

热等静压在铸造高温合金领域的应用

邵冲, 刘慧渊, 李俊涛, 马章林, 赵明汉

(中国钢研科技集团有限公司, 北京 100081)

摘要 采用适当热等静压工艺处理铸造高温合金, 利用高温高压实现铸件内部疏松孔洞的蠕变扩散, 达到闭合疏松和均匀合金组织的目的, 使铸造高温合金的综合力学性能, 尤其是疲劳性能、塑性及合金力学性能的稳定性显著提高, 大大提高了铸件使用的安全性和可靠性。介绍了热等静压工艺处理高温合金铸件的致密化原理、工艺因素及其对合金组织和性能的影响, 同时概述了热等静压技术的应用成果及发展状况。

关键词 热等静压 致密化 显微组织 力学性能 高温合金

中图分类号: TG132.32; TG136.1

文献标识码: A

Applications of Hot Isostatic Pressing on Cast Superalloy

SHAO Chong, LIU Huiyuan, LI Juntao, MA Zhanglin, ZHAO Minghan

(China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081)

Abstract Hot isostatic pressing (HIP) can promote creep diffusion of pores in the cast, leading to closing porosity and uniform microstructure. The mechanical properties, especially the fatigue resistance, plasticity, and the stability of these properties are improved greatly, thus the security and reliability of cast superalloy are enhanced. The densification principle, processing parameters, and the influence of processing parameters on the microstructure and properties of cast superalloy are discussed. The application and development of HIP are also introduced.

Key words hot isostatic pressing, densification, microstructure, mechanical property, superalloy

0 引言

热等静压(HIP)技术起源于20世纪50年代, 是利用高温高压同时作用使部件经受三向等静压制的工艺技术, 可以实现复杂形状的粉末冶金产品的全致密化成形及生产一些传统方法难以制备成形的制品。随着航空航天技术、原子能工业等的发展, 热等静压技术的应用范围和普及程度都发生了质的飞跃, 成为许多高端和重要产品制造的常规和例行工艺环节, 广泛应用于各种金属、陶瓷、金属陶瓷、金属-纤维复合材料的制备, 以及固态粘结和钛合金、铝合金、高温合金等铸造产品内部冶金缺陷的消除^[1,2]。

随着燃气涡轮发动机工作温度和使用安全性能的不断提高, 所使用零件的集成化、复杂化程度和对力学性能的要求越来越高。采用无余量精密铸造技术生产的铸造高温合金产品在航空航天、地面燃气轮机和其他动力能源领域的苛刻条件下的应用越来越广泛^[3]。由于高温合金熔体凝固时体积减小, 最后凝固部位往往得不到液态金属补缩, 而产生缩孔和疏松缺陷。铸造技术的进步及工艺控制的精准只能减轻而不能完全消除疏松等冶金缺陷, 疏松含量一般达到体积的0.4%以上。先进航空发动机叶片几乎都采用定向凝固或者单晶叶片, 定向凝固过程中液固界面顺序推进, 合金液能不断补充到凝固界面, 因此定向凝固和单晶叶片铸件的显

微疏松程度一般要小得多, 但也占体积的0.2%左右, 通常位于枝晶根部。这些疏松往往成为裂纹萌生的根源, 导致蠕变或者疲劳失效^[4,5]。

1972年在美国召开的第二届国际高温合金会议上, 首次公开了用热等静压工艺来闭合高温合金铸造过程中产生的显微疏松缺陷的技术^[6]。随后研究者对Rene'77、Rene'80、In738C、In713C和In718C等合金的热等静压工艺展开研究, 获得了普遍的成功, 使上述合金的循环疲劳寿命、持久强度、塑性和性能稳定性等得到显著提高, 其中循环疲劳寿命可以延长2倍以上^[7-10]。目前对航空航天发动机用关键等轴晶高温合金精铸件进行热等静压处理已经成为国际上的通行做法, 作为必要的工序固定下来。据报道, 对铸件的热等静压处理已经占HIP生产任务量的50%以上。20世纪80年代末开始, 国内外开始对定向凝固及单晶合金开展热等静压研究工作, 也取得了积极成果^[4,11-13]。

1 热等静压的致密化作用机理

目前, 关于热等静压处理对铸件产品疏松等冶金缺陷闭合效果及对合金的综合力学性能影响方面已经得到广泛研究, 具体合金的热等静压处理工艺也相当成熟, 国内也开展了较多的研究工作, 但对热等静压处理的致密化过程及作用机理等方面的研究甚少。

