

连接温度对 GH4169 合金 TLP 接头 界面组织和性能的影响

宋晓国^{1,2}, 曹健¹, 冯吉才¹, 窦冬柏², 金贵东²

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 材料科学与工程学院, 威海 264209;
2. 黑龙江工程学院 材料与化学工程学院, 哈尔滨 150050)

摘要: 采用 50 μm 厚的 Ni82CrSiB 非晶箔片为中间层, 通过瞬时液相扩散连接(TLP)方法实现 GH4169 合金的连接。研究 TLP 接头的界面组织结构, 重点分析连接温度对接头界面组织和力学性能的影响规律。结果表明: GH4169 合金 TLP 接头由等温凝固区(ISZ)和扩散区(DZ)组成。等温凝固区为单相镍基固溶体, B 元素向母材的扩散导致在扩散区内晶界处形成大量的针棒状硼化物。随着连接温度的升高, 扩散区厚度逐渐增加, 而等温凝固区厚度基本保持不变。当连接温度为 1 120 $^{\circ}\text{C}$ 、连接时间为 2 h 时, 接头室温及高温(600 $^{\circ}\text{C}$)抗拉强度最高, 分别为 692 和 599 MPa, 为母材强度的 82%和 71%。断口分析结果表明: 随连接温度的升高, 室温拉伸时接头断裂位置由等温凝固区逐渐转向扩散区, 而高温拉伸时接头均在等温凝固区发生断裂。

关键词: GH4169 合金; 瞬时液相扩散连接; 界面组织; 连接温度; 断口分析

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

Effect of bonding temperature on interfacial microstructure and properties of GH4169 alloy TLP joints

SONG Xiao-guo^{1,2}, CAO Jian¹, FENG Ji-cai¹, DOU Dong-bai², JIN Gui-dong²

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China;

2. School of Materials and Chemical Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China)

Abstract: The bonding of GH4169 superalloy was achieved by transient liquid phase (TLP) bonding method using 50 μm -thick Ni82CrSiB amorphous foil as the interlayer. The interfacial microstructure of TLP joint was characterized and the effect of bonding temperature on the interfacial microstructure and joining properties was investigated in details. The results show that the GH4169 TLP joint consists of isothermal solidification zone (ISZ) and diffusion zone (DZ). The ISZ is composed of Ni-based solid solution, and lots of needle-like borides are formed at the grain boundaries in DZ due to the diffusion of element B into GH4169 substrate. With the increase of bonding temperature, the thickness of DZ increases while that of ISZ remains unchanged. The highest tensile strength at room temperature and high temperature reaches 692 and 599 MPa when the joint is bonded at 1 120 $^{\circ}\text{C}$ for 2 h, which is about 82% and 71% of the base metal strength, respectively. The fracture analysis results show that the fracture location changes from ISZ to DZ during room temperature tensile test with the increase of bonding temperature. However, when tested at high temperature, the fracture always occurs at ISZ.

Key words: GH4169 alloy; transient liquid phase (TLP) bonding; interfacial microstructure; bonding temperature; fracture analysis

先进航空发动机(推重比 >8)的发展趋势是不断提高其推重比和降低油耗率^[1-2]。涡轮盘作为航空发动机的核心部件,减轻其质量不仅可以减轻航空发动机的质量、改善冷却效果、提高涡轮前温度,而且可以增加发动机的推重比,从而提高发动机效率^[3-5]。涡轮盘质量的减轻可以通过以下两种途径实现。其一,采用先进的轻质高温结构材料代替目前制造涡轮盘常用的高温合金。金属间化合物(Ti-Al、Ni-Al、Ti-Al-Nb等)、结构陶瓷(Si₃N₄、SiC等)以及新型的陶瓷基复合材料均具有较高的比强度和优异的耐高温性能,是制造涡轮盘的理想候选材料,但是,由于其本质脆性较难得到根本性的改善,这些先进的轻质结构材料目前难以应用于涡轮盘的制造^[6-10]。其二,对涡轮盘的结构进行优化设计。王营和余朝蓬^[11]在基准实心涡轮盘的基础上,按照质量最轻原则对其进行了结构拓扑优化,得到了一种空心结构的涡轮盘。实际上,通过溶模铸造得到的具有空心结构的涡轮叶片已经在航空发动机上获得了应用,空心叶片内部通以冷却气体,在降低质量的同时提高了涡轮进口温度^[12]。然而,通过锻造难以获得空心结构的涡轮盘,采用焊接方法将两半对开的涡轮盘连接为一体是获得空心涡轮盘的可靠途径。GH4169 合金作为制备涡轮盘最常见的高温合金,实现其高质量连接是空心涡轮盘技术应用的重要前提和保障。

