

镍基高温合金电子束焊接热影响区微裂纹特征分析

Analysis on the Microfissuring Behavior in the Heat-affected Zone of Electron-beam Welded Nickel-based Superalloy

张海泉¹, 赵海燕¹, 张彦华², 李刘合², 张行安³

(1 清华大学, 北京 100084; 2 北京航空航天大学, 北京 100083;

3 北京航空材料研究院, 北京 100095)

ZHANG Hai-quan¹, ZHAO Hai-yan¹, ZHANG Yan-hua², LI Liu-he², ZHANG Xing-an³

(1 Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2 Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

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

摘要: 利用金相分析和扫描电镜对镍基高温合金电子束焊接热影响区微裂纹行为进行了分析。研究发现, 熔合线附近的热影响区产生大量液化裂纹和沿晶扩展的固相裂纹。液化裂纹起源于 MC 碳化物的组份液化而形成的晶界连续或半连续的低熔点共晶液化膜, 固相裂纹形成的则是高能电子束流的快速瞬态热冲击效应的直接结果。通过改善焊缝成形和提高焊接线能量有助于减小两类热影响区微裂纹倾向。

关键词: 电子束焊接; 热影响区微裂纹; 快速瞬态热冲击; 组份液化

中图分类号: TG402; O346.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)03-0022-04

Abstract: The microfissuring behaviors in the heat-affected zone (HAZ) of electron beam (EB) welded nickel-based superalloy GH 4133 have been studied by using analytical scanning electron microscopy (SEM). It is observed that considerable liquation microcracks and some other microfissures called solid-state microcrack initiate in the regions nearby the fusion line and propagate across the grain boundary. The microstructure observation in the microfissures suggests the liquation microcrack results from grain boundary liquation by constitutional liquation of MC carbides and formation of continuous and/or semi-continuous low melting liquid films, however, the occurrence of the solid-state microcracks can be attributed to the effect of ultrafast transit thermal shock introduced by high energy electron beam. Minimal the tendency of microcracks can be obtained by improving the shape of weld pool and enhancing the welding energy input.

Key words: electron beam welding; HAZ microfissuring; ultrafast transit thermal shock; constitution liquation

镍基高温合金电子束焊接构件及其修复件在现代新型航空发动机中的用量不断增长, 极大地改善了航空发动机的性能和使用寿命。电子束焊接的固有热冲击特性导致焊缝成形、焊缝中力的作用和焊缝金属熔析状态不同于常规的熔焊方法, 对于添加了大量复杂强化元素的高温合金, 电子束焊接热冲击很容易引起高温合金焊接接头的元素偏析和微裂纹损伤^[1,2]。已开展的高温合金电子束焊接与修复研究表明, 通过工艺参数优化和填丝合金化, 可以显著改善接头中的偏

析程度和消除焊缝凝固裂纹, 然而, 热影响区(HAZ)微裂纹则很难通过常规的方法发现和消除, 微裂纹的产生与扩展不仅取决于高温合金自身的冶金性能, 而且与高功率电子束焊热冲击引发的温度与热应力的急剧变化有着紧密的联系^[3]。电子束焊接修复接头中大量 HAZ 微裂纹的存在会导致接头性能降低, 引发疲劳裂纹和蠕变裂纹。本工作对 GH4133 高温合金电子束修复焊接的 HAZ 微裂纹行为进行了实验研究, 对于保证焊接接头质量和优化焊接工艺具有重要

意义。

1 焊接接头的显微组织分析

实验材料取自已服役 370h 某航空发动机涡轮盘,母材化学成分为(质量分数,下同): $\leq 0.07\% \text{C}$, $0.65\% \text{Si}$, $19.0\% \sim 22.0\% \text{Cr}$, $2.2\% \text{Al}$, $2.7\% \text{Ti}$, $2.65\% \text{Nb}$, $0.35\% \text{Mn}$, $\leq 2.5\% \text{Fe}$ 。采用板厚 7mm 的电子束堆焊接头,用 ZD150-15A 电子束焊机在真空下焊接,加速电压为 140kV,聚焦电流 434mA,工作距离 350mm,其它焊接参数参见文献[1]。焊后分别在垂直于焊接方向和平行于焊缝的表面截取试样,用醋酸、

