

FGH95 粉冶高温合金涡轮盘锻造工艺研究

钢铁研究总院 杨士仲 李力

摘 要

研究指出, FGH95合金难变形, 不能采用一般的锻造工艺, 必须采取慢速变形和保温措施。采用等温锻造最合适。在目前我国还没有大型等温锻造机的情况下, 采用水压机包套锻造, 只要保证终锻温度, 严格控制变形量, 可以锻出质量合格的盘件。盘件性能已达到美国同类合金Reneg5的技术指标。

前 言

粉冶高温合金组织均匀、晶粒细小、疲劳性能好、屈服强度高, 是制造先进发动机涡轮盘的理想材料。美国已有十多年的生产和使用经验, 由军用现已扩大到民用。英、德、日、法等国也都正在研究。

FGH95(美国称Reneg5)合金是一种镍基粉冶涡轮盘合金, 含有较多的W、Mo、Nb、Al、Ti等合金元素, 由于合金化程度高, 变形很困难。美国原来采用直接热等静压技术制造涡轮盘, 1980年, 这种盘件曾发生断裂事故。

直接热等静压成形的涡轮盘, 其组织中存在大量的PPB(原始颗粒边界), 降低粉末间的结合强度。压力加工可以破碎PPB, 并改善夹杂物的形态和分布, 从而提高材料的性能, 增加盘件的安全可靠性^[1]。为寻求合理的成型工艺, 进行了锻造工艺的研究。

一、研究用料

采用真空熔炼氩气雾化的合金粉末。粉末

◁*▷ ◁*▷ △*▷ ◁*▷

又具有高温耐热的优点。特别是在200℃(< 2 in)其剪切强度不明显下降的特点, 作为火箭铆钉用材是很适用的。

该线材已定型并有了一套完整的资料, 如试验方法、验收标准、热处理规范、铆接工艺规

粒度为-150目, 化学成分(%)0.05C, 13Cr, 8Co, 3.5W, 3.5Mo, 3.5Nb, 3.5Al, 2.5Ti, 0.05Zr, 0.01B, Ni基。粉末装套经加热脱气处理, 再经1120℃ 117.6MPa3小时热等静压成形。热等静压锭经扒皮、超声波探伤后, 作为研究的原材料使用。

二、锻造工艺参数的研究

1. 合金的热加工性能

用高温拉伸试验机、FTMP-6型静压试验机和Gleeble热模拟试验机, 对热等静压锭和锻造饼坯的最佳变形温度范围、最大变形量以及变形速度对变形抗力和塑性的影响进行了研究, 结果见图1~4。研究表明: ①FGH95合金的最佳变形温度范围是1050~1150℃; ②热等静压锭的最大允许变形量是45%, 饼坯还可高些, 但仍很难变形; ③变形速度对FGH95合金的变形抗力和塑性影响很大, 慢速变形时, 变形抗力降低, 塑性提高。