GH4169 合金具有优良的焊接性,几乎采用所有的焊接方法均可以实现其连接。然而,对于高精密的涡轮盘结构来说,瞬时液相扩散连接(Transient liquid phase bonding, 简称 TLP 连接)综合了钎焊和扩散连接的特点,最适合实现两半对开涡轮盘的连接^[13-14]。为此,本文作者以 GH4169 高温合金为连接材料,采用 Ni82CrSiB 非晶箔片为中间层,分析 GH4169 高温合金经 TLP 连接后的接头界面组织结构,重点研究连接温度对接头界面组织和抗拉强度的影响规律,为空心涡轮盘的高质量连接提供可靠的理论和实验基础。

1 实验

实验母材为航空材料研究院提供的 GH4169 合金,供货状态为锻态。中间层为 50 μm 厚 Ni82CrSiB 非晶箔片,其化学成分如表 1 所列。该中间层的熔化温度范围为 970~1 000 $^{\circ}\text{C}$ 。连接前,采用线切割将 GH4169 高温合金加工成 35 mm \times 20 mm \times 12 mm 大小的待连接试样,连接面积为 20 mm \times 12 mm,试样连接面用 400 号和 800 号砂纸磨光,连接前置于丙酮

中超声清洗 20 min,将 Ni82CrSiB 箔片置于连接件之间。连接试样在 1×10^{-3} Pa~ 3×10^{-3} Pa 的真空条件下进行焊接,以 30 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速度加热至连接温度(1 060~1 160 $^{\circ}\text{C}$),保温 2 h 后,以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率冷却至室温。将连接好的试样加工成如图 1 所示的标准拉伸试样,采用 Instron1186 型万能试验机测试连接接头的室温及高温(600 $^{\circ}\text{C}$)抗拉强度。利用扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对接头界面组织形貌和拉伸断口形貌进行观察和分析,并采用 X 射线衍射仪(XRD)对断口表面进行物相标定,分析界面组织对接头力学性能的影响。

表 1 Ni82CrSiB 非晶箔片的化学成分

Table 1 Chemical compositions of Ni82CrSiB amorphous foil (mass fraction, %)

Ni	Cr	Si	B	Fe	C
Bal.	6-8	4-5	2.75-3.5	2.5-3.5	0.06

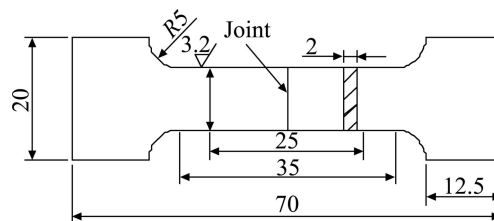


图 1 GH4169 合金 TLP 接头拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GH4169 TLP joint for tensile test (mm)

2 结果及讨论

2.1 GH4169 合金 TLP 接头界面组织

图 2(a)所示为 1 100 $^{\circ}\text{C}$, 2 h 条件下获得的 GH4169 合金 TLP 接头界面组织结构背散射电子衍射(BSE)照片。从图 2(a)可以看出,采用 TLP 能很好地实现 GH4169 合金的连接。根据其形貌特点可以将接头分为等温凝固区(ISZ)和扩散区(DZ)两个区域。其中,等温凝固区厚度与 Ni82CrSiB 非晶中间层厚度相当。可见,该区域主要是由中间层箔片在高温条件下熔化后经等温凝固形成的。介于 GH4169 合金母材和等温凝固区之间的区域为扩散区,该区厚度略大于等温凝固区厚度,且有大量亮白色条棒状化合物分布于其中。扩散区在连接过程中并未发生熔化,主要是由于中间层内合金元素向母材扩散形成的。图 2(b)所示为图 2(a)中横跨母材和焊缝主要合金元素的分布。从 2(b)可以

看出, 等温凝固区内除了 Ni 和 Si 元素的含量比母材的高外, 其余合金元素的含量均低于母材的。由此可见, 等温凝固区主要为溶有一定含量 Fe、Cr 和 Si 等合金元素的 Ni 基固溶体。另外, 由扩散区的元素分析可知, 亮白色化合物为富 Cr、Nb 和 Ti 且贫 Ni 的化合物。

