

# 等温锻造用模具材料的国内外研究发展状况\*

李 青 韩雅芳 肖程波 宋尽霞

(北京航空材料研究院先进高温结构材料国防科技重点实验室,北京 100095)

**摘要** 综述了不同温度范围内使用的等温锻造模具材料,对它们的使用情况和优缺点进行了讨论,分析了高强、难变形涡轮盘和粉末盘材料用高温合金以及金属间化合物,如 TiAl 等,形变对等温锻造模具材料的需求,并根据我国国情提出了 1050°C 以上使用的等温锻造模具材料的发展思路。

**关键词** 等温锻造 模具材料 高温

## R & D Status of Die Materials for Iso-thermal Forging at High Temperature

LI Qing HAN Yafang XIAO Chengbo SONG Jinxia

(The National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, BIAM, Beijing 100095)

**Abstract** The die materials for iso-thermal forging at high temperatures are reviewed. The application, advantages and disadvantages of these materials are also discussed. The requirements of iso-thermal forging die materials for the deformation of high strength, hard deformative materials and powder superalloys, such as TiAl intermetallics, are analyzed. According to Chinese situation national conditions of China, some suggestions of the development for iso-thermal die materials with operating temperature higher than 1050°C, are made in this paper.

**Key words** iso-thermal, die material, high temperature

## 0 引言

等温锻造指毛坯从始锻到终锻始终在同一温度条件下进行低变形速率的锻造。等温锻造(Iso-thermal Forging)成形时,毛坯与模具的加热温度相同,并且应变速率很低( $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),这样由于消除了模具激冷和材料应变硬化的影响,不仅变形抗力小,而且可以完成净成形(near-net shape)加工,因而大大提高了金属的利用率以及锻件的性能。这种新型工艺已经成为先进难变形材料(如钛合金、镍基高温合金、金属间化合物)的主要成形方法<sup>[1,2]</sup>。大气下等温锻造与全封闭等温锻造相比是一种经济的工艺路线,其关键是模具材料。高温合金及金属间化合物的变形温度一般都在 1000°C 以上,锻件缓慢成形,整个工艺过程需要较长时间,而且根据实际使用经验,要求在变形温度下模具材料的屈服强度极限与变形材料的屈服强度极限比值在 3 以上<sup>[2,3]</sup>,这就要求模具材料在锻造温度范围内具有较高的屈服强度、抗氧化、抗蠕变和良好的冷热疲劳性能。

提高变形温度是增加难变形合金塑性的有效方法,并且还有希望达到其超塑性状态,这就要求其等温锻造模具能承受更高的温度。欧美、俄罗斯等国都先后在此领域进行了深入的研究,并建立了有效的等温锻造工艺体系。目前我国由于不具备能够在 1050°C 以上高温使用的模具材料,还无法进行大粉末镍基涡轮盘以及更先进的金属间化合物(TiAl 等)的等温成形,因此在我国研究 1050°C 以上大气下使用的低成本模具材料具有

重要的现实意义。

## 1 典型合金的等温锻造温度范围

由于在超塑性状态下合金锻造所用的锻造应力显著降低,呈现优异的塑性,可成形许多形状复杂的零件,因而在等温锻造过程中,希望达到材料的超塑性状态。有研究表明,IN100, Waspaloy, Astroloy 的超塑性温度分别在 982~1093°C, 900~940°C 和 927~1066°C 范围内。通常 Astroloy 盘在 1038°C 达到超塑性状态下模锻,所需的应力只有 8.2MPa<sup>[4]</sup>。

当温度高于 1089°C 时,应变速率低于  $0.08 \text{ S}^{-1}$ ,或当温度低于 1050°C 时,应变速率低于  $0.005 \text{ S}^{-1}$ , Rene'95 都可达到超塑性;在 1050°C,应变速率为  $0.001 \text{ S}^{-1}$  时该合金的流变应力仅为 130MPa,则模锻合金的屈服强度在 390MPa 以上就能够保证其使用的安全性<sup>[5]</sup>。TiAl 的超塑性温度范围因合金的成分不同而异,但超塑性性能较好的温度范围在 1100°C 附近,这时的应变速率在工程中容易实现,在  $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ S}^{-1}$  之间。 $\alpha + \beta$ -Ti 合金的等温锻造,如 Ti-6Al-4V,在 925~980°C 范围内; $\beta$ -Ti 合金如 Ti-10V-2Fe-3Al 则可在 815°C 或更低的温度锻造。

