

BNi82CrSiB 钎料钎焊 DD6 单晶合金 接头组织及力学性能研究

Microstructure and Mechanical Properties of Single
Crystal Superalloy DD6 Joint Brazed with
BNi82CrSiB Filler Metal

周 媛, 毛 唯, 李晓红

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

ZHOU Yuan, MAO Wei, LI Xiao-hong

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 采用 BNi82CrSiB 钎料在 1070℃/ 15min 规范下对 DD6 单晶合金进行了真空钎焊实验研究。获得了致密完整的钎焊接头, 钎料元素未向母材扩散。钎焊接头在 750℃ 的抗拉强度为 400 MPa 左右, 750℃/100h 持久强度可达 100MPa。钎焊接头的失效断裂源自焊缝中间的化合物相上, 断口呈脆性断裂特征。

关键词: 真空钎焊; BNi82CrSiB 钎料; 单晶合金

中图分类号: TG146.1+5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)05-0003-04

Abstract: The single crystal superalloy DD6 was bonded by vacuum brazing at 1070℃ for 15min using the BNi82CrSiB filler metal. The sound joint was obtained. The result showed that the elements of the filler metal did not diffused into the base metal. At 750℃, the joint tensile strength reached about 400MPa, and the stress rupture strength of 750℃/ 100h was 100MPa. The rupture of joint originated from the compound phases in the central part of the brazing seam, and the tested samples exhibited brittle fracture.

Key words: vacuum brazing; BNi82CrSiB filler metal; single crystal superalloy

DD6 是国内研制的第二代镍基单晶高温合金, 具有高温强度高、综合性能好、组织稳定等优点, 且因其铪含量低具有低成本的优势。该合金适合于制作 1100℃ 以下工作的具有复杂内腔的燃气涡轮工作叶片等高温零件^[1-3]。单晶合金连接作为单晶高效气冷组合式叶片制造过程中最重要的关键技术之一, 国内外学者已在过渡液相扩散焊及钎焊连接方面展开研究工作^[4-7]。在钎焊连接方面, 主要采用以 B 作为降熔元素的镍基钎料以高温、长时工艺进行实验, 获得了具有一定高温性能的单晶合金接头^[4,5]。英国罗罗公司采用 Ni-15Cr-3.5B 钎焊的 CMSX-4 合金导向叶片, 已通过发动机验证试车^[4]。

在实际叶片构件的焊接中, 某些部位只要求可靠封闭, 而对接头的强度要求并不高。因此可以采用某些低熔点的钎料进行真空钎焊, 减少钎焊热循环对单晶合金组织性能的影响, 降低单晶合金出现再结晶的可能性, 从而有效地保证叶片整体性能的稳定。

BNi82CrSiB 钎料为 Ni-Cr-Si-B 系钎料, 在以 Si

和 B 作为降熔元素的镍基钎料中, 其熔化温度最低 (970~ 1000℃), 可在较低温度下进行钎焊, 具有良好的钎焊工艺性能, 广泛用于高温合金及不锈钢的钎焊^[8]。本工作采用 BNi82CrSiB 粉状钎料对 DD6 单晶合金进行了真空钎焊实验, 并对钎焊接头的组织及力学性能进行了研究。

1 实验材料及方法

实验用母材为 DD6 单晶合金, 其化学成分见表 1。实验用钎料为 BNi82CrSiB, 其化学成分见表 2, 使用形式为-150 目粉末。

为了防止机械加工应力导致在焊接热循环中母材发生再结晶, 对所有试样采用了按母材热处理制度处理+ 线切割+ 砂纸打磨, 最后用丙酮超声波清洗的焊前表面处理方法。

接头金相试样和性能试样均为对接试样, 先将 0.1mm 厚的镍条夹在试样连接面两端, 并用氩弧点焊

定位,然后将钎料粉末置于试样上方,滴加粘结剂固定。连接时,钎料熔化并流入缝隙中形成接头。试样

严格配对加工并在装配及点焊定位时精确保证两试样的相对位置,使两个相配合的试样晶体取向一致。

表 1 DD6 单晶合金化学成分(质量分数/ %)^[1]

Table 1 The chemical composition of DD6 alloy (mass fraction / %)

Cr	Co	Mo	W	Ta	Re	Nb	Al	Hf	Ni
3.8-4.8	8.5-9.5	1.5-2.5	7.0-9.0	6.0-8.5	1.6-2.4	0-1.2	5.2-6.2	0.05-0.15	Bal

表 2 BNi82CrSiB 钎料化学成分及熔化温度^[9]

Table 2 The chemical composition and melting temperature of BNi82CrSiB filler metal

Mass fraction of chemical composition / %						Melting temperature / °C	
Ni	Cr	B	Si	Fe	C	T _S	T _L
Bal	6.0-8.0	2.75-3.50	4.0-5.0	2.5-3.5	≤0.06	970	1000