Wasielowski 等认为热等静压处理过程是一个蠕变-扩散相结合的过程,首先应力引起蠕变变形而消除孔隙,孔隙表面相互接触,随后发生扩散结合,但是对于具体的闭合过程没有展开分析^[6]。张善勇等认为热等静压的致密化过程不是扩散蠕变机制占主导作用,占优势的致密化机制是位错蠕变机制^[14]。根据位错理论,在高的压力和内部存在空洞的条件下,位错将移向内部空洞的内表面,由于位错逸出而造成原子空缺,则空缺两侧原子所受到的力不能保持平衡,微孔将逐渐压缩减小。此外,微孔附近区域内,材料受力并不是各向相等的,而是存在指向微孔的不为零的合力,同样也能引起位错向微孔表面运动,从而达到致密化的目的。

随着温度的升高,合金屈服强度降低,有利于蠕变过程进行,研究表明温度是影响疏松闭合效果最关键的影响因素。对于 In738C 合金而言,在 1093~1176℃ 范围内,只能使 50%~80% 的孔隙闭合,如果将温度升高到 1204℃,就能达到 100% 的致密度,如果温度没有达到,仅仅提高压力,对疏松闭合影响甚小。对 K418 合金的热等静压研究也有类似的结果。热等静压处理后合金力学性能的提高依赖于缩孔和疏松缺陷的冶金闭合而不是机械闭合,将疏松严重、持久寿命极低的试样热等静压处理后,合金持久性能大幅度提高,持久断口未再现疏松,说明疏松内表面达到完全的冶金结合^[15]。

2 普通等轴晶铸造高温合金的热等静压处理

对正常铸造的等轴晶高温合金铸件进行热等静压处理取得了很大的成功,在某 Rene'120 合金涡轮叶片生产中,没有经过热等静压处理的铸造叶片由于疏松超标,产品废品率为 28%,经过 1219℃/101MPa 的 4h 的 HIP 后,废品率降低到 4%,同时合金疲劳寿命有较大幅度延长^[16]。另外 Rene'80 合金和 Inconel-738C 合金以及 Inconel-718C 合金经过适当的热等静压处理后,疲劳性能及塑性也得到显著提高,其中 Inconel-738C 合金 704℃ 低周疲劳性能提高 3~10 倍,中温持久寿命延长 1 倍以上^[17]。通过密度测量发现, K405 合金在 HIP 处理前平均密度为 8.149g/cm³,经 HIP 处理后平均密度为 8.158g/cm³,提高了约 0.1%^[18]。

通过晶粒细化技术生产具有细小的等轴晶粒、高度弥散分布的碳化物质点和细小而均匀的 γ' 相分布的细晶铸造高温合金零件,可以大大提高合金在等强温度以下的综合力学性能^[19],但是采用整体晶粒细化技术生产的铸件,往往含有大量的显微疏松缺陷,而消除疏松、提高性能的最好措施就是热等静压处理^[20]。

涡轮叶片在服役过程中会产生组织退化和形成蠕变空洞,通过热等静压完全闭合了这些孔洞,配合采用热处理可以恢复叶片的大部分使用性能。采用 HIP+热处理的方法处理服役一段时间的 In713C 合金涡轮叶片,可以发现叶片的内部微观组织和力学性能类似于新的涡轮叶片^[21]。但也有研究表明,虽然 IN738LC 合金在蠕变过程中产生的微观缺陷经过热等静压处理后得到了有效闭合,但是所恢复的蠕变性能只相当于在没有压力条件下的再热处理对性能的恢

复,也即热等静压处理并未收到预期效果^[22]。另外,普通铸造的 GTD-111 合金叶片服役一段时间经过热等静压修复后,叶片的退化速度很快^[23,24]。

等轴晶铸造高温合金的热等静压处理应尽可能采用较高的温度,一般选择在 1160~1220℃ 之间^[25],过高易造成合金晶粒长大,尤其是采用晶粒细化方法生产的细晶铸件,一般需要有差别地选择热等静压温度^[26]。差热分析显示合金的初熔温度比实际的熔点要低,且随偏析程度的增加而更加显著。对偏析严重的合金,需要在热等静压前按台阶升温的方法做均匀化预处理。铸件的热等静压压力的选择依据是能使材料产生塑性流动,一般可选择范围为 98~200MPa 之间^[25,27]。

