

大间隙钎焊在燃气轮机热端部件修复领域的应用和发展

李金祺^{1,2} 高振桓^{1,2} 王天剑^{1,2} 聂丽萍^{1,2}
(1.长寿命高温材料国家重点实验室; 2.东方汽轮机有限公司)

摘要 综述了钎焊修复技术在燃气轮机高温部件修复领域的研究进展,介绍了国内外一些先进的大间隙钎焊技术(WGB)修复方法,深入分析了不同修复方法的特点。探讨了 WGB 修复技术存在的一些问题并对未来的发展进行展望。

关键词 高温合金;大间隙;钎焊修复

中图分类号 TG454; TG457.19 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.025 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application and Progress in Wide Gap Braze Repair of Gas Turbine Vanes
Li Jinqi^{1,2}, Gao Zhenhuan^{1,2}, Wang Tianjian^{1,2}, Nie Liping^{1,2}
(1.State Key Laboratory of Long-Life High Temperature Materials;
2.Dongfang Steam Turbine Co., Ltd.)

Abstract: The progress in WGB repair of superalloy vanes was reviewed, and advanced WGB repair methods at home and abroad were introduced, of which the characteristics was analyzed in depth. In conclusion, the existing problems of WGB technology were discussed and the future development was prospected.

Key Words: Superalloy, Wide Gap, Repair Brazing

燃气轮机被广泛应用于电力、运输、石油等领域,其涡轮叶片通常由高强度、耐高温的镍基或钴基铸造高温合金制成。为了提高其使用性能,叶片内部设计有复杂的冷却通道,表面采用涂层技术,制造涡轮叶片材料中加入大量的稀有金属,制造成本很高。在发动机运行过程中,涡轮叶片长期受高温燃气的腐蚀、冲刷以及冷热疲劳等作用,很容易导致叶片表面产生热疲劳裂纹、热腐蚀以及凹坑等缺陷。这些损坏叶片若不及时处理,

收稿日期:2020-07-24;修改稿收到日期:2020-08-26
第一作者简介:李金祺,男,1993 年出生,助理工程师,四川德阳(618000),E-mail:672831084@qq.com
通信作者:高振桓,男,1986 年出生,高级工程师,四川德阳(618000),E-mail:gaozhenhuan@dongfang.com
引用格式:李金祺,高振桓,王天剑,等. 大间隙钎焊在燃气轮机热端部件修复领域的应用和发展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):246-250.
LI J Q, GAO Z H, WANG T J, et al. Application and progress in wide gap braze repair of gas turbine vanes[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2):246-250.

[30] CHEN Y, PAN Y, LU T, et al. Effects of combinative addition of lanthanum and boron on grain refinement of Al-Si casting alloys[J]. Materials and Design, 2014(64): 423-426.

[31] SHI Z M, WANG Q, ZHAO G, et al. Effects of erbium modification on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A626(25): 102-107.

[32] LI Q, XIA T, LAN Y, et al. Effects of rare earth Er addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20 Si alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2013, A588: 97-102.

[33] 饶远生, 闫洪, 胡志, 等. Sm 对 ADC12 铝合金变质效果影响的研究[J]. 材料导报, 2013, 27(4): 45-48.

[34] 李纓缤, 郭二军, 王丽萍, 等. Sm 对 7050 铝合金铸态组织及硬度的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(5):20-23,28.

[35] QIU H, YAN H, HU Z. Effect of samarium (Sm) addition on the microstructures and mechanical properties of Al-7Si-0.7Mg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 567: 77-81.

[36] PATAKHAM U, KAJORNCHAIYAKUL J, LIMMANEEVI-CHITR C. Modification mechanism of eutectic silicon in Al-6Si-0.3Mg alloy with scandium[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 575: 273-284.

[37] WU X F, WANG K Y, WU F F, et al. Simultaneous grain refinement and eutectic Mg₂Si modification in hypoeutectic Al-11Mg₂Si alloys by Sc addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 791: 402-410.