钎焊实验在 L1215 -1/ZM 型真空钎焊炉中进行,钎焊时的热态真空度不低于 2×10^{-2} Pa。钎焊规范为 1070 °C/ 15min。采用 FEI QUANTA 600 环境扫描电镜(SEM)和 INCA 能谱仪(EDS)对钎焊接头组织及相关区域的成分进行分析。采用图 1 所示两种形式的试样测试了钎焊接头性能。

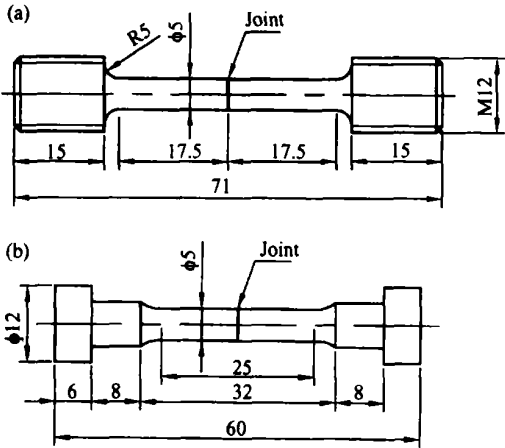


图 1 接头性能试样简图

(a) 拉伸试样; (b) 持久试样

Fig. 1 Specimen for the joint property testing

(a) tensile specimen; (b) stress-rupture specimen

2 结果及讨论

2.1 钎焊接头的组织

图 2a 为采用 BNi82CrSiB 钎料在 1070 °C/ 15min 规范下真空钎焊 DD6 单晶合金的接头组织,对焊缝中各相的能谱分析结果列于表 3 中。从图 2a 中可以看出,钎焊接头致密完整,焊缝中央存在多种化合物相。钎焊时,初生 γ -Ni 固溶体相首先依附母材基体凝固,使剩余液态钎料中富含 B, Si 和 Cr。在随后的冷却过程中, Ni_3B 化合物相和 γ 相二元共晶先从液态钎料中

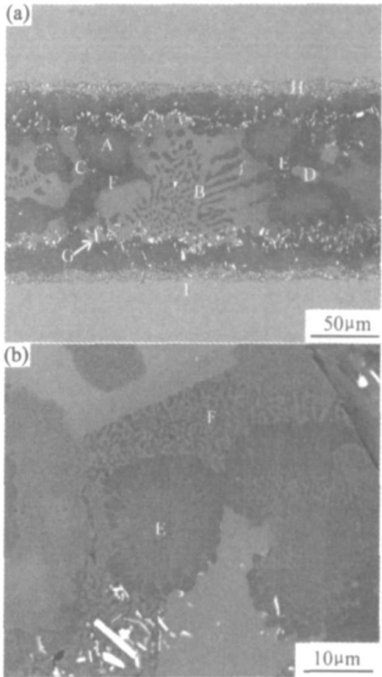


图 2 1070 °C/ 15min 钎焊 DD6 单晶合金接头组织的 SEM 照片

(a) 整体形貌; (b) 局部组织

Fig. 2 SEM micrographs of the DD6 single crystal alloy joint brazing at 1070 °C/ 15min

(a) the whole joint;

(b) the local phases at high magnification

析出, 剩余钎料富含 Cr, 进一步冷却析出 Cr_3B 和 γ 二元共晶。在液态钎料凝固临近结束时, 钎料中富含 Si, 析出 γ , Ni_3B 和 Ni_3Si 三元共晶^[10]。结合能谱分析结果推断, 图 2a 中靠近母材的焊缝中的灰色相(A)是 γ -Ni 固溶体。在焊缝中央有大量析出并呈粗大树枝状分布(B, C)的可能是 Ni_3B 化合物相。此相中还存在衬度差异, 树枝晶内部(B)较亮, 末梢(C)较暗。这是由于母材元素溶解扩散进入焊缝组织造成的成分偏

析,能谱分析结果显示,较亮的 B 区富 Ta 但不含 Si,较暗的 C 区含 Si 但不含 Ta。图 2a 中呈条块状分布(D)的可能是 Cr-B 化合物相。结合析出物组织特征^[11],图 2 中 E 处可能是 Nb₃Si 相,点状共晶区 F 可能是 γ, Nb₃B 和 Nb₃Si 三元共晶。母材与焊缝之间发生了一定程度的相互作用,DD6 单晶合金中的 Nb, Mo, Ta, W, Re 富集在母材与焊缝界面附近,析出大量细小的白色点状物(图 2a 中 G, H)。

