

电子束热作用对 DD407 单晶熔凝区裂纹形成的影响

黄永德^{1,2}, 曾志强¹, 蔡祖鹏¹, 陈玉华¹, 何鹏²

(1. 南昌航空大学, 江西 南昌 330063)

(2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 使用电子束对 DD407 单晶高温合金进行焊接, 采用光学显微镜和扫描电镜观察分析了熔凝区裂纹形态及分布特征, 采用 EDS 测定了试样枝晶干与枝晶间区域的化学成分, 计算了元素的偏析比并分析了裂纹形成原因。结果表明: 在电子束热作用下, DD407 单晶熔凝区中主要产生纵向裂纹、横向裂纹、弧坑裂纹、晶间裂纹, 当其它工艺参数不变时, 熔凝区凝固裂纹含量随着电子束流的增大先增大后减小; DD407 单晶在焊接凝固过程中, 杂晶区合金元素偏析严重, 导致低熔点共晶组织聚集并形成低熔点液态薄膜, 在凝固收缩拉应力作用下, 使得杂晶区常形成凝固裂纹。

关键词: 单晶高温合金; 裂纹; 电子束焊

中图分类号: TG456.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)07-1920-04

镍基单晶高温合金因其优异的高温性能广泛应用于航空发动机和燃气轮机涡轮叶片的制造^[1,2]。涡轮叶片工作时受磨损、冲击、高温燃气和冷热疲劳等作用, 常常产生早期损伤, 如裂纹、烧蚀等, 致使叶片报废^[3,4]。相比更换新叶片, 采用焊接修复技术对损伤的叶片进行修复, 不仅节省了昂贵的单晶合金材料, 而且提高了发动机的使用效率。

单晶高温合金焊接修复的主要问题是修复区凝固组织中存在裂纹, 而裂纹的产生对于叶片来说是致命的。对于单晶叶片中裂纹的修复, 国内外研究者做了很多工作^[5,6]。其中 N. Wang^[7]等人在对单晶和双晶高温合金激光焊过程中的裂纹研究发现, 当焊缝区出现杂晶且晶界角超过 13° 之后焊缝中出现了裂纹。R. K. Sidhu^[8]等人采用取向成像显微技术研究钨极氩弧焊单晶叶片中出现的裂纹问题。实验发现, 尽管在单晶合金的熔合区中有杂晶存在, 但只要选取合适的焊接方法和工艺参数就能避免裂纹的出现。C. Churchman^[9]等人通过添加 3 种不同强度的填充材料对单晶叶片进行 TIG 焊接和电子束焊接, 实验结果表明添加填充材料后 TIG 焊缝凝固组织中杂晶区并未出现裂纹, 而在相同热作用下, 电子束焊缝的杂晶区却存在裂纹。以

上研究一定程度上揭示了不同焊接热作用对凝固裂纹形成的影响, 但缺乏对裂纹形成原因的分析。为进一步研究焊接热作用对熔凝区裂纹形成的影响以及裂纹形成原因, 本研究采用电子束对 DD407 单晶高温合金进行焊接, 研究了凝固组织中裂纹的分布特征、影响因素、形成原因, 为减少凝固组织中裂纹提供理论依据。

1 实验

实验材料为 DD407 镍基单晶高温合金, 其化学成分如表 1 所示。采用线切割将母材加工成 $\Phi 14 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的圆柱形试样。焊前, 用砂纸将待焊面磨光, 并用丙酮超声波清洗。电子束焊工艺参数如表 2 所示。

焊后沿横截面截取金相试样, 采用腐蚀剂 (8 g $\text{FeCl}_3 + 14 \text{ mL HCl} + 21 \text{ mL H}_2\text{O}$) 对试样进行腐蚀。然后使用光学显微镜 (OM) 和扫描电镜 (SEM) 观察裂纹形态及分布; 采用 EDS 测定试样枝晶干与枝晶间区域的化学成分。

2 结果与讨论

2.1 DD407 单晶高温合金裂纹敏感性分析

合金的裂纹敏感性主要由冶金因素和工艺因素决

表 1 DD407 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of DD407 superalloy ($\omega/\%$)

Element	Cr	Al	Mo	Ti	Co	W	Ta	C	Si	Fe	Zr	Ni
Content	7.88	5.94	2.24	2.00	5.5	5.03	3.63	0.002	0.034	0.025	0.021	Bal.