综上所述,在以上的难变形合金中,Ti 合金的等温锻造温度最低,在 900°C 左右;而 Ni 基合金的等温锻造温度多在 1000°C 左右;对于粉末合金 Rene'95,等温锻造温度需 1050°C 甚至更高;而金属间化合物 TiAl 的等温锻造则要在 1100°C 以上。

\* 基金资助国家“863”计划(2002AA331140);航空基础科学基金(02G21001) 李青:博士研究生 E-mail:liq0324@sina.com

## 2 国内外目前开发的等温锻造用模具材料及其使用状况

按锻件的等温锻造温度范围可将等温锻造模具分为 3 类:第 1 类是常规的热作模具钢,如:5CrNiMo、3Cr2W8V 等;第 2 类是最高使用温度在 1000℃ 左右的高温合金模具,如欧美的 IN100、MAR-M-200、X-40、Udimet 700、Inconel713C 以及 Astroloy、IN-718、Waspoly, AF2-1DA 等<sup>[6,7]</sup>,俄罗斯的 ЖС6К、

ЖС6У、ИШВ-1、ИШВ-2、Л114 以及中国的 K3 等,这些合金的使用温度都在 1000℃ 以下,主要用于 Ti 合金的等温锻造。表 1 显示了其中某些用作模具材料的典型高温合金的化学成分;第 3 类是当变形温度超过 1000℃ 的某些高温合金及其它高温材料锻造时用的(如某些变形 Ni 基高温合金以及金属间化合物)铸造 Ni 基高温合金、难熔金属合金(主要有钼基合金以及钨基合金)模具及某些陶瓷模具。

表 1 国内、外典型的等温锻造用高温合金成分

合金名称	使用温度	化学成分(wt%)										
		Al	C	Cr	Co	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	Ti	其它
Inconel 713C(美)	一般不超过 1000℃	6.1	0.12	12.5	—	1	0.15	4.2	余量	0.4	0.6	2Nb, 0.012B, 0.1Zr
Inconel 718(美)		0.5	0.04	19	—	18.5	0.2	3	52.5	0.2	0.9	5.1Nb
In-100(美)		5.5	0.18	10	15	0	0	3	60	0	4.7	0.014B, 0.06Zr, 1V
MAR-M-200(美)		5.0	0.15	9	10	—	—	—	余量	—	2.0	0.015B, 1.8Nb, 12.5W, 0.05Zr
Udimet 500(美)		2.9	0.08	18	18.5	0.0	0.0	4	54.0	0.0	2.9	0.06B, 0.05Zr
Udimet 700(美)		4	0.06	15	17	0.0	0.0	5	余量	—	3.5	0.06C, 0.03B
Astroloy(美)		4.0	0.06	15	17	—	—	5.3	55	—	3.5	0.03B
TZM(欧美)	可至 1700℃	—	0.03	—	—	<0.01	0.008	余量	<0.002	—	0.48	<0.0005H, <0.0025O
K3(中)	可至 1000℃	5.3~5.9	0.11~0.18	10.0~12	4.5~6.0	≤2.0	≤0.5	3.8~4.5	余量	≤0.5	2.3~2.9	4.8~5.5W, 0.012~0.022B, 0.03~0.08Zr, 0.01Ce
K21(中)	至 1050℃	6.0	0.15	3.0	<10.0	—	—	—	余量	—	<0.2	18.0W, 1.0Nb, 0.5Zr, 0.02B
Nimoval(日)	至 1070℃	6.0	—	—	—	—	—	10	余量	—	—	0.01Y, 12W
ЖС6-К(俄罗斯)	至 1000℃	5.5	0.16	11	4.5	<2	<0.4	4	余量	<0.4	2.75	0.02B
ЖС6-У(俄罗斯)	至 1000℃	5.1	0.13	8.0	9.5	—	—	1.2	余量	—	2.0	Zr<0.04, B<0.035, 9.5W, Ce<0.02, 0.8Nb, Y<0.01

本文重点是介绍在较高温度使用的模具材料,故不再详述常规的热作模具钢的使用状况,下面将主要介绍最高使用温度在 1000℃ 左右和在 1000℃ 以上的模具材料在国内外的开发和应用状况。

