

DZ40M 合金缺陷试样 TLP-DB 接头力学性能研究

Study on Mechanical Property of DZ40M Defective TLP-DB Joint

中航工业北京航空制造工程研究所 张 蕾 侯金保

[摘要] 开展定向凝固钴基高温合金 DZ40M 的过渡液相扩散焊试验,研究不同界面缺陷率 DZ40M 合金 TLP-DB 接头的高温力学性能。结果表明:采用 1260℃ /0.5h+1200℃ /6h 规范可实现 DZ40M 合金过渡液相扩散焊的良好结合;接头高温持久强度达到等条件下母材的 70% 以上;当界面缺陷率达 15% 时,接头高温持久强度仍达到母材的 70% 以上;但随着缺陷比例的增大,断裂位置由母材转移到焊缝。

关键词: 定向凝固 钴基高温合金 DZ40M 过渡液相扩散焊(TLP-DB) 缺陷率 持久强度

[ABSTRACT] The transient liquid phase diffusion Bonding tests are carried out to study the elevated temperature mechanical properties of directionally-solidified Cobalt-based superalloy DZ40M defective TLP-DB joints. The results show that the DZ40M superalloy can be bonded soundly by using TLP-DB method under optimized parameters: 1260℃ /0.5h+1200℃ /6h. The joint elevated stress-rupture strength at 815℃ reaches 70% above of that of the base metal. The joint stress-rupture strength still reaches 70% above of that of the base metal when the rate of defect is 15%. With the rate of defect increasing, the fracture position appears from the base metal to the welded seam.

Keywords: Directionally-solidification Cobalt-based superalloy DZ40M Transient liquid phase diffusion bonding(TLP-DB) Rate of defect Stress-rupture strength

过渡液相扩散焊(Transient Liquid Phase Diffusion Bonding, TLP-DB)技术是专为高温合金的连接而发展的一种新型连接技术,其原理是首先生成液相(利用中间层的熔化或中间层与母材的共晶反应),然后通过溶质原子的扩散发生等温凝固,最后形成组织均匀的焊缝接头^[1-4]。该技术综合扩散连接和高温钎焊的优点,可以获得高强度的焊缝,并且不需要通常的扩散连接那样高的设备投资和严格的工艺要求,为焊接困难的高温合金的连接开辟一条新途径^[4-5]。DZ40M 合金是在传

统 X40 的基础上,通过微合金化及采用定向凝固工艺制造的一种定向凝固钴基高温合金。与 X40 合金相比, DZ40M 合金具有更高的室温和高温强度及初熔温度,使用温度可提高 40℃,适合于制作 1050℃ 以下工作的具有复杂内腔的气冷空心导向叶片^[6-7]。但由于叶片结构比较复杂,采用普通的熔焊或扩散焊方法难以实现其连接要求,采用母材不熔化的 TLP-DB 连接技术进行 DZ40M 合金的连接研究具有重要的科研及工程应用价值。

本研究采用非晶态中间层进行 DZ40M 合金的 TLP 连接试验,研究不同界面缺陷率对接头力学性能的影响,为该材料在航空领域的工程应用提供技术储备。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本研究采用的 DZ40M 合金,其主要化学成分如表 1 所示,熔化温度范围为 1345~1395℃,材料在铸态使用。

1.2 试验方法

将 DZ40M 棒材线切割成 $\phi 16 \times 5\text{mm}$ 的焊接试样,经砂纸打磨、超声清洗、烘干处理后,将中间层直接平铺于两对接试样的待焊表面。经干燥处理后,将试样放入 GZQ-1 高温真空钎焊炉,并预置一定压力进行试验。利用金相显微镜、扫描电镜分析接头组织。采用优化的焊接规范焊接试样,测试接头高温持久强度,并进行断口分析。

在 TLP 扩散焊技术工程应用中,主要缺陷形式为未焊合。本试验采用 GB/T 2039—97 标准进行缺陷试样的高温强度测试,试样直径为 $\phi 5\text{mm}$ 。在实际操作中,采用在焊接面加入中间层不能润湿的氧化物,形成焊接接头中的氧化物夹杂,即未焊合区域,同时,一定厚