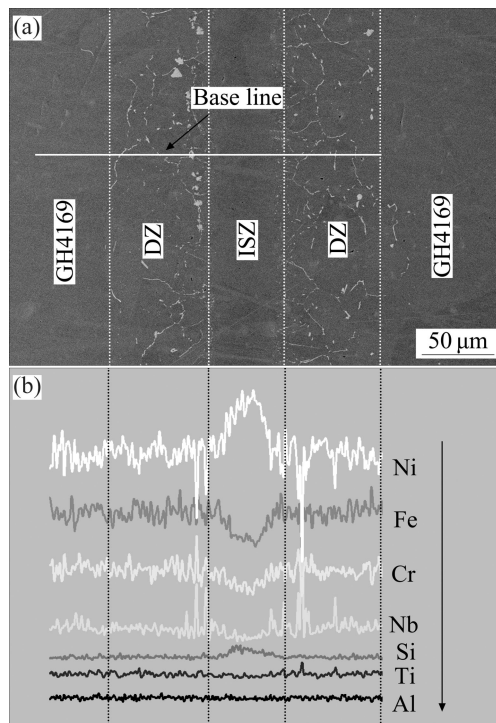


图2 GH4169合金TLP接头界面结构及元素线扫描分析结果
Fig. 2 Interfacial microstructure (a) and elemental line scanning analysis results (b) of GH4169 TLP joint

图3所示为扩散区高倍BSE像, 图中各微区的能谱分析结果如表2所列。可知, 扩散区内亮白色化合物主要为Cr、Nb和Ti等合金元素的硼化物。硼化物是采用含硼钎料钎焊高温合金或不锈钢常见的一类化合物^[14-15]。从图3中可以看出, 硼化物主要分布于扩散区与等温凝固区的界面处以及扩散区内晶界处, 这是由于连接过程中当中间层箔片熔化后, GH4169合金固态表面对B原子有吸附效应(B是一种正偏析元素), 大量B原子便扩散至固液界面处, 与母材中的合金元素反应形成硼化物。在随后的等温凝固过程中, B原子通过扩散进入GH4169母材侧, 由于B原子半径小, 扩散系数大, 优先在晶界偏聚并沿着晶界向GH4169合金母材内部扩散, 且在扩散过程中形成的硼化物分布于晶界, 从而导致图3中晶界硼化物呈典型的网络状分布, 同时也有一部分B原子沿某些晶面扩散, 形成的硼化物分布于晶内。

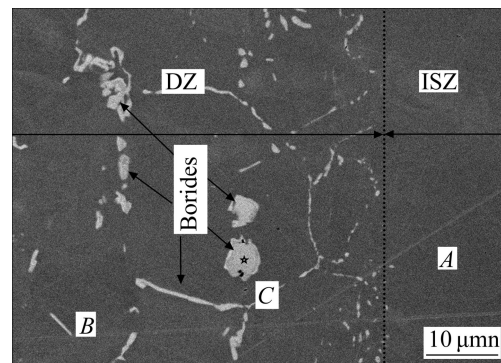


图3 GH4169合金TLP接头扩散区(DZ)形貌
Fig. 3 Morphology of diffusion zone (DZ) in GH4169 alloy TLP joint

表2 图3中各微区化学成分

Table 2 Chemical compositions of spots shown in Fig.3 (mass fraction, %)

Spot	Ni	Cr	Fe	Nb	B	Other element
A	66.88	14.75	11.7	2.15	0.92	4.52
B	53.46	18.29	18.27	4.72	0.35	4.91
C	3.52	21.31	1.96	66.09	2.95	8.51

2.2 连接温度对接头界面组织和抗拉强度的影响

对不同连接温度条件下获得的GH4169合金TLP接头界面结构进行观察, 发现连接温度的改变对界面结构并无明显影响。在本实验条件下, 所有GH4169合金TLP接头均由等温凝固区和扩散区组成。接头各区厚度随连接温度的变化规律如图4所示。由图4可以看出, 随着连接温度的升高, 等温凝固区的厚度基本保持不变, 约为50 μm, 但扩散区的厚度逐渐增