[38] WANG K Y, ZHAO R D, WU F F, et al. Improving microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Mg₂Si alloy by Gd addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 813: 152-178.

[39] MAO F, YAN G Y, XUAN Z J, et al. Effect of Eu addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 896-906.

[40] 隋育栋. Al-Si-Cu-Ni-Mg 系铸造耐热铝合金组织及其高温性能研究[D].上海:上海交通大学, 2016.

(编辑:栗万仲)

不仅会降低发动机的工作效率,如果发生断裂,更会对其他部件造成进一步的损坏^[1~3]。采用合理的修复技术对一定程度受损的叶片进行修复可有效降低其更换费用,显著提高机组的经济性。

对于多元强化的 Ni/Co 基铸造高温合金,Al 和 Ti 的含量高,焊接性差。采用熔焊方式进行焊接修复时,接头处易脆性开裂,且可能使叶片严重变形导致冷却通道堵塞^[3~5]。为克服熔焊修复难的问题,研究者通过对传统钎焊技术的改进,提出大间隙钎焊(WGB)修复技术。目前,WGB 修复技术已在燃气轮机叶片修复领域得到越来越多的使用,并通过改变修复材料和工艺,衍生出多种操作,以增强修复区域的性能。

1 铸造高温合金的钎焊修复

1.1 传统钎焊

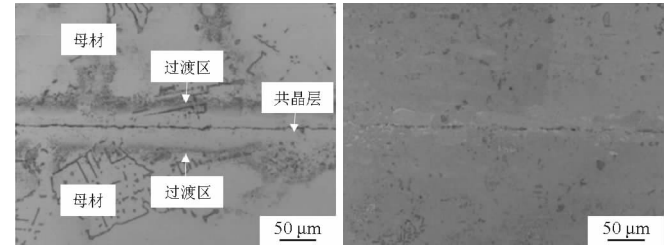
传统钎焊是待修复区填有低熔点钎料的工件整体加热,钎料液化后保温一段时间使钎料润湿并填满间隙,然后降温使钎料固化。该技术步骤简单,不需要施加压力或夹具,适用于高温部件上不易熔焊修复的位置,同时可以进行批量处理,修复效率高。但是,钎料在冷却过程中发生的是非平衡凝固,修复区会生成大面积共晶和脆性化合物,与母材的成分和微观结构差异很大,修复区力学性能差且重熔温度低^[5,6]。

1.2 瞬时液相扩散连接

瞬时液相扩散连接(TLP)利用液态钎焊合金等温凝固理论,在基材间通常使用非晶态中间层合金进行近等强度连接。中间层合金设计时选用与母材相似的成分,并添加有高扩散性降熔元素(如 B)。操作时要求焊接面与中间层合金紧密接触,在真空条件下加热至中间层合金熔化,润湿基体表面,并通过毛细作用充满焊接面之间的空隙。同时,钎料中的高扩散性降熔元素向两端基体扩散,导致液相线、固相线温度升高并发生等温凝固^[7~9]。TLP 与传统钎焊的主要区别在于,TLP 在凝固过程中发生的是等温凝固,能有效抑制低熔点共晶和脆性化合物组织的形成,可实现接头接近母材性能的均匀连接。

图 1 为采用 TLP 技术连接 Mar-M247 镍基高温合金的接头组织^[7]。从图 1a 看出,钎焊 5 min 时,降熔元素未扩散均匀,接头发生非等温凝固,以低熔点共晶和脆性化合物组织为中心对称展开,依次为类似于基体金属的过渡层和母材,得到类似于传统钎焊的不均匀组织,这些低熔点共晶和硬脆相的存在严重降低接头的重熔温度和对裂纹扩展的抵抗力。从图 1b 看出,保温时间延长至 6 h,降熔元素扩散均匀,焊缝与母材之间无

明显的界面,得到的这种接头不仅性能优异且工作温度高,室温拉伸和在 870 ℃、400 MPa 下的持久时间接近母材,在 900 ℃ 的抗拉强度为母材的 88.4%。