表1 DZ40M合金的主要化学成分(质量分数) %

Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta
25.5~26.5	9.5~11.5	Bal	7.0~8.0	0.1~0.5	0.7~1.2	0.1~0.3	0.1~0.5
Fe	B	Zr	Si	Mn	P	S	
≤ 2.0	0.008~0.018	0.1~0.3	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.04	

度的中间层可以起到保证固定焊缝间隙的作用。根据计算,将厚度为 0.05mm 的云母片制备成 1mm × 1mm 的小片添加于焊接面,1mm × 1mm 云母片面积正好为试样接头面积的 5%,分别制备 5%、10%、15% 等不同缺陷比例的焊接试样。5% 缺陷时,缺陷位于焊接面中心;10% 缺陷时,缺陷位于中心对称,间距为 2mm;15% 缺陷时,3 个缺陷呈等边三角形位于焊接面中心,缺陷间距为 2.5mm。

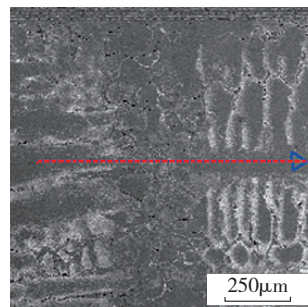
2 试验结果与讨论

2.1 接头组织分析

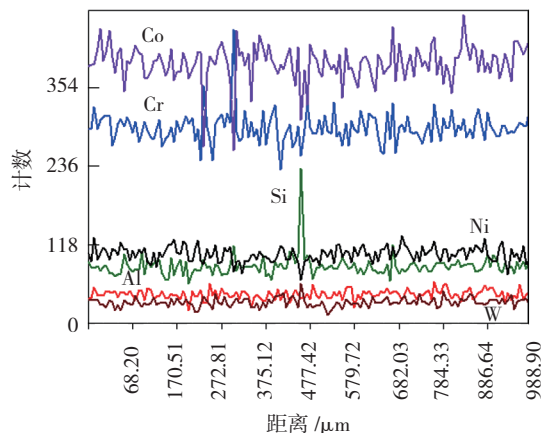
焊接温度是影响 TLP 接头组织的重要因素之一。试验表明:如果焊接温度过低,则中间层不能充分熔化,无法与母材实现良好冶金结合,接头强度较低。焊接温度应在不影响母材性能的前提下尽可能提高,这将有利于等温凝固过程及接头均匀化过程的进行。但是,由于 DZ40M 为铸态使用合金;如果焊接温度过高,根据 TLP 技术特点,过高焊接温度下长时间保温的等温凝固过程会造成母材组织性能的恶化;同时,平衡结晶会造成焊缝中心形成一条明显的连接线,降低接头性能。如果在 TLP 工艺中采用高温下保温一段时间后,再降到较低温度进行保温以实现中间层的等温凝固,通过这样的分步工艺,可以避免上述问题^[8]。根据 TLP 扩散焊原理,为保证中间层材料充分熔化并实现等温凝固的条件下,不损害母材的性能,作者创新采用 2 步 TLP-DB 工艺:1260 °C /0.5h+1200 °C /6h,实现了 DZ40M 的良好连接。图 1 为焊缝宽度为 40~60 μm、采用非晶态中间层和两步 TLP-DB 工艺所得的接头组织及线扫描结果。可以看出:在优化工艺下,整个接头组织致密,接头由焊缝中央的等轴晶粒区及临近母材的粗晶区组成,无残留大块脆性相。成分扩散均匀,接头与母材组织及成分已实现均匀化。均匀化过程进行得比较充分,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。

2.2 高温持久性能测试及断口分析

考虑到 DZ40M 合金主要用途是做为高温叶片的选材,接头的高温持久强度是工程应用考虑的主要指标,故分析接头的高温持久强度。采用非晶态中间层和两段 TLP 工艺(1260 °C /0.5h + 1200 °C /6h)焊接 DZ40M 合金高温持久性能标准测试试样,在 RB2-3 型设备上高温持久测试,结果如表 2 所示。可以看到,由于采用两步 TLP-DB 技术,DZ40M 合金接头的高温持久强度大大超过同等条件下基体强度(815 °C, $\sigma_{20}=215\text{MPa}$)的 70% 以上。



