

825 镍基高温合金凝固裂纹敏感性评测

白睿¹, 夏春智^{1,2}, 郑淮北³, 张洪涛², 胡庆贤¹

(1. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212100; 2. 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;
3. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 成都 610300)

摘要: 【目的】凝固裂纹敏感性是目前国产镍基 825 合金工程化应用关注的重点技术问题。【方法】采用横向位移凝固裂纹试验(TMW 裂纹试验)以及相图计算方法对 2 种不同成分的镍基 825 合金的凝固裂纹倾向进行研究。并利用光学显微镜及扫描电镜对焊接接头凝固裂纹的断面形貌及显微组织进行分析,使用热力学相图软件 Pandat, 采用 Scheil 凝固模型计算两种合金的 $T-(f_s)^{1/2}$ 凝固曲线及凝固裂纹敏感指数。【结果】研究结果表明, 镍基 825 B 合金表现出比镍基 825 A 合金更高的凝固裂纹敏感性, 镍基 825 A 合金的凝固裂纹敏感指数为 3 452 °C, 而镍基 825 B 合金的凝固裂纹敏感指数为 4 074 °C。【结论】825 B 合金的凝固裂纹敏感性计算结果高于 825 A 合金, 与 TMW 测试结果吻合, 表现出更高的凝固裂纹敏感性。

关键词: 825 镍基合金; 凝固裂纹敏感性评测; TMW 裂纹试验; Scheil 凝固模型

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A doi: [10.12073/j.hj.20230816001](https://doi.org/10.12073/j.hj.20230816001)

Evaluation of solidification crack susceptibility of 825 Ni-base superalloy

Bai Rui¹, Xia Chunzhi^{1,2}, Zheng Huaibei³, Zhang Hongtao², Hu Qingxian¹

(1. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, Jiangsu, China;
2. State key Laboratory of Advanced Welding and connection, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. Chengdu Advanced Metal material Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, China)

Abstract: [Objective] Solidification crack sensitivity is a key technical problem in the engineering application of domestic Ni-based 825 alloy at present. [Methods] In this paper, transverse displacement solidification crack test (TMW) and phase diagram calculation method were used to study the solidification crack tendency of two kinds of Ni-base alloy with different composition. The fracture morphology and microstructure of solidification cracks in welded joints were analyzed by optical microscope and scanning electron microscope. Using the thermodynamic phase diagram software Pandat, the solidification curve and solidification crack sensitivity index of $T-(f_s)^{1/2}$ of the two alloys were calculated by Scheil solidification model. [Results] The results show that the solidification crack sensitivity of Ni-base 825B alloy is higher than that of Ni-base 825A alloy. The solidification crack sensitivity index of Ni-base 825A alloy is 3 452 °C, while that of Ni-base 825B alloy is 4 074 °C. [Conclusion] The calculated results of solidification crack sensitivity of 825B alloy are higher than those of 825A alloy, which is consistent with the TMW test results, and shows higher solidification crack sensitivity.

Key words: 825 Ni-base alloy, solidification crack susceptibility evaluation, TMW crack test, Scheil solidification model

0 前言

镍基合金作为具有优异耐热性、耐腐蚀性及抗氧化性的镍基耐热超合金(高温合金),已成为现代燃

气涡轮、航空发动机叶片、舰艇燃气轮机、火箭发动机等所必须的最重要金属材料^[1]。近年来,国产镍基合金发展迅速,但在合金纯净度、组织均匀度、加工工艺控制 and 产品合格率等方面仍与国外成熟产品存

收稿日期: 2023-08-16

基金项目: 先进焊接与连接国家重点实验室开放基金(AWJ-21M05)

在一定差距。而焊接裂纹敏感性较高是制约国产镍基合金材料在高精尖技术领域推广应用的关键技术瓶颈。

目前国内外对镍基合金凝固裂纹形成机理研究已经取得了一定进展,薄春雨等人^[2]采用横向可调拘束试验方法研究了 690 镍基合金焊带堆焊金属的凝固裂纹形成机理。研究表明,凝固裂纹的形成与晶界偏析密切相关。低熔点共晶相在晶界的偏析,导致堆焊金属的实际结晶温度降低,晶界处塑性储备减小,促使结晶过程中裂纹萌生并沿平直晶界扩展。王体刚等人^[3]分别从化学成分,物理性能和力学性能对镍基 Incoloy 825 合金进行焊接工艺分析,Incoloy 825 合金焊接时,由于 S, Si 等杂质在焊缝金属中偏析,形成低熔点共晶,在焊缝金属凝固过程中,这种低熔点共晶在晶界间形成一层液态薄膜,在焊接应力的作用下形成晶间裂纹。镍基合金凝固裂纹敏感性与其合金成分变化关系密切。针对 825 镍基合金成分变化时的凝固裂纹敏感性评测研究,对优化其裂纹敏感性、改善工艺焊接性具有重要意义。