(a) 非等温凝固接头,

钎焊时间为 5 min

(b) 等温凝固接头,

钎焊时间为 6 h^[7]

图 1 DFB-1 技术连接 Mar-M247 镍基高温合金接头的组织
Fig.1 Microstructure of DFB-1 brazed Mar-M247 Ni-based superalloy joints

一般 TLP 达到等温凝固所需的时间(t_{is})计算如下^[8]:

$$t_{is} = \left(\frac{C_i}{C_1} \right) \frac{W_0^2}{16\beta^2 D_s} \quad (1)$$

式中, W_0 为钎料层的初始厚度; C_i 为钎料中降熔元素的初始浓度; C_1 为液相中降熔元素的饱和浓度; D_s 为降熔元素在母材中的扩散率; β 为由钎料固相线和液相线确定的无量纲参数($0 < \beta < 1$)。从式(1)可以看出,钎料层的厚度是决定等温凝固所需时间的重要因素之一,对于尺寸较大的间隙,完全等温凝固往往需要花费数十小时,极大增加了修复成本,因此 TLP 技术仅限于修复一些小尺寸间隙。

1.3 大间隙钎焊

为了使 TLP 技术能够应用于较大尺寸接头和缺陷的修复,研究者们开发了 WGB 修复技术。在 WGB 中,修复材料由高熔点合金粉末和低熔点钎料粉末按一定比例混合而成。与 TLP 相比,WGB 中高熔点合金粉末的加入可为钎料提供更大的比表面积,从而大幅减少等温凝固所需的扩散时间。在修复材料的选择上,高熔点合金粉末可采用与母材相同的成分,亦或是为提高接头目标性能而设计的其他成分。钎料粉末的成分一般与母材相似,且含有高扩散性降熔元素,如 B、Si、Zr、Hf 等^[9~14]。为提高修复区粉末的堆积密度,可选用尺寸小于高熔点合金粉末的钎料粉末。修复粉末的形状一般选用球形或类球形,可使钎料熔化后高熔点合金粉末保持较好的流动性,利于待修复区缺陷的填充。高熔点合金粉末的尺寸不易太大或太小,大尺寸的高熔点合金粉末易导致修复区生成较大尺寸的共晶相,而尺寸太小虽然有利于离散硼化物的形成,但由于比表面积增加可能引起降熔元素扩散太快,液相快速消失,导致待修复区缺陷还未填满,粉末就已失去流动性。

钎料的成分设计一直以来都是工作者研究的重点,优异的钎料可以在较短的时间完成降熔元素的完全扩散和等温凝固,并且修复区具有好的力学性能和环境抗性。有些设备制造商也会为特定零件定制专用的修复钎料。为了提高接头的耐蚀性,在 WGB 修复中选用高铬钎料也是比较常见的^[12]。表 1 为常见的商用钎料。

表 1 WGB 用商用钎料的性能^[5,6,11,13~15]

Tab.1 Properties of commercial WGB brazed metals			
牌号	名义成分	固、液相线温度/℃	钎焊温度/℃
NB130	Ni-3.1B-4.5Si	982,1 038	1 010~1 175
NB150	Ni-15Cr-3B	1 020,1 050	1 065~1 205
NB200	Ni-7Cr-6W-4.5Si-3.2Fe-3.2B-0.06C	975,1 040	1 065~1 175
AmdryDF3	Ni-20Cr-20Co-3Ta-3B-0.02La	1 050,1 120	1 190~1 220
AmdryDF4B	Ni-14Cr-10Co-3.5Al-2.5Ta-2.7B-0.05Y	1 065,1 120	1 150~1 190
Amdry788	Co-22Cr-21Ni-14W-2B-2Si-0.03La	1 166,1 240	1 220~1 260
AmdryD-15	Ni-15.3Cr-10.3Co-3.5Al-3.5Ta-2.3B	1 095,1 165	1 185~1 215
AMS4775	Ni-14Cr-4.5Si-4.5Fe-3B-0.7C	970,1 040	1 065~1 205
AMS4777	Ni-7Cr-4.5Si-3Fe-3B	970,1 000	1 010~1 175
AMS4783	Co-8Si-19Cr-17Ni-4W-0.8B	1 121,1 149	1 149~1 232