(a) 接头组织的 SEM 照片



(b) 元素线扫描分布图

图1 DZ40M合金TLP-DB接头组织及元素分布

Fig.1 Microstructure and element distribution of DZ40M TLP-DB joint

表2 DZ40M合金TLP接头高温持久测试结果

试验温度 / °C	试验应力 / MPa	持续时间 / h		
815	150	236.97	291.77	251.58

图 2 为高温持久测试后断口形貌。试样拉断前有明显的颈缩现象,断口表面较粗糙,由于拉应力方向与枝晶生长方面相同,可以看到枝晶断裂的截面,呈十字形,均匀分布在断口表面,如图 2 (a) 所示。微观形貌分析表明:断口枝晶形貌明显,在枝晶间隙处分布着明显的二次裂纹特征;在晶内分布着大量的韧窝。试样在断裂过程中需要吸收很大的能量,颈缩现象明显,如图 2 (b) 所示。由于接头在高温下断裂,断口表面覆盖一层厚厚的氧化皮,能谱分析(表 3)表明:含量最高的为基体元素 Co、Cr,其次分别是 C 和 O,这是由于高温持久测试后表面金属元素生成了碳化物与氧化物,其余元素均为 DZ40M 的合金元素。断口分析表明:该类断口为典型韧性断裂,接头具有很高塑性,试样的收缩率在

表3 DZ40M合金TLP-DB试样高温持久测试断口EDS分析结果

元素	C	O	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Zr	Ta	W	总量
质量分数 / %	9.71	6.57	0.46	0.63	25.61	42.13	7.13	1.16	1.31	5.29	100.00

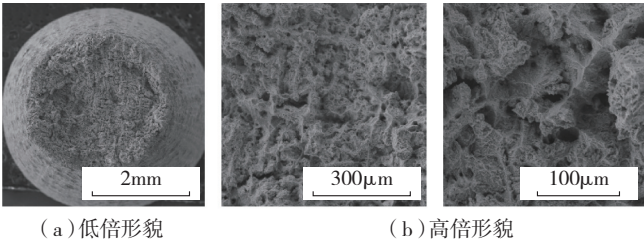


图2 DZ40M合金TLP-DB试样高温持久测试后断口形貌

Fig.2 Fracture morphology of DZ40M TLP-DB joint after elevated stress-rupture test

70% 以上。

2.3 缺陷试样高温持久性能测试及断口分析

采用前文所述方法制备不同缺陷比例的高温持久测试试样,按国标进行持久测试,结果如表 4 所示。可以看到,3 种缺陷试样的高温持久强度均可达到同等条件下基体持久强度(815℃, $\sigma = 215\text{MPa}$, 持久时间 $t \geq 20\text{h}$) 的 70% 以上。随着缺陷比例的增大,接头的持久寿命越短,断裂位置由母材(5% 缺陷试样)转移到焊缝(15% 缺陷试样)。

表4 DZ40M合金缺陷试样高温持久测试结果

缺陷比例 /%	试验温度 /℃	试验应力 σ_t /MPa	持续时间 /h		
			201.97	197.75	198.33
5	815	150	201.97	197.75	198.33
10	815	150	175.63	167.23	155.75
15	815	150	145.43	134.47	155.45

图 3 为 DZ40M 合金 5% 缺陷试样高温持久断口照片及断面能谱分析结果。可以看到:当缺陷率为 5% 时,由于焊缝组织均匀,几乎不存在残余脆性相;而母材由于铸造时可能存在的缺陷,强度反而低于焊缝,试样断裂在母材。其宏观断口比较粗糙,试样有明显颈缩现象,由于拉应力方向与枝晶生长方向相同,可以看到枝晶断裂的截面,呈十字形,均匀分布在断口表面。EDS 分析表明:主要成分为基体元素 Co、Cr,此外, C、O 含量

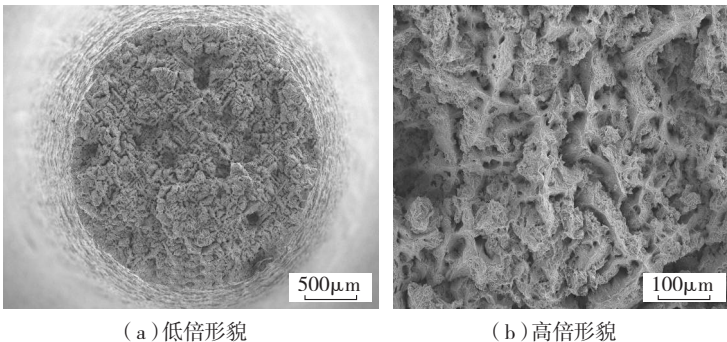


图3 低缺陷率试样断口形貌

Fig.3 Fracture morphology of DZ40M TLP-DB joint with low rate of defect

也很高,这是由于持久断裂后表面生成一层厚厚的氧化物。从断口的微观形貌可以明显看到由于枝晶被拉断而留下的近十字的枝晶截面,在枝晶间二次裂纹特征明显,此外在晶内分布着大量的韧窝,在断裂过程中需要吸收很大的能量,颈缩现象明显。