如今应用最广泛的凝固裂纹测试方法是由 Savage 等人^[4]发明的可调拘束裂纹试验(纵向),以及基于可调拘束裂纹试验,由日本 Senda 等人^[5]发展的横向可

调拘束裂纹试验。其他凝固裂纹测试方法^[6-7]还有如鱼骨状可变拘束试验、控制速率拉伸试验(PVR)以及控制拉伸试验(CTW)等。而试验采用近期由 Wisconsin 大学的 Xia 等人^[8]开发的一种新型凝固裂纹测试装置(TMW)横向位移凝固裂纹试验,对不同合金成分的 A, B 两类镍基 825 合金进行凝固裂纹敏感性的对比评价。该方法具有以下特点:①试验过程中外力仅作用于熔池局部的糊状区,不作用于整个试板;②外力施加的速度比较缓慢,与工程实际的焊接工况更为接近;③能够区分研究裂纹萌生与裂纹扩展,避免液化裂纹等其他裂纹对试验结果的影响。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验采用 2 种不同成分的镍基 825 合金作为研究对象,分别为 A 合金和 B 合金。利用光谱法对 2 种镍基 825 合金的化学成分分别进行测试,其结果见表 1。试验前分别制备 25.4 mm×127.0 mm×3.0 mm 下试板及 76.2 mm×76.2 mm×3.0 mm 上试板,用于横向位移凝固裂纹试验,试板尺寸如图 1 所示。焊前对待焊试板进行严格的除油除锈处理,再用丙酮或无水乙醇清洗。

表1 2 种镍基 825 合金的化学成分 (质量分数, %)

Tab. 1 Chemical composition of two kinds of 825 Ni-base alloy (wt.%)

试样	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Fe	Cr	Mo	Co	Ti	V
825 A 合金	0.01	0.30	0.011	0.007	0.06	1.87	40.194	31.66	21.38	3.3	0.526	0.7	0
825 B 合金	0.01	0.49	0.011	0.007	0.1	2.03	39.6	31.93	22.17	2.69	0	0.985	0.191

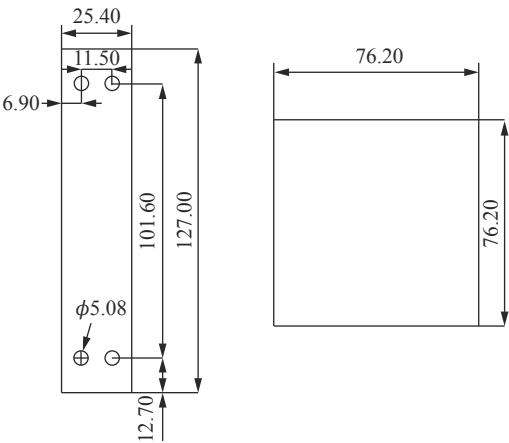


图1 横向位移裂纹试验的试板尺寸

Fig. 1 Size of test plate for transverse displacement crack test

1.2 TMW 试验

横向位移凝固裂纹试验(TMW 裂纹试验)是一种直接作用于焊缝凝固糊状区的焊接凝固裂纹试验方法,可用于评价金属材料(如高温合金、钢铁材料等)的焊接凝固裂纹敏感性^[9],其装置测试原理如图 2 所示。将 2 个待测平板搭接在一起,上板固定,焊接上下板形成的角焊缝,焊接的过程中以设定速率推动下板垂直于焊接方向移动,使处于凝固末期的焊缝金属产生横向应变而引起凝固裂纹。该方法以不同材料的不同推进速率作为评价凝固裂纹敏感性的指标。

