

Fe 对 NiAl 金属间化合物光束堆焊层成形及组织结构的影响

张迪, 单际国, 陈武柱, 任家烈

(清华大学, 北京 100084)

摘要: 采用 X 射线衍射、SEM、EDS 等分析方法, 研究了铁元素对光束堆焊合成 NiAl 金属间化合物层的成形和组织结构的影响规律。结果表明, 光束堆焊镍铝混合粉制备 NiAl 金属间化合物层时, NiAl 的高熔点导致堆焊层成形困难。在镍铝混合粉中加入适量铁粉(11at%~28at%)可以降低堆焊合金体系的熔点、改善堆焊层成形。随着铁粉加入量的增加, 堆焊层的稀释率呈现先增加后降低的趋势, 过多的铁粉加入量(43at%)将使熔池金属不能润湿母材。铁元素的引入使堆焊层中析出了 Fe₃Al 相, 随着堆焊层中含 Fe 量的增加, Fe₃Al 的析出量增加, 堆焊层的微观组织为 NiAl 柱状晶和柱状晶间的 Fe₃Al 条状相。

关键词: 光束堆焊; NiAl 金属间化合物; 堆焊层成形; 微观组织

中图分类号: TG 455

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2006)01-0005-04

1 引言

NiAl 金属间化合物具有优良的抗高温氧化性和高温力学性能, 是应用前景很好的高温结构材料和涂层材料^[1-3]。堆焊反应合成制备 NiAl 金属间化合物涂层时, 由于 NiAl 金属间化合物的熔点远高于单质镍和单质铝, 因此一旦堆焊熔池中形成 NiAl 金属间化合物, 就会使熔池的过热度减小、流动性降低、与母材金属的润湿性下降, 导致堆焊层成形恶化, 甚至不能获得堆焊层^[4]。

向 Ni-Al 合金系中引入 Fe 元素可以降低体系的熔点^[5], 有可能改善堆焊层的成形, 但 Fe 的引入又会导致堆焊层的组织结构发生变化。国内外学者针对 Fe 元素宏观合金化后的 NiAl 金属间化合物组织特征开展了大量研究^[1,6-11]。研究 NiAl-Fe 合金的铸态组织发现, 当 Fe 加入量小于 20at% 时, 铸态组织为单相 NiAl; 加入量超过 30at% 时, NiAl 晶间就会析出 bcc 结构的第二相^[6]。机械合金化制备 NiAl-Fe 合金时, Fe 加入量较少时合金仍由单相 NiAl 组成^[7], Fe 加入量超过 20at% 后得到 fcc 结构的 Ni(Al,Fe) 过饱和固溶体^[8]。快速凝固制备 Ni-Al-Fe 带时, Al-45Ni-5Fe (原子分数) 组织为等轴晶粒, 内部有亚微米级针状亚晶, Al-35Ni-15Fe 和 Al-25Ni-25Fe 的快速凝固组织则为柱状晶^[9]。以液态 Al 和液态 Ni-Fe 合金为原料反应铸造

NiAl 金属间化合物时, 随着铁含量的增加, 晶粒尺寸减小^[10]。文献^[11]研究了 Ni-25Al-xFe 合金系的组织和性能, 认为加入适量的 Fe 可将单相的 NiAl 粒状组织变为多相的枝晶组织, 枝晶间韧性相的存在使合金具有塑性变形能力。可见, Fe 元素对 NiAl 金属间化合物组织特征的影响不仅与 Fe 元素的加入量有关, 还与 NiAl 金属间化合物的制备工艺有关。

目前, 就堆焊反应合成制备 NiAl 金属间化合物表面层而言, Fe 元素对堆焊层成形和组织结构的影响尚不清楚。本研究采用光束堆焊方法制备了 NiAl 金属间化合物表面层, 研究了 Fe 元素对堆焊层成形和组织结构的影响。