2. 锻造加热温度的影响

锻造加热温度对FGH95合金显微组织和

◁*▷ ◁*▷ ◁*▷ ◁*▷

范等, 并制定了有关技术标准。用LY16-1铝合金线材制作的铆钉, 作为航天产品有关结构件的连接, 能满足设计要求, 在长征系列火箭上应用是成功的。

力学性能影响的研究结果见图5。合金在1080~1140℃加热，组织均匀，晶粒细小，各项力学性能都达到技术条件的要求。而在1160℃加

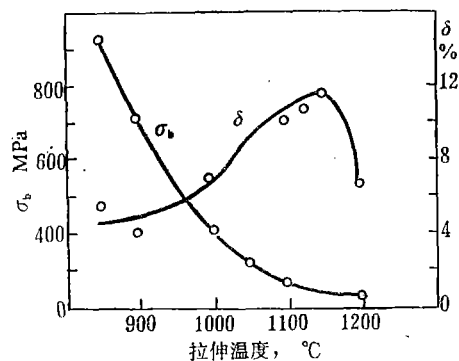


图 1 HIP FGh95合金在不同温度下的拉伸性能

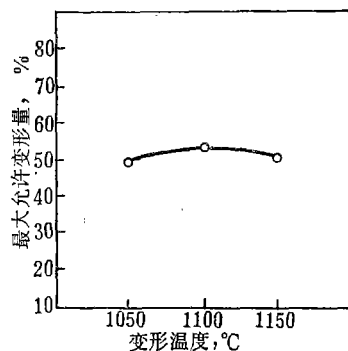


图 2 HIP FGh95合金在不同温度下的最大允许变形量

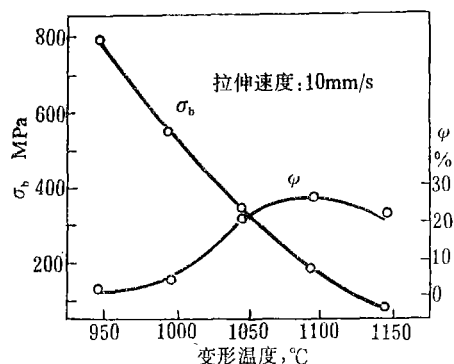


图 3 变形温度对FGh95合金锻坯热加工性能的影响

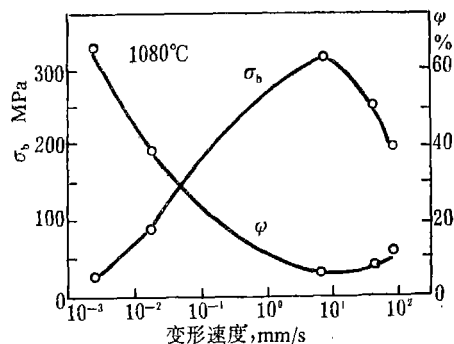
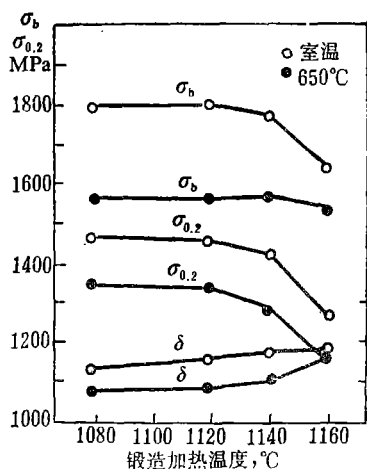
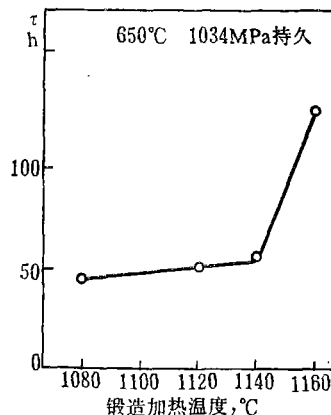


图 4 变形速度对FGh95合金锻坯热加工性能的影响



(a)



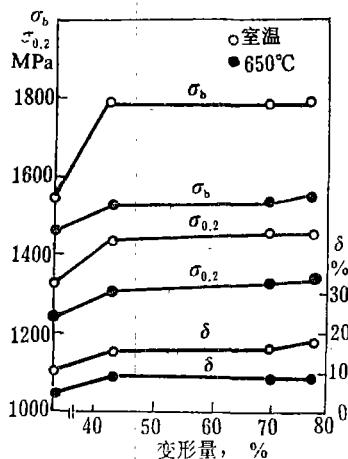
(b)

图 5 锻造加热温度对FGh95合金拉伸性能(a)和持久性能(b)的影响

热, 由于大部分 γ' 溶解, 晶粒长大, 持久强度提高, 但屈服强度明显降低。

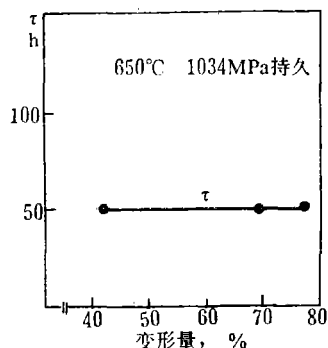
3. 锻造变形量的影响

锻造变形量对 FGH95 合金显微组织和力学性能影响的研究结果见图6。热等静压铤锻造



(a)

图6 锻造变形量对FGH95合金拉伸性能(a)和持久性能(b)的影响



(b)

三、亚尺寸盘的锻造

由锻造工艺参数研究结果得知, FGH95合金是一个难变形合金, 不能采用常规的锻造工艺, 必须采取慢速变形和保温措施。针对这种情况, 选用等温锻造和水压机包套锻造两种工艺进行试验, 在500t压机上试锻了直径为150 mm的亚尺寸盘。这两种工艺都锻出了表面完好性能合格的盘件。

等温锻造: 加热温度1050°C, 变形速度3.6 mm/min, 变形量达55%。盘件质量良好。

水压机包套锻造: 热等静压铤包以软钢套, 套子和铤子之间填充耐火纤维, 起保温作用。当套子包得严实、操作速度快、保证终锻温度不低于1050°C、每火变形量不超过45%时, 盘件质量良好。

等温锻造能保证锻件在整个变形过程中都处于最佳变形温度, 而且能慢速变形, 对FGH95合金来说, 最为合适。但目前我国没有大型等温锻造机, 所以只能选择水压机包套锻造工艺,

变形后, 破碎了PPB和铸态的枝晶组织。随着变形量的增加, PPB和枝晶组织减少。锻造变形量从42%增加到77%, 枝晶组织从1.99%减少到0.39%。由于组织的改善, 锻造合金的拉伸强度、屈服强度和塑性都比热等静压状态的合金明显提高。持久性能略有降低的原因, 是由于变形再结晶后晶粒细化。