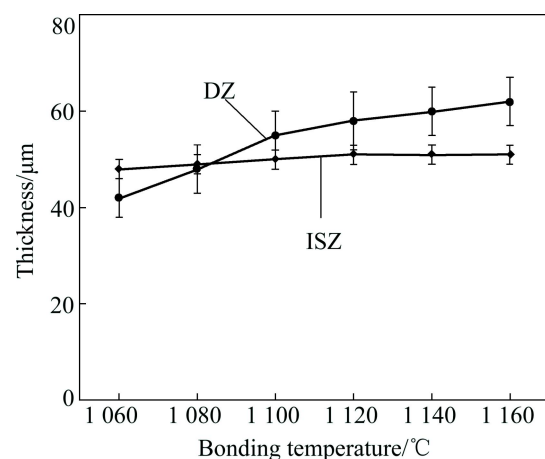


图4 连接温度对接头内各区厚度的影响
Fig. 4 Effect of bonding temperature on thickness of each zone in joints

加。由上述分析可知, 扩散区主要是由于液相中 B 原子向母材扩散形成的, 所以, 在相同的扩散时间内, 随着温度的升高, B 原子扩散加快, 扩散距离增大, 导致 TLP 接头中扩散区厚度增加。然而, 扩散区厚度随温度升高并非呈指数增长, 这主要是由于 B 原子的扩散行为不是简单的纯扩散, 实际上, 在 B 原子向母材扩散的过程中必然涉及到硼化物的形成和分解, 也就是说扩散区的形成是一个反应扩散过程。所以, 随连接温度的升高, 扩散层厚度增加趋势逐渐减小。

图 5 所示为不同连接温度条件下获得的 TLP 接头室温拉伸性能。从图 5 可以看出, 随着连接温度的升高, 接头的平均抗拉强度先增加后减小; 当连接温度为 1 120 °C、连接时间为 2 h 时, 接头强度最高达 692 MPa, 为母材强度的 82%。

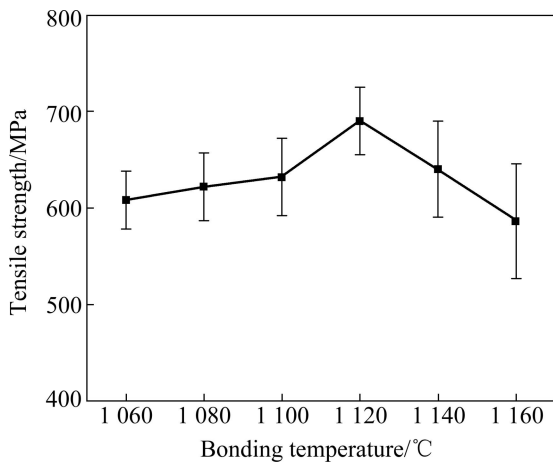


图 5 连接温度对接头室温抗拉强度的影响
Fig. 5 Effect of bonding temperature on tensile strength of joints at room temperature

图 6(a)和(b)所示为 1 080 °C、2 h 条件下获得的 TLP 接头室温拉伸断口的二次电子扫描照片。从图 6(a)和(b)可以看出, 断口中分布着大量等轴状韧窝, 说明该接头在拉伸过程中产生了较大的塑性变形, 其断裂机理主要为微孔聚集型断裂。图 6(c)所示为该断口表面的 XRD 谱。经分析可知, 接头的断裂位置为等温凝固的 Ni 基固溶体层, 由于等温凝固区内溶解了 Cr 和 Fe 等固溶元素, 导致 Ni 的晶格常数增加, 从而使得衍射角(2θ)相应减小。

图 7(a)和(b)所示为 1 120 °C、2 h 条件下获得的 TLP 接头室温拉伸断口的扫描照片。从图 7(a)和(b)可以看出, 该接头的断裂机理属于延性沿晶断裂, 其断裂路径是沿晶的, 断裂方式是延性的。在断裂过程中沿晶界产生了一定的塑性变形, 使得微观断口表面上形成大量细小的浅韧窝, 但由于晶内未发生明显塑性