2 实验

堆焊设备为清华大学研制的 5 kW 光束加热设备。堆焊材料是镍铝原子比为 1:1 的镍铝混合粉和镍铝铁混合粉, 镍铝铁混合粉是同质量的镍铝混合粉和不同量的铁粉混合后得到的, 铁粉加入量见表 1。堆焊材料预涂在尺寸为 12.5 mm×12.5 mm×50 mm 的 A3 钢表面, 预涂长度为 40 mm, 宽度为 4 mm。采用 3000 J/mm 的线能量制备光束堆焊层, 并横向截取制备金相试样。

堆焊层微观组织及析出相化学成分在 CSM950 扫描电镜和 TN5420 能谱仪上进行分析, 用 D/max-RB 型 X 射线衍射仪并结合相图标定堆焊层的物相组成。

收到初稿日期: 2004-09-08; 收到修改稿日期: 2005-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助 (50275082)

作者简介: 张迪, 女, 1977 年生, 博士生。联系人: 单际国, 男, 1965 年生, 教授, 清华大学机械工程系, 北京 100084, 电话: 010-62773798

3 结果与讨论

采用较小的光束线能量 (3000 J/mm) 堆焊镍铝混和粉时, 堆焊熔池中一旦形成 NiAl 金属间化合物, 熔池与母材金属的润湿性将下降, 导致不能获得 NiAl 金属间化合物堆焊层 (表 1, No.1)。为改善光束堆焊层的成形, 向镍铝混合粉中加入了不同量的铁粉 (表 1), 即采用镍铝铁混合粉为堆焊材料, 来降低堆焊合金体系的熔点, 改善堆焊层的成形, 并研究铁元素对堆焊层成形和组织结构的影响规律。各种堆焊材料的熔点如图 1 所示。

表 1 Fe 元素对 NiAl 光束堆焊层成形的影响

Table 1 Effect of Fe on the formation of light beam surfacing layers of NiAl intermetallic

Sample number	Fe in surfacing powder/at%	Experimental results
No.1	0	Surfacing metal can not wet base metal and surfacing layer can not be acquired
No.2	11	Surfacing layer can be acquired
No.3	13	Surfacing layer with good formation can be acquired
No.4	28	Surfacing layer with good formation can be acquired
No.5	43	Surfacing metal can not wet base metal and surfacing layer can not be acquired

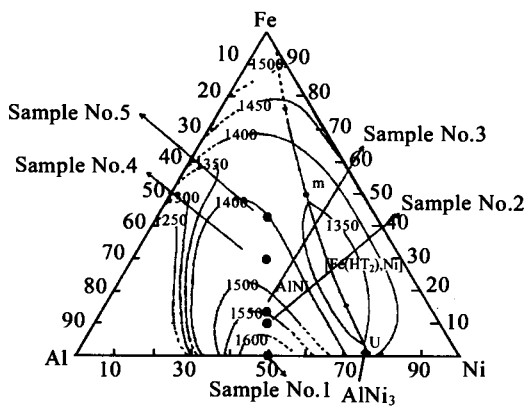


图 1 Ni-Al-Fe 三元系液相面投影图

Fig.1 Projection of the liquid surface in Ni-Al-Fe ternary alloy system [5]

3.1 铁元素对 NiAl 光束堆焊层成形的影响

采用镍铝铁混合粉为堆焊材料时, 铁粉加入量过低 (小于 11at%) 时, 并不能改善堆焊合金体系与母材金属的润湿性, 因此仍不能获得 NiAl 金属间化合物堆焊层。只有当堆焊材料中铁粉加入量达到一定值 (11at%) 后, 方可获得 NiAl 金属间化合物光束堆焊层 (表 1, No.2); 且随铁粉加入量的增加, 堆焊层的

成形明显改善 (表 1), 堆焊层的稀释率呈现先增加后降低的趋势 (图 2)。但铁粉加入量过高 (43at%) 又将导致堆焊金属不能润湿母材, 也就不能获得堆焊层 (表 1, No.5)。

