

高温合金叶片粉末冶金修复再制造

王茂才, 张杰

(中国科学院金属研究所 金属腐蚀与防护国家重点实验室, 沈阳 110016)

摘要: 粉末冶金修复再制造是新近发展的一种先进材料表面求原重构完型的工艺方法。采用此工艺方法, 可以有效解决高温合金, 尤其是难焊铸造高温合金叶片及部件的无损伤熔焊连接难题; 还可以对叶片的大间隙缺陷如裂纹、孔洞、烧蚀区与磨蚀区等进行三维空间的近等强度的恢复与重建。与加拿大 Liburdi Powder Metallurgy(L-PM)工艺相比, 作者所研发的高温合金叶片粉末冶金修复工艺(China Powder Metallurgy, C-PM)有显著特色。

关键词: 粉末冶金; 高温合金; 再制造; 叶片; 修复

中图分类号: TG 4

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)01-0080-07

Powder Metallurgy Repair & Remanufacturing of High Temperature Alloy Bucket

WANG Mao-cai, ZHANG Jie

(State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: Powder metallurgy repair-remanufacturing technique is a nearly developed advanced surface prototype-reconstruction and/or-recovered art. High temperature alloy, especially the cast alloy, is very difficult to be welded for their high heat-crack sensitivity, and then the bucket (e.g. blade and vane) made of the alloy, which is damaged during service, not able to be repaired with the high strength being near/equal to the bucket alloy. Using the Powder Metallurgy, many defects of three dimensions in the bucket, such as crack, void, firing-corrosion zone and wear-erosion area etc, can be restored or rebuilt without any damages to the substrate alloy. Compared with the Liburdi Powder Metallurgy (L-PM) of Canada, so called China Powder Metallurgy (C-PM) developed by authors shows distinguished features in bucket repair process.

Key words: powder metallurgy; high temperature alloy; remanufacture; bucket; repair

0 引言

工件的修复再制造是相对工件的原态制造而言, 不等同工件的二次制造, 它有着不同的形式, 如仅恢复几何构型、仅恢复组织结构与性能、此两者均恢复、或几何构型与性能的提升等等。正如英文的 Refurbish, Restore, Rejuvenation, Reverse Machining, Recovery, Re-build up, Upgrade, etc. 表示出不同层次的修复再制造。

工件的修复再制造是一个相当复杂的系统工程。就几何构型的恢复而言, 有二维平面、三维立体空间构型以及多维空间构型的恢复; 就组织性能

的恢复而言, 有低强度(硬度)恢复、近强度(硬度)恢复、等强度(硬度)恢复、超强度(硬度)恢复。工件的无损伤求原修复是先进的修复再制造工艺方法, 它涉及到工件的修复再制造的两个方面, 其一是被修工件的基体, 即在修复过程中工件基体不发生变形与组织改变, 受热影响不明显; 其二是被修复区的性能应接近或达到该区起始水平, 即修复区与其基体界面结合强度和修复层本身的强度均应接近以至等于原始强度。

工件的修复再制造从总的来看分熔焊修复与非熔焊修复两大工艺形式。对于后者, 如各种热喷涂涂层与各种沉积镀层等, 原则上只能用于工件的几何构型的恢复以及硬度与耐蚀性能恢复重建上, 而工件的强度与力学性能的恢复则只能采用熔焊

收稿日期: 2009-09-23; 修回日期: 2010-01-11

作者简介: 王茂才(1945—), 男(汉), 安徽东至人, 研究员, 博士生导师。

修复工艺,如热喷焊和各种弧焊以及各种形式的钎焊等工艺。下表1列出了目前通常采用的几种熔焊涂层工艺。表中数据表明,微弧火花沉积的热影响最小,而激光熔敷涂层有较好的热输入可控性,等离子弧焊热影响较大,其它弧焊均有着很大的热影响作用。表1中所有熔焊涂层工艺都不能修复工件的大平面、宽间隙缺陷或损伤区,如在航空发动机,地面电力燃机,舰艇燃机,火箭推进器等重大动力装置上的叶片、喷嘴、涡轮盘等热端部件。往往由于过热烧蚀,熔盐热腐蚀、氧化和外来物击打等所引起的大蚀坑、蚀洞、粗大裂纹和击打坑与缺口之