文中采用横向位移凝固裂纹试验,采用双速度模式,对 2 种不同成分的镍基 825 合金的凝固裂纹倾向

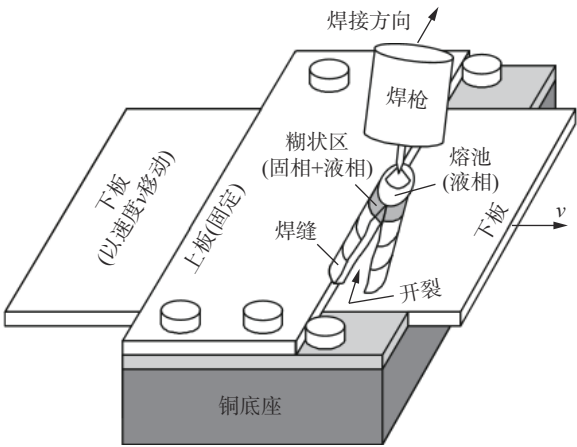


图2 横向位移凝固裂纹试验

Fig. 2 Transverse displacement solidification crack test

进行测试,焊接工艺参数见表2,其试验模式原理如图3所示。第一段采用0.5 mm/s的推进速度促使裂纹形成,然后突然降低到较低的推进速度观察裂纹是否扩展,测定致使焊缝裂纹扩展的推进速度范围(裂纹率0~100%),用于评价被测材料的凝固裂纹敏

表2 焊接工艺参数

Tab. 2 Welding process parameters

焊接 电流 I/A	焊接 速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	保护气体 流量 L/min	焊枪 倾角 $\theta/(^{\circ})$	钨极 直径 D/mm	钨针 尖端 $\alpha/(^{\circ})$
110	1.5	18	20	3.2	15

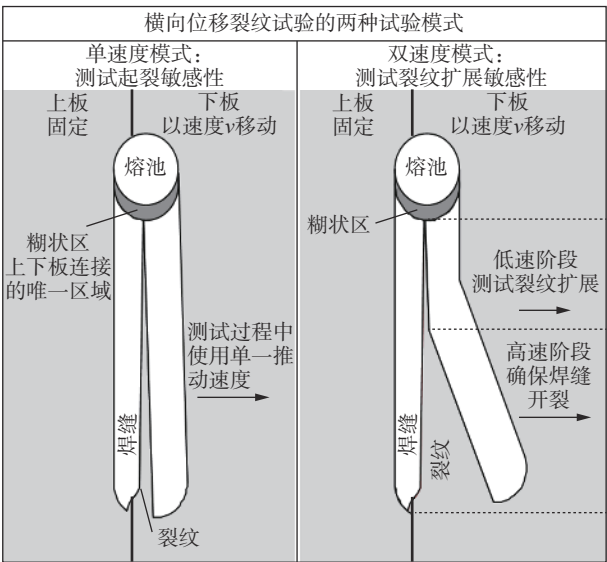


图3 TMW 裂纹试验双速度试验模式

Fig. 3 Dual velocity model of TMW crack test

感性。待被焊试件冷却后,测量焊缝表面的裂纹长度,用下述公式计算裂纹率。裂纹率= $L_1/L \times 100\%$,其中 L_1 为裂纹长度, L 为焊缝长度。

2 试验结果与分析

2.1 TMW 裂纹试验

表3为镍基825 A合金的横向位移凝固裂纹试验结果,给出了随推进速度变化的裂纹率变化情况。裂纹率最开始为0%(无裂纹),并随着推进速度 v 的增加而上升到100%(全裂纹)。临界速度 v_c 表示要发生全裂纹下板所需的最小移动速度。通过表3可知,在推进速度为0.10 mm/s及0.11 mm/s时,裂纹率为0%,焊缝尚未有凝固裂纹产生;当推进速度为0.12 mm/s时,裂纹萌生并扩展,裂纹长度占总体焊缝长度的91.7%;当推进速度达到0.13 mm/s及以上时,裂纹率达到100%,焊缝完全开裂。发生全裂纹下板所需的临界速度 v_c 为0.13 mm/s。通过致使焊缝凝固裂纹扩展的推进速度范围,判断其凝固裂纹的开裂区间。镍基825 A合金开裂区间如图4所示,阴

表3 镍基825 A合金裂纹试验结果

Tab. 3 Crack test results of Ni-based 825A alloy

试样 编号	第1阶段速度 $v_1/(mm \cdot s^{-1})$	第2阶段速度 $v_2/(mm \cdot s^{-1})$	裂纹率 $\delta(\%)$
1	0.5	0.10	0, 未开裂
2	0.5	0.11	0, 未开裂
3	0.5	0.12	91.7
4	0.5	0.13	100, 完全开裂
5	0.5	0.20	100, 完全开裂