硝酸和盐酸溶液腐蚀,进行金相观察、电镜分析以及能谱分析。

电子束焊缝形貌呈钉形(图 1a),焊缝内为树枝状铸造组织,少数晶粒与热影响区的晶粒联为一体。所有试样的热影响区均存在密集分布的沿晶微裂纹,并且裂纹相互连接及出现裂纹透入焊缝的现象。热影响区与母材组织为奥氏体晶粒,晶粒度级别均为 2.5~3 级。金相观察还发现,在母材、焊缝和热影响区的晶内和晶界都存在大量的第二相粒子和析出相(图 1b, c)。第二相粒子在合金中有两种分布形式,即晶内块状第二相沿晶界析出,导致晶界粗化。

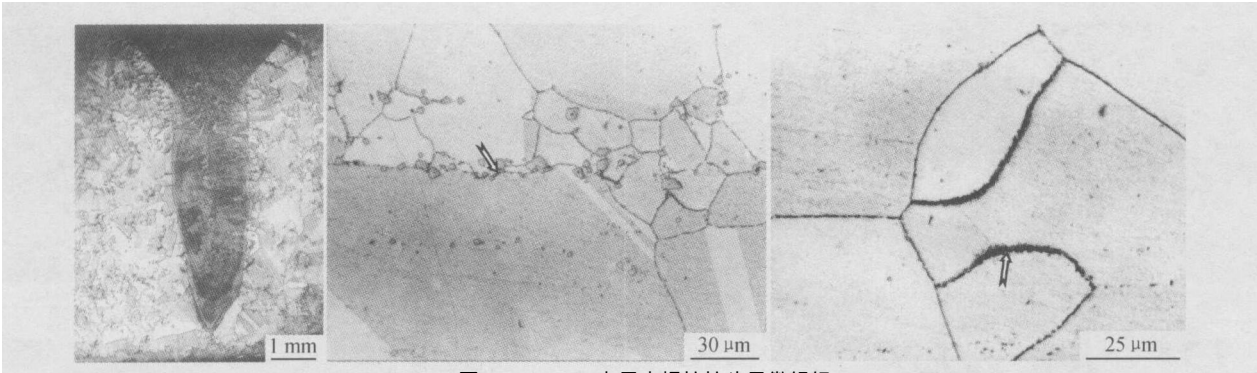


图 1 GH4133 电子束焊接接头显微组织

(a) 部分穿透焊缝形貌; (b) 晶界第二相; (c) 晶界析出物

Fig. 1 Microstructure of electron beam welded superalloy GH4133

(a) weld profile of partial penetration welding; (b) second-phase at grain-boundary; (c) educt at grain-boundary

利用能谱对接头组成元素进行了成分线分析,在横跨焊缝两侧 HAZ 的线分布浓度测量中发现,除 Fe 元素外,其余元素沿母材-热影响区-焊缝-热影响区-母材直线上的分布变化不大。表明热影响区的组织成分与母材相同。Fe 元素在焊缝区成分突然增加,可能是在电子束焊接过程中,焊缝金属一次结晶析出初析相是 δ 铁素体的缘故,由于 δ 铁素体的析出,焊缝中较少发生凝固裂纹。

此外,电子探针对母材第二相和析出相进行了分析, GH4133 合金电子束焊接接头中热影响区和焊缝析出相与基体相组成的含量列于表 1。观察发现,晶内第二相中没有 C,表明晶内第二相中不含碳化物或者含量极低,主要为 γ' 相,在晶界第二相中, C 的含量为 11.33%,表明含有大量的碳化物。C 是碳化物强化元素,在 γ 基体中的固溶度很小,而且不能进入 γ' 相,在晶界析出相中, C 的含量高达 11.53%,而且 Ti 和 Nb 的含量相对于第二相和基体成分明显提高,表明晶界析出相中除 γ' 相外,还存在 MC 和 M_{23}C_6 碳化物。由于 Ti 和 Nb 是与 C 元素具有高亲和力元素,可以推断,初生 MC 碳化物的组成形式为 $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}$ 。