四、全尺寸盘的锻造

在试锻了大量亚尺寸盘的基础上, 开始全尺寸盘的锻造。锻造由墩饼和模锻两步完成。

1. 墩饼

直径200 mm长300 mm的热等静压铤, 经超声波探伤后, 包以耐火纤维和软钢套。

墩饼用两火进行, 加热温度均为1120°C。每火变形量为38%, 总变形量为62%。锻完去套后, 饼材表面质量很好, 无裂纹。

2. 模锻涡轮盘

将饼材重新包套并填充耐火纤维。加热温度1120°C, 一火锻成。不同部位的变形量为35~61%。

因局部变形量大, 变形条件恶劣, 如操作迟缓, 或套子破裂, 会因锻造温度低而出现裂纹。锻造裂纹沿套子裂口处产生。

3. 全尺寸涡轮盘的金相组织和力学性能

全尺寸涡轮盘的低倍和显微组织均匀, 无宏观偏析。从中心至边缘的晶粒度没有差别,

晶粒尺寸很小, 为 $6\sim 10\mu\text{m}$ 。枝晶组织很少, 盘子中心为 0.061% , 边缘为 0.26% ; 盘子的力学性能见图7², 已达到美国同类合金 Rene95 的技术指标。

FGH95 合金是我国当前性能最高的涡轮盘材料。

结 论

1. FGH9 粉冶金高温合金变形温度窄、塑性差, 是难变形合金, 必须采取慢速变形和保温措施。

2. 等温锻造对 FGH95 合金最为适宜, 用液压机包套锻造, 只要采取必要措施将套子包严实、操作迅速, 也可锻出质量良好的盘件。

3. 热等静压经锻造变形, 基本上能消除原始颗粒边界和枝晶组织。锻造合金的显微组织和力学性能, 都明显优于热等静压状态的合金。

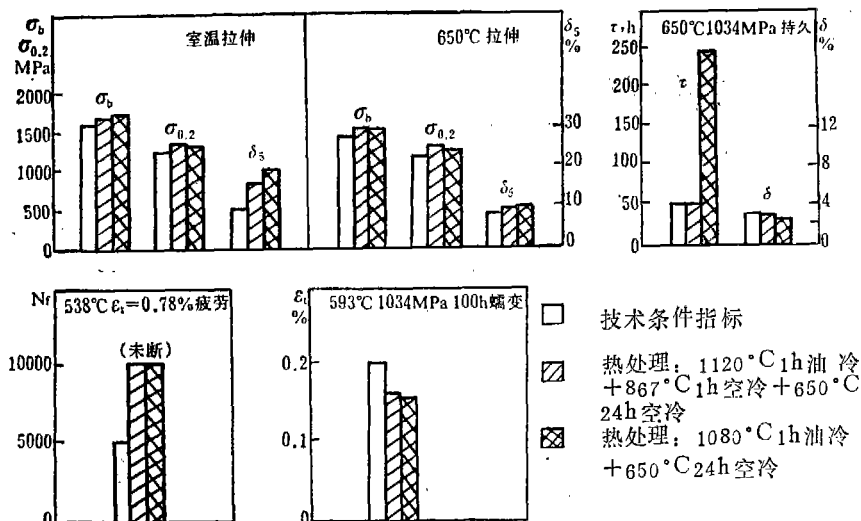


图 7 FGH95 合金涡轮盘的力学性能

(强劲熙和王恩辉同志参加了部分工作)

参考文献

- [1] 李力等, 《钢铁研究总院学报》, 1985, Vol. 15, 411~415.
- [2] 《FGH95 粉冶金高温合金涡轮盘的组织 and 性能》, 联合研制组内部报告, 1986, 1.

陶瓷在发动机上的应用

陶瓷材料由于重量轻、耐高温, 可能在燃气涡轮中获得应用, 但存在的主要问题是可靠性差。通过无损检验的使用和试运转可以改进可靠性。目前, 罗·罗公司的固定式涡轮上已采用氮化硅空气轴承。自从在 747 发动机上采用陶瓷封严环后, 燃油效率提高 3% 。在美国已有一台 100% 陶瓷燃气涡轮运转 2000 小时; 在日本有一台陶瓷内燃机正在进行试验。

陶瓷件在活塞式发动机上的应用主要有以下四个方面的进展: 涡轮增压器; 柴油机燃烧系统绝热; 代用件及新发展。氮化硅涡轮增压器由于重量轻而有希望获得广泛应用。日本自 1983 年以来已投产, 目前产量大约为 600 台/月。活塞绝热涂层可减少噪音和冷却系统尺寸并易

于起动, 从而提高使用温度, 提高热动力效应并从废气中回收能量。陶瓷绝热发动机现正在美国陆军进行实验评价。使用这种发动机的车辆可以不用散热器而只用少量空气冷却即可。代用件主要用于非流体动力学的高磨损环境之中, 其中包括摇臂、连杆和活门等部件。进一步的应用可能是在柴油机上而不是在点燃式发动机上。

关于陶瓷材料的制造工艺, 目前最好的方法是注射模塑和等静压, 以便获得更大的可靠性和精度, 而且有利于生产自动化。通过使用陶瓷纤维增强的陶瓷材料可使缺陷容限得到改进。高精度的要求是必备的, 但在具有腐蚀作用的工作环境中又难以完全保持。

(张怀良摘译自《Powder Metallurgy》1896, 2.)