

BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳水化损毁机理及其对定向凝固 TiAl 合金的影响

熊富豪¹, 陈光耀^{1,2}, 段保华¹, 毛 露¹, 张学贤¹, 邹星礼¹, 李重河^{1,2}

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室; 上海市钢铁冶金新技术开发应用重点实验室, 上海 200072; 2. 上海市特种铸造工程技术研究中心, 上海 201605)

摘 要: 以 BaZrO₃ 为面层材料和 Al₂O₃ 为背层材料, 在 1 600 °C 保温 8 h 烧结制备 BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳。通过光学显微镜、X 射线衍射仪、扫描电子显微镜结合能谱仪等手段观察了面层与背层界面结合层水化前和水化后的物相与显微结构变化, 分析了模壳内界面结合层的水化过程及损毁机理, 并通过 TiAl 合金定向凝固实验, 研究了模壳损毁对定向凝固合金的影响。结果表明, 模壳面层 BaZrO₃ 与背层 Al₂O₃ 在高温烧结过程中, 在界面结合处生成 BaAl₂O₄; 而 BaAl₂O₄ 在水化后生成 Ba(AlO(OH))₂、Ba₂Al₄(OH)₁₆ 和 Ba₃(Al(OH))₆, 导致晶粒体积变化破坏晶粒间结合力, 引发模壳裂纹的生成而导致损毁。在定向凝固过程中, 生成的裂纹会成为 TiAl 合金熔体渗透的通道, 而导致模壳出现熔体泄露, 并进一步导致了定向凝固的 TiAl 合金铸件中杂晶的出现。

关键词: 钡酸钡/氧化铝复合模壳; 钡酸钡; 水化; 钛铝合金; 定向凝固

中图分类号: TQ17 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)03-0819-09

网络出版时间: 2022-01-24



Hydration Damage Mechanism of BaZrO₃/Al₂O₃ Composite Mold and Its Effect on Directionally Solidified TiAl Alloy

XIONG Fuhao¹, CHEN Guangyao^{1,2}, DUAN Baohua¹, MAO Lu¹, ZHANG Xuexian¹, ZOU Xingli¹, LI Chonghe^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Special Steel & Shanghai Key Laboratory of Advanced Ferrometallurgy, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Special Casting Engineering Technology Research Center, Shanghai 201605, China)

Abstract: BaZrO₃/Al₂O₃ composite molds were prepared *via* sintering at 1 600 °C for 8 h with BaZrO₃ as a surface coating material and Al₂O₃ as a backup coating material. The phase composition and microstructure of the interfacial bonding layer between the face and back layers before and after hydration were investigated by optical microscopy, X-ray diffraction, and scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy. The hydration process and damage mechanism of the interfacial bonding layer in the mold were analyzed. The effect of mold damage on the directional solidification of TiAl alloy was also investigated *via* directional solidification tests. The results show that BaZrO₃ and Al₂O₃ generate BaAl₂O₄ at BaZrO₃/Al₂O₃ interface during the high-temperature sintering process; and BaAl₂O₄ generates Ba(AlO(OH))₂, Ba₂Al₄(OH)₁₆ and Ba₃(Al(OH))₆ after hydration, leading to the grain volume change to destroy the intergranular bonding force, the generation of cracks in the mold and the failure of the mold. In the directional solidification process, the generated cracks become a channel for melt penetration of TiAl alloy, resulting in a melt leakage from the mold and the appearance of heterogeneous crystals in the directionally solidified TiAl alloy castings.

Keywords: barium zirconate/alumina composite mold; barium aluminate; hydration; titanium aluminium alloy; directional solidification

收稿日期: 2021-06-15。 修订日期: 2021-09-20。

基金项目: 国家自然科学基金(52022054; 51974181; 52104305); 上海高校特聘教授(东方学者)岗位计划资助(TP2019041)。

第一作者: 熊富豪(1994—), 男, 硕士。

通信作者: 陈光耀(1987—), 男, 博士, 讲师。

李重河(1962—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2021-06-15. Revised date: 2021-09-20.

First author: XIONG Fuhao (1994—), Male, Master candidate.

E-mail: xiongfuhao@shu.edu.cn

Correspondent author: CHEN Guangyao (1987—), Male, Ph.D., Lecturer; LI Chonghe (1962—), Male, Ph.D., Professor.

E-mail: cgybless1@shu.edu.cn; chli@staff.shu.edu.cn

TiAl 合金密度仅为镍基合金的 50%，具有低密度、高比强度及高温强度等特点，其作为一种新型轻质工程材料，已逐渐应用在航空领域^[1-2]。但其室温塑形低、室温加工性能差以及 850 °C 以上使用的抗氧化能力不足及稳定性差等问题，极大的限制其在实际生产中的应用^[3-4]。TiAl 合金定向凝固技术的引入，可有效减小横向晶界的存在以提高其高温稳定性，而较多的航空发动机叶片材料也均使用定向凝固技术制备而成^[5]。目前，TiAl 合金定向凝固制备技术，主要有 3 种：电磁冷坩埚、光浮区和模壳法定向凝固^[6-9]。尽管电磁冷坩埚和光浮区法定向凝固技术在定向凝固 TiAl 合金时不会引起合金污染，但是两者均只能制备固定简单形状样品。这其中，模壳法定向凝固因为采用并不受形状和尺寸限制的陶瓷模壳，是唯一既能控制合金组织又能实现复杂形状 TiAl 合金制备的工程化应用的技术手段。但 TiAl 合金在熔融状态化学活性极高，这就需要模壳具有高热力学稳定性来抵抗熔体侵蚀。

