

# 热等静压技术在镍基单晶高温合金中的应用研究进展

张剑<sup>1</sup>, 宋富阳<sup>1,2</sup>

1. 北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095

2. 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100083

**摘要** 通过总结目前热等静压对镍基单晶高温合金的应用研究进展, 阐释了热等静压对镍基单晶高温合金中的疏松等孔洞类缺陷的消除作用, 分析了孔洞的愈合机理, 并分别展示了应用热等静压后合金的拉伸、持久、疲劳等力学性能变化情况, 同时介绍了热等静压对已服役制件组织力学性能恢复处理的研究进展、计算模拟在指导热等静压工艺研究中的作用, 展望了中国热等静压技术的未来发展。

**关键词** 镍基单晶高温合金; 热等静压; 孔洞缺陷; 力学性能

镍基单晶高温合金因其在高温下出色的抗疲劳和蠕变性能以及优异的抗氧化及抗腐蚀等能力已成为目前先进航空发动机和燃气轮机涡轮叶片的首选材料<sup>[1-3]</sup>。与其他铸造高温合金相比, 采用熔模精密铸造法所制造的单晶高温合金疏松倾向很小<sup>[4]</sup>, 但其依然不可避免地存在疏松、偏析等缺陷, 因合金晶体凝固时树枝状的生长方式, 枝晶间区域逐渐成为最后凝固区域, 金属液无法进入枝晶间区域补缩导致在枝晶间形成微孔。当合金进行固溶热处理时, 由于柯肯达尔效应<sup>[5-6]</sup>同样会形成固溶微孔等缺陷, 这些孔洞直径大约 10~30 μm, 体积分数为百分之零点几<sup>[7]</sup>。在合金服役过程中, 孔洞类缺陷会成为裂纹源并造成合金力学性能下降,

严重降低材料的服役寿命<sup>[8]</sup>。

热等静压技术主要用于对金属或陶瓷制件加热同时施加各向相同的压力, 从而制件得以烧结与致密化。利用热等静压技术不仅对合金中缺陷有显著消除作用, 同时可以改善合金内部微观组织及力学性能, 提高合金使用可靠性<sup>[9]</sup>。当前热等静压技术主要应用领域分别为铸件的致密化处理、粉末冶金和材料的粘结固定, 应用占比分别为 54%、43% 和 3%。由于热等静压技术对促进制件的致密性、消除孔洞类缺陷、降低偏析并提高合金的力学性能有着独一无二的优势, 该技术也逐渐成为镍基高温合金所制造涡轮叶片的标准后处理工序<sup>[10]</sup>。目前国外针对单晶高温合金上应用的热等静压

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-01-06

作者简介: 张剑, 高级工程师, 研究方向为单晶高温合金, 电子信箱: 6211zhangjian@gmail.com

引用格式: 张剑, 宋富阳. 热等静压技术在镍基单晶高温合金中的应用研究进展[J]. 科技导报, 2020, 38(2): 11-18; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.02.002

(hot isostatic pressing, HIP)技术研究已经比较成熟,并且热等静压技术在二代单晶高温合金上得以工程化应用,然而国内在单晶高温合金领域的热等静压技术研究与应用还不多<sup>[11]</sup>。

为了消除镍基单晶高温合金铸件中的微观孔隙缺陷,需要对不同热等静压参数下镍基单晶高温合金显微组织变化及孔隙愈合情况开展研究,了解孔隙愈合机理,避免因热等静压造成合金内部产生其他缺陷。综述了近年来热等静压技术在镍基单晶高温合金中的研究应用情况,分析了热等静压研究的热点方向,指出了未来热等静压技术在镍基单晶高温合金领域的发展前景。

## 1 HIP对镍基单晶高温合金致密化影响研究

### 1.1 不同HIP参数对镍基单晶高温合金孔隙率的影响

热等静压涉及的主要工艺参数包括温度、压力以及保持时间,不同的工艺参数在促进孔隙闭合、提高制件组织致密程度上起着不同的作用。以温

度为例,当热等静压温度高于 $\gamma'$ 相溶解温度时,镍基单晶高温合金在单相的情况下得以软化,塑性显著提升,有利于孔隙的闭合。然而当温度接近合金固相线温度时,材料内部有发生再结晶和初熔的风险,这在工程应用中是严禁发生的<sup>[12-13]</sup>。因此为了控制成本、保证制件质量,需要详细研究不同参数热等静压处理对合金组织性能的控制及影响机理,选择工艺参数最优匹配方案,才能获得综合性能显著提升的合金材料,发挥热等静压技术的优势。