### 2.1 最高使用温度 1000℃ 左右的高温合金模具材料

最高使用温度在 700~1000℃ 范围内的模具材料很多,主要有 Ni 基和 Ni<sub>3</sub>Al 基高温合金。在欧美、俄罗斯以及中国等国家都有广泛的应用。Ni 基高温合金的开发使用状况如下。

美国的等温模锻用 Ni 基合金模具材料均在 1000℃ 以下使用。在 982℃ 时 X-40、Udimet 700、Inconel713C、IN-100 和 MAR-M-200 的最高屈服强度分别为 150MPa、210MPa、320MPa、490MPa 和 520MPa<sup>[6]</sup>。以上合金中 MAR-M-200 合金的高温性能最佳,不仅在 982℃ 高温下具有最高的屈服强度,而且还能在 1050℃ 高温下达到完全抗氧化级别。Udimet 700 合金在 980℃ 下具有良好的抗氧化性能,但在 1090℃,表面层上的合金元素略有烧损。IN-100 合金的抗热疲劳性能为 Udimet 700 的 2 倍和 Udimet 500 的 3.5 倍。俄罗斯开发了多种 Ni 基高温合金模具,主要有 ЖС6К、ЖС6У、ИШВ-1、ИШВ-2。ИШВ-1 的工作温度为 850~900℃,ИШВ-2 的工作温度为 900~1000℃<sup>[8]</sup>,

这 2 种合金主要用于钛合金的等温锻造。在国内,用于 1000℃ 以下使用的 Ni 基高温合金模具材料及候选材料有 K3、K5、K412 等。上海钢铁研究所的劳金海、乐秋萍等以 K3 合金为模具材料,采用等温锻造工艺成功地研制出 TC11 钛合金八级钛合金压气机盘、TC6 钛合金 WS11 I II 级压气机盘<sup>[9,10]</sup>。

美国研制的 IC-221M 为一种 Ni<sub>3</sub>Al 基的高温材料,可代替 Inconel713C 合金,用作 1000℃ 以下使用的热锻模具材料,其高温强度要比 Inconel713C 高许多,而且高周疲劳性能也优于 Inconel713C。IC-221M 还成功地代替了 Cr-Mo-V 模具钢应用于刹车架(brake spider)的锻造,其使用寿命是 Cr-Mo-V 模具钢模具的 7 倍以上,使每个锻件的锻造成本降低了 4 倍<sup>[11]</sup>。由我国钢铁研究总院研制的 MX246(Ni<sub>3</sub>Al 基)合金已经得到了大量的工程应用,也可用作模具材料。该合金在 900℃ 以上具有较高的瞬时拉伸性能、持久性能和抗蠕变性能。其铸态合金在 900℃, 150MPa 应力下的寿命在 200h 以上<sup>[12]</sup>。

### 2.2 使用温度超过 1000℃ 的高温模具材料

将在此温度范围使用的高温模具材料的开发使用状况按材料的种类进行阐述。

### (1) Ni 基高温合金

目前开发的 Ni 基高温合金模具材料均为在大气下使用,合金的特点是高温强度高、有较好的抗氧化性和冷热疲劳性能。

在俄罗斯,1000℃以上使用的主要是 ЖС6К、ЖС6V<sup>[8]</sup>。其中 ЖС6V 合金在 1050℃,105MPa 应力下的寿命为 100h,1000℃下的屈服强度可达 500MPa。在 1050℃能达到完全抗氧化。日本研制的 Nimowal 是一种铸造 Ni 基高温合金,据报道该合金具有较高的耐高温强度,等温锻造的极限使用温度为 1070℃,可用于 Waspaloy 合金和 IN100 合金的锻造<sup>[13~15]</sup>。但其成分中 Mo 和 W 的含量高,含抗氧化性元素较少,高温抗氧化性不好,对于大气下使用的模具材料这是影响其使用寿命的一个重要方面,而且还导致模具的精度下降。

在国内,1000℃以上使用的仅有仿制合金 K21。K21 是一种高温高强度的高钨类型 Ni 基高温合金,理论使用温度为 1050℃,在 1050℃的屈服强度为 420~478MPa。使用这种合金,已经成功锻造出 Φ220mm 的 FGH95(相当于 Rene95)粉末高温合金模拟盘。其存在的主要问题是裂纹倾向性大,抗氧化性稍差。