类三维甚至多维空间的大平面宽间隙形成。一般钎焊工艺也只能愈合修复不大于0.1 mm宽的间隙^[2]。

钎焊修复为整体加热,零件变形小,可克服表1中诸熔焊工艺的局部加热易引起不均匀热收缩的不足,是国际上目前常用于高温合金材料上细小裂纹与尺寸不足的再制造方法。与氟离子清洗对应的专利钎焊技术包括氟活化连接(FCC)、反应扩散愈合(ADH)、表面钎焊愈合(SBH)等有效结构修复;与机械打磨清理对应的专利钎焊技术包括液相扩散连接(LDB)、瞬时液相烧结(TLS)和粉末冶金修复(PMR)。

表1 几种熔焊工艺比较^[3]

Tab 1 Comparison of several weld processes

工艺	涂层-基材金属的稀释程度%	沉积率b/h	最小厚度/mm	涂敷效率/%
激光	0~99	1~7	0.25	80~100
氧-乙炔焰焊	1~10	1~15	0.81	85~100
CO ₂ 气幕保护金属焊	10~20	10~20	3.2	65
气体保护钨弧焊	10~20	1~10	2.3	98~100
埋弧焊	10~60	10~60	3.2	95
等离子弧焊	5~15	1~15	0.81	85~100
气体保护金属弧焊	10~40	2~12	1.6	90~95
微弧火花沉积	0~1	0.01~0.5	0.01	90~95

1 工件的粉末冶金修复再制造

粉末冶金(Powder Metallurgy & PM)通常是包括粉末制备+成型+烧结这样的一整套工件制造方法,主要用于制作新零件^[1]。其主要工艺特点是采用模具预成型和在 $0.80\sim 0.85T_m$ 温度下成型坯体的空间对称均匀收缩聚集。基于粉末冶金原理的粉末冶金再制造技术(Powder Metallurgy Remanufacture, PMR)则是无模压成型坯体在低于工件的 $0.80T_m$ 温度下发生非对称不均匀收缩并向工件基体聚集,由此达到工件的三维空间不完整性的重构成型,从而实现损伤工件的修复再制造。不难看出PM和PMR两者之间是有很大差异的。PMR涉及到两个主体,其一是待修复工件基体,其二是粉末坯体。PMR是采用粉末坯体对工件基体损伤区实行填补与增尺寸式的反向加工。

图1示意的表示出工件表面裂纹粉末冶金修复(PMR)以及作为对比的激光熔覆修复(LCR),表面钎焊修复(SBH)。这样3种工艺过程对于粗大开口裂纹,PMR和LCR相同,均主要采用机械

方法去除裂纹及裂纹上的氧化物等,但PMR是一种所谓的可塑性粉末体来充填机械打磨坑或沟或开口,随后进行烧结连接;修补区上面多余的烧结层等采用辅助机加工方法除去。LCR是采用激光-粉末层层显微堆焊即所谓激光显微积分焊来充填打磨坑、沟或开口并连接基体。与PMR和LCR完全不同,SBH是采用某种物理或化学方法先将裂纹中及其两侧上的氧化物与污染物清除干净,显现出金属体本身,然后置于裂纹上方某种钎焊料,并借助真空高温条件使钎焊料依表面张力,毛细管作用进入裂纹缝内,同时发生扩散,最终实现裂纹缝隙的充填和与基体的连接。由图1可见,对于SBH其最大难度是裂纹上氧化物尤其是弯曲细长裂纹尖端上的氧化物彻底去除和宽间隙粗大裂纹的填充,而对于LCR则是难焊材料尤其是裂纹敏感性很高的高Al、Ti镍基高温合金的三维或多维空间填充焊时的热裂纹形成,其中包括与基体之间界面连接和大孔洞成型等。对于PMR由于采用了可塑性粉末体与真空粉末烧结工艺,有效地解决了相对