近年来，氧化物模壳耐火材料由于其易加工和低成本，受到广泛关注。常见耐火材料有 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 CaO 、 Y_2O_3 。这其中， Al_2O_3 模壳成本低且工艺成熟，但造成熔体污染较为严重^[10]。 ZrO_2 模壳在高温下不稳定，很容易与合金形成一层无法剥离的黏结层^[11]。而只有 CaO 和 Y_2O_3 对 TiAl 合金熔体呈现较好的热力学稳定性；但 CaO 本身的亲水性导致模壳保存困难； Y_2O_3 热力学稳定性最好，但其抗热震性差，会进入 TiAl 合金中形成夹杂物^[12]。锆酸盐(BaZrO_3 和 CaZrO_3)作为一种高热力学稳定性耐火材料被引入到钛合金的熔炼制备中^[13-14]。贺进等^[15]通过使用 BaZrO_3 耐火材料感应熔炼 TiAl 合金，考察耐火材料与合金熔体在高温长时间接触的界面反应；发现合金中氧含量低于比同等条件下的 Y_2O_3 耐火材料制备的合金，且并未发现有夹杂物存在。陈光耀等^[16-17]通过 25 kg 级 BaZrO_3 坩埚中试化制备 TiAl 合金，得到的合金铸锭中氧含量为 0.078% (质量分数)，满足铸造 TiAl 合金氧含量标准 (小于 0.1%)。与此同时，李明阳等^[18]使用 BaZrO_3 为面层材料 + Al_2O_3 为背层材料制备复合模壳的技术应用于定向凝固 TiAl 合金，发现 BaZrO_3 复合型壳在定向凝固实验中能够保持好的抗热震性，并获得了 γ 和 α_2 的片层凝固组织。张浩等^[19]通过深入研究 $\text{BaZrO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合模壳制备过程中面层与背层的界面作用机理，指出复合模壳经高温烧结后， BaZrO_3 与 Al_2O_3 发生化学反应并在接触界面处形成 BaAl_2O_4 新相，进一步加强了面层与背层的结合。

通过调研，发现 BaAl_2O_4 具有易水化的性质，而该性质是否对模壳在定向凝固 TiAl 合金过程中的影响研究鲜有报道。

本研究通过制备 $\text{BaZrO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合模壳，对比研究了模壳水化前和水化后的宏观和微观形貌，微观组织结构和定向凝固 TiAl 合金后的结构变化，考察了模壳水化对模壳组成、微结构以及模壳在定向凝固过程中对 TiAl 合金组织的影响。

1 实验

1.1 模壳制备

面层涂料由平均粒径分别为 62 μm 和 18 μm 的电熔 BaZrO_3 耐火材料粉体按质量比 3:2 混合配制而成。以钇溶胶为面层黏结剂，分别将 BaZrO_3 粗细混合的粉体、少量 JFC 型表面活性剂 (0.3%) 和辛醇 (0.05%) 加入钇溶胶中配制成浆料，粉液比控制在 3.5:1.0，流杯黏度控制在 17~18 Pa·s。选取中温蜡为填充蜡型，将浆料均匀涂挂在填充蜡膜表面，待蜡膜涂挂面层充分干燥后涂挂过渡层。过渡层由面层涂料配以 60 目 (250 μm) 的 EC95 电熔 Al_2O_3 制备。背层浆料由 47 μm 的 EC95 电熔 Al_2O_3 粉和硅溶胶配制而成 (粉液比为 2.5:1)，撒砂骨料为 24 目 (700 μm) 的 EC95 电熔 Al_2O_3 ，背层反复涂挂 4 次后进行封浆。 $\text{BaZrO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合模壳的具体涂挂工艺见表 1。待模壳在空气中充分干燥后，采用高压脱蜡釜在 180 °C 和 7.2 MPa 下脱蜡 20 min。将脱蜡后的模壳置于硅钼棒高温烧结炉中在 1 600 °C 保温 8 h 进行烧结。考虑到模壳置于空气中的水化周期较长，本次研究采用将模壳置于 80 °C 的热水中保温 72 h 的加速水化实验；将水化后模壳置于烘箱中在 45 °C 进行干燥。随后，将水化前和水化后模壳分别进行冷镶嵌后在烘箱中进行快速凝固，随后将镶嵌样品进行切割打磨和抛光处理；这其中，所使用的清洁用的液体均为无水乙醇。

1.2 定向凝固实验

采用 Bridgman 法，以名义化学成分为 Ti-46Al-8Nb (摩尔分数) 的合金进行定向凝固实验，所用模壳为 $\text{BaZrO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合模壳。首先，通过 BaZrO_3 坩埚真空感应熔炼获取 Ti-46Al-8Nb 母合金铸锭，其所用原材料为海绵钛 (99.97%)、高纯铝块 (99.99 %)，及铝铌中间合金 Al-60%Nb (质量分数)。在高纯氩气环境下对 Ti-46%Al-8%Nb 母合金铸锭进行重熔，再将熔体倒入温度控制在 1 600 °C 条件下的 $\text{BaZrO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合模壳中静置 30 min，最后以 9 mm/min 的抽拉速率定向生长 TiAl 合金。

表 1 BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳制备工艺
Table 1 Preparation process of BaZrO₃/Al₂O₃ composite mold

Coat No.	Slurry			Stucco
	Binder	Filler	Additives	
1	Yttria sol	BaZrO ₃	Wetting agent (0.3%) Antifoaming agent (0.05%)	BaZrO ₃ (75–150 μm)
2	Yttria sol	BaZrO ₃	Wetting agent (0.3%) Antifoaming agent (0.05%)	BaZrO ₃ (75–150 μm) + (150–270 μm) (1:1)
3	Yttria sol	BaZrO ₃	Wetting agent (0.3%) Antifoaming agent (0.05%)	BaZrO ₃ (150–270 μm)
4	Yttria sol	BaZrO ₃	Wetting agent (0.3%) Antifoaming agent (0.05%)	BaZrO ₃ (180–380 μm)
5	Yttria sol	BaZrO ₃	Wetting agent (0.3%) Antifoaming agent (0.05%)	Al ₂ O ₃ (250 μm)
6–9	Silica sol	Al ₂ O ₃ (44 μm)	Wetting agent (0.3%) Antifoaming agent (0.05%)	Al ₂ O ₃ (700 μm)
10	Silica sol	Al ₂ O ₃ (44 μm)	Wetting agent (0.3%) Antifoaming agent (0.05%)	

BaZrO₃ filler is graded according to $m_{\text{BaZrO}_3(62\text{ }\mu\text{m})} : m_{\text{BaZrO}_3(18\text{ }\mu\text{m})} = 3 : 2$.