表 1 接头析出相与基体相成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical components of the precipitated phase in superalloy GH4133 EBW joints (mass fraction/%)

	O	Si	Al	Nb	Fe	Ti	Cr	Ni
Base metal	9.67	0.43	1.30	0.63	0.68	2.39	22.1	62.8
Precipitated phase in HAZ	8.25	0.69	1.15	1.79	0.88	4.14	21.6	61.5
Precipitated phase in weld	10.5	0.94	1.37	2.66	0.52	5.03	20.3	58.7

由表 1 可见,在母材的析出相和第二相以及焊缝区和热影响区析出物中都有较高的 O 含量和一定的 Si, Fe 含量,这些元素是低熔点共晶元素,可能导致液化裂纹的产生,对合金强度和塑性造成不利影响。基体中也存在较高的 O 含量,可以设想这是由于长期服役的高温氧化的结果。但是与 γ' 相和碳化物等相比, O, Si, Fe 的组成含量低,对具有优良高温强度和塑性的 γ 固溶体以及 γ' 强化相的影响不大。

与母材相比,焊缝和热影响区析出相的 Ti, Nb 含量显著增大。高温合金中 Ti, Al, Nb 是进入 γ' 的元素,在 GH4133 中形成 $(\text{Ni}_{0.94}\text{Cr}_{0.06})_3(\text{Al}_{0.42}\text{Ti}_{0.47}$

Nb_{0.11}) 第二相强化, γ' 具有低温均匀析出(600~800℃), 高温(900~1010℃)就地均匀回溶的良好特性。因此, 焊缝和热影响区析出相中过高的 Ti, Nb 含量不是由 γ' 析出和熔化所致。高温合金中 Ti, Nb 的另一个作用是强烈形成 MC 型碳化物, 与 C 的高亲和力决定了形成的 MC 碳化物具有极高的熔点, 事实上 TiC 和 NbC 的熔化温度均在 3200℃以上^[4]。造成热影响区析出物中过量 Ti 和 Nb 的一个可能的解释是, MC 碳化物在亚固相区的组份液化导致了 Ti 和 Nb 在晶界上的富集。

2 电子束焊接 HAZ 微裂纹分布特征

低倍金相分析表明, GH4133 合金材料具有较大的电子束焊接裂纹敏感性, 图 2 示出了接头不同部位的典型裂纹分布。由图 2 可见, 在深度为 6~7mm 的焊缝轮廓上分布有 10~15 条左右的微裂纹, 绝大部分的裂纹长度在 0.1~0.25mm 以内, 属于微观尺度的热裂纹(图 2a)。长裂纹出现于钉形焊缝的钉头颈部和局部熔透焊缝中发生裂纹联通的钉尖部位(图 2b, c), 这两个部位的大裂纹的长度可达 0.4~0.5mm,