于 LCR 工艺的困难。这里所谓的可塑性粉末体,是采用一种粘结成形剂(粘结剂+增塑剂+表面活性剂+湿润剂+分散剂混合物)添加到粉末中并通过适当球磨混合与搓揉等工序所制成的塑泥状物,可手工塑成所需形状;所谓的真空粉末烧结方法,是在高真空高温条件下进行的一种准液相烧结-焊接,即填充粉末体的烧结和填充烧结体与工件基体之间焊接。粉末颗粒体之间界面烧结和粉体对基体之间界面焊接过程都是通过多重液相反应来实现的。

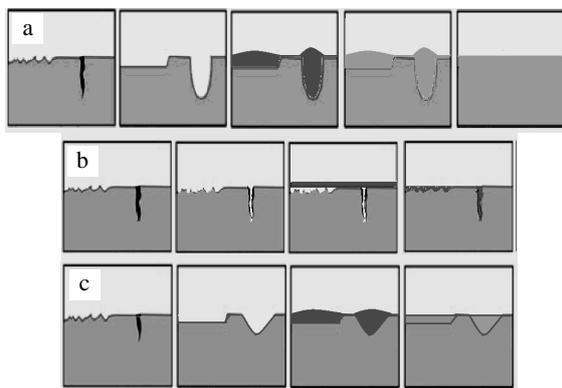


图1 各种修复过程示意图

Fig.1 Several repair technology plan (a) PMR (b) SBH (c) LCR

2 L-PM 和 C-PM

基于粉末冶金原理发展工件的粉末冶金修复再制造工艺在国际上应首属加拿大 Liburdi 公司,即所谓 Liburdi Powder Metallurgy 修复技术,L-PM。该技术由于对由高 Al+Ti 量的镍基高温合金所制造的叶片、喷嘴、整体导向器等形状复杂且昂贵零件的高温燃气烧蚀与热腐蚀孔洞和热疲劳裂纹等严重损伤失效区的修复有独特的效果,因此目前 GE 公司、Rolls Royce 公司、Siemens Westinghouse 公司等 在电力燃机与航空发动机的叶片与热端部件修复上越来越广泛地被采用^[4]。以前很多采用钎焊、ADH、TLP 甚至采用氩弧与激光显微焊不能修复而报废的叶片、导向器、喷嘴等零件均可得到有效修复,并且修复后的工件使用性能良好。在 L-PM 修复过程中,填充的粉末材料可以选用与工件基体成分相同或相近的材料,真空烧结温度及其温度控制制度也可以与工件基材的热处理制度相结合起来。由此可实现近性能或等性能修复。对于叶片尤其空心导向叶片与形状结构极其复杂的喷嘴还可以依

损伤失效部位的工况条件特殊要求进行局部选择性的修复。L-PM 修复有好的成形性,加工余量少。如图 2 展示出电力燃汽轮机导向叶片(喷嘴)根部被烧蚀形成的大孔洞 L-PM 修复前后的形貌。

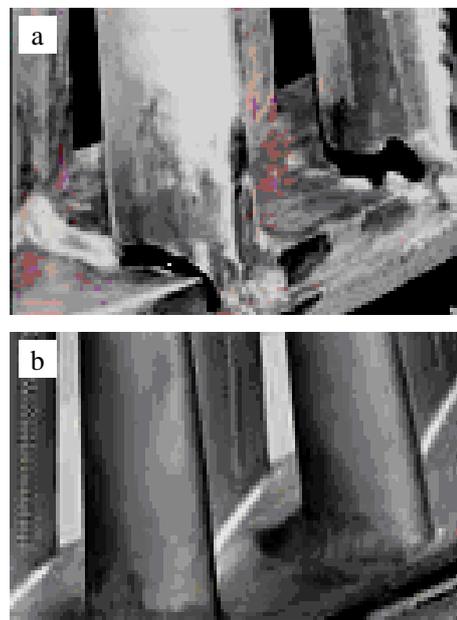


图2 电力燃机汽轮机导向叶片根部被烧蚀形成的大孔洞 L-PM 修复前后的形貌^[5]

Fig.2 Large ablation pores on power gas turbine root blade (a) before repairing (b) after L-PM repairing