曹腊梅等<sup>[14]</sup>研究了不同热等静压温度对DD10单晶高温合金内部显微疏松的影响,图1展示了铸态及不同热等静压方案处理后DD10单晶高温合金光学组织。研究表明,铸态合金组织中分布于枝晶间的形状不规则显微疏松在1290℃、150 MPa热等静压处理后,合金中的显微疏松得以完全消除。当压力不变,温度提升至1300~1340℃对合金进行热等静压处理,DD10单晶高温合金内部的显微疏松同样能够完全闭合,然而在1340℃热等静压处理后,合金内部出现了初熔现象。因此针对DD10单晶高温合金,在150 MPa下其热等静压温度选择不宜超过1340℃,以避免初熔的产生。

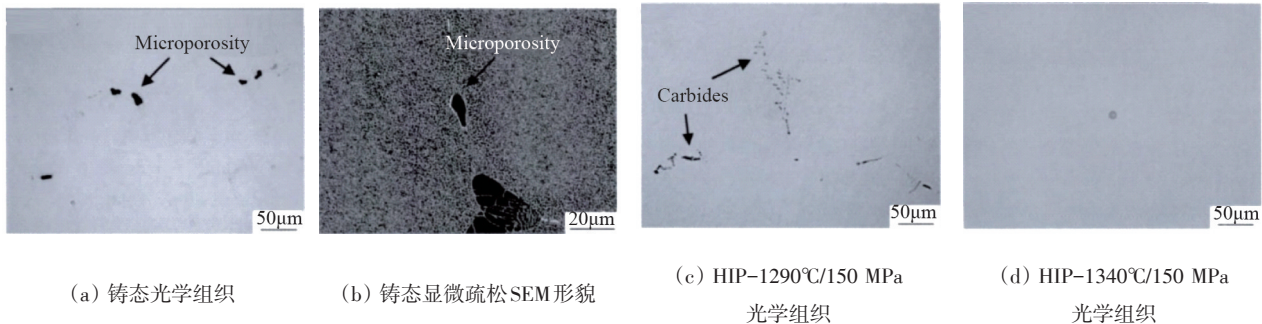


图1 DD10单晶高温合金不同状态下显微疏松分布及形貌

Lopez-Galilea等<sup>[15]</sup>对单晶高温合金ERBO-1开展了不同温度、压力、保持时间的热等静压工艺研究,选取铸态试样(ERBO-1A)与完全固溶并时效后试样(ERBO-1C)进行不同方案热等静压研究。表1设计了热等静压工艺方案研究在确定压力条件下温度与保持时间对两种试样的孔隙闭合的影响。图2展示了不同实验结果所对应的材料孔隙

率,可以看出热等静压的应用对材料孔隙率的降低有明显的效果,并且随着温度的升高效果更显著。无论试样状态如何,当热等静压温度高于 $\gamma'$ 相溶解温度(约1260℃)时,无论采用3 h或是5 h的保持时间,在热等静压处理后试样孔隙几乎都得以完全消除。

表1 确定压力条件下热等静压方案

温度/°C	保持时间/h	压力/MPa
1100 1200 1220 1320	3	200
1200 1220 1300 1320	5	200

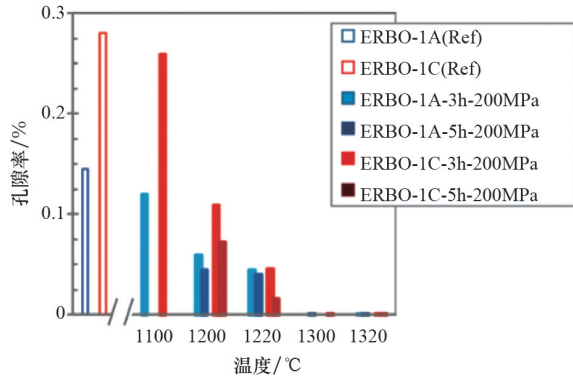


图2 不同热等静压方案下铸态ERBO-1A和硬化ERBO-1C样品的孔隙率

同时,设计了表2所示的热等静压工艺方案,研究在确定保持时间条件下温度与压力对铸态试样的孔隙闭合情况的影响,图3展示了不同实验结果所对应的材料孔隙率。可以看出,在大气压下,材料在高温条件下内部元素扩散产生固溶微孔导致孔隙率增加,在低于 $\gamma'$ 相溶解温度时,随着施加压力的增加的确会降低孔隙率,如图3所示(蓝色