收稿日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51365044); 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题 (AWJ-M13-09)

作者简介: 黄永德, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: huangydhm@nchu.edu.cn

表 2 DD407 合金的焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters of DD407 superalloy				
F/Hz	V/mm s ⁻¹	U/kV	I _f /mA	I _b /mA
0.01	20	110	1850	1 ~ 5

定^[10]，从冶金因素上看，DD407单晶高温合金含有大量的合金元素，特别是沉淀强化元素Al、Ti的含量很高，且其γ'相的体积分数高达70%，在焊接凝固过程中极易形成(γ+γ')低熔点共晶组织。图1是DD407单晶的DSC曲线。实验在25~1400 °C温度范围内进行，其升温速率为10 °C/min。从DSC曲线中可以观察到DD407的固相线温度为1330.2 °C，液相线温度为1370.8 °C，合金的凝固温度为40.6 °C，文献[11]指出合金凝固温度范围越大，越容易形成凝固裂纹。由此可知，DD407单晶高温合金在焊接熔凝过程中若工艺参数选择不当，则极易产生裂纹。

2.2 电子束热作用下熔凝区的裂纹分布特征

典型电子束热作用下 DD407 单晶熔凝区裂纹形态及分布如图 2 所示。从图中可以看到在电子束热作用下，熔凝区裂纹分布比较广泛，在熔凝区表面有沿熔凝区中心纵向开裂的纵向裂纹和沿等轴晶间开裂的横向裂纹，以及呈放射状分布的弧坑裂纹，在熔凝区横截面上则存在沿杂晶晶界开裂的晶间裂纹。

2.3 电子束流对凝固裂纹形成的影响

在电子束热作用下，当其它工艺参数不变时，通过改变电子束流研究其对裂纹形成的影响，如图 3 所示。当电子束流为 1 mA 时熔凝区中无裂纹，随着电子束流的增大，熔凝区中的裂纹数量先增加后减小，且裂纹都位于杂晶区，图中黑线圈为杂晶区所在位置。而且，从图中可以发现裂纹的产生总伴随着杂晶的出现。由此可知，杂晶对凝固裂纹的产生有很大影响。

2.4 凝固裂纹的形成原因

由于凝固过程中溶质元素的非平衡分配，导致溶质元素在枝晶干和枝晶间的浓度不同，即产生了微观

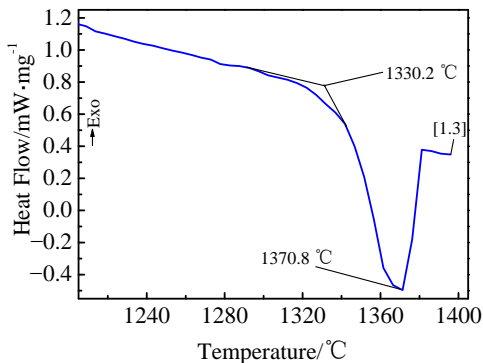


图 1 DD407 单晶高温合金的 DSC 曲线

Fig.1 DSC curve of DD407 superalloy

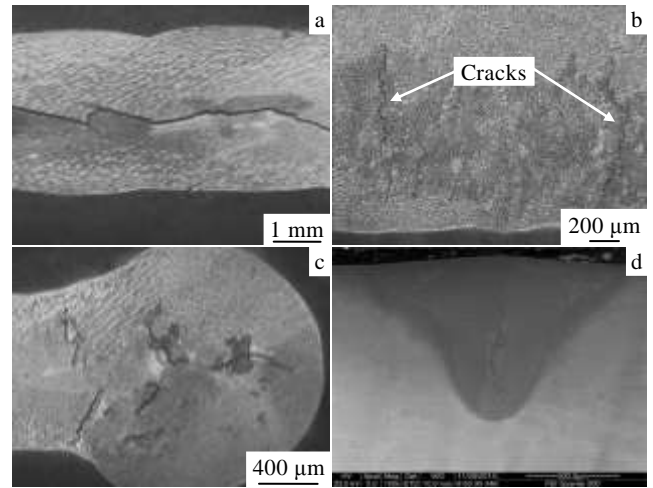


图 2 电子束热作用下裂纹形态及分布

Fig.2 Morphologies and distributions of cracks with the thermal effect of electron beam: (a) surface longitudinal cracks in the melted zone, (b) surface transverse cracks in the melted zone, (c) surface crater cracks in the melted zone, and (d) intergranular cracks