在我国,L-PM 技术受到许多航空发动机制造厂与修理厂的积极关注,尤其是进口的高性能发动机叶片修复迫切需求。目前我国是依靠 Liburdi 公司提供填充用可塑粉末体对少数几种导向叶片进行烧结修复。叶片修复价格高,且多被国外专利所占有。

我国地面电力燃机,尤其是高功率电力燃机多是从国外进口的;电力燃机喷嘴的烧蚀十分严重。目前几乎都是送往设在泰国、新加坡等地的美国、英国、加拿大等修理公司进行修复。费用很高,严重制约我国电力生产成本的降低。发展我国自主的粉末冶金修复再制造技术意义重大。

C-PM,即 China Powder Metallurgy,这是属中国科学院金属研究所自主知识产权的粉末冶金修复再制造技术。其工序过程如图 3 所示,主要包括①原料粉末和粘结剂的制备与准备;②粉末和粘结剂的混合;③混合料涂覆于待修复区并成型;④脱脂;⑤真空烧结和热处理使制品具有最终的物理、化学与力学性能;⑥修形。

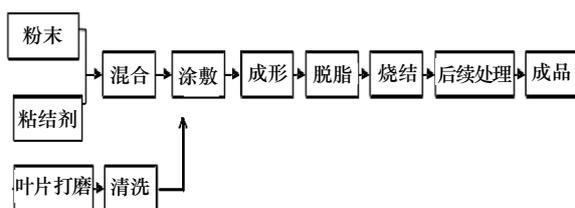


图3 C-PM 工序过程图

Fig.3 C-PM process flow chart

3 C-PM 技术特征

C-PM 技术特征的最基本点是该工艺所用的原材料与设备均是国产的,由此可实现不受制于他国;价格便宜,便利及时,尤其是能根据我国不同军用战机发动机维修需求而进行针对性修复。依图3, C-PM 技术特征可分述如下:

3.1 粉末的制备

粉末材料是粉末冶金生产的基础,粉末的化学组成与其混合组成,粒度与粒度组成等不但影响其成形、烧结过程,而且直接关系到最终产品的物理、化学性能。对于 C-PM,粉末的化学组成与其混合组成等直接决定了工件缺陷的焊补连接温度和焊补区的性能。如对于燃气轮机叶片修复,为了保证修复区的高温强度、抗氧化和抗腐蚀性能,采用高 Al+Ti 量和多合金元素强化的镍基或钴基高温合金粉末。一般选用与基体材料一致或相近的合金粉末作为骨架。为了粉末的焊补连接温度远低于叶片基体材料的熔点,防止叶片过热损伤,采用添加少量降低粉末烧结温度的活性元素,如 B、Si 等。此外,采用适当粒度及粒度组成和一定的微纳米超细粉末也起到进一步降低烧结温度提高致密度的作用。

在我国生产的燃气轮机叶片材料有如 K403、K417(g)、K418、K24 等国产高温合金,还有 IN738、ЖС6y、FSX414、GTD111、与 GTD222 等国外产高温合金。叶片合金种类很多,性能差异也很大。对于 C-PM 可针对不同合金材料和不同服役条件,制备不同的粉末冶金焊补连接修复用粉末材料是有十分重要意义的。

3.2 粘结成型剂的制备

粉末的团聚与成形在通常的粉末冶金生产中常采用压力与模具来实现,但是对于粉末冶金修复再制造目的,由于工件所修补的部位往往是不规则形状的,尤其是像有型腔结构叶片的烧蚀洞等是无

法实现模压,必须采用特殊方法成形。为此, C-PM 方法采用的是粘结成型剂。粘结成型剂的制备是考虑到以下几点:①与粉末材料间不发生化学反应,但与粉末润湿性好;②制取粉末成型剂的各组元原料易获得、便宜,并且常温可塑性好;③粉末成型剂各组元应部分化学互溶,不发生相分离;④热分解温度范围宽,其分解产物无腐蚀性、无毒、残留量低。

在粉末注射成型技术中,常用的粉末粘结剂体系如表2所示。对于石蜡系粘结剂,因石蜡熔点低,在热脱脂时热变形温度低,坯体变形协调性差;聚合物基粘结剂主要组分为高分子聚合物,其强度高、保形性好,但粘度高,需要加入低分子量聚合物共混或共聚改性来降低粘度。C-PM 粘结成型剂是由如下多种成分所组成:

表2 粉末注射成形中重要的粘结剂体系

Table 2 Important binder system of powder injection molding

编号	系统	主粘结剂	辅助粘结剂	助剂
1	石蜡系 ^[6]	石蜡 (PW)	蜂蜡	硬脂酸(SA)
2	石蜡-聚合物系 ^[7]	PW	PE,PP,PA, PE,PEVA,P EA	SA
3	聚合物系 ^[8]	PP,HDPE,PS	PW	SA
4	水溶性聚合物系 ^[9]	PS	低分子树脂	小分子 石油
5	可催化分解聚合物系 ^[10-11]	PEGS	PMMA	添加剂
6	聚合物-石蜡系 ^[12]	聚醛树脂	不可催化分解聚合物	添加剂

粘结剂(主要为聚合物成分,包覆粉末颗粒并相互粘结在一起);增塑剂(其分子插入粘结剂聚合物分子之间,将组元分子分隔开来,为粘结剂分子运动提供更多的空间,即增加自由体积,以降低粘结剂聚合物分子间的各种吸引力);表面活性剂(起分散、乳化、润湿、增溶多种性能);湿润剂(保持粘结剂湿润性,减慢硬化速度);分散剂(降低黏度,并使混炼时间和能量消耗下降,加快填料、粉末的分散)。

在上述组份中,粘结剂起骨架作用。所用的 PMMA 的基本特征列于表3。此粘结剂易获得、无毒、常温稳定,在高于 230 °C 即可分解,分解残余

物含量(质量分数 w) 在 0.02 % 以下^[13], 其他几种添加剂依试验酌情选取。

表 3 PMMA 的基本特性
Table 3 PMMA characteristic

性能	指标
密度/(g/cm ³)	1.19
流动指数	16
热变形温度/°C	90
软化点/°C	102

3.3 可塑粉末的制备

可塑粉末体是通过粉末与粘结成型剂按某一优化比例充分混合而成的。该可塑粉末体具有适当的流变性能和较大的粉末承载能力, 成型剂脱除容易且烧结收缩率较小等特点。采用真空高速搅动混合可以获得粘结剂均匀包覆粉末颗粒的成形性高的可塑粉末体。利用此可塑性粉末体可以依工件待修复区几何构型采用胎具或手工制作出填补用的型坯或直接依缺陷形态涂抹在待修复区并随工件表面成形。此粉末体可以采用冰箱等低温装置长期保存, 抗老化。

3.4 待修复区的制备

对于 C-PM, 待修复区多是大尺寸的豁口、缺口、孔洞与沟槽等大间隙多维空间和严重缺尺寸的二维平面。这样状态的待修复区是对工件上的粗大裂纹、烧蚀与腐蚀洞、坑及掉快等故障缺陷采用喷砂(丸)机械打磨及化学处理等一系列工序将缺陷彻底清除及表面清洁并修整成适合于 PM 焊补修复状态而制成的。为了获得理想的粉末冶金焊补修复效果, 待修复区表面几何构型不仅应有利于可塑粉末体的涂覆及成形。还应有利于粉末体的团聚烧结和烧结体与工件基体之间界面连接。在 C-PM 工艺中要求待修复区表面应是光洁圆滑、梯度过渡、弧形边口等, 以实现可塑粉末体的均匀塑造、均匀烧结收缩和烧结体与基体周界的均匀连接。

3.5 可塑粉末体的涂覆成形

将可塑粉末体涂覆在待修复区上并依工件表面构型随形抹塑成形。涂敷时借助于针对待修复区的构型特点而制作的专用涂抹工具, 以便将可塑粉末体涂抹固实, 避免虚涂、漏涂和涂压不均匀问题。