虽然 B 和 Si 的原子半径较小,扩散速度很快,并且在以其作为降熔元素的 BNi82CrSiB 钎料中的含量也非常高,但是并未发现其扩散进入 DD6 单晶合金中,如图 2a 所示。近缝区母材 I 处的成分也和 DD6 母材是相同的,见表 3。而在类似低温、短时规范下钎焊 K403 合金的接头组织中却明显可见,钎料中的 B 已经扩散进入母材中,沿近缝区母材晶界析出^[12]。这种差异可能与母材合金自身成分及结构有关。一方面,单晶合金中没有作为 B 元素快速扩散通道的晶界。另一方面,DD6 单晶合金中富含 Re, Ta 等降低扩散速率的元素。由此可见,在实验规范下采用 BNi82-

CrSiB 钎料钎焊 DD6 单晶合金,并未发生钎料元素向母材的明显扩散,可以用于实际构件某些部位的连接。图 3 显示了采用 BNi82CrSiB 钎料在 1070℃/

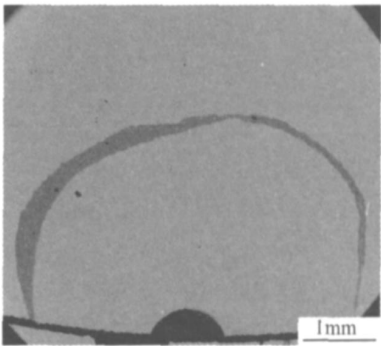


图 3 实际构件剖面 SEM 照片
Fig. 3 The section SEM micrograph of the practical component

15min 规范下钎焊的 DD6 单晶高温合金实际构件剖面 SEM 照片,钎焊时在大间隙处预填了高温合金粉。可以看出,整体焊缝成形良好,实现了对构件的可靠连接。

表 3 钎焊接头中各相及母材成分能谱分析结果

Table 3 The compositions of the phases in the joint and the base metal analyzed by EDS

Microzone	Content	Al	Si	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	Ta	W	Re
A	Mass fraction/ %	2.86	4.06	5.29	3.03	3.11	79.63	-	-	-	2.02	-
	Atom fraction/ %	5.80	7.91	5.57	2.97	2.89	74.26	-	-	-	0.60	-
B	Mass fraction/ %	2.27	-	3.76	1.68	3.38	81.00	-	-	7.91	-	-
	Atom fraction/ %	5.04	-	4.33	1.81	3.44	82.76	-	-	2.62	-	-
C	Mass fraction/ %	1.77	1.39	4.65	2.37	3.42	86.39	-	-	-	-	-
	Atom fraction/ %	3.70	2.79	5.03	2.39	3.27	82.82	-	-	-	-	-
D	Mass fraction/ %	-	-	48.17	1.78	2.72	17.54	-	6.03	-	11.88	11.88
	Atom fraction/ %	-	-	61.99	2.14	3.09	19.99	-	4.21	-	4.32	4.27
E	Mass fraction/ %	2.14	6.28	4.91	2.46	2.47	80.47	-	-	-	1.28	-
	Atom fraction/ %	4.26	12.02	5.08	2.37	2.25	73.66	-	-	-	0.37	-
F	Mass fraction/ %	-	6.73	3.59	1.88	2.64	85.16	-	-	-	-	-
	Atom fraction/ %	-	13.04	3.76	1.84	2.44	78.93	-	-	-	-	-
G	Mass fraction/ %	-	-	7.60	0.51	2.00	22.08	-	11.20	3.72	44.71	8.17
	Atom fraction/ %	-	-	14.77	0.92	3.43	38.00	-	11.80	2.08	24.57	4.43
H	Mass fraction/ %	0.62	-	4.01	0.64	7.87	29.89	1.88	9.27	10.83	29.18	5.81
	Atom fraction/ %	2.05	-	6.88	1.02	11.92	45.42	1.80	8.62	5.34	14.16	2.78
I	Mass fraction/ %	5.64	-	4.22	-	8.97	60.47	1.21	2.17	6.44	9.40	1.47
	Atom fraction/ %	13.04	-	5.06	-	9.50	64.27	0.82	1.41	2.22	3.19	0.49
The base metal	Mass fraction/ %	5.53	-	4.20	-	9.02	59.95	0.97	2.50	7.07	9.05	1.71
	Atom fraction/ %	12.85	-	5.07	-	9.61	64.07	0.65	1.64	2.45	3.09	0.58

2.2 钎焊接头的力学性能

根据实际构件的服役环境,在 750℃对 DD6 单晶合金钎焊接头的力学性能进行了测试,结果列于表 4

中。采用 BNi82CrSiB 钎料在 1070℃/ 15min 规范下钎焊的 DD6 单晶合金接头 750℃的抗拉强度为 400 MPa 左右,750℃/ 100h 持久强度可达 100MPa。

表 4 750℃时 DD6 单晶合金钎焊接头的力学性能

Table 4 Mechanical properties of brazed joints of DD6 single crystal alloy at 750℃