除了修复合金成分的选择外,热处理也是影响等温凝固的一个重要因素。研究表明,钎焊合金的液相线与基体材料的固相线温度之间存在一个最佳钎焊温度^[9],在此温度下,降熔元素的有效通量(扩散,溶解以及形成化合物)达到最大,实现完全等温凝固所需的时间最短。理论上,WGB 发生完全等温凝固时,接头组织接近均匀固溶体。但在实际应用中,大多数工业 WGB 无法实现完全的等温凝固,所得的 WGB 接头组织中通常含有脆性相和共晶。提高修复材料中高熔点合金粉末的占比虽然可以减少接头中有害相的生成,但也往往导致钎料熔化后高熔点合金粉末流动性差,修复材料无法铺满修复区。一般常见的 WGB 接头优化技术是对接头组织进行焊后热处理,使降熔元素充分扩散,从而减小硼化物或硅化物的尺寸。李晓红等^[16]对 N300 钎料修复的 DZ4 与 K403 大间隙接头进行扩散处理加固溶时效处理,其高温持久性能相对于热处理之前提高了近百小时。另外,也可以通过优化修复材料的成分来实现,如在高熔点合金粉末中加入 W、Re 或 Mo 等元素,有助于硼化物的形核,从而使液相在非等温凝固时生成细小弥散的硼化物^[17]。

2 WGB 技术在国内外的发展现状

自 20 世纪 70 年代以来,WGB 技术在燃气轮机修复上得到广泛的研究和应用,国外各大公司通过技术改

进形成各自所特有的方法或专利,如通用电气(GE)公司的 Activated Diffusion Heating(ADH)技术^[11,18]、联合技术公司的 Turbofix 技术^[19,20]、西门子(Sermatech)和西门子西屋(Siemens Westing House)公司的 Liquid Phase Diffusion Bonding (LPDB)技术^[15]以及 Liburdi 公司的 Liburdi Powder Metallurgy(LPM)技术^[21]等。中科院金属研究所也开发出自主知识产权的高温合金叶片粉末冶金修复工艺(China Powder Metallurgy,C-PM)^[22]。

2.1 ADH 技术

ADH 技术主要用于破裂的机翼表面以及涡轮机盘中的裂缝带修复,可实现接近基材性能的等效修复。该技术采用的填充粉末由商用 AmdryD-15 钎料粉末和高熔点合金粉末组成^[11]。根据接头间隙宽度的不同,高熔点合金粉末和钎料的质量比在 4 : 1 到 1 : 1 之间变化。图 2 是 ADH 修复技术的原理示意图。其工艺特点是将涂有填充粉末的待修复接头在真空或惰性气氛中烧结。在低于母材熔点的温度下 D-15 钎料完全熔化,带动高熔点合金粉末流动并填满裂缝,在随后的扩散热处理过程中钎料向高温合金粉末和母材中扩散熔合,得到与母材性能相近的接头组织。成分不同的高熔点合金粉末与 D-15 钎料混合可衍生出许多成分不同的 ADH 填充粉末,D-15 钎料也可与 Co 基合金粉末混合用于钴基叶片修复(如 D-15 与 X-40 粉末混合)。但该技术修补裂纹的宽度仅在 1.5 mm 内,不适用于更大间隙的修复^[18,23]。

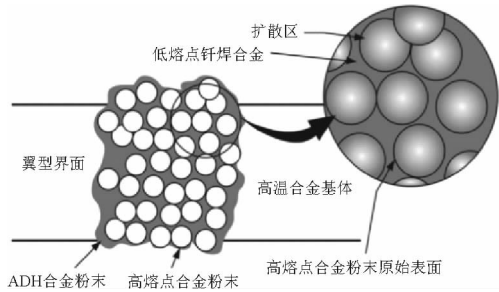


图 2 ADH 修复技术原理示意图^[23]

