了跨越界面的共同晶粒, 界面完全消失, 实现了真正的冶金结合; 当等温凝固结束后而均匀化过程进行得并不充分时, 接头强化机制除上述钎焊的强化机制外, 还有最终所得组织方面相对理想(如无低熔脆性相而为固溶体)的原因。两种工艺接头形成过程及强化机制的差别使得采用的接头形式也不同: 钎焊常用搭接接头(搭接量常取 3 倍板厚); TLP 常用对接接头。

12 结束语

就本质而言, TLP 中的扩散狭义上讲就是 MPD 元素的扩散, MPD 元素的充分扩散是 TLP 焊接成败的命脉; 而合理选定中间层则是其内因方面的首要前提。扩散的目的就在于试图使中间层中 MPD 元素的浓度降至足够低, 以达到如提高接头的重熔温度、消除中间层中的脆性相使其改变为成固溶体等目的, 中间层成分的这种显著且合理的质的变化乃至中间层的消失正是该方法名称中“过渡”(或“瞬时”)一词的含义所在。

参考文献:

[1] Duvall D S, Owczarski W A, Paulonic D F. TLP bonding a new method for joining heat resistant alloys[J]. Welding Journal, 1974, 53(4): 203 ~ 214.

[2] 邹 僖. 钎焊(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.

[3] 美国焊接学会. 焊接手册(第一卷, 第七版)[M]. 清华大学焊接教研室译. 北京: 机械工业出版社, 1985. 34.

[4] Zhou Y, Gale W F, North T H. Modelling of transient liquid phase bonding[J]. International Materials Review, 1995, 40(5): 181 ~ 196.

[5] Cam G, Kocak M. Progress in joining advanced materials[J]. International Materials Review, 1998 43(1): 1 ~ 30.

[6] 赵熹华. 压力焊[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988

[7] Isaac Tuah-poku, Dollar M, Massalski T B. A study of transient liquid

phase bonding process applied to a Ag/Cu/Ag sandwich joint[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1988, 19A(3): 675 ~ 686.

[8] 崎贤二. 超合金の溶接・接合の要点, Ni 基超合金をととして[J]. 溶接技术, 1995 (8): 60 ~ 67.

[9] 铃村晓男, 恩泽忠男, 田村博. 铁基耐热合金 A286 の液相 インサー ト扩散接合[J]. 溶接学会志, 1981, 50(7): 20 ~ 26.

[10] 庄鸿寿, 罗格夏特 E. 高温钎焊[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989. 153.

[11] 美国焊接学会. 焊接手册(第三卷)[M]. 清华大学焊接教研室译. 北京: 机械工业出版社, 1986.

[12] 大桥修, 田沼欣司, 木村隆. 扩散溶接の酸化皮膜の密着部での挙動[J]. 溶接学会论文集, 1986, 4(1): 53 ~ 59

[13] Takahasi Y, Nakamura T, Nisiguchi K. Dissolution process of surface oxide film during diffusion bonding of metals[J]. Journal of Materials Science, 1992, 27(2): 485 ~ 498.

[14] 西本和俊, 才田一幸, 都筑亮一. 氧化物分散強化型耐热超合金のバリス通电烧结合継手の機械的特性[J]. 日本金属学会志, 2001, 65(8): 756 ~ 764.

[15] 中尾嘉邦, 西本和俊, 崎贤二, 等. 液相 インサー ト金属接合継手の機械の性質の劣化要因の検討[J]. 溶接学会论文集, 1991, 9(1): 62 ~ 68.

[16] 中尾嘉邦, 西本和俊, 崎贤二, 等. 液相 インサー ト金属による母材の溶融現象[J]. 溶接学会论文集, 1988, 6(4): 67 ~ 74.

[17] 范富华, 韩丽霞, 钱乙余. 以镍为中间层的铝合金真空接触反应钎焊试验研究—提高钎缝致密性[A]. 第五届全国焊接学术会议论文集[C], 哈尔滨, 1986

[18] 川胜一郎. ろう接工学[M]. 日本. 东京: 朝仓书店. 1972.

[19] Yeh M S, Chuang T H. Super plastic forming/brazing process for in-conel 718 superalloy components[J]. Welding Journal, 1997, 76(5): 197s ~ 200s.

[20] Rabinkin A, Pounds S. Effects of load on brazing with Metglas MBF2005 filler metal[J]. Welding Journal, 1988, 67(5): 33 ~ 45.

[21] 张国定, 赵昌正. 金属基复合材料[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996

[22] 邹贵生, 吴爱萍, 任家烈, 等. 连接压力在 Ti/ Ni/ Ti 复合层 TLP 扩散连接 Si₃N₄ 陶瓷中的作用机制[J]. 宇航材料工艺, 2000, (4): 76 ~ 80.

[23] 陈 铮, 金朝阳, 赵其章. SiC_p 颗粒增强 Al 基复合材料的瞬间液相连接[J]. 焊接学报, 2001, 22(6): 57 ~ 60.

[24] 美国焊接学会. 焊接手册(第二卷, 第七版)[M]. 清华大学焊接教研室译. 北京: 机械工业出版社, 1988.

作者简介: 张贵锋, 男, 1965 年 12 月生, 副教授, 在读博士生. 主要研究方向为特种焊设备的自动控制与特种焊工艺. 获国家发明专利 1 项; 发表论文 15 篇。

Email: gfzhang@mail.xjtu.edu.cn