1.3 样品表征

采用 VHX-1000C 型宏观显微镜观察模壳水化前后的面层与背层界面结合形貌以及定向凝固后的 TiAl 合金宏观形貌。用 D8 advance, Bruker 型 X 射线衍射仪对模壳进行物相分析, 测试射线为 Cu-K α , 波长为 0.154 056 nm, 工作电压 40 mV, 工作电流 40 MA, 扫描角度 10°~90°, 步长 0.02°。用 FEI Nova Nano SEM 450 型场发射扫描电子显微镜分析观察模壳结构, 同时运用配备的 X 射线能谱分析仪测定样品中元素种类和含量。采用电火花切割机对定向凝固试棒进行切割, 并试样进行打磨、抛光后进行

腐蚀观察, 腐蚀液体积分数配比 HF:HNO₃:H₂O 为 1:1:18。

2 结果与讨论

采用 VHX-1000C 型宏观显微镜拍摄 BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳水化前后的面层与背层界面处宏观照片如图 1 所示。由图 1a 可以看出, 水化前模壳中面层 BaZrO₃ 与背层 Al₂O₃ 结合紧密, 未见分离和微裂纹的产生。而经过水化后模壳中面层与背层间出现明显的微裂纹, 同时, 面层与背层出现了明显的分离。

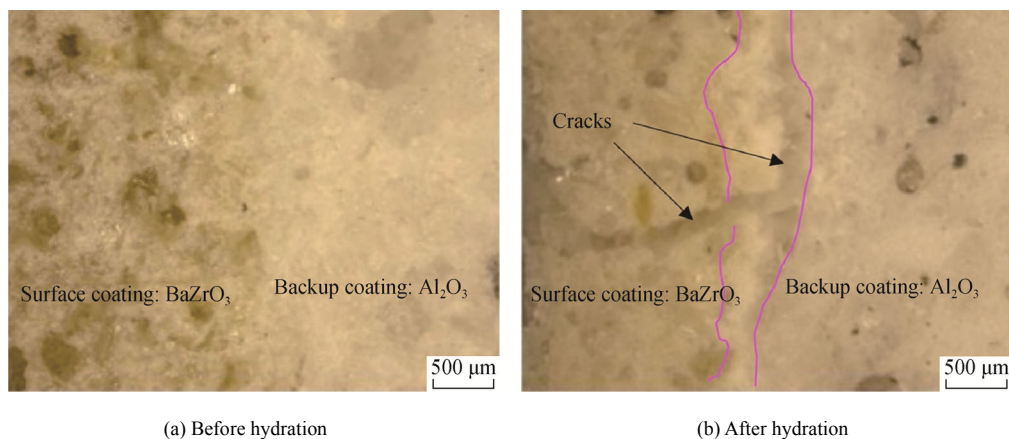


图 1 BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳水化前后的面层与背层界面处宏观图

Fig. 1 Macrostructure images of BaZrO₃/Al₂O₃ composite mold before and after hydration at the interface between the surface coating and the backup coating

图 2 为 BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳水化前后的面层与背层界面结合处的背散射图片以及元素 Al 和 Ba 的面扫描图。由图 2a 可以看出, 水化前模壳面层与背层界面是 3 层的复合结构, 结合元素 Al 和 Ba 的面扫描图(见图 2c 和图 2e)可知, 在过渡层处有部分元素 Al 和 Ba 有明显的重叠, 李明阳等^[18]

的研究指出, 该元素重叠区域为面层 BaZrO₃ 和背层 Al₂O₃ 的界面反应产物 BaAl₂O₄, 其反应方程式如下:



因为面层与背层发生化学反应, 而导致两者以

化学结合力的作用进行结合,使得过渡层呈现致密的结构,并提高了模壳面层与背层的结合强度。采用《拉开法附着力试验》GB/T 5210—1985 测得复合模壳面层与背层间结合力为 2.898 MPa。由图 2b 可以看出,水化后模壳面层与背层界面结合处出现了裂纹,通过面扫描图 2d 和图 2f 中元素 Al 和 Ba 的重叠程度可看出模壳水化后过渡层厚度由水化前

686 μm 增加至 931 μm ,这说明面层与背层出现了明显的分离,使得面层与背层结合紧密程度降低,水化作用破坏了模壳面层与背层的结合强度。

图 3 为 $\text{BaZrO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合模壳水化后面层与背层界面结合处 XRD 谱。由图 3a 可以看出,烧结前模壳面层与背层界面结合处主要由 BaAl_2O_3 、 BaZrO_3 和少量的 t-ZrO_2 及 m-ZrO_2 组成。而从图 3b