图 4 为 DZ40M 合金 15% 缺陷试样高温持久断口照片。由于接头缺陷率较高,导致接头有效承力面积减小,强度降低。试样断于焊缝。从低倍可看到断口比较粗糙,断口附近有一些塑性变形。高倍下可以看到断口形貌存在冰糖状刻面;部分区域可看到韧窝以及二次沿晶裂纹。韧窝底部有破碎的第二相质点,经能谱分析,证实为含 Ta 或 W 的化合物。由于预制夹杂物面积较大,裂纹产生于大块夹杂物内部或者夹杂物和基体的结合面;在受到外力作用时,这些夹杂物破碎形成裂纹源。可以判断,该断裂模式为沿晶 + 穿晶的复合断裂模式。

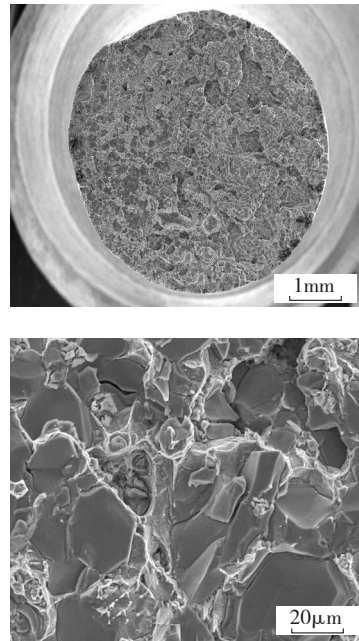


图4 高缺陷率试样断口形貌

Fig.4 Fracture morphology of DZ40M TLP-DB joint with high rate of defect

3 结论

(1) 采用非晶态中间层进行 DZ40M 合金的 TLP-DB 技术研究,焊缝宽度为 40~60µm,焊接规范为 1260/0.5h + 1200℃ /6h,可获得焊接缺陷少、连续完整的焊接接头,接头由中央的等轴晶粒区及临近母材的粗晶区组成;中间层与母材形成了跨界面晶粒,界面已基本消失。所得接头的高温(815℃)持久强度大大超过同等条件下母材性能的 70% 以上。(下转第 144 页)

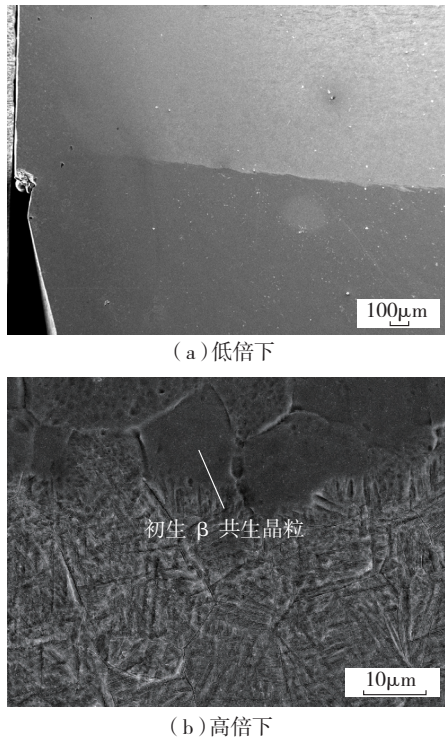


图9 距接头表面10mm处微观形貌
Fig.9 Microstructure at position of 10mm distance from surface of joint

进行, TC11 一侧钛合金首先发生动态再结晶过程,随后 TC17 钛合金也发生动态再结晶过程。而当界面温度在 β 转变温度以上时,界面两侧初生 β 晶界将发生迁移,从而在界面上形成共生晶粒。此外,在 TC17 一侧焊缝与 TMAZ 的界面处将产生裂纹。随着摩擦过程的进行,界面温度进一步升高,在外加应力的作用下,TC17 一侧焊缝与 TMAZ 界面处裂纹将消失。最终,将获得无缺陷且焊合良好的接头。