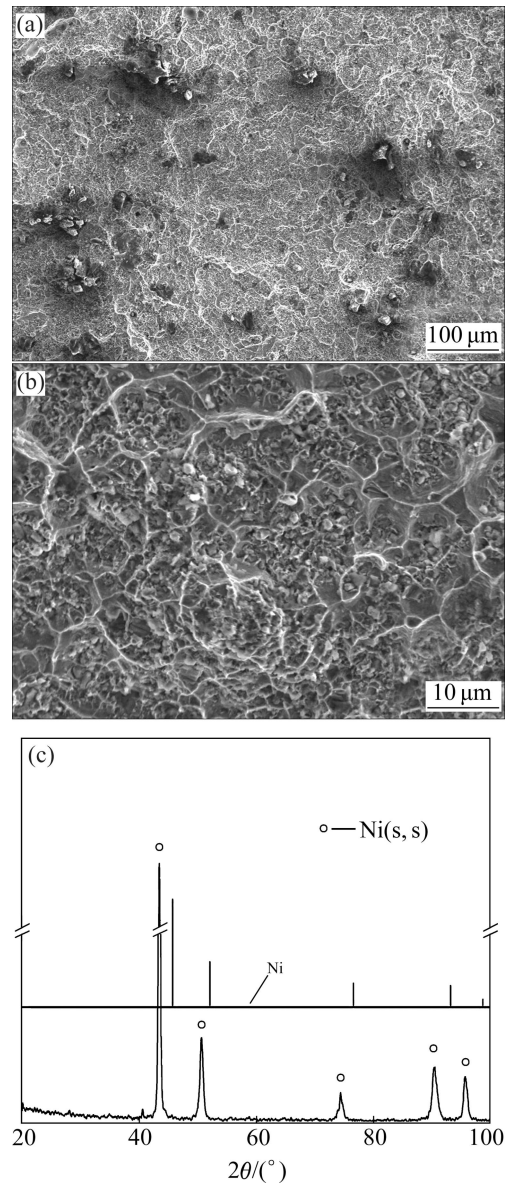


图 6 1 080 °C、2 h 条件下获得的接头室温拉伸断口分析结果
Fig. 6 Fracture analysis results of GH4169 TLP joint bonded at 1 080 °C for 2 h in room temperature tensile test: (a) SEM image, low magnification; (b) SEM image, high magnification; (c) XRD pattern taken from fracture surfaces

变形, 所以, 在宏观断口中观察不到塑性变形的痕迹。图 7(c)所示为该断口表面的 XRD 谱。由图 7(c)可知: 断口表面存在大量硼化物相, 因此, 可以确定接头的断裂位置为扩散区。由于大量硼化物沿晶界析出, 削弱了晶界强度, 当接头在拉伸过程中受应力作用时, 在硼化物与基体的界面处首先形成显微孔洞, 孔洞不断长大和聚集, 最终造成断裂。

由上述分析可知, 连接温度不仅对接头室温抗拉强度有显著影响, 而且随连接温度的变化接头断裂位

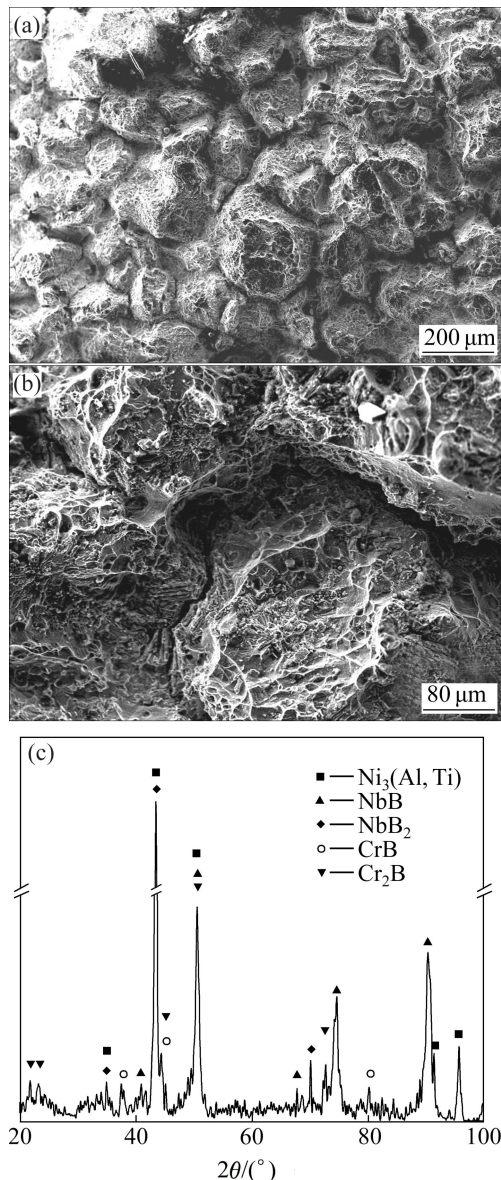


图7 1120 °C、2 h条件下获得的接头室温拉伸断口分析结果
Fig. 7 Fracture analysis results of GH4169 alloy TLP joint bonded at 1120 °C for 2 h in room temperature tensile test: (a) SEM image, low magnification; (b) SEM image, high magnification; (c) XRD pattern taken from fracture surface