3 定向及单晶高温合金的热等静压处理

国外从 20 世纪 80 年代末开始研究定向和单晶高温合金的热等静压处理。由于定向凝固和单晶铸件的凝固界面顺序推进,具有较好的凝固冷却条件,产生的显微疏松缺陷较少,只占体积的 0.2% 左右。然而,在闭合这些疏松的同时可能会带来再结晶的问题。再结晶前后的组织形貌完全不同,再结晶形成的带有横向晶界的等轴晶粒与基体的柱状晶存在本质差别,极大降低了合金的性能,尤其是高温持久、疲劳等性能^[28]。采用热等静压处理带有宏观缩孔的高温合金或者是 TiAl 合金时,均在闭合缩孔的同时产生了明显的再结晶^[29]。关于热等静压处理定向凝固和单晶铸件,其显微疏松部位产生再结晶及再结晶产生的临界空洞尺寸,尚未有系统研究,但至少具有这种潜在风险。这将从根本上消除热等静压所带来的对性能有益之处。

从 20 世纪 80 年代开始,陆续出现了热等静压应用到定向凝固和单晶合金方面的报道^[4,30],但关于热等静压对定向凝固及单晶合金组织和力学性能的影响的研究报告相对较少。目前定向凝固及单晶合金的热等静压工艺过程主要包括:采用固溶处理温度进行热等静压,热等静压后的固溶及时效处理。已有的研究表明,采用适当的热等静压工艺提高了合金的力学性能而没有产生再结晶问题^[5]。在对第一代、第二代单晶高温合金中的热等静压应用研究过程中,发现热等静压可有效消除单晶合金枝晶间的疏松和缩孔等缺陷,且显著提高合金疲劳性能。对 CMSX-4 合金的热等静压处理工艺研究表明,由于热等静压处理后的冷却速度限制,造成合金 γ' 相的尺寸和分布不合理,需要采用热处理来全面恢复合金的力学性能。CMSX-4 合金铸态+热处理态和铸态+热等静压+热处理的 950℃/355MPa 持久寿命分别为 72.72h 和 134.38h,持久寿命延长幅度达到 185%^[12]。通过适当热等静压处理,有效延长了 PWA1480 合金的高周疲劳寿命和蠕变寿命,蠕变寿命的延长或许归因于延迟蠕变第三阶段的开始,没有疏松和细小 γ' 数量的增加^[31]。M. T Kim 等采用与 GTD-111 合金标准热处理制度相同的温度和时间的热等静压工艺,将热等静压和热处理工艺同步开展,使合金获得了优良的力学性能,简化了生产工艺^[12]。

4 热等静压对铸造高温合金组织的影响

热等静压采用气体介质传递压力,一般选择高纯 Ar,含有一定量的有害杂质。研究表明,镍基合金铸件在含有 20×10^{-6} 有害杂质的高压介质中处理时,铸件不受污染;有害杂质含量达到 35×10^{-6} 时,污染稍有发生;杂质含量达到 200×10^{-6} 时,会产生一个从表面开始的 $50 \mu\text{m}$ 污染层^[32]。

高的压力还将对合金的固态相变产生深远的影响。如进行正火处理,在常压条件下,铁素体抗蠕变钢中的 Cr 含量超过 10% (质量分数) 时就会产生 δ 铁素体;而在 4 GPa 压力条件下,含 15% Cr (甚至 20%) 的铁素体抗蠕变钢也未产生 δ 铁素体^[11]。热等静压所造成的高压条件也会对合金元素扩散产生很大影响。以 Ni-Cr 扩散偶为研究对象,得出了压力与扩散系数的关系式 $D=nA^p$ 。在 1140℃、作用时间为 4 h 的条件下,扩散带宽度由真空条件下的 $68 \mu\text{m}$ 增加到 200 MPa 条件下的 $200 \mu\text{m}$ ^[33]。在高应力作用下,元素的互扩散是由空位和位错混合机制所控制的扩散类型。对正常热处理和不同应力条件下热等静压处理的试样位错密度分析研究表明,在相同温度条件下,热等静压处理后位错密度有了较大幅度提高。位错密度随压力增加而提高,与正常热处理态相比较,有数量级的变化,位错密度的提高对扩散的增强作用进一步得到促进。