3 结论

(1) 摩擦刚开始阶段,界面中心温度上升较快,首先产生塑性金属层,随着摩擦过程的进行,热量向界面其他位置传导,使整个界面产生塑性金属层,并形成飞边。

(2) 接头形成过程依次为摩擦磨损、粘着剪切、原始摩擦界面形成金属键连接、TC11 一侧钛合金发生动态再结晶、TC17 一侧钛合金发生动态再结晶、原始摩擦界面形成共生晶粒、TC17 一侧焊缝与 TMAZ 交界处产生裂纹、裂纹消失。

参考文献

[1] 梁春华,李宏新,凌瑶. 先进航空涡扇发动机风扇/压气机的先进结构与新材料. 航空制造技术,2007(1): 60-63.
[2] Romero J, Attallah M M, Preuss M, et al. Effect of the forging

pressure on the microstructure and residual stress development in Ti-6Al-4V linear friction welds. Acta Materialia, 2009, 57: 5582-5592.

[3] Karadge M, Preuss M, Lovell C, et al. Texture development in Ti - 6Al - 4V linear friction welds. Materials Science and Engineering A, 2007, 459: 182-191.

[4] Li W Y, Ma T J, Zhang Y, et al. Microstructure characterization and mechanical properties of linear friction welded Ti-6Al-4V alloy. Advanced Engineering Materials, 2008, 10 (1-2): 89-92.

[5] Vairis A, Frost M. Modelling the linear friction welding of titanium blocks. Materials Science and Engineering A, 2000, 292: 8-17.

[6] Lang B, Zhang T C, Li X H, et al. Microstructural evolution of a TC11 titanium alloy during linear friction welding. Journal of Materials Science, 2010, 45(22): 6218-6224.

[7] Wanjara P, Jahazi M. Linear friction welding of Ti - 6Al - 4V: processing, microstructure and mechanical-property inter-relationships. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36A: 2149-2164.

(责编 良辰)

(上接第 136 页)

(2) 针对铸态 DZ40M 合金材料,通过采用两步 TLP-DB 工艺,在不损害母材性能的前提下,保证中间层材料充分熔化并实现完全等温凝固,从而获得了综合性能良好的 DZ40M 合金 TLP-DB 技术。

(3) 采用非晶态中间层及优化的工艺焊接不同缺陷比例的 DZ40M 合金的试样并进行高温持久性能测试,结果表明,3 种缺陷试样的高温持久强度均已可达到同等条件下基体 (815°C , $\sigma = 215\text{MPa}$, 持久时间 $t \geq 20\text{h}$) 的 70% 以上。而且,随着缺陷比例的增大,接头的持久寿命越短;断裂位置由母材 (5% 缺陷试样) 转移到焊缝 (15% 缺陷试样)。

参考文献

[1] 曲文卿,张彦华. TLP 连接技术研究进展. 焊接技术,2002, 31(3):4-7.
[2] 李晓红,毛唯,程耀永. DZ22 定向凝固高温合金 TLP 扩散焊 // 王守业,王麟书. 第八次全国焊接会议论文集. 北京:机械工业出版社,1997:318-320.
[3] Tetsuro Toyoda, Taka O Endo. Transition liquid phase bonding of a hastelloy X and the bond strength at 1173K. Journal of Materials Science, 1996, 31: 2461-2467.
[4] Nakao Y, Nishimoto K, Saida K. Bonding of Si3N4 to metals with active filler metals. Transactions of the Japan Welding Society, 1989,20: 66-76.
[5] Duvall D S, Owczarski W A, Paulonis D F. TLP Bonding: a new method for joining heat resistant alloys. Welding Journal, 1974, 20(4): 203-213.
[6] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册. 2 版. 北京:中国标准出版社,2002: 765-771.
[7] 姜文辉,管恒荣,胡壮麒. 定向凝固钴基高温合金 DZ40M 的热处理研究. 航空材料学报,2001,21(1):1-5.
[8] 张蕾,侯金保,张胜. DZ40M 合金 TLP 扩散焊接头组织及拉伸性能分析. 材料工程,2010(增刊 1): 28-31. (责编 良辰)