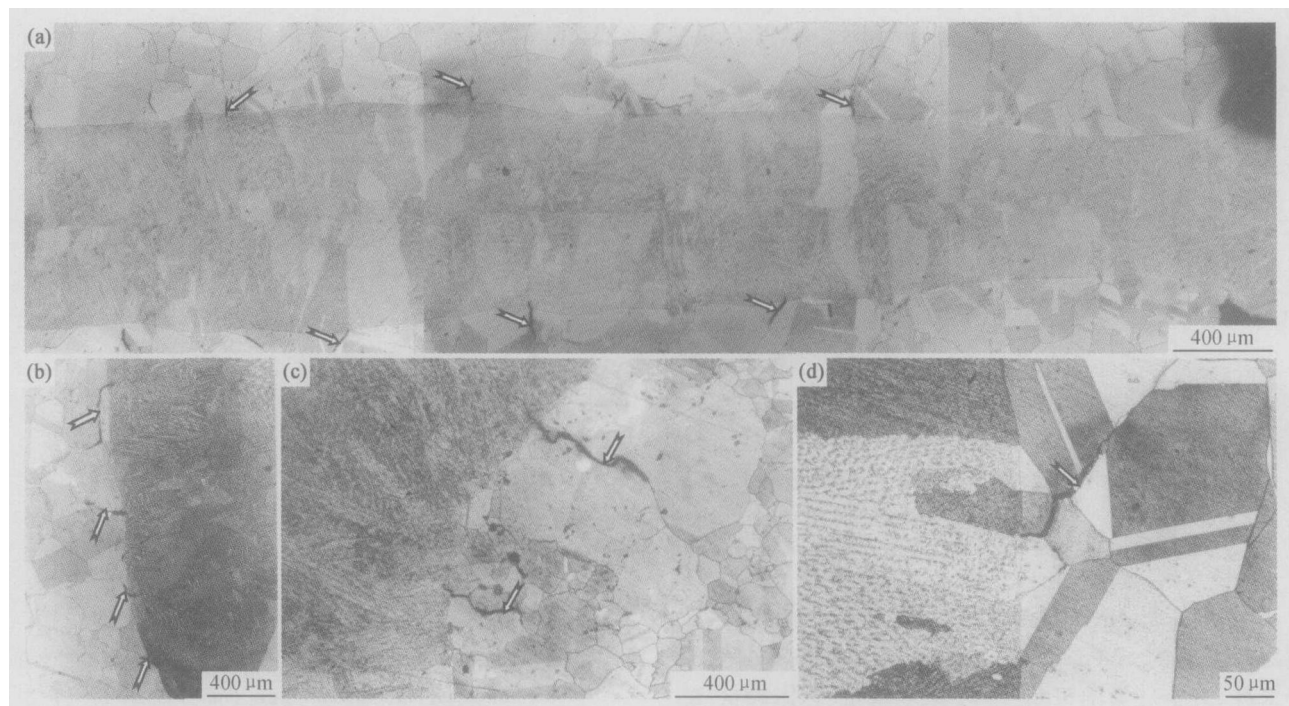


图 2 GH4133 电子束焊接热影响区的微裂纹分布形态

(a) 钉身中部裂纹; (b) 钉尖裂纹; (c) 钉头裂纹; (d) HAZ 沿晶微裂纹

Fig. 2 Microcracks distribution in superalloy GH4133 EBW joints

(a) microcracks in the middle nail; (b) microcracks in nail tip; (c) microcracks in nail head; (d) intergranular crack in HAZ

接近于宏观裂纹的尺度, 给接头强度造成极大的危害。

通过对不同焊接工艺的焊接微裂纹损伤分析发现, 接头中的微裂纹都发生于熔合线附近的热影响区, 焊缝中未发现微裂纹, 但是有部分热影响区微裂纹穿过熔合线透入焊缝。综合比较多个试样不同部位的裂纹密度发现, 热影响区微裂纹的分布依赖于焊缝形貌, 在熔透深度相同的情况下, 微裂纹的严重程度随焊缝宽度的增大而减轻。对于典型的钉形焊缝而言, 在焊缝根部的钉尖部位微裂纹分布密度最大; 钉头颈部次之; 钉形焊缝的中部附近热影响区微裂纹分散均匀分布, 而且裂纹尺度小。微裂纹一般在熔合线附近的近

缝区形核, 并在热影响区内沿熔合线外法线方向扩展, 在稍远的热影响区扩展受阻而止裂。在钉形焊缝的钉尖部位, 裂纹形核和扩展不稳定, 微裂纹倾向于沿深度方向扩展, 可能发生微裂纹的贯通而发展为宏观裂纹。显然, 钉尖不稳的裂纹形核和扩展与不稳定的部分穿透电子束焊接的“钉尖”现象有关。

在高倍金相和扫描电镜下清晰可见微裂纹中存在连续或间断分布的填充物和析出物, 此外, 如图 2d 所示, 部分裂纹的底部还可见球状物。仔细分析发现, 伸入焊缝的微裂纹中的填充物是熔池中的金属液体向晶界浸灌的结果。部分熔化区的晶粒在高温下长大, 导致熔池液体沿晶界向 HAZ 晶间间隙浸渗, 形成液体