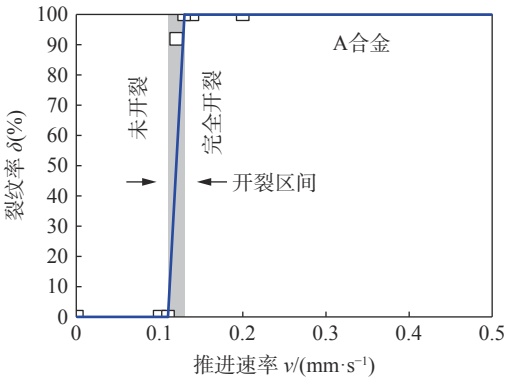


图4 镍基825 A合金开裂区间

Fig. 4 Cracking interval of Ni-based 825A alloy

影区域表示从无裂纹到全裂纹的过渡区域,开裂的推进速度区间为 0.11 ~ 0.13 mm/s。

表 4 为镍基 825 B 合金的横向位移凝固裂纹试验结果。在推进速度为 0.05 mm/s 时,裂纹率为 0%,焊缝尚未有凝固裂纹产生;当推进速度为 0.06 ~ 0.08 mm/s 时,裂纹萌生并扩展,裂纹长度占总体焊缝长度的 8.3% ~ 12.5%;当推进速度达到 0.09 mm/s 及以上时,裂纹率达到 100%,焊缝完全开裂。完全开裂所需下板临界速度 v_c 为 0.09 mm/s。镍基 825 B 合金开裂区间如图 5 所示。开裂的推进速度区间为 0.05 ~ 0.09 mm/s。根据横向位移凝固裂纹试验结果可知,A 类 825 合金的开裂区间显著小于 B 类 825 合金的开裂区间,镍基 825 B 合金表现出比镍基 825 A 合金更高的凝固裂纹敏感性。

A,B 两类 825 合金的凝固裂纹敏感性对比如图 6

表4 镍基 825 B 合金裂纹试验结果
Tab. 4 Crack test results of Ni-based 825B alloy

试样 编号	第 1 阶段速度 $v_1/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	第 2 阶段速度 $v_2/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	裂纹率 $\delta(\%)$
1	0.5	0.05	0, 未开裂
2	0.5	0.06	8.3
3	0.5	0.07	12.5
4	0.5	0.08	8.3
5	0.5	0.09	100, 完全开裂
6	0.5	0.10	100, 完全开裂
7	0.5	0.11	100, 完全开裂

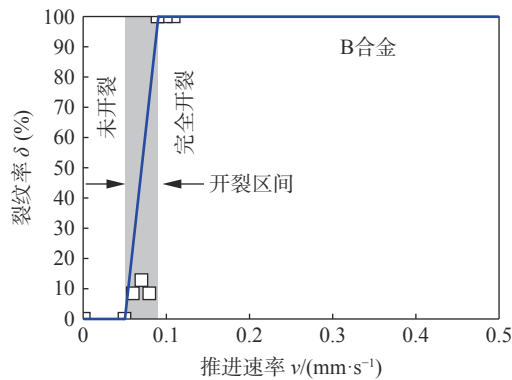


图 5 镍基 825 A 合金开裂区间

Fig. 5 Cracking interval of Ni-based 825A alloy

所示。可以看出,B 合金在推进速度小于 A 合金时就完全开裂,A 合金的完全开裂区比 B 合金小,即 B 合金的凝固裂纹敏感性比 A 合金高,在焊接过程中更容易产生凝固裂纹,从而使焊缝力学性能降低。

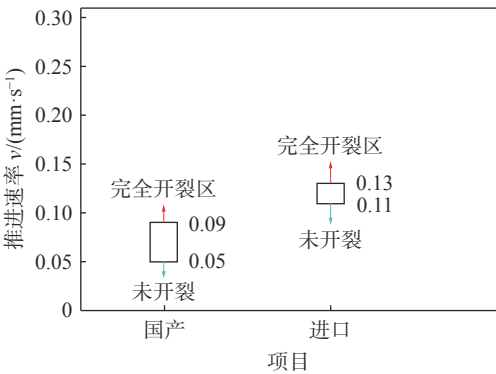


图 6 A 合金与 B 合金的凝固裂纹敏感性对比

Fig. 6 Comparison of solidification crack sensitivity between A alloy and B alloy