从现有资料分析可见,现有的 Ni 基高温合金模具材料使用温度均在 1100℃以下,在上述的 3 种合金 ЖС6V、Nimowal 和 K21 中,ЖС6V 合金的综合性能最好但耐温不高,Nimowal 和 K21 耐温稍高,但存在裂纹倾向性大,抗氧化性不好等问题,影响模具的使用寿命。

### (2) Ni<sub>3</sub>Al 基合金

Ni<sub>3</sub>Al 基合金具有熔点高,密度小,比强度高,抗氧化性能好等优点,是一种潜在的高性能高温结构材料。Ni<sub>3</sub>Al 基合金模具材料同样具有能在大气下使用的优点。其缺点是高温塑性指标不高,有较强的热裂倾向,另外由于合金中铝含量较高,流动性较差,会导致合金的充型能力不足,这些因素限制了其在大型复杂锻造模具上的应用。

Ni<sub>3</sub>Al 基合金从 20 世纪 50 年代起即作为模型合金进行研究,但由于多晶 Ni<sub>3</sub>Al 基合金的室温晶界脆性一直限制了其发展,直到 70 年代发现微量硼可以大大提高 Ni<sub>3</sub>Al 室温塑性<sup>[16]</sup>,并使其断裂方式由沿晶型转变为穿晶型后,Ni<sub>3</sub>Al 的研制才进入了一个新的高潮,而且取得了许多重要进展。美国的 PW 公司、NASA 和橡树岭国家实验室(ORNL)开发出大量的 Ni<sub>3</sub>Al 基高温结构材料,如 IC-50、IC-396、IC-221M 以及 IC-218 等<sup>[12,17~20]</sup>,但主要用于石油、化工、机械及汽车等民用工业领域。据目前报道,将其成功应用于 1000℃以上等温锻造的仅有俄罗斯,他们结合合金设计和高温梯度定向凝固技术发展了 BKHA 系列 Ni<sub>3</sub>Al 基合金。采用该系列合金 BKHA-3 铸造的等温锻模具可在 177MPa 载荷下耐 1200℃的高温,已用于 ЭИ962 难变形合金涡轮盘的等温模锻<sup>[8]</sup>。

在国内,自 80 年代以来,北京航空材料研究院、北京钢铁研究总院、中国科学院金属所和上海交通大学在 Ni<sub>3</sub>Al 基合金的基础研究、研制开发和应用研究等方面做了许多工作,研制成功了一些具有自主知识产权的合金。北京航空材料研究院经“七五”、“八五”和“九五”十余年的努力,在“863”计划资助下研制成功了具有自主知识产权、低成本定向凝固 Ni<sub>3</sub>Al 基合金 IC6 和

钪改性的 IC6A<sup>[21~26]</sup>。该合金在 1100℃/100h 的持久强度可达 100MPa,具有突出的高温强度。“十五”期间,在“863”计划资助下北京航空材料研究院已经开始了 1050℃以上大气下使用的等温锻造用模具材料的开发和研究工作。总之,虽然目前国内金属间化合物还缺乏在等温锻造材料上的应用,但已具备了相当的研究基础,有关的研究工作也正在逐步开展。

### (3) TZM 合金

TZM 合金是耐温最高但同时也是所需耗费最昂贵的锻模材料。它是一种已经被商业化生产的碳化物沉淀强化钼基合金。在 1100~1700℃范围内,TZM 合金的强度水平在 900~600MPa 之间<sup>[5]</sup>。但 TZM 合金的抗氧化性很差,在温度超过 425℃时就发生严重的氧化,必须采用真空封闭装置或采用氩气氛保护。另外由于 TZM 合金存在韧-脆转变温度,需在 1400~1700℃范围内在真空或氢气中进行热处理。在使用过程中要控制模具的加热速率,使用低频感应加热,从而使生产周期延长。由于以上因素,使用 TZM 合金作模具材料成本很高。

在美国 TZM 合金是等温锻造粉末高温合金盘件的唯一模具材料,已建立了完善的全封闭等温锻造设备。他们利用 TZM 合金作模具材料,已经批量生产以 IN100、Rene'95、Rene'88DT 镍基高温合金为主的涡轮盘。