填充的愈合晶界,愈合晶界由晶间液膜组成^[5]。由于金属材料在高温下处于无强度和低塑性状态,冷却过程中晶界受拉应力的作用而发生断裂,裂纹形态如图 3a 所示。显然,这些微裂纹的形核与愈合晶界的液膜有关,是一种浸渗性液化裂纹。

更大量的微裂纹发生于近缝的热影响区,微裂纹没有透入焊缝,不存在熔池液体的浸渗。但是裂纹内连续分布的白色析出物表明此类微裂纹具有液化裂纹的特征(图 3b)。由于 GH4133 合金成分中形成低熔点共晶的元素受到限制,而且析出相分析表明相组成中的低熔点元素含量极低,因此在焊接热循环过程中发生晶间低熔共晶熔化的可能性不大。根据基体及析出相的组成

可以断定 HAZ 的晶界液化主要是由第二相的组元液化引起的^[6],因此大部分液化裂纹属于组元液化裂纹。

此外,在部分热影响区微裂纹中仅存在少量间断的析出相或者没有析出相(图 3c),此类沿晶裂纹不具有液化裂纹的液膜特征和高温低塑性裂纹的二次晶界特征。前人已经在一些合金的电子束焊接 HAZ 中发现了此类裂纹,而在常规熔化焊中尚未见到这方面的报道,由于其形成机理还不清楚,因此,一般称为固态裂纹或者沿晶微裂纹^[7]。本文作者研究认为,这种固态沿晶微裂纹形成原因是,电子束焊接热冲击驱动空位和位错聚集成形成孔穴,在高温渗透变形作用下发生孔穴的沿晶界扩展所致。

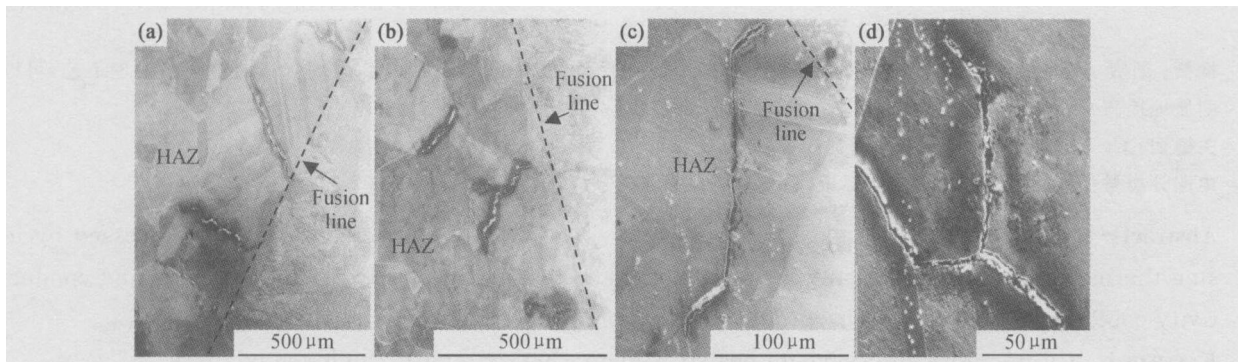


图 3 热影响区微裂纹类型

(a) 浸灌液化裂纹; (b) 组元液化裂纹; (c) 晶界渗透裂纹; (d) 三晶交界裂纹

Fig. 3 Microfissuring mode in the HAZ of electron beam welded nickel-base superalloy

(a) irrigating liquation crack; (b) constitutional liquation crack; (c) grain-boundary penetration crack; (d) three-crystal adjacent crack

在三晶交界处微裂纹扩展受阻,并且由于拉伸热应力作用的局部性,微裂纹扩展 1~2 个晶界距离后通常发生止裂。但是,在高能电子束的高强度突发性快速瞬态热冲击作用下,近缝区三晶交界处有可能引发显著的应力和应变集中,导致微裂纹在三晶交叉处沿分支晶界扩展,图 3d 示出了热影响区中的三晶交界微裂纹,三晶裂纹可能由晶界液膜引起,也可能由渗透变形中的晶界滑动形核,受热应力激发而扩展。