K417 合金经过热等静压处理后,枝晶轴、枝晶间、共晶心、共晶边缘等处的元素和组织趋于均匀化,抑制了有害的 σ 相析出^[34]。可能源于合金元素扩散系数的提高及相变受高压力的影响,热等静压条件下 K418 合金的 γ' 相的完全溶解温度比常压条件下 γ' 相的完全溶解温度低 20℃ 左右^[33]。热等静压处理+标准热处理后的 K488 合金显微组织与铸态+标准热处理状态相比, γ' 相形态变得更加不规则,尺寸变大^[35]。对熔铸的 TiAl 合金进行热等静压处理时,高温相区移向低温区,以致于在 1300℃ 时 TiAl 合金就处于无序的六方晶系 α 相区内^[36]。热等静压处理的 NiAl 合金基体中存在一些 Cr(Mo) 颗粒沉淀,且有的 Heusler 颗粒沉淀在 Cr(Mo) 颗粒中,Heusler 相颗粒与 Cr(Mo) 已失去共格,且有界面位错存在,而此现象从未被观察到^[37,38]。

赵京晨等发现 In718 合金经过热等静压处理后形成了网状亚结构,属于一种位错亚结构,将原始铸造晶粒分割成细小的亚晶粒结构。完全热处理后则在网状界面上分布成串的盘状 γ'' 相。实验结果表明,经过热等静压处理后的 In718 合金,采用标准热处理制度处理的强度和蠕变寿命均远低于标准要求,主要缘于 γ'' 相尺寸细小,需要调整热处理制度来改善组织和提高性能^[39]。

In713C 合金热等静压过程中晶界碳化物没有发生显著变化^[40],In100 合金的 MC 碳化物不稳定,热等静压处理时部分分解成为 M_{23}C_6 ,Mar-M-246 合金也发生了明显的 MC 到 M_6C 碳化物转变,且这些碳化物反应无法通过后续热处理进行逆转,这对中温性能有一定损害。研究表明,热等静压过程中是否发生碳化物转变反应很大程度上取决于 W 和 Mo 元素的含量^[15]。对钴基 X-45 合金也是如此,热等静压过程

沉淀出针状钴铬碳化物。

定向凝固合金及单晶合金在蠕变过程中 γ' 相会产生筏化现象。对 GTD111 合金的研究表明,正常热处理的试样沿着载荷方向,伴随着强烈的 γ' 相筏化,而采用适当热等静压处理且不经后续热处理的试样则几乎没有观察到筏化现象。虽然 γ' 相筏化对合金力学性能的影响有所争议,但定向凝固镍基合金 γ' 相筏化倒是一个普遍的现象。热等静压处理后的试样没有发生筏化的现象是不寻常的,也许与性能的改善有很大的关系。研究认为高的压力限制了合金元素在相变过程中的扩散,产生了一个细小和均匀的显微结构,这样的显微结构对性能是有利的,导致弹性模量提高和筏化的抑制^[12]。

热等静压工艺可完全消除 DD3 合金的显微疏松缺陷,但经热等静压+标准热处理后,合金中 γ' 相更为粗大,立方化和排列整齐程度变差,且热等静压温度越高,影响越显著。合金的中、高温持久和蠕变性能有所降低,对 900℃ 拉伸性能无明显影响^[41]。也许只有热等静压和热处理工艺间的良好匹配,才能提高 DD3 合金的性能。单晶 DD8 合金经热等静压处理后,合金的微观组织形貌发生了很大变化,不同于一般热处理状态的 γ' 相,大部分的 γ' 相呈现田字形和凸字形,其具体、深入的原因亦未见报道^[42]。

5 热等静压技术的发展

热等静压工艺过程一般效率很低,而以 Avure 公司为代表的设备制造商采用预热热等静压工艺和均匀的快速冷却 (URC) 系统,使生产周期减半,一个生产周期降低到 5 h 以下,同时对炉型结构、装卸系统、过程控制和辅助系统等方面开展优化设计,大大降低设备的运行成本,在过去的 15 年内使热等静压产品的生产成本降低了 65%。先进的直径 800 mm、高 2500 mm 的热等静压机可年处理制品 1800 t,运转成本降低到 0.19 欧元/kg。在更大型的热等静压机中,还可以进一步降低单位生产成本。目前大型热等静压设备中均已经广泛采用 URC 技术,Avure 等公司已经可以制造直径达 3 m 的热等静压机^[43]。近年发展起来的液态介质热等静压技术 (LHIP) 利用熔盐类物质为工作介质,MC-USA 和 Teksid-Italy 在此领域取得突破性进展,能够用很短的时间达到所设定的工作压力和温度,极大提高生产效率和热等静压的安全性能,降低设备和生产成本。