(1) 可塑粉末体的涂覆量是一个关键问题, 涂敷过多不仅会造成材料浪费而且会增大后续加工

量; 当然涂敷量不足就会引起表面修复区不充满、缺肉甚至缩孔。最佳的涂敷量应是修复区完全充满, 致密度 98 % 以上。同时还有适量精整形量。可塑粉末体的涂敷量 ($W_{涂}$) 在 C-PM 中按以下(1)和(2)控制:

$$W_{涂} = (D_{粉} \cdot V_{区}) y \quad (1)$$

$$y = (D_{件} / D_{粉}) + y' \quad (2)$$

式中, 修复件的比重 $D_{件}$; 可塑粉末体的比重 $D_{粉}$, 它是粉材与粘结剂加权比重; 待修复区的体积 $V_{区}$; 权重系数 y ; 精整修复成形加工权重数 y' , 在 (0.1~0.5)。

(2) 另一个关键问题是涂敷在待修复区上的可塑粉末体在随后脱脂-烧结过程中发生收缩的均匀性及其缩补问题。在烧结过程中, 可塑粉末体因致密化而收缩。线度长收缩大, 要求的缩补量也大。对于粉末冶金法填补修复, 往往是横向收缩纵向缩补。为此需在涂敷时考虑到最大的收缩位向和相对于这个位向选择适当的区域给出缩补量。缩补是在以上计算的涂敷量一定的情况下, 对可塑粉末体的最优化预置达到各向均匀收缩。

(3) 第三个关键问题是, 可塑粉末体与工件基体之间的异向收缩。粉体烧结收缩通常是聚中的, 工件基体收缩也是聚中的。在粉体与基体之间应有一个连接层在烧结过程中来协调这二者的反向收缩。为此在可塑粉末体与基体之间添加一层活性反应粉末体。在可塑粉末体明显烧结收缩之前该活性反应粉末体已经发生烧结并将粉体及基体连接为一体, 同时随粉体一起进行扩散烧结。

3.6 可塑粉末体的脱脂与烧结

涂敷在修复区上的可塑粉末体随工件一起进入真空炉中, 随着炉温的升高, 相继发生溶剂的挥发、粘结剂与其他助剂的分解脱除、粉末体与基体之间以及粉末颗粒之间液相反应扩散和连接与烧结发生。

粘结成型剂的脱除需要一定的时间和温度, 图 4 给出在 3 个升温制度下的脱脂热重曲线。由于成分多样使得粘结成型剂的脱除大致 3 个温度区, 分别为 100~120 °C、150~230 °C 和 320~420 °C。其中 100 °C 左右脱除溶剂, 150 °C 以上分别脱除其他成分。比较 1 °C/min、3 °C/min 和 5 °C/min 升温速率下的 TG 大小可知, 升温速率越慢越有利于脱脂完全。

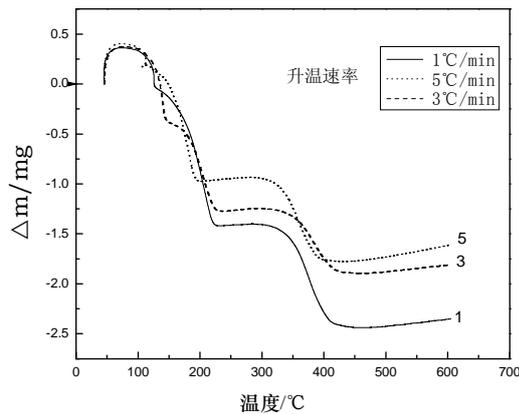


图4 脱脂热重曲线

Fig.4 TG curves of binder removal

脱脂是可塑成型剂的物理化学热解过程,而烧结则是粉末体的物理化学冶金过程。粉末颗粒之间通过扩散、反应与流动等机制相互聚集。与通常的PM相比较C-PM粉末烧结连接过程有如下特点:

(1) 存在粉末的自烧结和粉末与工件基体界面之间的连接二个过程,二者需同时联动进行。若烧结发生在连接之前,则会引起粉末烧结体脱离基体,若相反则会发生粉末烧结体的裂纹或凹陷等。