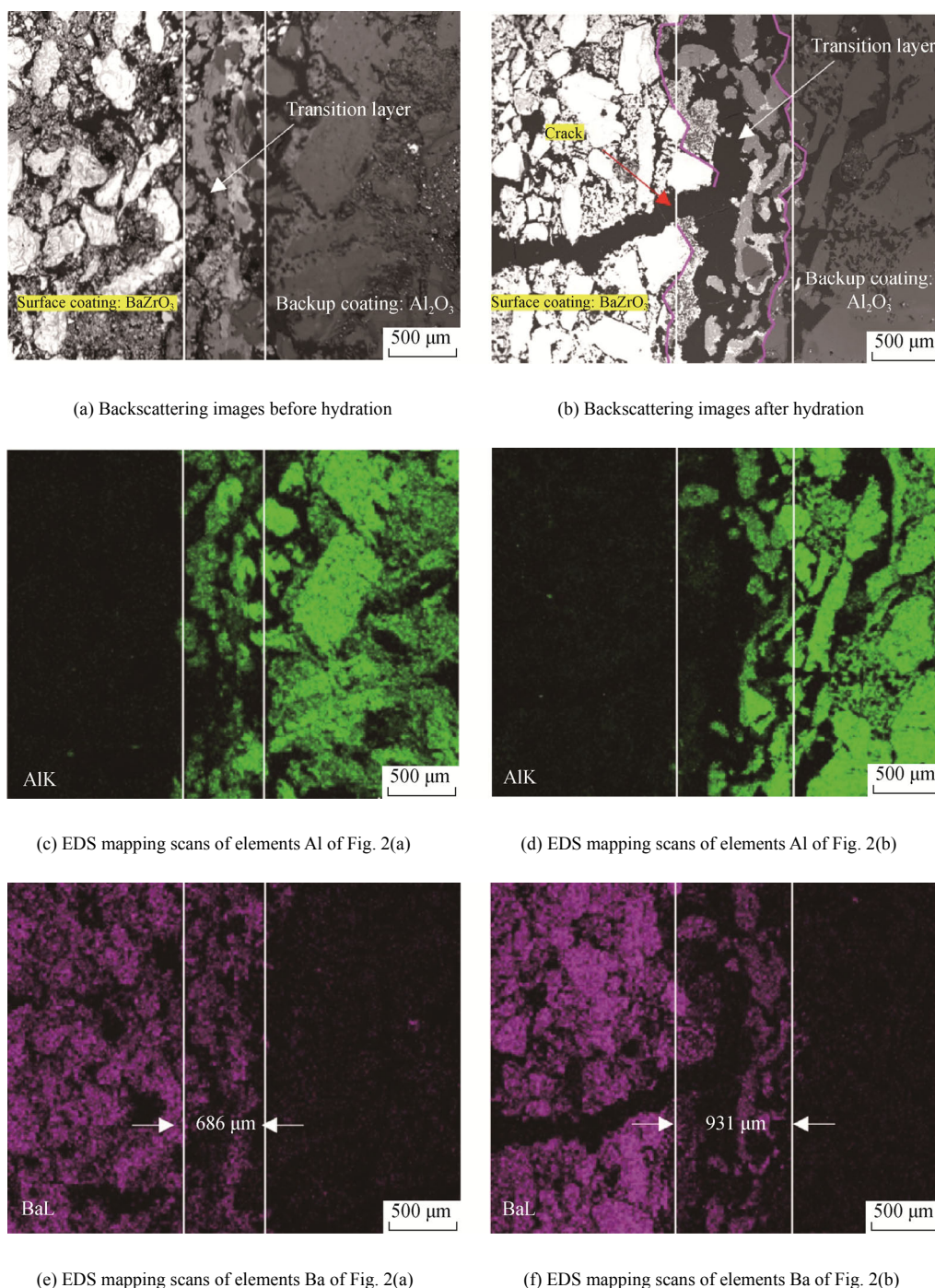
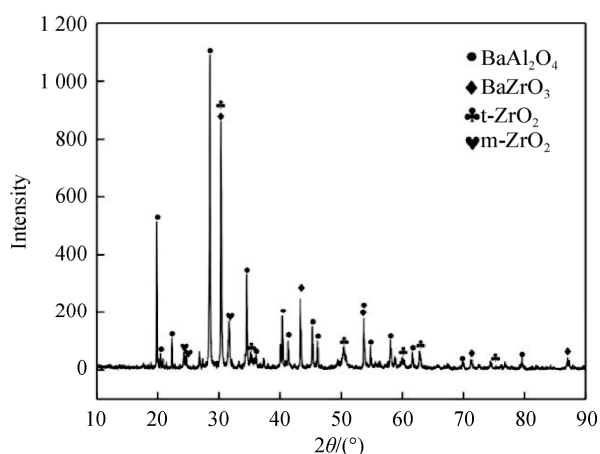
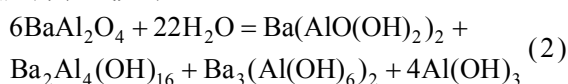


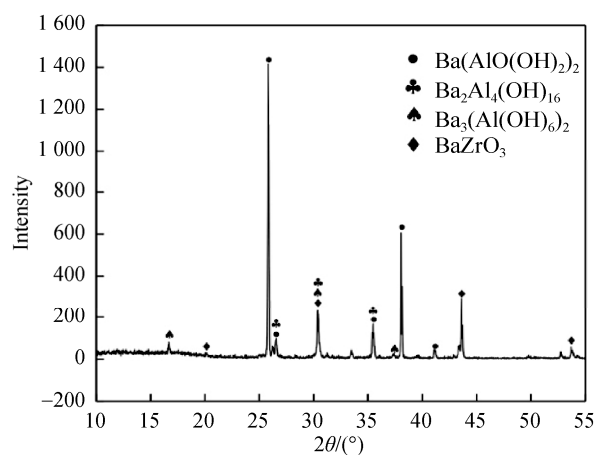
图 2 $\text{BaZrO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合模壳水化后面层与背层界面结合处背散射图及元素面扫描图

Fig. 2 Backscattering images and the corresponding EDS mapping images at the interface between the surface and backup coatings of $\text{BaZrO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite molds before and after hydration

可以看出, 模壳水化后界面结合处主要由 BaZrO₃、Ba(AlO(OH))₂、Ba₂Al₄(OH)₁₆ 和 Ba₃(Al(OH))₆)₂ 相组成。其中, BaAl₂O₄ 的密度(4.44 g·cm⁻³)要大于 Ba(AlO(OH))₂ 的密度(3.3 g·cm⁻³)、Ba₂Al₄(OH)₁₆ 的密度(3.32 g·cm⁻³)和 Ba₃(Al(OH))₆)₂ 的密度(3.53 g·cm⁻³), 由李景磊等研究可知^[20-21], BaAl₂O₄ 易与 H₂O 发生化学反应, 生成氢氧化物, 根据反应产物可推出水化反应方程式如下:



(a) Before hydration



(b) After hydration

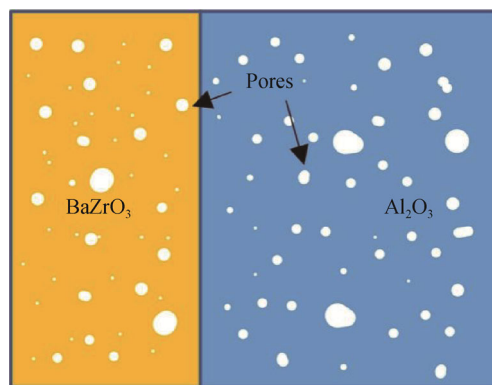
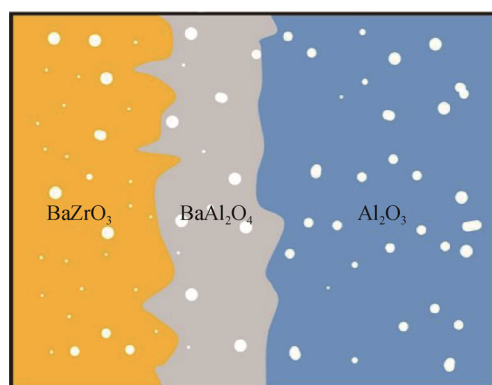
图 3 BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳水化前后面层与背层界面结合处 XRD 谱

Fig. 3 XRD patterns at the interface between the surface and backup coatings of BaZrO₃/Al₂O₃ composite molds before and after hydration

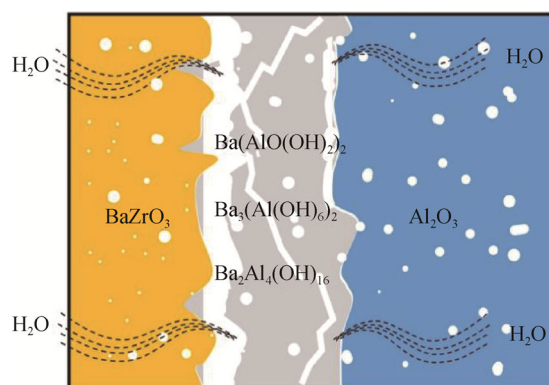
忽略水化反应前空气中引进的水分子体积, 可计算出水化反应后体积膨胀约 75.44%。因此, 在 BaAl₂O₄ 水化过程中, 晶粒体积增加, 相应的体积效应破坏晶粒与晶粒之间的结合力, 导致模壳面层与背层界面结合处有大量裂纹生成, 这些裂纹逐渐

扩展, 最终引发模壳损毁。

图 4 为 BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳面层与背层界面结合处水化过程示意图。由图 4 可以看出, 高温烧结后的模壳面层与背层在界面结合处发生化学反应生成 BaAl₂O₄, 而 BaAl₂O₄ 在与空气中 H₂O 的接触过程中, H₂O 分子分解出的 OH⁻ 与其周围的 Al³⁺ 和 Ba²⁺ 金属离子结合形成多种水化物质如图 4c 所

(a) Schematic diagram of the green body of BaZrO₃/Al₂O₃ composite mold

(b) Schematic diagram of the sintered mold before hydration



(c) Schematic diagram of the sintered mold after hydration

图 4 BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳的水化过程示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the hydration process of BaZrO₃/Al₂O₃ composite mold

示, 而出现体积膨胀效应, 导致模壳内面层与背层界面结合处裂纹出现, 并使得面层和背层产生间隙, 造成复合模壳失效。

为进一步考察烧结后的 $\text{BaZrO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合模壳在水化前及水化后对定向凝固 TiAl 合金的影响, 将从烧结炉中取出的模壳迅速放入定向凝固炉, 以及同条件下烧结的并开展过水化实验模壳分别在定向凝固炉中开展定向凝固实验。定向凝固实验步骤和

装置以及定向凝固后模壳宏观形貌如图 5 所示。由图 5b 可以看出, 水化前的模壳在定向凝固后, 表面光洁, 并无明显熔体渗透现象。而由图 5c 可以看出, 水化后的模壳在定向凝固后表面呈现灰黑色, 模壳表面有明显的熔体渗透现象。通过图 2 中水化前和水化后模壳的结构分析可推断, 模壳经水化生成的裂纹是合金在定向凝固过程中, 熔体由模壳内部向模壳表面渗透的主要原因。