6 结语

采用热等静压处理等轴晶铸造高温合金,显著提高合金的综合力学性能及力学性能的稳定性,大大提高了铸件使用的安全性和可靠性,已经成为高端铸件生产的一个例行工序环节,定向凝固和单晶合金的热等静压研究尚处于探索阶段。所开展的研究主要集中在具体的处理制度对合金性能的影响方面,但就热等静压的致密化过程及机理、热等静压处理对铸件显微组织结构影响以及对力学性能影响的内在关系等方面展开的研究很少。从非常有限的公开研究成果看,热等静压过程对合金元素扩散、显微组织结构产生深刻

的影响,改变了热处理前的热历史,必须对热处理制度做相应的匹配调整,才能实现热等静压对性能的改善和提高。

参考文献

- Atkinson H V, Davies S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview[J]. Metall Mater Trans A, 2000,31(12):2981
- Bocanegra-Bernal M H. Hot isostatic pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics[J]. J Mater Sci, 2004,39(21):6399
- Schafrik R E, Walston Scott. Challenges for high temperature materials in the new millennium[C]// Proceedings of the International Symposium on Superalloys. USA, 2008:3
- Fritzscheier L G. The influence of high thermal gradient casting, hot isostatic pressing and alternate heat treatment on the structure and properties of a single crystal nickel base superalloy[C]// Proceedings of the International Symposium on Superalloy. USA, 1984
- Vjacheslav I Goloanov. Densification of Ni-based superalloy single crystals through HIP: Diffusion models of pores dissolving, microstructure and mechanical properties[C]// HIP'05. France, 2005
- Wasielewski G E, Lindblad N R. Elimination of casting defects using HIP[C]// International Conference on Superalloys (2nd). USA, 1972:24
- Rao G Appa, Prasad K Satya, Kumar M, et al. Characterisation of hot isostatically pressed nickel base superalloy Inconel 718[J]. Mater Sci Technol, 2003,19(3):313
- Bouse G K, Schilke P W. Process optimization of cast alloy 718 for water cooled gas turbine application[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Superalloys. USA, 1980:303
- Bailey P G, Schweikert W H. HIP densification of castings[J]. Acta Metall, 1976(9):451
- Lamberigts M, Diderrich E, Coutsouradis D, et al. HIP'ing various precision cast engine components in nickel-base superalloys[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Superalloys. USA, 1980:285
- Chang J C, Yun Y H, Choi C, et al. Development of microstructure and mechanical properties of a Ni-base single-crystal superalloy by hot-isostatic pressing[J]. J Mater Eng Perform, 2003,12(4):420
- Kim M T, Kim D S, Oh O Y. Effect of γ' precipitation during hot isostatic pressing on the mechanical property of a nickel-based superalloy[J]. Mater Sci Eng A, 2008,480(1-2):218
- Kim M T, Chang S Y, Won J B. Effect of HIP process on the micro-structural evolution of a nickel-based superalloy[J]. Mater Sci Eng A, 2006,441(1-2):126
- 张善勇,隋玉俭. 铸造高温合金的热等静压致密化机理[J]. 钢铁研究学报, 1985,5(S1):77
- 徐建庭,庄景云,许静君. 热等静压(HIP)——消除铸件缺陷的有效方法[J]. 钢铁研究学报, 1982,2(1):29
- Bittence J C. HIP, the great healer of castings[J]. Mater Eng, 1978,88(4):54
- 陈建种. 用热等静压消除 M38 涡轮叶片疏松[J]. 特种铸造及有色合金, 1984(4):52
- 呼和. 镍基铸造高温合金的热等静压处理[J]. 金属学报, 2002,38(11):1199
- Chang D A, Nasser-Rafi R, Robertson S L. Mechanical properties of controlled grain structure alloy 718[J]. Miner Metals Mater Soc, 1991
- Loria E A. Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives[C]// Proceedings of the International Symposium. USA, 1997
- Maccagno T M, Koul A K, Immarrigeon J P, et al. Microstructure, creep properties, and rejuvenation of service-exposed alloy 713C turbine blades[J]. Metall Trans A, 1990, 21(12):3115
- McLean M, Tipler H R. Assessment of damage accumulation and property regeneration by hot isostatic pressing and heat treatment of laboratory-tested and service exposed In738LC[C]// Proceedings of the International Symposium on Superalloy. USA, 1984
- Lvova K. A comparison of aging kinetics of new and rejuvenated conventionally cast GTD-111 gas turbine blades[J]. J Mater Eng Perform, 2007,16(2):254
- Lvova E, Norsworthy D. Influence of service-induced microstructural changes on the aging kinetics of rejuvenated Ni-based superalloy gas turbine blades[J]. J Mater Eng Perform, 2001,10(3):299
- 马富康. 等静压技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 1991:302
- Patty Sierveld John F, Radavich T K, Widmer Gail Cole Robert. Effect of HIP parameters on fine grain cast alloy 718[C]// Proceedings of the International Symposium on Superalloy. USA, 1988:46
- Bouse G K, Schilke P W. Process optimization of cast alloy 718 for water cooled gas turbine application[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Superalloys. USA, 1980
- Zhang Weifang, Li Yunju, Liu Gaoyuan, et al. Recrystallization and fatigue failure of DS alloy blades[J]. Eng Fail Anal, 2004,11(3):429
- Jeon J H, Godfrey A B, Blenkinsop P A, et al. Recrystallization in cast 45-2-2 XD titanium aluminide during hot isostatic pressing[J]. Mater Sci Eng A, 1999,271(1-2):128
- Fritzscheier, Leslie G. Hot isostatic pressing of single crystal superalloy articles; US, 5573609[P]. 1996-11-12