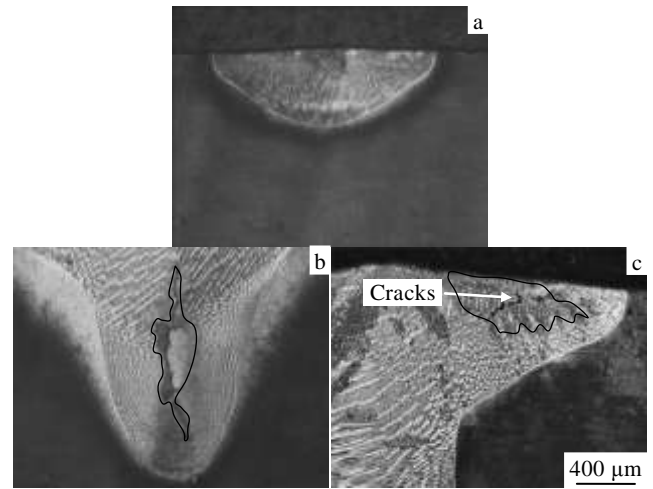


图 3 电子束流对裂纹的影响

Fig.3 Effect of the electron beam current on the cracks: (a) I_b=1 mA, (b) I_b=3 mA, and (c) I_b=5 mA

偏析。一般采用偏析比 k' ^[12] (segregation ratio) 表征合金元素在枝晶干和枝晶间的偏析程度，其定义如下：

$$k' = \frac{C_{DC}}{C_{ID}} \quad (1)$$

式中， C_{DC} 和 C_{ID} 分别为枝晶干中心和枝晶间成分。当 $k' < 1$ 时，表明元素偏析于枝晶间，为正偏析，偏析比越小则偏析越严重；当 $k' > 1$ 时，表明元素偏析于枝晶干，为负偏析，偏析比越大则偏析越严重；当 $k' = 1$ 时，则表示不存在微观偏析。图 4 为在加速电压 (V_a) 为

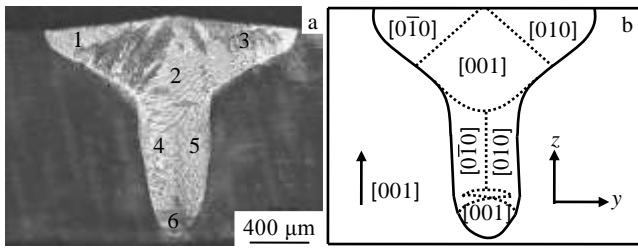


图 4 电子束热作用下熔凝区横截面

Fig.4 Cross-sectional area in fused region under the thermal effect of electron beam ($V_a=110$ kV, $V=20$ mm/s, $I_b=5$ mA, $I_f=1850$ mA): (a) microstructure infused region and (b) microstructure partition schematic

110 kV、电子束流 (I_b) 为 5 mA、焊接速度 (V) 为 20 mm/s、聚焦电流 (I_f) 为 1850 mA 下熔凝区横截面示意图。由于熔池内热流方向不一致，在熔池凝固的外延特性和择优取向的共同作用下，熔凝区内形成了几个不同晶体取向生长的凝固组织，其中 1, 3, 4, 5 为胞状晶，2, 6 为柱状晶。采用 EDS 对 [001], [010] 和 [010] 晶向区域的合金元素微观偏析进行测定。从图 5 可以看出，Al、Ti、Mo、Ta、W 的偏析比小于 1，为正偏析元素，这说明低熔点共晶元素 Al、Ti 在凝固过程会不断往枝晶间聚集。