表2 确定保持时间条件下热等静压方案

温度/°C	保持时间/h	压力/MPa
1220	3	0.1 200 300
1200 1220 1300 1320	3	100 200

柱状)。但是,当温度高于 $\gamma'$ 相溶解温度时,在100 MPa下孔隙已得到有效闭合,如图3所示(绿色柱状),继续增加压力对孔隙率也没有额外影响。

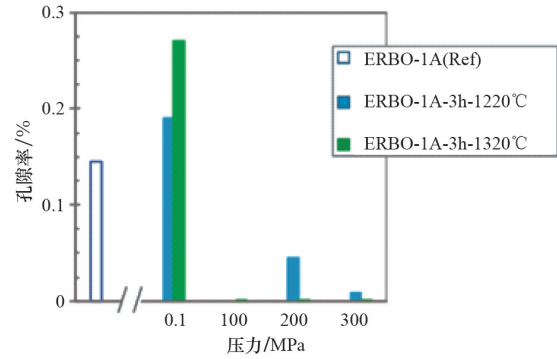
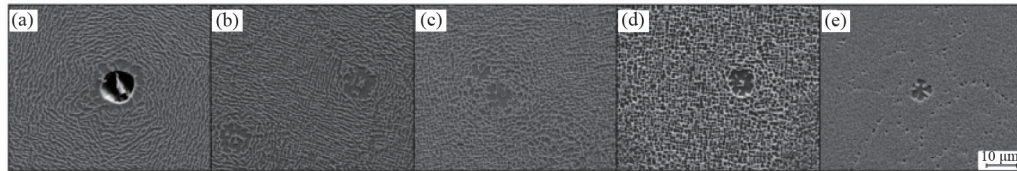


图3 不同热等静压方案下铸态ERBO-1A样品的孔隙率

### 1.2 热等静压作用下孔洞愈合机理研究

通常,合金在高温与高压作用下内部孔洞区域发生塑性变形以及蠕变行为,进而塌陷区表面在扩散行为作用下完成粘结,从而提高材料致密化。因此在热等静压作用下合金内部显微组织得以优化,致密程度得到提高,成分均匀性也得到改善<sup>[16-17]</sup>。

Roncery等<sup>[18]</sup>认为孔洞的主要闭合机制为蠕变变形,并且对热等静压下孔洞的闭合机制进行一系列研究,在低于与高于 $\gamma'$ 相溶解温度下分别对镍基单晶高温合金进行热等静压处理,图4展示了热等静压作用下孔洞周围显微组织变化。发现当低于 $\gamma'$ 相溶解温度时,在应力作用下孔洞周围出现了筏化结构;当温度高于 $\gamma'$ 相溶解温度时,由于 $\gamma'$ 沉淀相在热等静压过程中溶解,位错不再被 $\gamma'$ 沉淀相所固定,因此孔洞的变形也更加快速。



(a)~(c): 低于 $\gamma'$ 相溶解温度; (d)~(e): 高于 $\gamma'$ 相溶解温度

图4 热等静压处理后显微孔洞区域组织

Epishin等<sup>[13]</sup>研究了镍基单晶高温合金CMSX-4孔洞愈合机理,通过设置一系列中断实验,探究

孔洞愈合的动力学机理。分析实验结果认为孔洞的闭合主要是由位错滑移所引起的塑性变形所造

成。同时利用晶体塑性和大应变理论对单晶高温合金热等静压过程中的孔洞闭合动力学过程进行了建模,开发孔洞闭合过程的物理模型,研究不同热等静压参数对孔洞闭合动力学的影响,图5展示了实验与模拟结果对比,模拟结果也验证了塑性变形造成孔隙闭合的机理。