- gap polymer alternating dithienopyrrole and thienopyrrole-dione units [J]. *Polymer*, 2011, 52: 2559
- 31 Zhang Yong, Zou Jingyu, Hin Lap Yip, et al. Conjugated polymers based on C, Si and N-bridged dithiophene and thienopyrroledione units: Synthesis, field-effect transistors and bulk heterojunction polymer solar cells [J]. *J Mater Chem*, 2011, 21: 3895
 - 32 Li Zhao, Ding Jianfu, Song Naiheng, et al. Development of a new s-tetrazine-based copolymer for efficient solar cells [J]. *J Am Chem Soc*, 2010, 132: 13160
 - 33 Christian B Nielsen, Bob C Schroeder, Afshin Hadipour, et al. A benzotrithiophene-based low band gap polymer for polymer solar cells with high open-circuit voltage [J]. *J Mater Chem*, 2011, 21: 17642
 - 34 Prashant Sonar, Evan L Williams, Samarendra P Singh, et al. Thiophene-benzothiadiazole-thiophene (D-A-D) based polymers: Effect of donor/acceptor moieties adjacent to D-A-D segment on photophysical and photovoltaic properties [J]. *J Mater Chem*, 2011, 21: 10532
 - 35 Wang Bao, Sai Wing Tsang, Zhang Weifeng, et al. Naphthodithiophene-2,1,3-benzothiadiazole copolymers for bulk heterojunction solar cells [J]. *Chem Commun*, 2011, 47: 9471
 - 36 Hugo Bronstein, Dong Seok Leem, Richard Hamilton, et al. Indacenodithiophene-co-benzothiadiazole copolymers for high performance solar cells or transistors via alkyl chain optimization [J]. *Macromolecules*, 2011, 44: 6649
 - 37 Seul Ong Kim, Dae Sung Chung, et al. Efficient polymer solar cells based on dialkoxynaphthalene and benzo[c][1,2,5]thiadiazole: A new approach for simple donor-acceptor pair [J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2011, 95: 1678
 - 38 Wang Jieyu, Steven K Hau, Hin Lap Yip, et al. Benzobis(silolothiophene)-based low bandgap polymers for efficient polymer solar cells [J]. *Chem Mater*, 2011, 23: 765
 - 39 Blouin N, Michaud A, Gendron D, et al. Toward a rational design of poly(2,7-Carbazole) derivatives for solar cells [J]. *J Am Chem Soc*, 2008, 130: 732
 - 40 Zhou H X, Yang L Q, Price S C, et al. Enhanced photovoltaic performance of low-bandgap polymers with deep LUMO levels [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2010, 49: 7992
 - 41 Sun Ying, Shang Chieh Chien, Hin Lap Yip, et al. High-mobility low-bandgap conjugated copolymers based on indacenodithiophene and thiadiazolo[3,4-c]pyridine units for thin film transistor and photovoltaic applications [J]. *Mater Chem*, 2011, 21: 13247
 - 42 Chen Yichun, Yu Chaoying, Fan Yuling, et al. Low-bandgap conjugated polymer for high efficient photovoltaic applications [J]. *Chem Commun*, 2010, 46: 6503
 - 43 Zhang Maojie, Guo Xia, Zhang Zhiguo, et al. D-A copolymers-based on dithienosilole and phthalimide for photovoltaic materials [J]. *Polymer*, 2011, 52: 5464
 - 44 Wang Ergang, Ma Zaifei, Zhang Zhen, et al. An isoindigo-based low band gap polymer for efficient polymer solar cells with high photo-voltage [J]. *Chem Commun*, 2011, 47: 4908
 - 45 Bijleveld J C, Zoombelt A P, Janssen R A, et al. Poly(diketopyrrolopyrrole terthiophene) for ambipolar logic and photovoltaics [J]. *J Am Chem Soc*, 2009, 131: 16616
 - 46 Bijleveld B J, Gevaert V S, Nuzzo D D, et al. Efficient solar cells based on an easily accessible diketopyrrolopyrrole polymer [J]. *Adv Mater*, 2010, 22: E242
 - 47 Chen Guanyu, Yu Hsin Cheng, Yi Jen Chou, et al. Crystalline conjugated polymer containing fused 2,5-di(thiophen-2-yl)thieno[2,3-b]thiophene and thieno[3,4-c]pyrrole-4,6-dione units for bulk heterojunction solar cells [J]. *Chem Commun*, 2011, 47: 5064