置相应改变。当连接温度较低时，等温凝固区内 Fe 和 Cr 等固溶元素的含量较低，固溶强化作用有限，扩散区内晶界硼化物较少，此时，扩散区的强度高于等温凝固区的强度，所以，在室温拉伸过程中接头断裂于等温凝固区。随着连接温度的升高，等温凝固区内固溶元素含量增加，强度不断提高，而扩散区内晶界硼化物增多，导致其强度逐渐降低，因此，当连接温度较高时，接头则断裂于扩散区。也就是说，连接温度较低时接头的室温抗拉强度取决于等温凝固区的强

度；当连接温度较高时，则取决于扩散区的强度。

图8(a)所示为连接温度对接头高温(600 °C)抗拉强度的影响。由图8可见，随连接温度升高，接头高温抗拉强度先增加后降低，当连接温度为1120 °C、连接时间为2 h时，接头强度最高达599 MPa，为母材强度的71%。对接头断口进行观察发现，在高温拉伸过程中，所有接头均断裂于等温凝固区，其典型断口形貌如图8(b)所示。从图8(b)可以看出，断口表面形成了大量韧窝，断裂机理为微孔聚集型断裂。由此可知：当温度升高时，与母材及扩散区相比，等温凝固区强度的下降程度相对较大，因而易在该区域发生断裂。

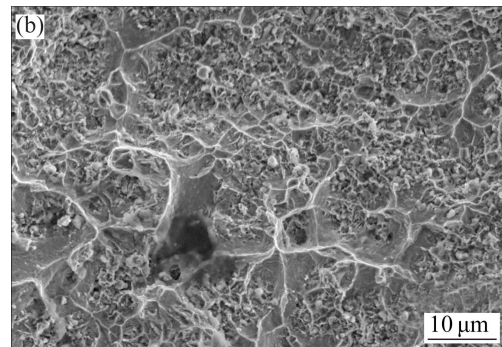
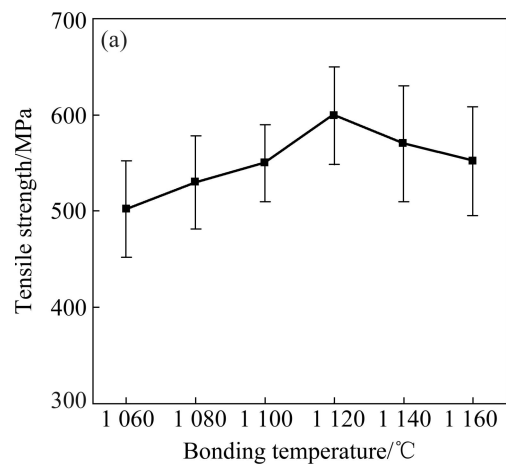


图8 GH4169 合金 TLP 接头高温抗拉强度及典型断口形貌
Fig. 8 High temperature tensile strength (a) and typical fracture morphology (b) of GH4169 alloy TLP joints

3 结论

1) 采用50 μm厚的Ni82CrSiB非晶箔片通过瞬时液相扩散连接(TLP)实现了GH4169高温合金的可靠连接。TLP接头由等温凝固区(ISZ)和扩散区(DZ)组成，其中，等温凝固区为溶解了Fe、Cr和Si等合金元素的镍基固溶体，扩散区内由于B元素的扩散及其

与母材中Cr、Nb和Ti等元素的反应在晶界处析出了大量的针棒状硼化物。

2) 连接温度的变化对接头界面结构无明显影响。当连接温度升高时,等温凝固区厚度变化不大,而扩散区厚度则逐渐增加。在1 120 °C、2 h条件下获得的TLP接头性能最佳,其室温抗拉强度最高达692 MPa,为母材强度的82%;高温(600 °C)抗拉强度最高达599 MPa,为母材强度的71%。室温拉伸时,随着连接温度的升高,接头断裂位置由等温凝固区逐渐转向扩散区,而高温拉伸时,接头均断裂于等温凝固区。