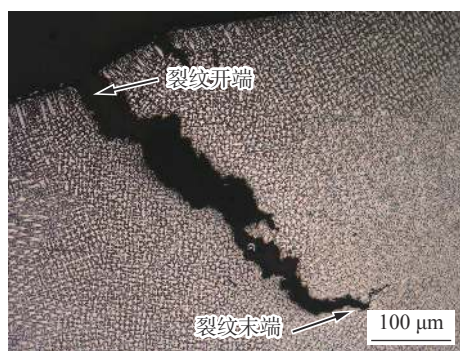
2.2 裂纹附近显微组织

凝固裂纹主要产生于熔池凝固后期,由于元素偏析,较多低熔点共晶化合物—残余液膜在晶界处形成,在凝固收缩和热收缩等焊接残余应力共同作用下,裂纹萌生并沿晶界扩展^[10]。低熔点共晶体聚集于粗大的柱状晶粒边界,降低焊缝强度。A、B 两类镍基 825 合金裂纹处显微组织如图 7 和图 8 所示。

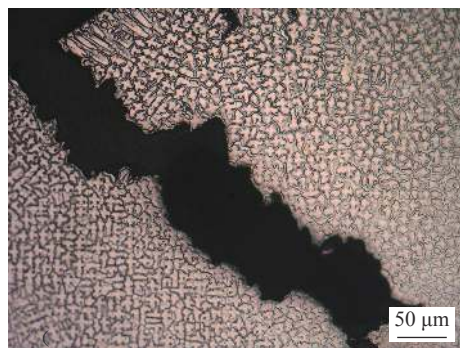
A 类镍基 825 合金 3 号试样,推进速度 0.12 mm/s,裂纹率 91.7%,显微组织如图 7 所示。晶粒较小,液膜较少,凝固裂纹内壁侧存有少量凹坑,且裂纹内壁侧相对较光滑,这说明相对于后者,该条件下凝固阶段较早结束,即残余液态薄膜较少,使得晶界强度显著提高,呈现出较低的凝固裂纹敏感性。

B 类镍基 825 合金 3 号试样,推进速度为 0.07 mm/s,裂纹率 12.5%,显微组织如图 8 所示。晶粒较大,液膜较多,凝固裂纹内壁侧极不平整,且会出现大量的明显的凹坑,而凹坑正是凝固过程中二次枝晶间的界面处,亦是低熔点共晶体—液态薄膜在晶界的残留之处,可显著降低晶界强度,导致凝固裂纹敏感性增加。

在凝固后期固相分数很高,枝晶生长相互结合,裂纹之间出现搭桥现象,晶间的搭桥对凝固裂纹的萌芽及扩展起着抑制作用。晶粒之间形成的搭桥具有一定的强度,会抵抗裂纹的产生,最后使枝晶分离形成不连续的微裂纹。



(a) A类合金 3 号试样显微组织(低倍)



(b) A类合金 3 号试样显微组织(高倍)

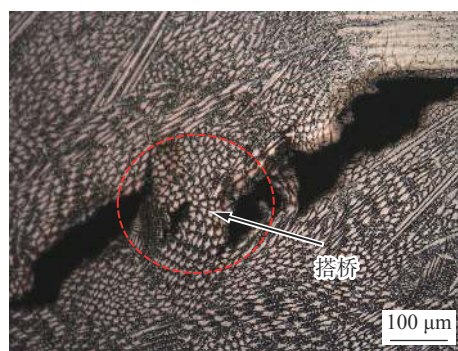
图 7 A 合金裂纹金相组织

Fig. 7 Metallographic structure of crack in A alloy. (a) microstructure of sample No. 3 of A alloy (low magnification); (b) microstructure of sample No. 3 of A alloy (high magnification)

2.3 裂纹断口形貌

焊缝金属结晶速度较快,凝固过程中容易在晶界内产生元素的偏析现象。两种镍基 825 合金试样焊缝裂纹断口形貌如图 9 所示。焊缝凝固裂纹断口处的组织以柱状晶形式生长,柱状晶彼此平行,具有明显的方向性,其二次晶晶粒大小均匀,排列有序,颜色较灰暗,且晶界清晰可辨,同一柱状晶上的二次晶彼此连接紧密。柱状晶附近析出细小的第二相颗粒,阻碍柱状晶的生长。不同区域,柱状晶的生长方向不同,晶粒大小也有差别。