(责任编辑 沈 恒)

(上接第 124 页)

- 31 Walston W S, Bernstein I M, Thompson A W. Role of the γ/γ' eutectic and porosity on the tensile behavior of a single-crystal nickel-base superalloy [J]. *Metall Trans A*, 1991, 22 (6): 1443
- 32 王声宏, 曾果特, 王洪君. K17 合金热等静压处理时表面氧化的研究 [J]. *钢铁研究学报*, 1989, 1(4): 35
- 33 潘钢, 王声宏. 热等静压对元素扩散及镍基合金组织和性能的影响 [J]. *钢铁研究学报*, 1989, 1(S1): 31
- 34 黄荣芳, 马军, 杨金庆. 热等静压对 K17 铸造高温合金 σ 析出的影响 [J]. *机械工程材料*, 1989(5): 9
- 35 刘晓功, 饶洋, 肖程波, 等. 热等静压后炉冷对 K488 合金显微组织和力学性能的影响 [J]. *航空材料学报*, 2008, 28 (3): 24
- 36 熊翔, 黄伯云. 熔铸 TiAl 合金热等静压处理的研究 [J]. *中国有色金属学报*, 1995, 5(3): 82
- 37 盛立远, 郭建亭, 章炜, 等. 热等静压和热处理对快凝 NiAl-Cr(Mo)-Hf 共晶合金显微组织和压缩性能的影响 [J]. *金属学报*, 2009, 45(9): 1025
- 38 韩萍, 郭建亭. 热等静压处理对 NiAl-Cr(Nb) 合金显微组织和力学行为的研究 [J]. *辽宁工业大学学报*, 2011(2): 40
- 39 赵京晨, 单熙, 燕平, 等. 铸造 In718C 合金热等静压组织研究 [J]. *金属学报*, 1995, 31(增刊): S61
- 40 Antony K C, Radavich J F. The metallurgical aspects of hot isostatically pressed superalloy castings [C]// *Proceedings of the 4th International Symposium on Superalloys*. USA, 1980
- 41 韩梅, 骆宇时. 热等静压对 DD3 单晶高温合金组织与性能的影响 [J]. *材料工程*, 2008(8): 40
- 42 李英敖, 张静华, 唐亚俊, 等. 热等静压处理对 DD8 单晶高温合金组织及性能影响 [J]. *金属学报*, 1995, 31(增刊): S290
- 43 Westerlund J. New equipment technology enhances HIP economics [C]// *HIP'05*. France, 2005: 110

(责任编辑 周媛媛)