我国目前还不具备全封闭等温锻造设备,但要使用 TZM 合金,不仅要付出高昂的成本,还需同时发展相应的大型全封闭锻造设备的制造技术,不符合我国国情。

### (4) 其它等温锻造用材料的研究

日本以及俄罗斯等国家在致力于开发探索低成本的 Ni 基合金和 Ni<sub>3</sub>Al 基合金锻模材料的同时,还对其它材料用作等温锻造模具材料进行了探索研究,日本机械技术研究所进行的研究表明可以用陶瓷模具锻造出近净成型的 Ni 基高温合金锻件。这项研究是将陶瓷模块连接起来制成满足工业用尺寸(直径约 50mm)的模具,其难点在于如何将其从简单的预制体形状制成复杂的近净成型的制品。模具由 SiAlON 陶瓷制成,然后用 EDM(Electron Discharge Machining)技术加工成复杂的形状。研究表明这种等温锻模在大气下使用情况良好<sup>[27]</sup>。但制造的陶瓷模具只限于很小的尺寸,而且其使用寿命也很短。乌克兰研究院的一项研究表明,与 Mo、V、Al、Y 合金化后的 Cr-TiC 共晶合金有望替代 BKHA-3 合金用作 1150℃以上的等温锻造模具材料<sup>[28]</sup>。这些工作目前尚在实验室探索阶段。

## 3 结束语

(1) 在热作模具使用极限以上,1000℃以下温度范围使用的模具材料,国内外发展都已相当成熟,多采用变形或铸造 Ni 基高温合金,且国内外发展差距不大。对于在 1000℃以上使用的模具材料,欧美以及俄罗斯均建立了自己完善的等温锻造设备,我国唯一在 1000℃以上使用的模具材料是 K21,在 1050℃以上使用的模具材料尚属空白。

(2) 在上述介绍的 1000℃以上使用的模具材料中,Ni 基高温合金的耐温程度最低,均在 1100℃以下,且综合性能还不够好,需进一步开发可用于高温等温锻造的特种超强 Ni 基合金模具材料;与常规的 Ni 基合金模具材料相比,Ni<sub>3</sub>Al 基合金具有比重较轻、抗氧化性好、抗疲劳性能好、价格较低等优点。该合金

(下转第 16 页)

- 2 马善理. 非冶金氧化铝. 轻金属, 1997, (7): 27
- 3 戚立宽. 初论多品种氧化铝分类法. 轻金属, 1996, (2): 18
- 4 张阳春. 我国多品种氧化铝生产发展. 轻金属, 1996, (8): 7
- 5 罗玉长. 氧化铝在精细陶瓷中的应用. 轻金属, 1992, (3): 13
- 6 韦园红. 超细  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  悬浮液的流变性研究. 华东理工大学学报, 1999, 25(5): 518
- 7 Manheew Neville, Dayed J Fluck, et al. Chemical mechanical polishing slurry for metal layers. USA Pat, 5527423. 1996-16-18
- 8 Joseph M, Steigerwald, Shyam P, et al. Chemical mechanical planarization of microelectronic materials. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1997. 1
- 9 The National technology roadmap for semiconductors. Semiconductor Industry Association(SIA). San Jose, CA, USA, 1994
- 10 曲直. 多品种氧化铝市场行情及预测. 世界有色金属, 1998, (10): 62
- 11 孙林贤. 浅论山东铝业公司多品种氧化铝生产技术改造可行性. 轻金属, 1996, (10): 6
- 12 刘丕旺. 低钠煅烧氧化铝的开发. 火花塞与特种陶瓷, 1994, (1): 37
- 13 刘纯玉, 刘朝霞. 活性氧化铝及其发展. 轻金属, 2001, (4): 24
- 14 高志贤, 武建青. 铝酸钠溶液碳化制备活性氧化铝. 燃料化学学报, 1998, 26(5): 468
- 15 潘泽琳. 无定形铝胶的研制与应用. 轻金属, 1991(12): 5
- 16 宋晓岚. 高纯超细氧化铝粉体制备技术进展. 陶瓷工程, 2001, (6): 43
- 17 Popp U, Herbig R, Michel G, et al. Properties of nanocrystalline ceramic powders prepared by laser evaporation and recondensation. J Eur Ceram Soc, 1998, (9): 1153
- 18 Kumar P M, Balasubramanian C, Sali N D, et al. Nanophase alumina synthesis in thermal arc plasma and characterization: correlation to gas-phase studies. Mater Sci Eng B-Solid, 1999, (3): 215
- 19 Sharma P K, Jilavi M H, Burgard D, et al. Hydrothermal synthesis of nanosize  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  from seeded aluminum hydroxide. J Amer Ceram Soc, 1998, (10): 2732
- 20 Peng T Y, Du P W, Hu B, et al. Preparation of nanoscale alumina powder by heterogeneous azeotropic distillation processing. J Inorgan Mater, 2000, (6): 1097
- 21 Zeng W M, Rabelo A A, Tomasi R. Synthesis of  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanopowder by sol-freeze drying method. Key Eng Mater, 2001, (1): 16
- 22 Wang H, Gao L, Li Weiqun, et al. Preparation of nanoscale  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder by the polyacrylamide gel method. Nanostruct Mater, 1999, (8): 1263
- 23 Ding J, Tsuzuki T, McCormick P G. Ultrafine alumina particles prepared by mechanochemical thermal processing. J Amer Ceram Soc, 1996, (11): 2956