对图 2d 裂纹断面进行 EDS 能谱分析与母材元素的含量进行对比，其结果列于表 3。从表中可以看出，裂纹处的 Al、Cr、W 元素含量比母材处显著增加，Co 元素的含量也有略微增加。W、Al 和 Cr 元素可以大量溶解于镍基体中，并且这些元素在胞晶、柱状晶及等轴晶间存在微观偏析，使得这些元素聚集在枝晶间或晶界处而形成低熔点共晶组织。在熔池凝固末期，低熔点共晶组织积聚于枝晶间或晶界处，形成一种所谓“液态薄膜”，又由于焊接是快速加热快速冷却

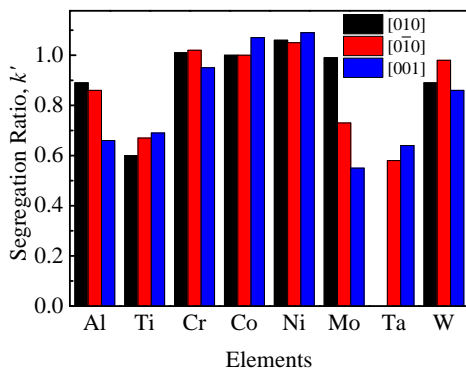


图 5 不同晶向区域单晶合金元素的偏析比

Fig.5 Segregation ratio of single crystal alloy elements in different crystal orientations

表 3 图 2d 中裂纹处 EDS 元素含量与母材含量
Table 3 EDS element contents of crack and the parent material contents in Fig.2d ($\omega/\%$)

Element	Cr	Ni	W	Al	Co
Crack	10.71	65.93	8.41	9.27	5.69
Parent materials	7.88	67.78	5.03	5.94	5.5

的过程，因此熔池金属凝固收缩产生的拉伸应力较大，若拉伸应力超过了该温度下熔池金属所具有的塑性值，液态薄膜就会被撕裂而形成凝固裂纹。综上所述，DD407 单晶高温合金焊接熔凝过程中，凝固裂纹是在液态薄膜和拉伸应力共同作用下形成的，而且液态薄膜是凝固裂纹产生的内在原因，拉伸应力是凝固裂纹产生的外在原因。

由图 2a、2d 可见，在熔凝区两侧的柱状枝晶向熔凝区中心定向生长，并且在熔凝区中心发生柱状枝晶向等轴晶转变，这使得溶质和杂质都聚集在熔凝区中心，凝固后期由于区域偏析导致低熔点共晶在熔凝区中心附近积聚，在拉伸应力作用下，就沿熔凝区中心产生纵向裂纹。

从图 3 可以看出，裂纹一般都存在于杂晶区，这表明杂晶区对裂纹的敏感性较大。杂晶的一个显著特征是具有大角度晶界，由于镍基单晶熔凝区中杂晶的含量比枝晶或胞晶少，因此熔凝区中大角度晶界的含量较少。当熔池金属凝固进入固液阶段时，一方面，由于晶界数量较少导致有害的低熔点共晶偏聚严重，不能完全填满拉伸应力作用下产生的间隙；另一方面，大角度晶界相互接触所需的时间远大于小角度晶界或枝晶，在这两者共同作用下导致杂晶区容易产生裂纹。由此可知，杂晶的出现不仅破坏了单晶体的完整性，而且容易诱发裂纹，导致单晶体的性能降低，因此有必要减小熔凝区杂晶的含量。

并且对于图 3，当电子束流为 1 mA 时，熔池热输入较小，熔宽和熔深均较小，熔池凝固时受到拉伸应力较小，又因为电子束流较小时，熔池凝固组织中的杂晶含量较低，因此电子束流较小时熔凝区中没有出现裂纹。当电子束流增大到 3 mA 时，熔池热输入增大，熔化区增加，由于热收缩产生的拉伸应力增大，且熔池凝固组织中杂晶的含量增多，加剧了低熔点共晶的偏析现象，这些因素的共同作用使得熔池凝固过程中形成裂纹的倾向显著提高。而当电子束流增大到 5 mA 时，熔凝区杂晶含量进一步增加，低熔点共晶偏聚也更严重，由于其数量多可以自由流动，并填充有裂口部位，这就起到了“愈合”作用，因此熔凝区裂纹减少。