镍基 825 A 合金 3 号试样,推进速度 0.12 mm/s,裂纹率 91.7%,断口形貌如图 9(a) 和图 9(b) 所示。断面较为平坦,基体上弥散分布着少量的点状析出物。其焊缝凝固裂纹断口处组织更加致密,呈现出明显的金属光泽,柱状晶与柱状晶之间连接紧密,排列规则,取向高度一致,二次晶晶粒细小且均匀,整个焊缝缺陷裂纹较少,从而其抗凝固裂纹敏感性性能更好。



(a) B类合金 3 号试样显微组织(低倍)



(b) B类合金 3 号试样显微组织(高倍)

图 8 B 合金裂纹金相组织

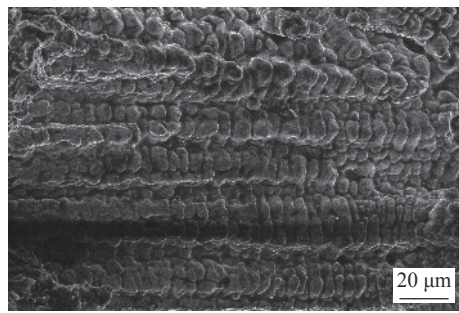
Fig. 8 Metallographic structure of crack in B alloy. (a) microstructure of sample No. 3 of B alloy (low magnification); (b) microstructure of sample No. 3 of B alloy (high magnification)

镍基 825 B 合金 3 号试样,推进速度 0.07 mm/s,裂纹率 12.5%,断口形貌如图 9(c) 和图 9(d) 所示。颗粒状析出物弥散分布在柱状晶界,焊缝凝固裂纹断口处组织较不规则,柱状晶之间存在较大的裂纹,并且析出了更多的第二相小颗粒,因此其凝固裂纹敏感性高于 A 类 825 合金,容易断裂失效。

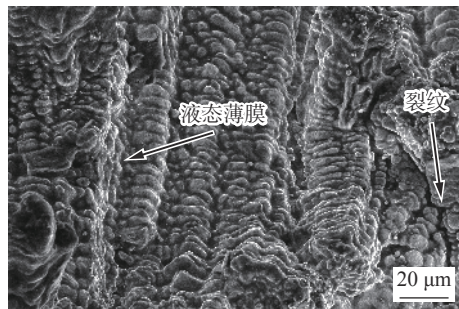
当晶粒在高温长大时,外面有液体包裹着晶粒,证明了凝固裂纹扩展时,液态薄膜的存在。发现其表面有一层液膜,在液膜表面有较少的皱褶出现,表面张力能有效抵抗收缩应力,达到阻止晶粒分离的目的。液态薄膜浸润晶粒边缘,在拉应力作用下,液膜被拉开,导致枝晶分离形成微裂纹。

2.4 Scheil 凝固模型计算

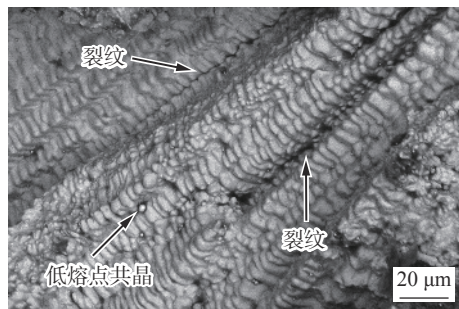
使用热力学相图软件 Pandat,采用 Scheil 非平衡凝固模型计算两种合金的 $T-(f_s)^{1/2}$ 凝固曲线及凝固裂纹敏感指数,结果如图 10 所示。使用 $|dT/d(f_s)^{1/2}|$ 接近 $(f_s)^{1/2}=0.98$ 作为评判凝固裂纹敏感性的指标^[11-12]。