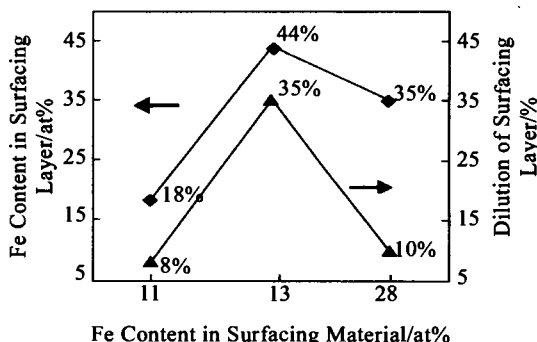


图 2 Fe 元素对 NiAl 光束堆焊层化学成分及稀释率的影响

Fig.2 Effect of Fe on the composition and dilution of light beam surfacing layers of NiAl intermetallic

堆焊熔池的过热度及其与母材金属的润湿性是决定堆焊层成形质量的关键影响因素。在镍铝混合粉中加入铁粉可以降低堆焊合金体系的熔点, 铁粉的加入量越大, 堆焊合金体系的熔点越低 (图 1)。但是铁粉的加入又会导致堆焊材料的预涂厚度增加, 在堆焊线能量不变的条件, 堆焊过程中熔池所达到的最高温度降低, 反而不利于熔池与母材金属间的润湿。

当堆焊材料中铁粉的加入量过少 (小于 11at%) 时, 堆焊合金体系仍具有较高的熔点 (约 1580 °C), 低过热度的堆焊熔池不能润湿母材金属, 导致不能获得光束堆焊层。当铁粉的加入量达到一定值 (11at%) 后, 堆焊合金体系熔点显著降低 (图 1), 熔池的过热度增加, 不仅改善了熔池与母材金属润湿性, 也可使母材表面熔化, 因此光束堆焊层的成形良好。在此临界值基础上继续增加铁粉加入量, 将进一步提高熔池过热度及母材金属的熔化量, 使堆焊层的稀释率及其铁含量增加。堆焊材料中铁粉加入量较大时 (13 at%~28at%), 堆焊材料预涂厚度的增加将成为影响堆焊层成形的主要因素。即使此时堆焊合金体系的熔点降低更多 (约 1460 °C), 但由于单位堆焊材料吸收的光束能量减少, 导致堆焊熔池的过热度及母材金属熔化量降低, 堆焊层稀释率减小。过高的铁粉加入量 (44at%) 将明显降低堆焊熔池的最高温度和过热度, 使其不足以润湿母材金属, 导致不能获得堆焊层。

3.2 铁元素对 NiAl 光束堆焊层组织结构的影响

铁粉的加入不仅影响 NiAl 金属间化合物堆焊层的成形, 而且改变了堆焊层的化学成分。随着堆焊材

料中铁含量的增加,堆焊层中铁含量呈现先增加后降低的趋势(图2,表2),这将影响到堆焊层的显微组织及其化学成分。

镍铝铁混合粉末光束堆焊层由柱状晶基底及柱状晶间的条状第二相组成(图3)。能谱分析结果(表2)表明堆焊层的铁元素除少量进入柱状晶点阵外,大量参与形成了柱状晶间的条状相,且随堆焊层中铁含量的增加,条状相的析出量增加(图3)。X射线衍射结果(图4)证实了柱状晶是固溶了铁元素的NiAl金属间化合物,柱状晶间的条状相为Fe₃Al(DO₃结构)金属间化合物,尤其是在衍射图谱中出现了2θ=84°的衍射峰,该峰位是Fe₃Al金属间化合物的特征峰(图4)。另外,堆焊层的平均成分点位于Ni-Al-Fe三元相图^[12]的DO₃+B2两相区中(图5),这亦证实了堆焊层中Fe₃Al析出的可能性。与Ni-Al-Fe光束堆焊层不同的是,NiAl-Fe合金铸造组织中出现的第二相为bbc结构^[6],这是由于堆焊过程的加热和冷却速度快,铝元素烧损量较少导致的。当堆焊熔池中镍、铝优先合成NiAl金属间化合物以后,剩余富铁熔体则以α-Fe固溶体形式凝固析出。当α-Fe固溶体的Al含量达到一定值时,高温的α-Fe固溶体将发生有序化转变,得到Fe₃Al金属间化合物。因此,镍铝铁混合粉末光束堆焊层的显微组织由NiAl柱状晶和柱状晶间条状Fe₃Al组成,这与铸造合金的物相组成截然不同。