(责任编辑 张明)

(上接第11页)

有潜力将模具的耐温程度提高 100°C, 俄罗斯的 BKNA-3 合金已率先达到这一目标; TZM 合金的耐温程度最高, 可达 1200°C 以上, 但使用该合金成本极高昂, 不符合我国国情。

综上, 研究开发 1050°C 以上大气下工作的 Ni 基或  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基金具材料, 不需建立昂贵的全封闭等温锻造设备, 保证了高温合金涡轮盘等温变形工艺的实施, 研究成果将填补国内空白, 并满足国防和民用工业需求, 具有重要的现实意义。

### 参考文献

- 1 David Furrer. Forging aerospace components. Advanced Materials & Processes, 1999, (3): 33
- 2 《高技术新材料要览》编辑委员会. 高技术新材料要览. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 203
- 3 [苏] 菲格林等著. 薛永春译. 金属等温变形工艺. 北京: 国防工业出版社, 1982. 52
- 4 黄乾尧, 等. 高温合金. 北京: 冶金工业出版社, 2002. 262
- 5 崔健. P/M Rene'95 合金等温变形与 STMP 工艺研究. 北京航空材料研究院博士论文, 1995
- 6 [美] T Altan 著. 现代锻造. 北京: 国防工业出版社, 1978. 397
- 7 SM International, Member/Customer Service Center. ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1995: 236
- 8 郝应其, 等. 材料工程, 1993, 12: 45
- 9 乐秋萍, 等. 稀有金属, 1997(增刊), 21: 312
- 10 劳金海, 等. 稀有金属, 1997(增刊), 21: 396
- 11 Elliott T. 41<sup>ST</sup> MWST CONF PROC, ISS, 1999, XXX V I: 677
- 12 张永刚, 韩雅芳, 等. 金属间化合物结构材料. 北京: 国防工业出版社, 2001. 618
- 13 大野 丈博(山口県). ガスタービンエンジン用超耐熱合金の開発に関する研究. 博士论文, 1988
- 14 Ohno T, Watanabe R, Nonomura T. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1987, 27(1): 34
- 15 Ohno T, Watanabe R, Fukui T, et al. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1988, 28(11): 958
- 16 张永刚, 韩雅芳, 等. 金属间化合物结构材料. 北京: 国防工业出版社, 2001. 560
- 17 Alexander D J, Sikka V K. Mater Sci Eng, 1992, A152: 114
- 18 Sikka V K, Mavity J T, Anderson K. Mater Sci Eng, 1992, A153: 712
- 19 Gieseke B, Sikka V K. Mater Sci Eng, 1992, A153: 520
- 20 张永刚, 韩雅芳, 等. 金属间化合物结构材料. 北京: 国防工业出版社, 2001. 608
- 21 Han Y F, Chaturvedi M C. Acta Metall Sinica (Engl Lett), 1998, 11: 296
- 22 Xiao C B, Han Y F. J Mater Sci, 2001, 36: 4755
- 23 Han Y F, Xiao C B. Intermetallics, 2000, 8: 687
- 24 Xiao C B, Han Y F. Scri Mater, 1999, 41(11): 1217
- 25 Xiao C B, Han Y F. Scri Mater, 1999, 41(5): 475
- 26 Han Y F, Li S H, Jin Y, et al. Mater Sci Eng, 1995, A 192/193: 899
- 27 Ohuchi K, Nakazawa Y, Matsuno K. J Jap Soc Techn Plast, 1990, 31: 73
- 28 Ivanchenko V G, Pogorelaya V V, Ponomarev Yu N. Metallofizika I Novejshie Tekhnologii, 1996, 18(8): 30

(责任编辑 石咏)