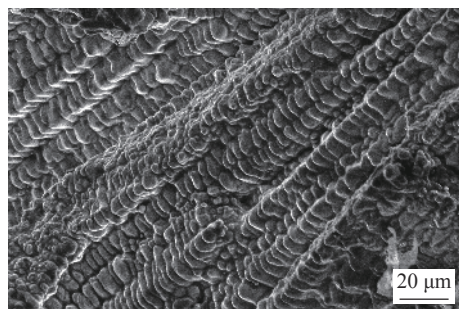
(a) A 类合金 3 号试样形貌 1



(b) A 类合金 3 号试样形貌 2



(c) B 类合金 3 号试样形貌 1



(d) B 类合金 3 号试样形貌 2

图 9 焊缝裂纹断口形貌

Fig. 9 Morphology of weld crack port. (a) morphology 1 of sample No. 3 of alloy A; (b) morphology 2 of sample No. 3 of alloy A; (c) morphology 1 of sample No. 3 of alloy B; (d) morphology 2 of sample No. 3 of alloy B

裂纹敏感性指数是以摄氏度为单位的最大陡度 $|dT/d(fs)^{1/2}|$, 该指数越大, 代表裂纹敏感性越高^[13]。

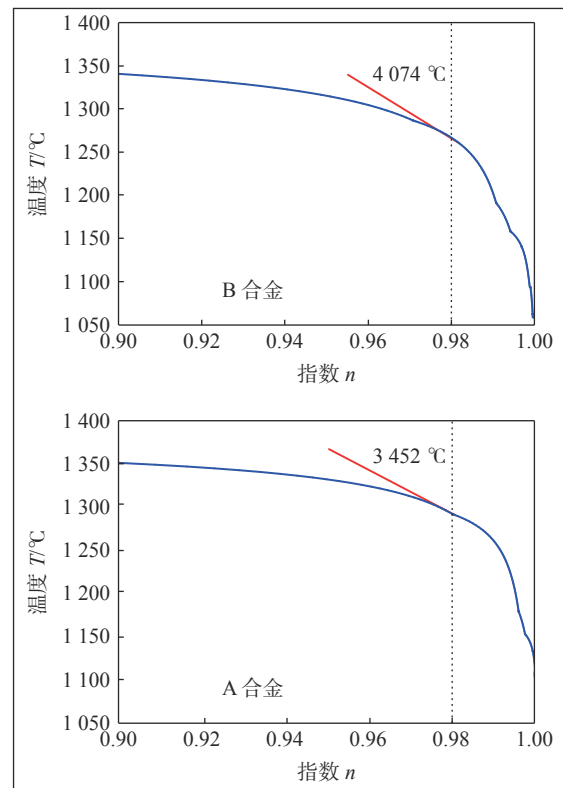


图 10 2 种镍基 825 合金的凝固裂纹敏感性指数

Fig. 10 Solidification crack susceptibility index of two Ni-based 825 alloys

A 类 825 合金的凝固裂纹敏感指数为 3 452 °C, 而 B 类 825 合金的凝固裂纹敏感指数为 4 074 °C。根据计算结果可知, B 类 825 合金的凝固裂纹敏感性计算结果高于 A 类 825 合金, 并与 TMW 测试结果吻合。镍基 825 B 合金相比镍基 825 A 合金凝固裂纹敏感性明显偏高。

3 结论

(1) 采用横向位移凝固裂纹试验测试表明, 镍基 825 A 合金的凝固裂纹敏感性速度区间为 0.11 mm/s 至 0.13 mm/s, 镍基 825 B 合金的凝固裂纹敏感性速度区间为 0.05 mm/s 至 0.09 mm/s。A 类 825 合金的开裂区间显著小于 B 类 825 合金的开裂区间, 镍基 825 B 合金表现出比镍基 825 A 合金更高的凝固裂纹敏感性。

(2) 通过显微组织及断口形貌分析, 镍基 825 B 合金晶粒粗大, 晶界处分布较多的低熔点共晶体-液态薄膜, 裂纹断口处组织较不规则, 柱状晶弥散分布大量的颗粒状析出物, 导致其具有较高的凝固裂纹

敏感性。镍基 825 A 合金晶粒较细小且分布均匀,残余液态薄膜较少,裂纹断口处组织致密,断面较为平坦,整个焊缝缺陷裂纹较少,从而其抗凝固裂纹敏感性更好。

(3)采用(Scheil)非平衡凝固模型计算两种镍基合金的 $T-(fs)^{1/2}$ 凝固裂纹敏感指数表明,A 类 825 合金的凝固裂纹敏感指数为 3 452 °C,而 B 类 825 合金的凝固裂纹敏感指数为 4 074 °C。B 类 825 合金的凝固裂纹敏感性计算结果高于 A 类 825 合金,并与 TMW 测试结果吻合。镍基 825 B 合金相比镍基 825 A 合金,凝固裂纹敏感性明显偏高。