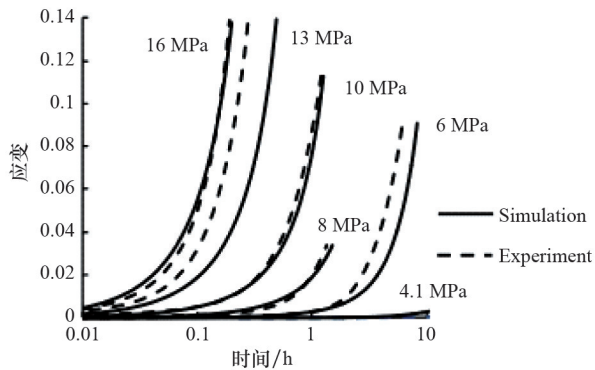


图5 实验蠕变曲线与模拟的蠕变曲线之间的比较

Zhou 等<sup>[19-20]</sup>研究了热等静压对蠕变孔洞的修复机理,认为温度和压力是溶质扩散的两个驱动因素,它们相互作用影响着蠕变孔洞的愈合性能。并基于孔洞修复特点以及相关热力学理论提出了孔洞的修复模型,该模型将孔洞周围应力梯度作为原子扩散的驱动力,对热等静压温度及压力对蠕变孔洞愈合动力学展开研究,从而建立了能够显示愈合时间和温度及压力的关系(图6),进而为热等静压参数选择提供一定依据。

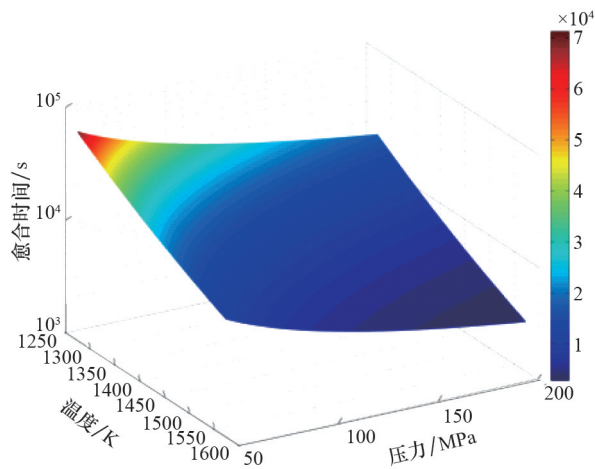


图6 孔洞修复所需的时间与HIP温度和压力关系模拟图

## 2 热等静压对镍基单晶高温合金力学性能的影响

### 2.1 热等静压对镍基单晶高温合金拉伸性能的影响

Lan 等<sup>[21]</sup>研究了热等静压下单晶高温合金拉伸性能的变化,采用图6所示热等静压方案对完全热处理态二代单晶高温合金 CMSX-4 进行热等静压处理。在 980℃ 下对采用 HIP 处理与没有采用 HIP 处理试样进行拉伸试验,实验结果如图7所示。研究发现 HIP 处理后合金在 980℃ 的断裂伸长率增加了 20%,而屈服强度保持不变。分析断口形貌可以判断 HIP 处理减少了合金内部微孔的大小及数量,从而起到了抑制裂纹萌生与传播的作用,提高合金拉伸性能(图8)。

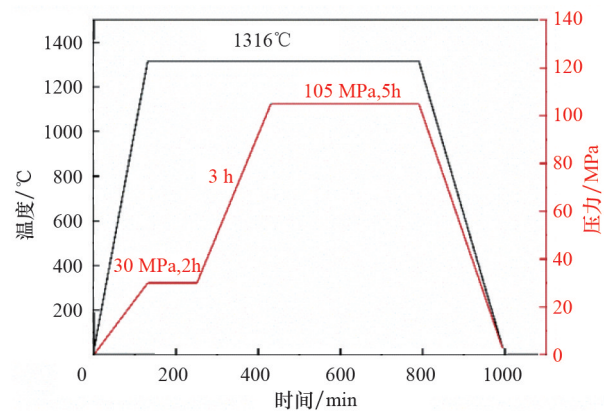


图7 热等静压方案

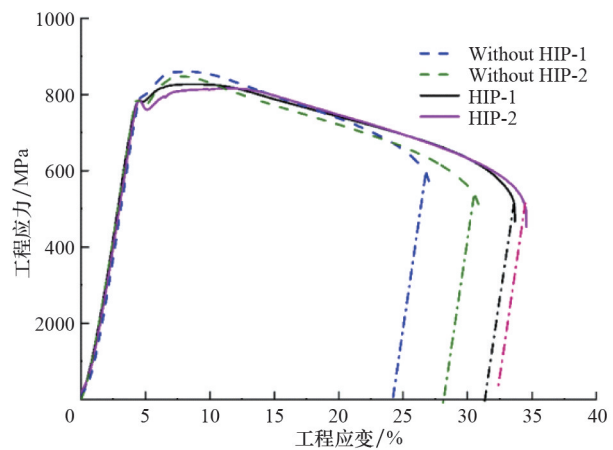


图8 980℃下有和没有HIP处理试样的工程应力应变曲线

## 2.2 热等静压对镍基单晶高温合金持久性能的影响

Chang<sup>[22]</sup>对完全热处理后的 CMSX-4 合金进行热等静压处理,并对合金显微组织与力学性能进行分析。研究表明,合金在经过热等静压处理后,内