表2 Fe元素对光束堆焊层及其析出相化学成分的影响

Table 2 Effect of Fe on the composition of light beam surfacing layers and their precipitations

Sample number	Areas	Composition of precipitations/at%			Phase	Atomic site occupancies
		Ni	Al	Fe		
No.2	Surfacing layer	34.69	46.99	18.32	--	--
	Column crystal	36.77	51.33	11.90	NiAl	(NiFe)Al
	Strip phase	7.96	28.37	63.66	Fe ₃ Al	(FeNi) ₃ Al
No.3	Surfacing layer	25.88	30.31	43.81	--	--
	Column crystal	42.84	35.24	21.92	NiAl	(NiFe)(AlFe)
	Strip phase	11.55	14.59	73.85	Fe ₃ Al	(FeNi) ₃ Al
No.4	Surfacing layer	25.44	39.73	34.84	--	--
	Column crystal	29.33	44.84	25.83	NiAl	(NiFe)Al
	Strip phase	6.73	27.76	65.51	Fe ₃ Al	(FeNi) ₃ Al

堆焊层中铁含量还决定了堆焊层中物相的析出量。堆焊层中铁含量越高,Fe₃Al条状相的析出量越多,而NiAl金属间化合物的析出量越少(图3)。此外,堆焊层的铁含量也影响NiAl金属间化合物中的原子排列。采用镍铝铁混合粉末堆焊时,堆焊层中的NiAl金属间化合物固溶了铁元素,且随堆焊层中铁含量的

增加,Fe原子在NiAl金属间化合物的占位将从占据Ni原子的亚点阵过渡为以相同概率分别占据Ni、Al原子的亚点阵^[13]。

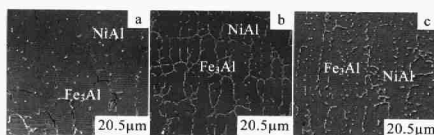


图3 镍铝铁混合粉末光束堆焊层的显微组织

Fig.3 Microstructure of light beam surfacing layers with Ni, Al and Fe mixed powder: (a) No.2, (b) No.3, (c) No.4

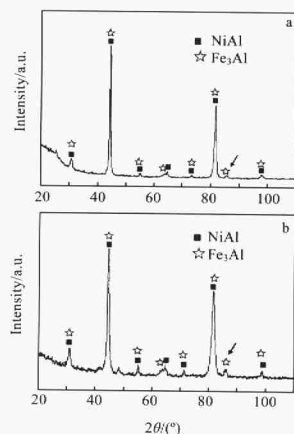


图4 镍铝铁混合粉末光束堆焊层衍射结果

Fig.4 X-ray diffraction spectra of light beam surfacing layers with Ni, Al and Fe mixed powder: (a) No.3, (b) No.4

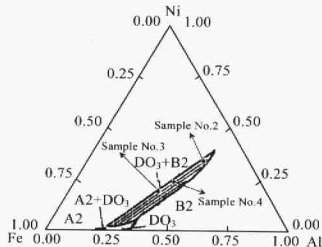


图5 Ni-Al-Fe三元系等温截面(700 K)

Fig.5 Isothermal section of Ni-Al-Fe ternary alloy system in 700 K^[12]

可见,在堆焊合金体系中引入铁元素,可促进堆焊层中析出了晶间 Fe_3Al 相,堆焊层由 NiAl 金属间化合物和条状 Fe_3Al 组成,且堆焊层中铁元素含量越高, Fe_3Al 条状相的析出量越多。