镍基高温合金热影响区微裂纹敏感性受到包括组织成分、焊缝形貌、焊接拘束条件和焊接工艺参数等多种因素的制约,改变焊接参数、调整线能量、加偏摆扫描束和焊后热处理均不能消除合金中的焊接热影响区微裂纹^[8],工艺实验和显微组织分析表明,在降低焊接速度、增大焊接电流和扫描偏摆情况下,微裂纹的严重程度有所减弱,表明微裂纹的产生与急剧加热和快速冷却的电子束焊接热循环过程有着密切关系,良好的焊缝成形和降低焊接速度以提高焊接线能量有利于改

善接头的热影响区的微裂纹倾向。

3 结论

(1) 镍基高温合金电子束焊接接头具有较大的裂纹敏感性,大量微裂纹在熔合线附近的粗晶晶界形核并扩展 1~2 个晶界距离,在钉形焊缝的钉头颈部和钉尖部位裂纹密集且容易形成复合裂纹和宏观短裂纹,对结构完整性和接头力学性能构成严重威胁。

(2) 镍基高温合金电子束焊接热影响区的微裂纹主要由液化裂纹和固相裂纹两种类型的沿晶微裂纹组成,液化裂纹起源于 MC 碳化物的组份液化而形成的晶界连续或半连续的低熔点共晶液化膜,高能电子束流快速瞬态热过程中波动扩展的峰值温度和热应力引起的动态热冲击效应是固相裂纹产生的根源。

(3) 热影响区微裂纹分布特征与熔合区形状和焊接线能量有着密切的关系,通过改善焊缝成形和减小焊接速度有助于减小两类热影响区微裂纹倾向。

(下转第 64 页)

- 电子显微分析[J]. 电子显微学报, 2002, 4(21): 455-460.
- [21] 樊建锋, 杨根仓, 刘新宝, 等. 深过冷 $\text{Al}_{72}\text{Ni}_{12}\text{Co}_{16}$ 合金的组织演化及单相准晶的生成[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 344-348.
- [22] 刘新宝, 杨根仓, 樊建锋, 等. 准晶 $\text{Al}_{72}\text{Ni}_{12}\text{Co}_{16}$ 合金在特殊涂层中的深过冷及其凝固组织[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 349-352.
- [23] 胡德林. 金属学原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995: 92.
- [24] KIMURA H M, SASAMORI K, INUOE A. Formation, microstructure and mechanical properties of Al-Fe base quasicrystalline alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 294-296: 168-172.
- [25] INUOE A, KIMURA H M, MASUMOTO T. Formation, thermal stability and electrical resistivity of quasicrystalline phase in rapidly quenched Al-Cr alloys[J]. J Mater Sci, 1987, 22: 1758-1768.
- [26] INUOE A, KIMURA H M. High elevated-temperature strength of Al-based nanoquasicrystalline alloys[J]. Nanostructured Materials, 1999, 11(2): 221-231.
- [27] ABE E, TSAI A P. Structure of a metastable Al_3Ni decagonal quasicrystal: comparison with a highly perfect $\text{Al}_{72}\text{Ni}_{20}\text{Co}_8$ [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 342: 96-100.
- [28] KIM S H, KIM B H, LEE S M, et al. On the phase transitions of the quasicrystalline phases in the Al-Cu-Fe-Co alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 342: 246-250.
- [29] FLUCKIGER T, MICHLMAYR T, BIELY C, et al. Structural transitions at the surface of the decagonal quasicrystal Al-Cr-Ni[J]. Applied Surface Science, 2003, 212-213: 43-46.
- [30] REYES-GASGA J, GARCIA R, JOSE-YACAMAN M. Electron-beam-induced structure transformation of the quasicrystalline phase of the AlCuCoSi alloy[J]. Radiat Phys Chem, 1995, 2(45): 283-291.
- [31] ZUMKLEY T, GUO J Q, TSAI A P, et al. Diffusion in quasicrystalline Al-Ni-Co and Al-Pd-Mn[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 294-296: 702-705.
- [32] KUPSCH A, MEYER D C, GILLE P, et al. Evidence of phase transition in decagonal Al-Cr-Ni at low temperatures[J]. J Alloys Comp, 2002, 336: 154-158.
- [33] 张利明, 董闯. 准晶材料性能及应用研究现状[J]. 材料导报, 2000, 14(1): 22-24.
- [34] SHEK C H, HE G, BIAN Z, et al. Effect of composition and cooling rate on structures and properties of quenched or cast Al-V-Fe alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2003, 357: 20-26.
- [35] DUBOIS J M, KANG S S, MASSIANI Y. Application of quasicrystalline alloys to surface coating of soft metals[J]. J Non-cryst Solids, 1993, 153-154: 443-445.
- [36] POPOVIC D, NAUMOVIC D, BOVET M, et al. Oxidation of Al-Pd-Mn quasicrystal surfaces[J]. Surface Science, 2001, 492: 294-304.
- [37] TSAI A P, AOKI K, INUOE A, et al. Synthesis of stable quasicrystalline particle dispersed Al base composite alloys[J]. J Mater Res, 1993, 8(1): 5-7.
- [38] VIANO A M, STROUND R M, GIBBONS P C, et al. Phys Rev, 1995, 135(17): 12026.
- [39] LEES M, JUNG J H, FLEURY E, et al. Metal matrix composites reinforced by gas atomised Al-Cu-Fe powders[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 294-296: 99-103.
- [40] MASUMOTO T, INUOE A, WATANABE, et al. High strength aluminum alloy[P]. USA Patent: 5458700, 1995.
- [41] RDIGER A, KSTER U. Corrosion behavior of Al-Cu-Fe quasicrystals[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 294-296: 890-893.
- [42] 董闯. B2 基准晶类似相的结构及摩擦行为[J]. 大连理工大学学报, 1999, 2(39): 247-253.
- [43] PHILLIPS B S, ZABINSKI J S. Frictional characteristics of quasicrystals at high temperatures[J]. Tribology Letters, 2003, 15(1): 57-64.