部孔隙率不仅得到显著降低,950℃/355 MPa 下的持久寿命也由 72.7 h 提升至 134.28 h,实验结果如图 9 所示。

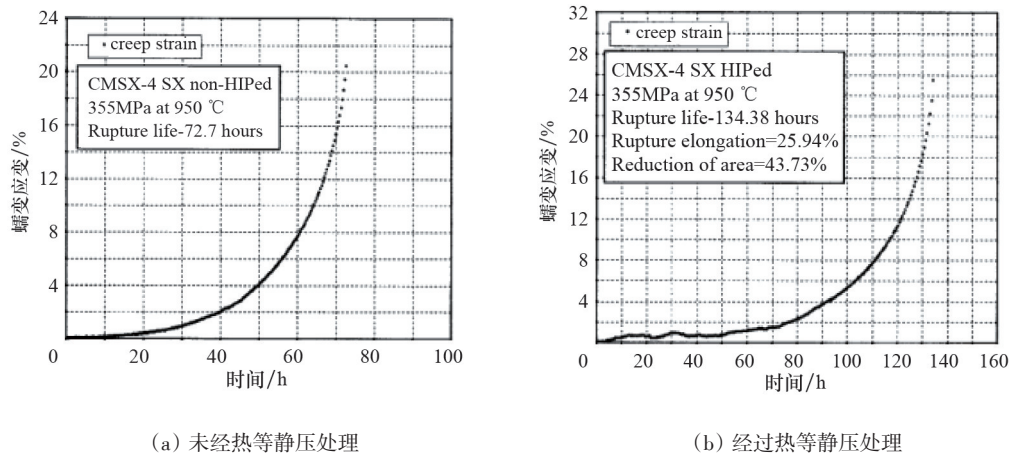


图9 CMSX-4合金950℃/355 MPa应力应变曲线

史振学等<sup>[23]</sup>将铸态镍基单晶高温合金试样进行1180℃/150 MPa条件下热等静压处理,并将HIP处理后试样与铸态试样进行标准热处理,测试不同条件试样的持久性能,实验结果如表3所示,可以看出在760℃/800 MPa和980℃/250 MPa条件下,合金经热等静压处理后持久寿命增加;在1100℃/140 MPa条件下,合金的持久寿命没有明显改变。

表3 热等静压对合金不同条件下持久性能的影响

测试条件	处理方案	时间/h
760℃/800 MPa	热处理	353.5
	HIP+热处理	462.1
980℃/250 MPa	热处理	225.2
	HIP+热处理	254.6
1100℃/140 MPa	热处理	83.4
	HIP+热处理	85.1

## 2.3 热等静压对镍基单晶高温合金疲劳性能的影响

郭会明<sup>[24]</sup>研究了热等静压对二代单晶高温合金DD6的低周疲劳性能的影响规律,通过设置3个不同温度(1280℃,1300℃,1320℃)及相同压力(100 MPa)与保持时间(4 h)的热等静压方案对DD6合金进行处理,并对合金进行760℃下高温低

周疲劳试验,实验结果如图10所示。可以看出热等静压能够显著提高DD6单晶合金的疲劳寿命,其中1300℃热等静压处理后试样的疲劳寿命( $2N_f=141900$ )相较未经热等静压处理的试样的疲劳寿命( $2N_f=16806$ )可提高1个数量级,不过当温度超过1300℃后,合金低周疲劳性能呈现下降趋势。

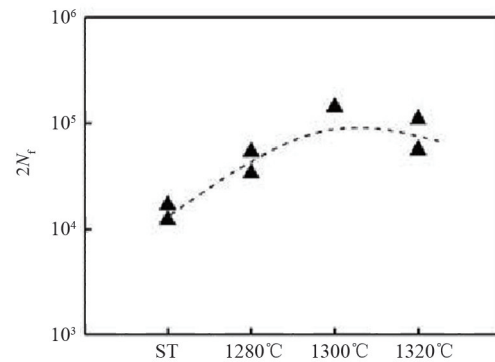
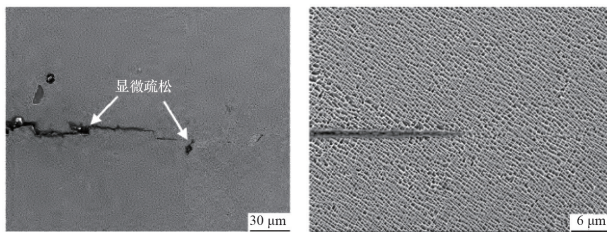