Tensile property		Stress-rupture property		
Strength / MPa		Stress/ MPa	Life/ (h : min)	Note
404	408	80	119: 30	The stress was raised to 90MPa after 100h
		90	190: 45	The stress was raised to 100MPa after 100h

2.3 钎焊接头的断口形貌

镍基钎料出于降低熔点的需要加入了大量的 B 和 Si, 这使得焊缝中间存在大量脆性的化合物相。钎焊接头的断裂失效往往就源于这些部位。本工作对 BNi82CrSiB 钎焊 DD6 单晶合金接头拉伸试样的研究结果也是这样, 如图 4 所示。从图 4 可以看出, 试样断口呈现出明显的脆性断裂特征, 钎焊接头断于焊缝中间粗大的 N+ B 化合物相上。在应力作用下, 焊缝中央脆性的化合物相因失稳而产生细小裂纹, 应力增大时裂纹进一步扩展, 最终裂纹彼此连通而发生断裂。从图 4b 中仍然清晰可见 N+ B 化合物相内部的大量裂纹。

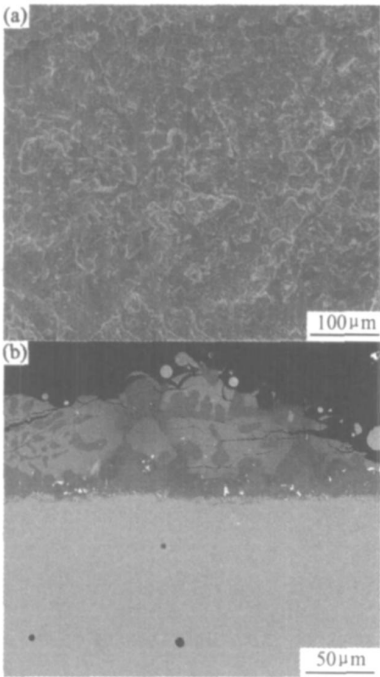


图 4 拉伸试样断口 SEM 照片 (a)断口形貌;(b)断口截面组织

Fig.4 SEM micrographs of the fractured sample after tensile test (a) fracture morphology; (b) microstructure of the fracture section

3 结论

(1) 采用 BNi82CrSiB 钎料在 1070℃/ 15min 规范下钎焊的 DD6 单晶合金接头致密完整, 未见钎料元素向母材扩散。

(2) 钎焊接头 750℃的抗拉强度为 400 MPa 左右, 750℃/ 100h 持久强度可达 100MPa。

(3) 钎焊接头断口呈脆性断裂特征, 断于焊缝中间的化合物相上。

参考文献

[1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册 第 2 卷 变形高温合金 铸造高温合金[M]. 第 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[2] 李嘉荣, 钟振纲, 唐定中, 等. 低成本第二代单晶高温合金 DD6 [J]. 金属学报, 1999, 35(增刊 2): S266- S269.

[3] LI J R, ZHONG Z G, TANG D Z, et al. A low-cost second generation single crystal superalloy DD6[A]. Superalloys 2000[C]. Warrendale, PA: The Minerals, Metals& Materials Society, 2000. 777- 783.

[4] BROOMFIELD R W. Development of brazing techniques for the joining of single crystal components [A]. Fifth International Charles Parsons Turbine Conference[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 741- 754.

[5] MIGLIETTI W M, PENNEFATHER R C. Microstructure, mechanical properties and coatability of diffusion brazed CMSX-4 single crystal[A]. Proceedings from Materials Solutions' 97 on Joining and Repair of Gas Turbine Components[C]. Materials Park, Ohio: ASM International, 1997. 61- 77.

[6] NISHIMOTO K, SAIDA K, KIM D, et al. Homogenization behavior of alloying elements during transient liquid phase bonding [J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1997, 15 (3): 509- 514.

[7] 李晓红, 毛唯, 郭万林, 等. DD6 单晶合金过渡液相扩散焊工艺 [J]. 焊接学报, 2005, 26(4): 51- 54.

[8] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

[9] GB10859- 89, 镍基钎料[S].

[10] TUNG S K, LIM L C, LAI M O. Solidification phenomena in nickel base brazes containing boron and silicon[J]. Scripta Materialia, 1996, 34(5): 763- 769.

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

[12] 毛唯, 何剑雄, 叶雷, 等. BNi82CrSiB 钎料钎焊 K403 合金接头的性能[A]. 第十一次全国焊接会议论文集(第 1 册)[C]. 上海: 中国机械工程学会焊接分会, 2005. 38- 40.

收稿日期: 2007-01-10; 修订日期: 2007-03-05

作者简介: 周媛(1981-), 女, 硕士, 主要从事钎焊、扩散焊研究工作, 联系地址: 北京市 81 信箱 20 分箱(100095)。