(2) 烧结温度及其温度控制制度是应与工件基体合金材料的热处理制度相拟合的,否则会导致工件组织的大改变,其烧结温度低于通常PM的烧结温度。

(3) 粉末体的化学组成是受到工件性能要求的制约,温度抑制元素及量是受限制的,因此粉末烧结过程中的液相量是有限的,要实现较少液相量达到高的致密度。

(4) 粉末体与工件基体界面间在烧结过程中存在液-固浸润、液-固反应、毛细管作用和液-液互溶等复杂过程。

(5) 由于粉末体是通过粘结剂形成的而没有压制致密化过程,粉末颗粒之间接触不紧密,在烧结过程中粉末颗粒将发生大的迁移与运动,导致粉末体的收缩。

4 C-PM 技术的应用

目前已针对几种高温合金材料与工件建立起比较完善的C-PM工艺方法,并取得了比较理想的实际应用。

4.1 铸造缺陷修复

某新型镍基单晶整体叶轮如图5所示在铸造过

程中由于结构复杂经常会出现砂眼,孔洞等铸造缺陷,直接报废经济损失巨大,因此经常需要修复。用钎焊方法只能消除细小的砂眼等缺陷,对于大孔洞或贯穿性缺陷则无能为力,粉末冶金法就是一个适合的修复方法。将预置合金粉料涂于处理好的缺陷处,再经过真空烧结热处理即可得到合格的铸造整体叶轮。经过修复的铸件经过渗透探伤未发现缺陷。图5(a)(b)表示出修复前后的整体叶轮。

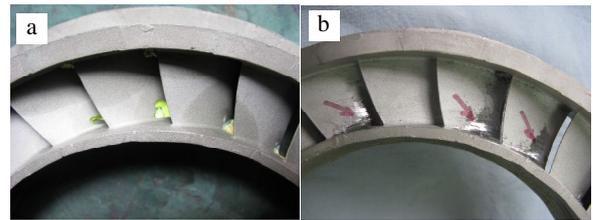


图5 铸造缺陷修复前后的整体叶轮

Fig.5 Casting defects in integral impeller (a)before repairing (b) after C-PM repairing

4.2 烧蚀叶片缺损再制造

K403合金是我国研制的广泛应用作燃气轮机的叶片等热端部件的材料。用于余热回收发电装置的WJ6G1型发动机转子叶片即由K403合金制作。由于长期在恶劣环境下工作,叶片进气边叶盆侧常被严重腐蚀,图6为C-PM技术修复前后的叶片和

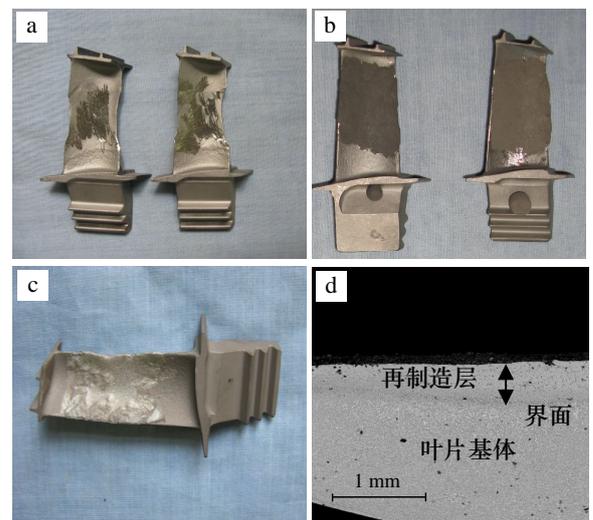


图6 WJ6G1型电力燃机1级转子叶片的C-PM工艺修复 (a) 叶片修复前 (b)叶片可塑粉末体涂覆成形 (c) 叶片真空烧结后 (d)修复层与基体之间冶金结合

Fig.6 C-PM WJ6G1 GT rotor blade band one (a) before repairing (b)after powder plasticizer shaping (c) after sintering in vacuum (d) the metallurgy bonding between substrate and repairing area

修复后界面组织。经过 C-PM 技术修复后恢复为原有形状 (图 6(c)), 界面为冶金结合, 组织均匀无不良组织(图 6(d))。

5 结 语

(1) 粉末冶金修复再制造不同于粉末冶金制造。①它是以待修复的工件基体为载体的粉末冶金过程。②通过粉末组成的优化选择可实现工件的近、等强度的无损求原修复;通过可塑粉末体随工件基体几何结构抹塑成形, 可实现工件的大面积、大孔洞、大间隙和较大厚度的无损求原修复;③通过降低熔点式烧结与连接界面反应扩散烧结, 这样的复合烧结过程, 可实现工件的基体组织无变化的无损求原修复。