图10 DD6合金760℃高温低周疲劳寿命

骆宇时<sup>[25]</sup>研究了热等静压对DD6单晶高温合金高温高周疲劳性能的影响,对铸态DD6合金进行1300℃/100 MPa条件下4 h的热等静压处理,随后对合金进行标准热处理。在850℃和300~850 MPa下分别对只进行标准热处理与热等静压+标

准热处理试样进行高周疲劳实验,发现经热等静压处理后合金疲劳强度由 331 MPa 提高至 433 MPa。如图 11 所示,利用扫描电镜分析断口组织形貌,对于未经热等静压处理试样,其枝晶间的显微疏松等缺陷会成为疲劳循环过程中萌生微裂纹的源头,并与疲劳主裂纹相互连接加速裂纹扩展。而经过热等静压处理后,合金内部显微疏松得以消除,裂纹只能通过基体滑移变形的方式扩展,因此提高合金抗疲劳性能。



(a) 标准热处理试样 (b) HIP + 标准热处理试样  
图 11 DD6 单晶高温合金试样疲劳断口纵截面的 SEM 形貌

### 3 热等静压镍基单晶高温合金恢复处理中的应用

镍基高温合金被广泛用于制造航空发动机及燃气轮机热端部件,这些部件由于需要在高温下承受复杂的应力而不可避免产生组织上的损伤,需要对部件进行更换以保证安全<sup>[20]</sup>。随着对自然资源可重复利用的需要以及降低成本的目的,近年来对已损伤材料的修复工作越来越引起人们的关注。

热等静压技术让材料在高温高压下发生塑性变形,并且大大增强元素扩散能力,这些特点都将有利于金属材料损伤的修复<sup>[26]</sup>。

Ruttart 等<sup>[27]</sup>利用热等静压技术对已发生蠕变行为的镍基单晶高温合金 CMSX-4 组织性能恢复现象的研究,通过设置图 12 所示循环试验方案,试样在 1050°C 和 160 MPa 下沿[001]方向预蠕变至 5%应变,观察组织发现内部已出现筏化与孔洞损伤,随后对试样进行恢复处理,即在 1280°C、100 MPa 下保温 2 h,随后在 1300°C、100 MPa 下保温 2 h 后充入氩气淬火,最后对试样进行时效处理。完成恢复处理后在相同蠕变试验条件下使试样发生 1.5%的应变。实验结果如图 13 所示,对比试验结果,恢复处理基本可以完全恢复已发生蠕变行为材料的蠕变性能。但是 Horst 等<sup>[28]</sup>在其研究中也指出在蠕变预应变为 5.0%之后进行的 HIP 恢复处理虽然可以显著提高蠕变强度。但是蠕变预变形引起的微观结构破坏不能完全消除。

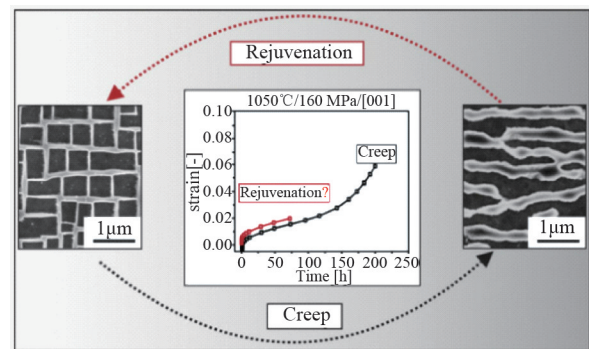
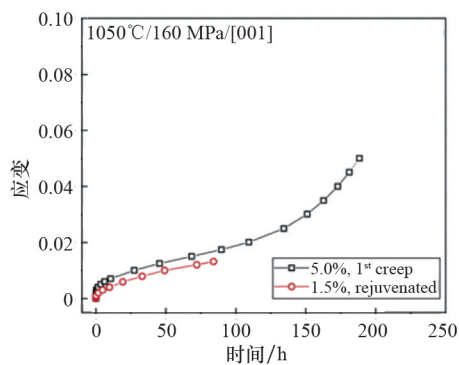
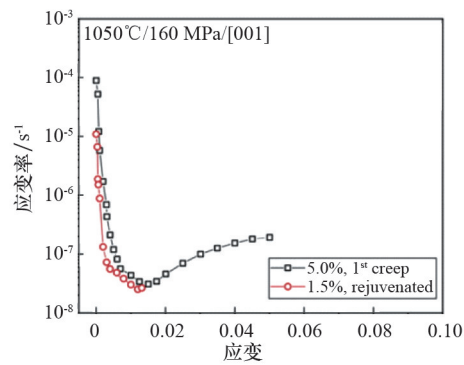