Fig.2 Mechanism schematic diagram of ADH repair technology

2.2 Turbofix 技术

Turbofix 技术主要用于飞机发动机和工业燃气轮机高温部件的裂纹修复。最初,TurboFix 1 系列修复材料由钴基高温合金粉末(如 Mar-M509)和钴基钎料(Co-Cr-Ni-B-C)混合而成^[19]。后来研发的 TurboFix 2 系列由镍基高温合金粉末(如 Mar-M247)和镍基钎料(Ni-Cr-Co-Al-Hf-W-B)混合而成。高熔点合金粉末和钎料之间具有 2 : 1~9 : 1 的广泛混合比。该工艺要求钎焊前工件要用氟化氢离子清洗(FIC)或 H₂ 光亮退

火,以清除裂纹区域的氧化物^[20]。

2.3 分层大间隙钎焊技术和 LPDB 技术

分层大间隙钎焊技术特点体现在修复材料的特殊放置方式,见图 3。间隙内层放置的是母合金和低熔点钎焊合金组成的混合物,外层放置的则是高熔点含 Si 钎焊合金(如 Ni-19Cr-10Si)。在钎焊过程中,首先在 1 050 ℃保温 1 h,使内层液相钎料向高熔点合金粉末和基体中扩散并发生等温凝固,接着在 1 190 ℃保温 1 h,外层的高熔点钎焊合金液化流入内层未被填满的剩余空隙。此工艺难度较大,要求外层钎料具有优异的熔渗性能^[24]。

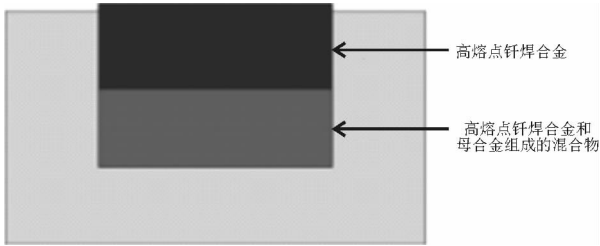


图 3 分层大间隙结合工艺特点示意图^[24]

Fig.3 Characteristic schematic diagram of stratified wide gap combination process

与分层大间隙结合技术工艺类似,LPDB 技术的修

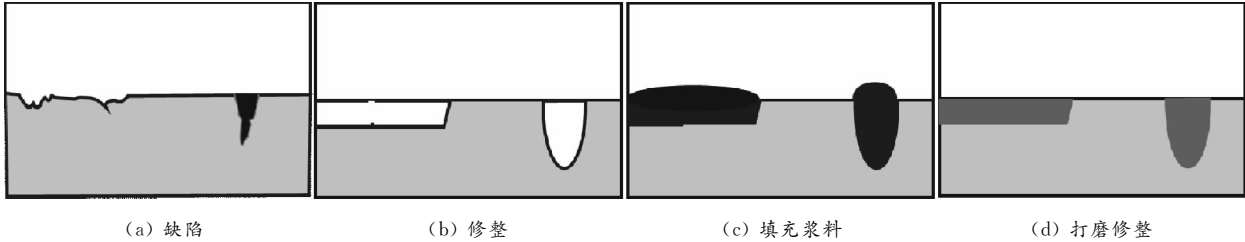


图 4 LPM™工艺过程示意图^[25]

Fig.4 Schematic diagram of LPM™ process

2.5 C-PM 修复技术

C-PM(China Powder Metallurgy)技术可实现工件的批量处理,修复效果佳。其工艺过程是将事先准备好的高熔点合金粉末、钎料粉末和粘结剂按一定比例混合均匀后填充到待修复区,然后将工件放入真空热处理炉中进行热处理。在较低的温度下长时保温脱出粘结剂,在此过程中要注意升温速率不能过快,否则会因坯体内压增大导致可塑粉体开裂。待粘结剂完全脱出后开始快速升温至钎料熔化,液态钎料通过毛细作用填充基材合金及待修复间隙。同时,液相中的降熔元素向基体和高熔点合金粉末中迅速扩散,随即发生等温凝固,最后通过扩散热处理使修复区组织均匀化^[22,25]。张杰^[26]采用该技术修复 K438 高温合金,修复区的抗氧化等级与基体相当且具有较好的热疲劳抗性;采用 Ni10-B 钎料修复 In738 高温合金,获得的接头组织抗拉强度可达到