REFERENCES

- [1] 刘大响,程荣辉. 世界航空动力技术的现状及发展动向[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 491-496.
LIU Da-xiang, CHENG Rong-hui. Current status and development direction of aircraft power technology in the world [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 491-496.
- [2] SPICER C W, HOLDERN M W, COWEN K A, JOSEPH D W, SATOLA J, GOODWIN B, MAYFIELD H, LASKIN A, ALEXANDER M L, ORTEGA J V, NEWBURN M, KAGANN R, HASHMONAY R. Rapid measurement of emissions from military aircraft turbine engines by downstream extractive sampling of aircraft on the ground: Results for C-130 and F-15 aircraft [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(16): 2612-2622.
- [3] 田世藩,张国庆,李周,颜鸣皋. 先进航空发动机涡轮盘合金及涡轮盘制造[J]. 航空材料学报, 2003, 23(S): s233-s238.
TIAN Shi-fan, ZHANG Guo-qing, LI Zhou, YAN Ming-gao. The disk superalloys and disk manufacturing technologies for advanced aero engine [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(S): s233-s238.
- [4] 罗希延,赵荣国,蒋永洲,李红超,李秀娟,刘学晖. 航空发动机涡轮盘用GH4133B合金常温力学性能统计分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 75-83.
LUO Xi-yan, ZHAO Rong-guo, JIANG Yong-zhou, LI Hong-chao, LI Xiu-juan, LIU Xue-hui. Statistical analysis on mechanical properties of GH4133B superalloy used in turbine disk of aero-engine at ambient temperature [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 75-83.
- [5] MENON M N, KANTZOS P T, GREVING D J. An innovative procedure for establishing lifing criteria turbine disk bores under multiaxial states of stress [J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(8): 1111-1117.
- [6] 徐强,张幸红,韩杰才,赫晓东. 先进高温材料的研究现状和展望[J]. 固体火箭技术, 2002, 25(3): 51-55.
XU Qiang, ZHANG Xing-hong, HAN Jie-cai, HE Xiao-dong. Current status of research and development and prospects of advanced high-temperature materials [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2002, 25(3): 51-55.
- [7] LAVERY N P, JARVIS D J, VOSS D. Emission mitigation potential of lightweight intermetallic TiAl components [J]. Intermetallics, 2011, 19(6): 787-792.
- [8] DAROLIA R. Ductility and fracture toughness issues related to implementation of NiAl for gas turbine applications [J]. Intermetallics, 2000, 8(9/11): 1321-1327.
- [9] DEY S R, ROY S, SUWAS S, FUNDENBERGER J J, RAY R K. Annealing response of the intermetallic alloy Ti-22Al-25Nb [J]. Intermetallics, 2010, 18(6): 1121-1131.
- [10] GHANEM H, GERHARD H, POPOVSKA N. Paper derived SiC-Si₃N₄ ceramics for high temperature applications [J]. Ceramics International, 2009, 35(3): 1021-1026.
- [11] 王营,余朝蓬. 航空发动机涡轮盘结构优化设计[J]. 机械设计与制造, 2010, 48(5): 4-6.
WANG Ying, YU Zhao-peng. Optimization design for the turbine disk of a gas engine [J]. Machinery Design and Manufacture, 2010, 48(5): 4-6.
- [12] 江龙平,许可君,隋育松. 涡轮叶片冷却技术的应用和发展[J]. 海军航空工程学院学报, 2002, 17(1): 130-132.
JIANG Long-ping, XU Ke-jun, SUI Yu-song. Application and development of cooling technology on turbine blades [J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2002, 17(1): 130-132.
- [13] LIU J D, JIN T, ZHAO N R, WANG Z H, SUN X F, GUAN H R, HU Z Q. Effect of TLP bonding on the ductility of a Ni base single crystal superalloy in a stress rupture test[J]. Materials Characterization, 2008, 59(1): 68-73.
- [14] IDOWU O A, RICHARDS N L, CHATURVEDI M C. Effect of bonding temperature on isothermal solidification rate during transient liquid phase bonding of Inconel 738LC superalloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 397(1/2): 98-112.
- [15] 周媛,毛唯,李晓红. BNi82CrSiB钎料钎焊DD6单晶合金接头组织及力学性能研究[J]. 材料工程, 2007, 52(5): 3-6.
ZHOU Yuan, MAO Wei, LI Xiao-hong. Microstructure and mechanical properties of single crystal superalloy DD6 joint brazed with BNi82CrSiB filler metal [J]. Materials Engineering, 2007, 52(5): 3-6.

(编辑 陈卫萍)