图 12 蠕变-恢复循环试验



(a) 应变与时间的关系



(b) 应变率与应变的关系

图 13 1050°C 和 160 MPa 下从同一样品获得的拉伸蠕变数据

## 4 结论

随着镍基单晶高温合金的快速发展及国内对镍基单晶高温合金制品需求量急剧增加,人们急切希望提高合金承温能力及其高温下的综合性能,从而开发出推重比及燃油效率更高的先进航空发动机和燃气轮机。然而,金属铸造过程中无法避免产生的疏松等孔洞类缺陷在一定程度上限制了合金的发展,危害合金力学性能并降低合金服役寿命。热等静压技术作为消除合金内部孔洞类缺陷的有效方法已得到国内外学者的深入研究,并且成功将该技术工程化应用。随着带有可快速冷却功能的热等静压设备的出现,学者们开始研究将热处理工艺与热等静压工艺相结合的方式处理合金制品,从而在提高合金综合性能的同时大大降低成本。同时还开展了热等静压技术在对材料修复领域的研究,热等静压与增材制造<sup>[29]</sup>等先进工艺相结合研究等。

目前,中国热等静压技术在镍基单晶高温合金领域的应用研究与国外发达国家还存在一定的差距,国外相关技术封锁以及先进热等静压设备的缺乏制约着中国热等静压技术在镍基单晶高温合金领域的工程化应用,目前的科学研究工作大部分局限于显微组织及材料性能的表征,缺乏机理的分析研究以及工程化应用研究。因此,热等静压技术在镍基单晶高温合金领域的应用研究还需更多科学工作者的积极参与,伴随着中国航空发动机技术的快速发展,镍基单晶高温合金涡轮叶片需求量也不断增加,相信不久的将来热等静压技术在镍基单晶高温合金领域应用研究能够得到飞速发展。

### 参考文献(References)

- [1] 胡壮麒, 刘丽荣, 金涛, 等. 镍基单晶高温合金的发展[J]. 航空发动机, 2005, 31(3): 1-7.
- [2] 陈荣章. 单晶高温合金发展现状[J]. 材料工程, 1995(8): 3-12.
- [3] Reed R C. The superalloys: Fundamental and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 1.
- [4] 李嘉荣, 熊继春, 唐定中, 等. 先进高温结构材料与技术(上)[M]. 北京: 国防工业出版社出版, 2012: 175.
- [5] Link T, Zabler S, Epishin A, et al. Synchrotron tomography of porosity in single-crystal nickel-base superalloys [J]. Materials Science & Engineering A, 2006, 425: 47-54.
- [6] Bokstein B S, Epishin A, Link T, et al. Model for the porosity growth in single-crystal nickel-base superalloys during homogenization[J]. Scripta Materialia, 2007, doi: 10.1016/j.scriptamat.2007.07.012.
- [7] Epishin A, Link T, Brückner U, et al. Investigation of porosity in single-crystal nickel-base superalloys[C]//Materials for advanced power engineering 2002. Belgium: PBD, 2002: 217-226.
- [8] 张健, 楼琅洪. 铸造高温合金研发中的应用基础研究[J]. 金属学报, 2008, 54(11): 1637-1652.
- [9] 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): 1199-1202.
- [10] Weddeling A, Theisen W. Energy and time saving processing: A combination of hot isostatic pressing and heat treatment[J]. Metal Powder Report, 2017, 72(5): 345-348.
- [11] 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): 40-43.
- [12] Bürgel R, Portella P D, Preuhs J. Recrystallization in Single Crystals of Nickel Base Superalloys[C]// Superalloys. Champion, USA: TMS, 2000: 229-238.
- [13] Epishin A, Fedelich B, Link T, et al. Pore annihilation in a single-crystal nickel-base superalloy during hot isostatic pressing: Experiment and modeling[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 586: 342-349.
- [14] 曹腊梅, 刘丽君, 陈晶阳, 等. 热等静压温度对第三代单晶高温合金 DD10 组织的影响[J]. 材料工程, 2013(6): 1-4.
- [15] Epishin T L, Fedelich B, Svetlov I, et al. Hot isostatic pressing of single-crystal nickel-base superalloys: Mechanism of pore closure and effect on mechanical properties[C]//MATEC Web of Conferences 14, Proceedings of Eurosuperalloys, Giens: France, EDP Sciences, 2014: 08003.
- [16] Chang J C, Choi C, Kim J C, et al. Development of microstructure and mechanical properties of a Ni-base single-crystal superalloy by hot-isostatic pressing[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2003, 12(4): 420-425.
- [17] 黄荣芳, 于维成, 唐亚俊, 等. 热等静压对铸造高温合金疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 1988(3): 50-53.
- [18] Roncery M L, Lopez-Galilea I, Rutttert B, et al. Influence of temperature, pressure, and cooling rate during hot isostatic pressing on the microstructure of an SX Ni-base superalloy[J]. Materials and Design, 2016, 97: 544-552.