3 结 论

1) 由于 DD407 镍基单晶高温合金具有较大的凝固温度区间, 较多的合金元素, 因此 DD407 镍基单晶在焊接凝固过程中具有较高的热裂纹敏感性。在电子束焊热作用下, DD407 镍基单晶熔凝区中主要会产生纵向裂纹、横向裂纹、弧坑裂纹、晶间裂纹。

2) 在电子束焊热作用下, 当其它工艺参数不变时, 随着电子束流的增大, 熔凝区凝固裂纹数量先增多后减少。

3) DD407 镍基单晶在焊接凝固过程中, 杂晶区合金元素偏析严重, 导致低熔点共晶组织聚集并形成低熔点液态薄膜, 在凝固收缩拉应力作用下, 使得杂晶区常形成凝固裂纹。

参考文献 References

- [1] Hu Zhuangqi(胡壮麒), Liu Lirong(刘丽荣), Jin Tao(金涛) *et al.* *Aeroengine*(航空发动机)[J], 2005, 31(3): 1
- [2] Wen Zhixun(温志勋), Gou Wenxuan(苟文选), Yue Zhufeng(岳珠峰). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(9): 1549
- [3] Daniel McGuire, Xiao Huang *et al.* *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*[J], 2010, 132: 1
- [4] Wang Gang, Zhang Binggang, Feng Jicai *et al.* *Welding & Joining*[J], 2008(1): 20
- [5] Xie Yujiang(谢玉江), Wang Maocai(王茂才), Wang Mingsheng(王明生). *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2010, 23(5): 1
- [6] David S A, Vitek J M, Babu S S *et al.* *Welding in the World*[J], 2000, 44(2): 38
- [7] Wang N, Mokadem S, Rappaz M. *Acta Materialia*[J], 2004, 52(11): 3173
- [8] Sidhu R K, Ojo O A, Richards N L. *Science and Technology of Welding & Joining*[J], 2013, 14(2): 125
- [9] Churchman C, Bonifaz E A, Richards N L. *Materials Science and Technology*[J], 2011, 27(4): 811
- [10] Dong Zhibo(董志波), Wei Yanhong(魏艳红), Liu Renpei(刘仁培). *Welding*(焊接)[J], 2005(11): 19
- [11] Hunziker O, Dye D, Roberts S M *et al.* *5th International Seminar on the Numerical Analysis of Weldability*[C]. Schloss Seggau: IIW. 1999
- [12] Liu Gang(刘刚), Liu Lin(刘林), Zhao Xinbao(赵新宝) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2010, 46(1): 77

Influence of Electron Beam Thermal Effect on Cracks Formation in Fused Region of Single Crystal Superalloys DD407

Huang Yongde^{1,2}, Zeng Zhiqiang¹, Cai Zupeng¹, Chen Yuhua¹, He Peng²

(1. Nanchang Hongkong University, Nanchang 330063, China)

(2. State Key Laboratory of advanced welding and connection, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Nickel base single crystal superalloys DD407 were welded by electron beam welding. The morphology and distribution of cracks were analyzed by optical microscopy and scanning electron microscopy. The chemical composition between dendrite arm and interdendritic area was measured by EDS. The segregation ratio of elements was calculated and the cause of cracks formation was analyzed. The results show that longitudinal cracks, transverse cracks, crater cracks and intergranular cracks are mainly produced in a fused region of DD407 with the thermal effect of the electron beam. With the increasing of electron beam current, the content of solidification cracks increases firstly and then decreases when other parameters remain unchanged. Low melting point eutectics gather and form a low-melting liquid film due to the serious segregation of alloying elements in miscellaneous grain zone. Therefore, the solidification cracks are often formed in miscellaneous grain zone with the solidification shrinkage tensile stress.

Key words: single crystal superalloys; cracks; electron beam welding

Corresponding author: He Peng, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Advanced Welding and Connection, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, E-mail: hepeng@hit.edu.cn