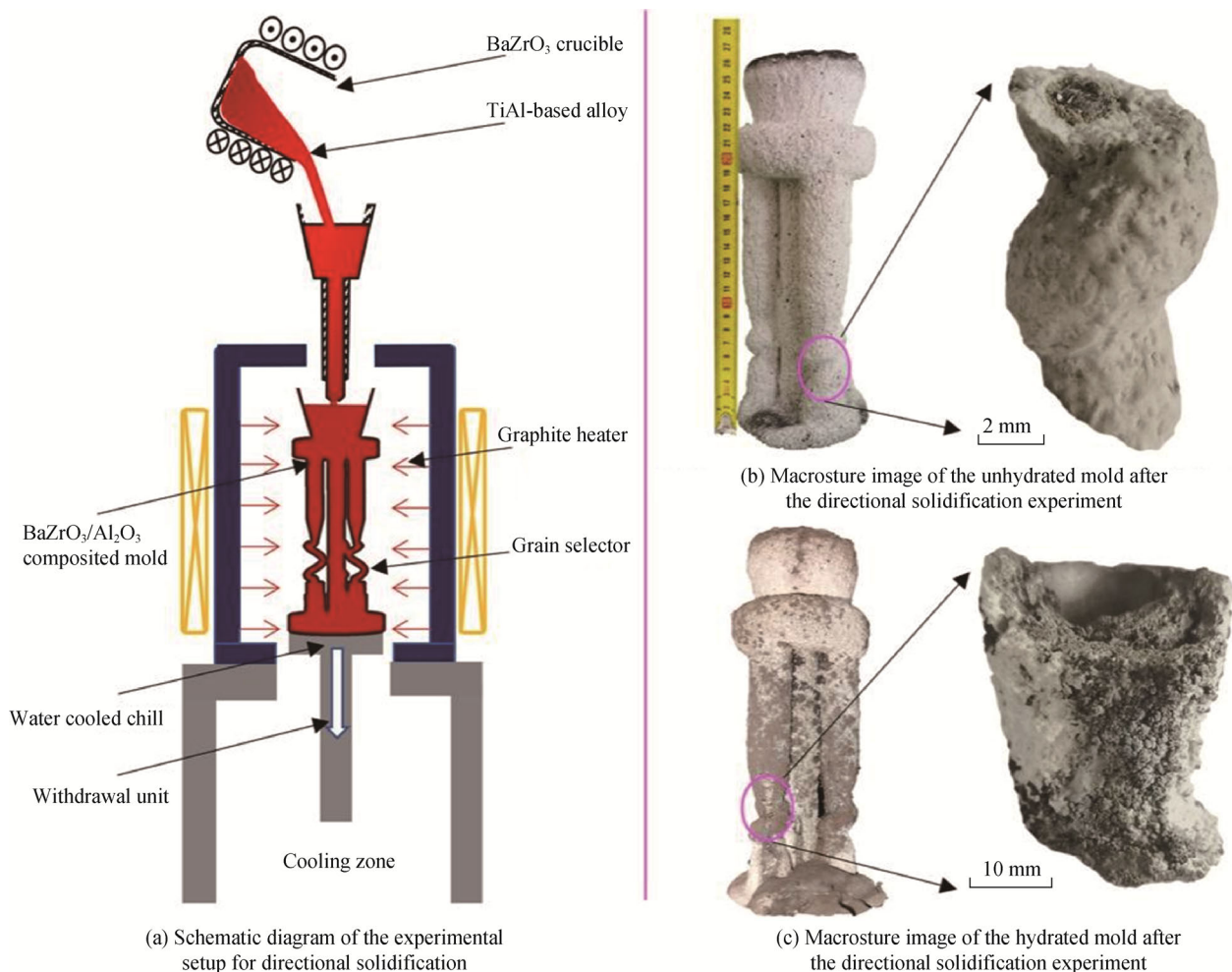


图 5 水化与未水化模壳在定向凝固实验后的宏观照片

Fig. 5 Macrostructure images of hydrated and unhydrated molds after directional solidification experiments

图 6a 为定向凝固后的模壳截面取样分析示意图。由图 6b 可以看出, 水化前模壳背层整体呈现灰黑色, 结合表 2 中 EDS 结果, 可知模壳背层中黑色物质(点 B)为冷镶嵌剂(环氧树脂), 灰色物质(点 A 和点 C)则为 Al_2O_3 , 这说明了水化前模壳并未出现熔体渗透, 这与图 5b 所见模壳表面宏观现象相一致。而从图 6c 可以看出, 水化后的模壳在定向凝固 TiAl 合金后显微形貌中除了灰黑色物质, 还有灰色的物质; 结合表 2 中 EDS 结果,

可知灰黑色物质(点 D 和点 F)为 Al_2O_3 , 而灰色物质(点 G)则为 TiAl 合金; 于此同时, 可以看出 Al_2O_3 晶粒分布比较分散, 其紧密程度相比图 5a 中 Al_2O_3 晶粒的结合程度要差, 这主要是因为熔体沿着模壳水化裂纹渗透进背层, 在定向凝固过程中, TiAl 合金熔体会不断侵蚀背层, 导致 Al_2O_3 晶粒出现分散的状态, 熔体会侵蚀穿背层, 渗透到模壳外壁, 出现图 5c 所示的模壳外表面呈现黑色的现象。

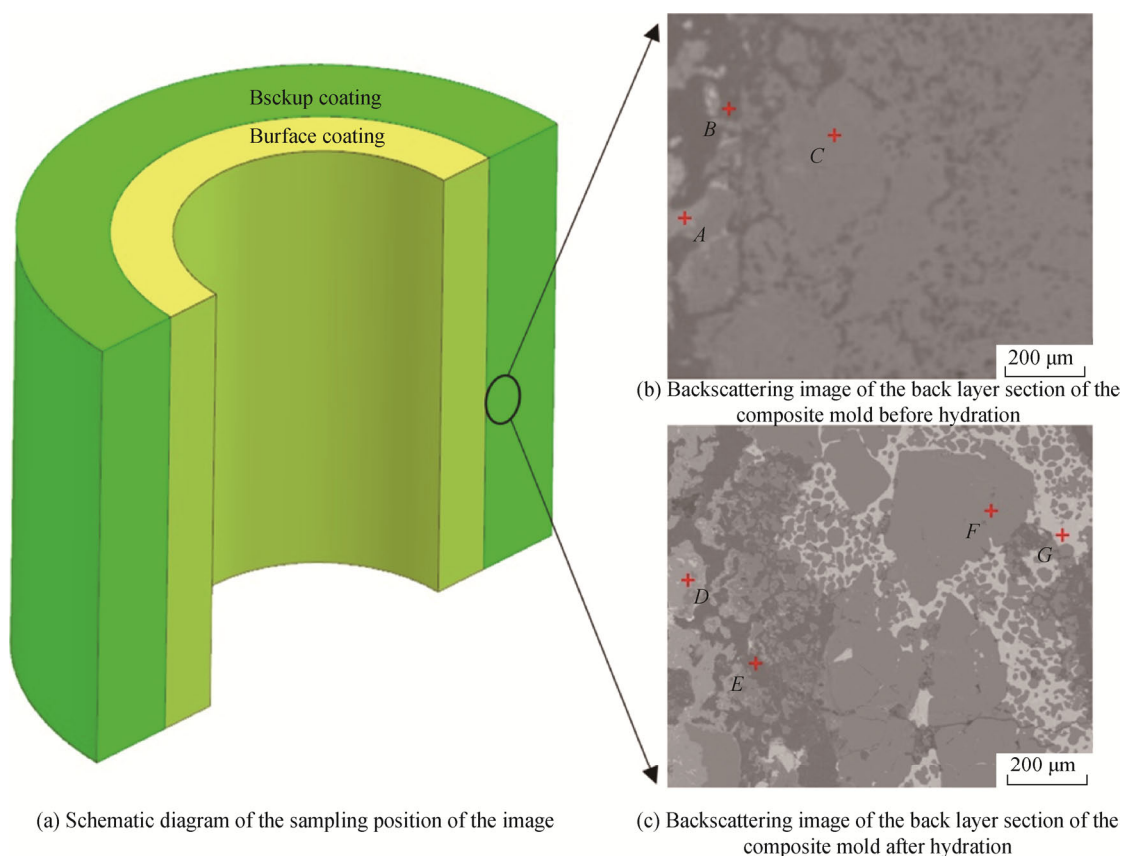


图 6 定向凝固实验后复合模壳背层截面的背散射照片

Fig. 6 Backscattering images of composite mold back layer section after directional solidification experiment