4 结 论

1) 光束堆焊原子比为 1:1 的镍铝混合粉时, NiAl 金属间化合物的高熔点导致难以获得堆焊层。在镍铝混合粉中加入适量铁粉 (11at%~28at%) 可改善堆焊层的成形,但铁粉加入量过高 (不低于 43at%) 或过低 (低于 11at%) 时都对堆焊层成形不利。

2) 随着镍铝混合粉中铁含量的增加,堆焊层的稀释率和铁含量呈现先增加后降低的趋势,堆焊层的铁含量决定了堆焊层的显微组织特征。

3) 镍铝铁混合粉光束堆焊层由 NiAl 柱状晶和柱状晶间条状 Fe_3Al 组成。铁元素的存在促进堆焊层中析出 Fe_3Al 相,且随堆焊层中铁含量的增加,条状 Fe_3Al 的析出量也相应增加。

参考文献 References

- [1] Zhang Yonggang(张永刚), Han Yafang(韩雅芳), Chen Guoliang(陈国良) *et al. Intermetallic Structural Material*(金属间化合物结构材料)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001, 686
- [2] Wu Yiqin(吴以琴). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 1994, 23(1):74
- [3] Li Mengjin(李猛进), Sun Xiaofeng(孙晓峰), Guan Hengrong(管恒荣) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(4): 400
- [4] Zhang Di(张迪), Shan Jiguo(单际国), Chen Wuzhu(陈武柱) *et al. Acta Metallurgica Sinica* (金属学报)[J], 2004, 40(5): 483
- [5] Pierre Villars, Alan Prince, Okamoto H. *Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams* [M]. New York: ASM International, 1995
- [6] Munroe P R, George M, Baker I *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2002, 325(1~2):1
- [7] Albitzer A, Bedolla E, Perez R. *Materials Science and Engineering A*[J], 2002, 328(1~2): 80
- [8] Guo J T, Zhou L Z, Liu Z G *et al. Acta Metallurgica Sinica*[J], 1996, 9(6):515
- [9] Sun Baode(孙宝德), Che Xiaozhou(车晓舟), Yang Gengang(杨根仓) *et al. Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报) [J], 1996, 10(2): 130
- [10] Matsuura K, Jinmon H, Hirashima Y *et al. ISIJ International* [J], 2000, 40(2): 161
- [11] Tsau C H, Yeh J W. *Materials Chemistry and Physics*[J], 2001, 68 (1~3): 142
- [12] Ma Gang(马钢), Xia Yuanming(夏源明) *et al. Acta Metallurgica Sinica* (金属学报)[J], 2002, 38(9): 914
- [13] Banerjee R, Amancheral S, Banerjee S *et al. Acta Materialia* [J], 2002, (50): 633

Effect of Fe on the Formation of NiAl Intermetallic Light Beam Surfacing Layer and Its Microstructure

Zhang Di, Shan Jiguo, Chen Wuzhu, Ren Jialie

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the use of X-ray diffraction, SEM and EDS, the effect of iron element on the formation of NiAl intermetallic light beam surfacing layer and its microstructure were investigated. The results show that owing to the high melting point of NiAl intermetallic, NiAl surfacing is difficult to acquire by light beam heating Ni and Al mixed powder. Adding reasonable content of Fe powder (11at%~28at%) to Ni and Al mixed powder can decrease the melting point of surfacing alloy system and improve the formation of light beam surfacing layer. With the increase of Fe addition in surfacing material, the dilution of surfacing layer and its Fe content firstly increase and then decrease. Too high addition of Fe powder (43at%) makes surfacing metal not to wet base metal. The Fe in surfacing layer promotes the precipitation of strip Fe_3Al , and the precipitation proportion of strip Fe_3Al increases with the increase of Fe content in surfacing layer. The light beam surfacing layer consists of NiAl column crystal and strip Fe_3Al between column crystal.

Key words: light beam surfacing; NiAl intermetallic; formation of surfacing layer; microstructure

Biography: Zhang Di, Candidate for Ph. D., Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China, Tel: 0086-10-62773798