参考文献

- [1] 路文江, 申尾嘉邦, 篠崎贤二. 镍基高温合金焊缝凝固裂纹敏感性研究 [J]. 甘肃工业大学学报, 1989(4): 31 – 37.
Lu Wenjiang, Yoshikuni Nakao, Kenji Shinozaki. Study on the Susceptibility of solidification crack in the nickel-base high-temperature alloy weld[J]. Journal of Gansu University of Technology, 1989(4): 31 – 37.
- [2] 薄春雨, 杨玉亭, 丑树国, 等. 690 镍基合金焊接结晶裂纹形成机理分析 [J]. 焊接学报, 2007(10): 69 – 72.
Bo Chunyu, Yang Yuting, Chou Shuguo, et al. Solidification cracking mechanism of 690nickel-based alloy surfacing metal. [J]Transactions of The China Welding Institution, 2007(10): 69 – 72.
- [3] 王体刚, 韦生, 陆传航, 等. 铁镍基 INCOLOY 825 合金焊接工艺研究 [J]. 钢结构, 2012, 27(S1): 385 – 388.
Wang Tigang, Wei Sheng, Lu Chuanhang, et al. Research on the welding procedure of the iron-nickel-based alloy INCOLO 825[J]. Steel Construction, 2012, 27(S1): 385 – 388.
- [4] Savage W F, Lundin C D. The varestraint test[J]. Welding Journal, 1965, 44(10): 433s – 442s.
- [5] Senda Tomio, Matsuda Fukuhisa, Takano Genta, et al. Fundamental investigations on solidification crack susceptibility for weld metals with Trans-Varestraint test[J]. Transactions of the Japan Welding Society, 1971, 2(2): 141 – 162.
- [6] Thomas Kannengiesser, Thomas Boellinghaus. Hot cracking tests-an overview of present technologies and applications[J]. *Welding in the World: Journal of the International Institute of Welding*, 2014, 58(3): 397 – 421.
- [7] Soysal T, Kou S. A simple test for assessing solidification cracking susceptibility and checking validity of susceptibility prediction[J]. *Acta Mater*, 2018, 143: 181 – 197.
- [8] Chunzhi Xia, Sindo Kou. Evaluating susceptibility of Ni-base alloys to solidification cracking by transverse motion weldability test[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2020, 25(8): 690 – 697.
- [9] Chunzhi Xia, Sindo Kou. Evaluating susceptibility of carbon steels to solidification cracking by transverse motion weldability test[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2020, 25(8): 706 – 711.
- [10] 熊丽, 王晓南, 张郑辉. Inconel 690 镍基合金焊接研究进展 [J]. 焊接技术, 2022, 51(3): 12 – 18.
Xiong Li, Wang Xiaonan, Zhang Zhenghui. Research progress of Inconel 690 nickel base alloy welding[J]. *Welding Technology*, 2022, 51(3): 12 – 18.
- [11] Kou S. A criterion for cracking during solidification[J]. *Acta Mater*, 2015, 88: 366 – 374.
- [12] Xia Chunzhi, Sindo Kou. Calculating the susceptibility of carbon steels to solidification cracking[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2021, 52(1): 460 – 469.
- [13] Liu Jiangwei, Henrique Pinho Duarte, Sindo Kou. Evidence of back diffusion reducing cracking during solidification[J]. *Acta Mater*, 2017, 22: 47 – 59.

第一作者: 白睿, 硕士; 主要从事凝固裂纹敏感性焊接方向的研究; 18342653140@163.com。

通信作者: 夏春智, 博士, 教授; 主要从事焊接冶金、新材料及特种连接技术方面的研究; cz_xia@126.com。

(编辑: 曲畅)

本文引用格式:

白睿, 夏春智, 郑淮北, 等. 825 镍基高温合金凝固裂纹敏感性评测[J]. 焊接, 2024(10): 1 – 7.

Bai Rui, Xia Chunzhi, Zheng Huaibei, et al. Evaluation of solidification crack susceptibility of 825 Ni-base superalloy[J]. *Welding & Joining*, 2024(10): 1 – 7.