表 2 定向凝固后复合模壳背层区域(见图 6b 和图 6c)的 EDS 分析结果

Table 2 EDS analysis results of the back layer region (see Fig. 6(b) and Fig. 6(c)) of the composite mold after directional solidification

Zone	Ti	Al	Nb	Ba	Zr	O	Si	C
A		53.3		5.3		38.3	3.1	
B						17.3	1.1	81.6
C		54.1				45.9		
D		49.2		5.4		43.0	2.4	
E						18.6	0.5	80.9
F		52.8				47.2		
G	42.7	46.5	5.1		2.5		3.2	

x—Mole fraction.

图 7 为模壳水化前后的定向凝固 TiAl 合金后合金棒截面宏观组织形貌图。由图 7a 可以看出, 模壳水化前在定向凝固制备 TiAl 合金后, 合金棒纵截面并未发现有杂晶的出现, 同时上中下 3 个横截面处并未发现有杂晶存在, 可说明采用水化前模壳并通过定向凝固可制备 TiAl 合金棒单晶。而从图 7b 可以看出, 使用水化后模壳定向凝固制备的 TiAl 合金棒右侧边界处出现杂晶, 而在此之前定向凝固段的纵截面显示其仍为单晶, 这说明杂晶的起

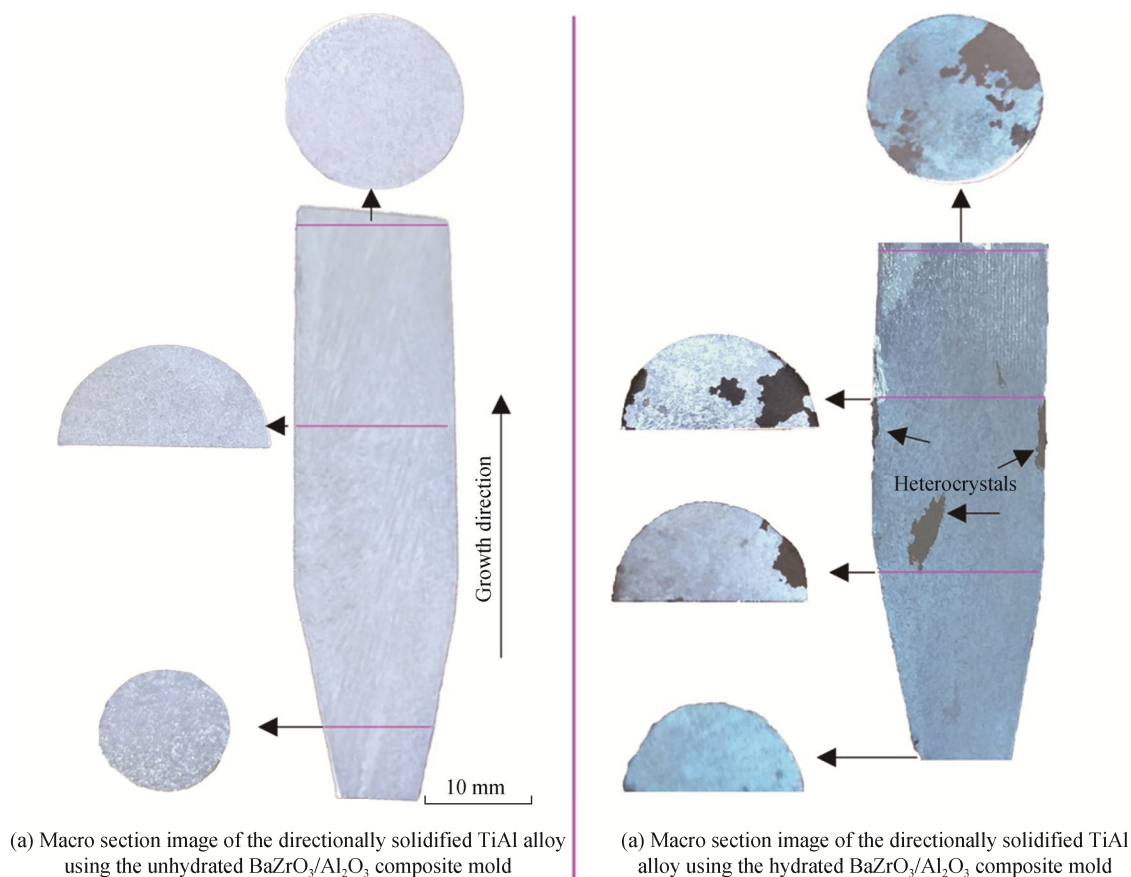
始形成位置在铸件边界处, 无独有偶, 其上方横截面(2/3 横截面)左侧边界处也开始出现杂晶, 说明杂晶较易形成于铸件边界, 相比于图 7a 中 TiAl 合金棒形貌可推测, 复合模壳的水化造成的模壳缺陷使得杂晶较易出现在铸件边缘, 严重影响了 TiAl 单晶的生长。

3 结论

1) 以 BaZrO₃ 为面层, Al₂O₃ 为背层, 在高温烧结制备 BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳时, 面层与背层在界面结合处生成 BaAl₂O₄, 并以化学形式结合提高模壳强度;

2) BaAl₂O₄ 在水化过程中生成 Ba(AlO(OH)₂)₂、Ba₂Al₄(OH)₁₆ 和 Ba₃(Al(OH)₆)₂, 使得晶粒体积发生变化破坏晶粒间结合力, 导致模壳面层与背层界面结合处出现裂纹;

