

涡轮转子用 GH4141 高温合金锻造工艺研究

万金川, 王海山, 王伟光
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 针对承受高温、高速、高载荷的 GH4141 高温合金涡轮转子锻造工艺, 从影响金属塑性的因素以及锻造对金属组织和性能的影响等方面, 对原有锻造工艺进行了分析, 指出了存在的缺点。改进后的锻造工艺很好地解决了原有工艺的缺点, 可操作性强, 批次稳定性好, 产品合格率大幅提高, 成本显著降低。

关键词: 高温合金; 转子; 锻造工艺

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2010) 06-0030-06

Forging techniques of superalloy GH4141 for turbo rotors

WAN Jin-chuan, WANG Hai-shan, WANG Wei-guang

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The initial forging techniques of the turbo rotor made of superalloy GH4141 are analyzed to obtain some factors of influencing malleability, metallic structure and performance. The defects are found and overcome successfully with the improved forging techniques. The products have high eligible ratio and lower cost.

Keywords: superalloy; rotor; forging techniques

0 引言

液体火箭发动机涡轮转子工作环境一般比较恶劣—温度高、转速高、气动冲击大等。某型液体火箭发动机工作时涡轮转速达 30000 rpm, 涡轮腔燃气温度高达 1123 K。为了增加涡轮转子机械强度以及保证轮盘和转动轴连接简单、可靠,

涡轮转子可采用一体化结构, 即转子叶栅与轮盘一体, 同时传动轴与轮盘一体。结构上就显得盘轴外径尺寸差异大, 采用棒料直接机械加工不太现实, 也不经济, 一般采用整体锻造而成。因此涡轮转子的锻造工艺将是转子机械性能的关键因素, 一旦机械性能不合格, 就会出现叶片断裂、轮盘龟裂等故障, 造成发动机不能正常工作, 直

收稿日期: 2010-09-13; 修回日期: 2010-10-11

基金项目: 国家航天技术支撑项目

作者简介: 万金川 (1977—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机涡轮泵设计技术

接导致发射任务失败。

GH4141 材料的本身特性决定了其锻造加工温度范围窄, 变形抗力大, 因此确定科学合理的锻造工艺, 确保工作可靠, 降低产品废品率, 节省生产成本有着重要意义。

1 高温合金 GH4141 的化学成分和机械性能指标

高温合金 GH4141 使用要求的机械性能指标见表 1。

表 1 GH4141 合金力学性能
Tab. 1 Mechanical properties of superalloy GH4141

<i>T</i> /℃	材料牌号	σ_f /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%	ak /J·cm ⁻²	短时持久 τ /h
20	GH4141	≥1176	≥882	≥12	≥12	≥14.7	-
800	GH4141	≥735	≥637	≥15	≥20	-	1.5(σ =588 MPa)

2 锻造基本原理

塑性材料由开始变形直至破坏分为三个阶段: 弹性变形、塑性变形、破裂。弹性变形发生在变形的初期阶段, 塑性变形是变形的第二阶段。当塑性变形达到极限状态时, 金属的连续性和完整性被破坏, 发生裂纹或断裂。锻造就是利用金属加热到高温所具有的塑性, 使之变形到规定的形状而不产生破裂。

金属的塑性变形微观上是晶体的塑性变形, 晶体有单晶体和多晶体, 通常使用的金属大都是多晶体, 是由大量的形状、体积和晶格方位不同的晶粒所构成的晶体。各个晶粒间的晶界呈犬牙交错状态, 每个晶粒内部的变形都在晶界上受到晶界杂质和相邻晶粒的阻碍, 变形抗力大。同样成分的金属, 晶粒愈细, 变形抗力愈大, 强度亦愈高。同时, 由于各个晶粒的晶格位向不同, 塑性变形并不是在所有晶粒内同时和相同程度地发生着, 而是首先在那些最有利于发生滑移的晶粒内发生, 因而, 晶粒越细塑性变形就越均匀地分布在更多的晶粒内, 塑性越好, 使金属能承受更大的整体变形而不会破裂。

金属高温下发生塑性变形时, 晶粒在滑移面附近发生晶格畸变和晶粒破碎, 在高温下原子的扩散速度很大, 原子排列首先趋向正常, 这个过程为回复, 回复只能消除晶格畸变, 不改变晶粒