(2) 对于高温合金, 尤其是含 Al+Ti 量高的镍基高温合金叶片及部件, 由于其难熔焊修复的问题, 采用粉末冶金修复再制造技术应是十分有意义的, 具有广阔的应用前景。

(3) C-PM 与 L-PM 在原理上基本相同, 但 C-PM 具有独自特色。最大的优势是具有自主知识产权, 可取材于国内, 价格便宜与及时便利;对我国的高温合金有很好的适应性, 适合于推广应用。

参考文献:

[1] 王盘鑫. 粉末冶金学 [M]. 冶金工业出版社, 2003. 1-3.

[2] Su C Y, Lih W C, Chou C P, et al. Activated diffusion brazed repair for IN738 hot section components of gas turbines [J]. Journal of Materials Processing Technology 2001, 115: 326-332.

[3] 王茂才, 吴维毅. 先进的燃气轮机叶片激光修复技术[J]. 燃气轮机技术, 2001,14(4):53-56.

[4] 任天明. 先进的燃气发动机热端部件在制造技术-粉末冶金 [C]. 武汉: 第十一次全国机械维修学术会议第十一次全国机械维修学术会议论文集 (2007).

[5] <http://www2.liburdi.com/liburditurbine/pdf/DS%20-%20LPM.pdf>

[6] Wiech R B Jr. Method of making inelastically compressible ductile particulate material article and subsequent working thereof [P]. US 4445936, 1984.

[7] Edirisinghe M J, Evens J R G. Rheology of ceramic injection molding formulations [J]. Ceram Trans J, 1987, 86: 18-22.

[8] Edirisinghe M J. Fabrication of engineering ceramics by

injection molding [J]. Am Ceram Soc Bull, 1991, 70: 824.

[9] Reeds J S. Injection molding. Principles of Ceramics Processing [M]. The second edition. A Wiley-Interscience Publication, 1995:480.

[10] Anwar P F et al. Injection molding of 316L stainless steel under using a novel binder system [J]. Powder Metallurgy, 1995, 38(2): 1-6.

[11] Liang S Q et al. Preparation & evaluation of partially water soluble polymer formula for plastic forming process [C]. Beijing: Proc of IUMRS-JCAM'99(1999).

[12] Allendorf A S. Powder injection molding for metal and ceramics[C]. In: Presse-Information. BASF, K'95 Trade press conference, Ludwigshafen, GERMANY, 1995,7: 29-30

[13] 李艳华, 石南林, 张德志, 等. 粉末涂层法制备 SiCf/Ti 先驱丝 [J]. 金属学报, 2004, 40(5): 55.

致谢: 感谢金研激光再制造技术开发有限公司的合作支持。

注: 本文为本刊特邀论文

作者地址: 沈阳市中科院金属研究所 110016
 金属腐蚀与防护国家重点实验室
 Tel: (024) 2391 5863
 E-mail: wmc@imr.ac.cn



• 学术动态 •

科研项目《军用装备机械零部件纳米颗粒复合延寿技术》荣获 2009 年度国家技术发明二等奖

装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室主任徐滨士院士领衔研究的“军用装备机械零部件纳米颗粒复合延寿技术”科研项目荣获 2009 年度国家技术发明二等奖。

该项目针对机械零部件表面磨损失效问题, 研究基于纳米颗粒材料的机械零部件延寿新技术, 综合传统电刷镀技术研发纳米颗粒复合电刷镀技术, 实现磨损失效表面的高性能修复; 综合摩擦润滑理论与技术研发纳米颗粒添加剂技术, 改善装备摩擦副零件表面服役性能、实现摩擦副表面微损伤的不解体自修复, 解决了装备机械表面磨损零部件的高性能维修和延寿的难题。项目前瞻性地结合机械装备维修急需和国家发展需要, 综合传统和新兴科技成果, 进行创新研究, 具有重大的军事意义、科学价值和社会效益。 (史佩京供稿)