基金项目: 国家八六三计划资助项目(2003AA302520)

收稿日期: 2003-09-18; 修订日期: 2004-07-31

作者简介: 黄劲松(1968-), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 有色金属新材料, 联系地址: 中南大学粉末冶金国家重点实验室(410083)。

(上接第 25 页)

参考文献

- [1] RICHARDS N L, NAKKALIL R, CHATURVEDI M C. The influence of electron-beam welding parameters on heat-affected zone microfissuring in incoloy 903[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1994, 25(8): 1733-1744.
- [2] LUCAS M J, JACKSON C E. The welded heat-affected zone in nickel base alloy 718[J]. Welding Journal, 1970, 49(2): 46-54.
- [3] 张海泉. 电子束焊接瞬态热冲击效应研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.
- [4] 应慧筠, 施成根, 郝传勇, 等. GH150 合金电子束焊接热影响区液化与液化裂纹[J]. 金属学报, 1997, 33(9): 995-1001.
- [5] SHINOZAKI K, KUROKI H, LOU X J, et al. Comparison of hot cracking susceptibilities of various Ni-base, heat-resistant superalloys by U-type hot cracking test[J]. Quarterly Journal of Japan Welding Society, 1999, 17(2): 286-293.
- [6] 路文江, 中尾嘉邦, 筱崎贤二. 镍基合金焊接热影响区的液化裂纹[J]. 焊接学报, 1993, 14(3): 186-194.
- [7] CHATURVEDI M C, RICHARDS N L, NAKKALIL R, et al. Electron beam welding of a Ti-45Al-2Nb-2Mn+0.8 vol.% TiB₂ XD alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 1997, 239-240: 605-612.
- [8] 马翔生, 毛智勇. 涡轮盘材料电子束焊接性分析[J]. 电子束加工技术, 1999, SI(增刊): 30-33.

收稿日期: 2003-07-28; 修订日期: 2004-10-08

作者简介: 张海泉(1970-), 男, 博士后, 材料加工专业, 联系地址: 清华大学机械工程系(100084)。