复粉末也是分层放置,内层的填充材料由 90% 的高温合金粉末(IN738 或 Mar-M247)与 10% 的 NB150 钎料混合而成,外层的填充材料由 70% 的高温合金粉末和 30% 的 DF4B 钎料混合而成。先在较低的温度下烧结,然后升高温度,使上层填充合金熔化、流动并填充下层组织中的孔隙,该修复技术最大可修复 10 mm 的间隙^[15]。

2.4 Liburdi 粉末冶金修复工艺

Liburdi 粉末冶金(LPM™)由加拿大 Liburdi 公司自主研制,尤其适用于 Al 和 Ti 含量高的热端部件损伤修复,工艺过程见图 4。首先用机械方法清洁待修复区,将预先配置好的可塑粉末浆料(高熔点合金粉末+粘结剂)填补在缺口处,通过真空烧结在接头处形成多孔结构。然后在多孔结构上堆积钎料,升温至钎料熔化,液相通过毛细作用充满多孔结构,冷却后形成固体接头,最后通过进一步的热处理使接头致密化。这种方法修复的接头组织比较均匀,没有线状的低熔点共晶组织、大块硼化物及成分偏析,组织与基体界面表现为冶金结合,其修复区强度可与基体材料相媲美,并且整个过程简便快捷,可实现大批量同时处理,修复合格率高^[21]。

基体合金的 75% 以上。该技术的开发使我国在燃气轮机高温部件修复领域能够独立自主,节约大量的维修成本。

3 总结及展望

WGB 技术解决了现代 Ni/Co 基铸造高温部件的修复问题,以后将继续应用于高成本、高性能、难焊接高温部件的修复。从修复材料的选择、热处理制度以及组织调控等方面对 WGB 修复技术做了简要的介绍,并与传统钎焊和 TLP 技术从本质上进行了对比。总结了几十年来国际上成功用于燃气轮机高温部件维修的 WGB 工艺,其中修复材料的成分设计以及热处理制度仍是重要的商业机密。我国 C-PM 技术的开发打破了外国的技术封锁,对延长我国燃机叶片的使用寿命具有重要意义。在未来,通过无限的修复材料成分选择和工

艺调整以增强修复区域的性能将一直是研究的重点。随着新一代高性能高温合金(单晶,等轴晶等)的出现,对 WGB 修复技术也提出了现实的挑战(如单晶涡轮翼型的修复需要在修复区域保留定向凝固或单晶生长晶粒结构,但传统的 WGB 修复工艺并不能实现这一目的)。而这些挑战也将鼓励 WGB 修复技术在特殊领域的研发。

参 考 文 献

[1] 马晓峰. 某燃机涡轮叶片精铸工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(12): 1 292-1 294.

[2] SHITAREV I L, SMELOV V G, SOTOV A V. Repair of a gas turbine blade tip by impulse laser build-up welding[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 682: 96-99.

[3] LI X Q, CHENG Z, QIU H, et al. Research progress in repair welding technology of Ni-based superalloy[J]. Materials Review, 2017, 31(S1): 541-543.

[4] ARENAS M F, ACOFF V L. Analysis of gamma titanium aluminum welds produced by gas tungsten arc welding[J]. Welding Journal, 2003, 82(5): 110-115.

[5] 李晓红, 熊华平, 张学军. 先进航空材料焊接技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.

[6] HEIKINHEIMO L S K, LAUKKANEN A, VEIVO J. Joint characterisation for repair brazing of superalloys[J]. Welding in the World, 2005, 49(5-6): 5-12.