3) 使用未水化的 BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳定向凝固 TiAl 合金并未出现熔体渗透, 定向凝固得到了无杂晶的 TiAl 基单晶。而水化后的模壳由于熔体沿着裂纹向外流动, 导致模壳出现明显渗透, 并进一步导致定向凝固 TiAl 合金中杂晶的出现。

图 7 BaZrO₃/Al₂O₃ 复合模壳定向凝固 TiAl 合金的宏观截面照片Fig. 7 Macro section images of the directionally solidified TiAl alloy using BaZrO₃/Al₂O₃ composite molds

参考文献:

- [1] APPEL F, CLEMENS H, FISCHER F. Modeling concepts for intermetallic titanium aluminides[J]. Prog Mater Sci, 2016, 81: 55–124.
- [2] SONG L, XU X J, YOU L, et al. Ordered α_2 to ω_0 phase transformations in high Nb-containing TiAl alloys[J]. Acta Mater, 2015, 91: 330–339.
- [3] BEWLAY B, NAG S, SUZUKI A, et al. TiAl alloys in commercial aircraft engines[J]. Mater High Temp, 2016, 33(4–5): 549–559.
- [4] 杨锐. 钛铝金属间化合物的进展与挑战[J]. 金属学报, 2015, 51(2): 129–147.
YANG Rui. Acta Metall Sin (in Chinese), 2015, 51(2): 129–147.
- [5] TAUB A, FLEISCHER R. Intermetallic compounds for high-temperature structural use[J]. Science, 1989, 243(4891): 616–621.
- [6] CHEN R R, WANG Q, ZHOU Z C, et al. Microstructure, tensile properties and creep behavior of high-Al TiAlNb alloy using electromagnetic cold crucible continuous casting[J]. J. Alloys Compd, 2019, 801: 166–174.
- [7] YAMAGUCHI M, JOHNSON D, LEE H, et al. Directional solidification of TiAl-base alloys[J]. Intermetallics, 2000, 8(5–6): 511–517.
- [8] JIN H, JIA Q, XIAN Q G, et al. Seeded growth of Ti–46Al–8Nb polysynthetically twinned crystals with an ultra-high elongation[J]. J Mater Sci Technol, 2020, 54: 190–195.
- [9] LAPIN J, GABALCOVA Z. Solidification behaviour of TiAl-based alloys studied by directional solidification technique[J]. Intermetallics, 2011, 19(6): 797–804.
- [10] ZHANG H R, TANG X X, ZHOU C G, et al. Comparison of directional solidification of γ -TiAl alloys in conventional Al₂O₃ and novel Y₂O₃-coated Al₂O₃ crucibles[J]. J Eur Ceram Soc, 2013, 33(5): 925–934.
- [11] 罗文忠, 沈军, 闵志先, 等. TiAl 合金定向凝固过程中与坩埚材料的界面反应研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(8): 1441–1445.
LUO Weizhong, SHEN Jun, MIN Zhixian, et al. Rare Met Mater Eng (in Chinese), 2009, 38(8): 1441–1445.
- [12] LAPIN J, GABALCOVA Z, PELACHOVA T. Effect of Y₂O₃ crucible on contamination of directionally solidified intermetallic Ti–46Al–8Nb alloy[J]. Intermetallics, 2011, 19(3): 396–403.
- [13] 张钊, 朱凯亮, 刘岚洁, 等. BaZrO₃ 坩埚的制备及与钛合金熔体的界面反应[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(9): 1278–1283.
ZHANG Zhao, ZHU Kailing, LIU Lanjie, et al. J Chin Ceram Soc 2013, 41(9): 1278–1283.
- [14] 高永辉, 庞威, 李重河, 等. CaZrO₃ 耐火材料的制备及其与钛合金熔体的界面反应[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12): 55–59.
GAO Yonghui, PANG Wei, LI Chonghe, et al. J Chin Ceram Soc, 2009, 37(12): 55–59.
- [15] 贺进, 魏超, 李明阳, 等. BaZrO₃ 耐火材料与 TiAl 合金熔体的界面

- 反应[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1505–1511.
- HE Jin, WEI Chao, LI Mingyang, et al. T Nonferr Metal Soc (in Chinese), 2015, 25(6): 1505–1511.
- [16] 陈光耀, 程治玮, 王树森, 等. 高活性钛熔体与 BaZrO₃ 耐火材料界面反应机理[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(6): 890–895.
- CHEN Guangyao, CHENG Zhiwei, WANG Shusen, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(6): 890–895.
- [17] CHEN G Y, LAN B B, XIONG F H, et al. Pilot-scale experimental evaluation of induction melting of Ti–46Al–8Nb alloy in the fused BaZrO₃ crucible[J]. Vacuum, 2019, 159: 293–298.
- [18] 李明阳, 张浩, 王树森, 等. BaZrO₃ 复合型壳定向凝固 Ti–46Al–8Nb 合金的微观组织研究[J]. 钛工业进展, 2016, 33(3): 18–23.
- LI Mingyang, ZHANG Hao, WANG Shusen, et al. Titanium Ind Progr (in Chinese), 2016, 33(3): 18–23.
- [19] 张浩, 高鹏越, 陈光耀, 等. Al₂O₃/BaZrO₃ 双陶瓷界面微观组织演化及机理[J]. 无机材料学报, 2017, 32(8): 819–824.
- ZHANG Hao, GAO Pengyue, CHNE Guangyao, et al. J Inorg Mater (in Chinese), 2017, 32(8): 819–824.
- [20] 李景磊, 王周福, 王玺堂, 等. 一铝酸钡的合成和水化特征[J]. 陶瓷学报, 2018, 39(1): 69–72.
- LI Jinglei, WANG Zhoufu, WANG Xitang, et al. J Ceram (in Chinese), 2018, 39(1): 69–72.
- [21] 李景磊. 铝酸钡水泥的制备及胶凝性研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
- LI Jinglei. Research on the preparation and cementitious behavior of barium aluminate cement (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.