- [19] Zhou Y, Rao S X, Zhang Z, et al. Interaction of hot isostatic pressing temperature and hydrostatic pressure on the healing of creep cavities in a nickel-based superalloy[J]. *Materials and Design*, 2013, 49: 25-27.
- [20] Zhou Y, Zhang Z, Zhong Q P, et al. Model for healing of creep cavities in nickel-based superalloys under hot isostatic pressing[J]. *Computational Materials Science*, 2012, 65: 320-323.
- [21] Lan J, Xuan W D, Han Y, et al. Enhanced high temperature elongation of nickel based single crystal superalloys by hot isostatic pressing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 805: 78-83.
- [22] Chang J H, 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]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2003, 12 (4): 420-425.
- [23] 史振学, 刘世忠, 熊继春. 热等静压对单晶高温合金组织和持久性能的影响[J]. *材料工艺*, 2015, 44(9): 2300-2304.
- [24] 郭会明, 赵云松, 郑帅, 等. 热等静压对第二代单晶高温合金 DD6 显微组织和力学性能的影响[J]. *材料工程*, 2016, 44(10): 60-67.
- [25] 骆宇时, 郭会明, 赵云松, 等. 热等静压对第二代 DD6 单晶高温合金高温高周疲劳性能的影响[J]. *机械材料工程*, 2016, 40(7): 51-55.
- [26] Zheng X G, Shi Y N, Lou L H. Healing process of casting pores in a Ni-based superalloy by hot isostatic pressing[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31: 1151-1157.
- [27] Ruttert B, Bürger D, Roncery L M, et al. Rejuvenation of creep resistance of a Ni-base single-crystal superalloy by hot isostatic pressing[J]. *Materials and Design*, 2017, 134: 418-425.
- [28] Horst O M, Ruttert B, Bürger D, et al. On the rejuvenation of crept Ni-Base single crystal superalloys (SX) by hot isostatic pressing (HIP)[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2019, 758: 202-214.
- [29] Ruttert B, Ramsperger M, Roncery L M. Impact of hot isostatic pressing on microstructures of CMSX-4 Ni-base superalloy fabricated by selective electron beam melting[J]. *Materials and Design*, 2016, 110: 720-727.

## Research and applications of hot isostatic pressing technology in nickel-based single crystal superalloy

ZHANG Jian<sup>1</sup>, SONG Fuyang<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China
2. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China

**Abstract** Since the introduction of the hot isostatic pressing (HIP) technology, it has been widely used in the powder metallurgy forming to improve the densification of castings. With the increasing demand for the high performance nickel-based single crystal superalloys, the applications of the hot isostatic pressing in the nickel-based single crystal superalloys attracted more and more studies. This paper reviews the current research progress in the applications of the hot isostatic pressing for the high temperature nickel-based single crystals, focusing on the elimination effect of the hot isostatic pressing on the looses and other pore defects in the nickel-based single crystal superalloys, and the pore healing mechanism, as well as the changes in mechanical properties such as tensile strength, endurance, and fatigue after applying the hot isostatic pressing. The application of the hot isostatic pressing for the restoration of the mechanical properties of the serviced parts and the calculation simulation in guiding the heat and other topics are also discussed. The role of the static pressure process research, and the future development of China's hot isostatic pressing technology are commented.

**Keywords** nickel-based single crystal superalloys; hot isostatic pressing; pore defects; mechanical properties ●



(责任编辑 卫夏雯)