[7] 张邦强. Mar-M247 镍基高温合金瞬时液相连接研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

[8] SAIDA K, ZHOU Y, NORTH T H. The influence of base metal grain size on isothermal solidification during transient liquid-phase brazing of nickel[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(23): 6 427-6 432.

[9] POURANVARI M, EKRAMI A, KOKABI A H. Effect of bonding temperature on microstructure development during TLP bonding of a nickel base superalloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2009, 469(1-2): 270-275.

[10] TOKORO K, WIKSTROM N P, OJO O A, et al. Variation in diffusion-induced solidification rate of liquated Ni-Cr-B insert during TLP bonding of Waspaloy superalloy[J]. Materials Science & Engineering, 2008, A477(1-2): 311-318.

[11] BUDINGER D E, GALLEY R L, WUSTMAN R D, et al. Tip cap hole brazing and oxidation resistant alloy therefor; US, 6276597B1[P]. 2001-08-21.

[12] HUANG X. Low-melting boron-free braze alloy compositions; US, 8197747 B2[P]. 2012-06-12.

[13] MALLEY D R, MOOR J J, RUTZ D A. Brazing repairs; EP, 1894658[P]. 2010-11-24.

[14] JALILVAND V, OMIDVAR H, SHAKERI H R, et al. Microstructural evolution during transient liquid phase bonding of Inconel 738LC using AMS 4777 filler alloy[J]. Materials Characterization, 2013, 75: 20-28.

[15] PHILIP V M. Liquid phase diffusion bonding to a superalloy component; US, 6726086[P]. 2004-04-27.

[16] 李晓红, 钟群鹏, 曹春晓. K403 与 DZ4 高温合金的大间隙钎焊[J]. 航空材料学报, 2003, 23(4): 10-15.

[17] MCGUIRE D, HUANG X, NAGY D, et al. Effect of tungsten addition on the nucleation of borides in wide gap brazed joint[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2009, 132(6): 721-729.

[18] BUDINGER D, THOLKE B, MILLER M, et al. Method for repair of a nickel-base superalloy article using athermally densified coating; US, 6982123[P]. 2006-01-03.

[19] DUVAL D S, OWCZARSKI W A, PAULONIS D F, et al. Method of repairing surface defects using metallic filler material; US, 4008844[P]. 1977-02-22.

[20] DAVID S D, WILLIAM A O, DANIEL F P, et al. Metallic filler material; US, 4073639[P]. 1978-02-14.

[21] ELLISON K A, LOWDEN P, LIBURDI J. Powder metallurgy repair of turbine components[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1992, 116: 1(1): 5-8.

[22] 王茂才, 张杰. 高温合金叶片粉末冶金修复再制造[J]. 中国表面工程, 2010, 23(1): 80-86.

[23] 任远. 修理涡轮导向叶片用的活化扩散愈合法[J]. 航空制造工程, 1992(9): 35-36.

[24] CLARK S D, WOOD P S, FELL P J. Filling fissures in metal articles; US, 4493451[P]. 1985-01-15.

[25] 张杰, 王茂才, 翟玉春. 先进的燃气轮机叶片粉末冶金修复技术[J]. 材料导报, 2010(5): 110-113.

[26] 张杰. 高 Al+Ti 镍基高温合金损伤粉末冶金法修复再制造研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.

(编辑: 刘卫)

中国 2020 年工业机器人销售 增长 19%

国家统计局公布数据显示, 2020 年 12 月, 中国工业机器人销售 29 706(套), 同比增长 32.4%; 1~12 月, 中国工业机器人销售 237 068(套), 同比增长 19.1%。

装备制造业势增稳健, 持续发挥重要支撑作用。2020 年, 装备制造业增加值比上年增长 6.6%, 增速与 2019 年基本持平。从主要行业看, 2020 年, 电子、电气机械、汽车行业增长较快。分产品看, 挖掘机、太阳能电池、笔记本电脑、工业机器人、新能源汽车、集成电路等主要产品实现较快增长。

(摘自压铸周刊)