的形状和大小, 也不能消除破碎的晶粒。随着原子活动能力进一步增强, 破碎和变形的晶粒就以碎晶块为核心成长为新的细小晶粒, 这个过程称为再结晶。再结晶后晶粒得到细化, 塑性改善, 可继续进行锻造。一般随着锻造进行, 金属温度快速降低, 塑性随之变差, 同时再结晶速率也会快速降低, 此时如果继续使之发生变形, 变形抗力增大, 会出现破裂。可再次加热, 提升温度, 同时充分发生再结晶, 改善塑性。然而如果再结晶过程中, 金属的温度继续升高, 则再结晶后晶粒就会聚集长大, 发生二次再结晶, 使材料的性能变差。

3 影响金属塑性的因素

除了金属本身的化学成分和组织状态对其塑性有重大影响外, 还受以下条件影响。①变形温度。一般塑性变形的温度越高, 则再结晶的速度越快, 塑性越好, 可改善金属的锻造性能。但是, 变形温度过高, 晶粒长大, 塑性则急剧下降。②应变速率。即单位时间内的相对变形程度。随着应变速率的增加, 回复和再结晶不能及时克服加工硬化的作用, 使塑性下降。因此, 对于本质塑性较差的材料, 应采取较低的应变速率, 通过多次锻造, 每次回炉时, 通过回复和再结晶, 使塑性改善。③应力状态。金属在经受不同的方法变形时, 其内部的应力状态也不同。例

如，挤压时的应力状态是三向压应力；拉拔时则为两个方向受压，一个方向受拉；自由锻时坯料上下同部位的应力状态不完全相同。压应力使金属质点间趋向紧密，拉应力则使它们趋向分离而易导致破裂。因此在三个方向的应力中压应力的数目越多，金属的塑性越好。但是，在压应力作用下变形时，金属内部的摩擦力增大，变形抗力增加。

4 锻造对金属组织和性能的影响

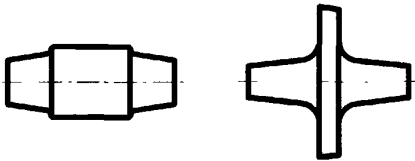
锻造不仅可以使金属改变形状，还可使其内部组织发生如下变化，从而影响材料的机械性能。①材料内部空洞性缺陷，如疏松、微裂纹等缺陷，在锻造压应力作用下可以压实直至焊合，改善组织致密性。②细化晶粒，锻造时粗大的晶粒在巨大的压应力作用下得到充分的破碎。经过再结晶后重新形成晶粒，形成晶粒的大小与变形温度和变形程度有关。一般地，在达到一定的变形程度后变形温度越低，晶粒越细。③形成纤维组织。锻造金属发生塑性变形时，金属内部非金属夹杂物沿着变形方向呈带状或链状分布。这种组织称为纤维组织。纤维组织的形成使金属的机械性能出现方向性，沿纤维方向的塑性和韧性高于垂直纤维方向。但金属的强度在两个方向上差

别不大。

5 GH4141 材料涡轮转子毛坯的锻造工艺研究

5.1 锻料情况

锻料如图 1 所示，图 1 中的左图为锻造前毛坯图，右图为锻造后毛坯图。



(a) 锻造前毛坯图 (b) 锻造后毛坯

图 1 锻造前后毛坯形状

Fig. 1 Blank shapes before and after forging

5.2 原有锻造工艺

GH4141 材料晶界结构属多晶体结构，具有合金化程度高，高温下机械性能好，变形抗力大、塑性低等特点。由图 1 可见，毛坯状态比毛坯状态中心轮盘直径增加了一倍多，轴径缩小近一倍，材料变形很大。而涡轮工作环境要求转子具有好的高温性能，相应的锻造工艺要求也高。

原有的简要锻造工艺见表 2。

表 2 简要锻造工艺

Tab. 2 Simplified forging techniques

锻造顺序	锻前炉温及保温时间	变形量/mm	设备	终锻温度
第一锻 拔轴	700 ℃入炉,在≥120 min 内 升温到 900 ℃,转入 1120 ℃ 炉中保温 40 min~60 min	Φ54→Φ45	2T 蒸汽锤,油炉	≥980 ℃
第二锻 墩盘	1120 ℃,20 min	Φ90→Φ185	3T 蒸汽锤,油炉	≥980 ℃
第三锻 拔轴	1120 ℃,20 min	Φ45→Φ32	2T 蒸汽锤,油炉	≥980 ℃

采用介于自由锻和模锻之间的半模锻。考虑到锻造前后毛坯结构的巨大变化，不可能通过一

次锻造使形状到位。整个锻造过程分 3 个阶段，包括拔轴、墩盘、拔轴。使用两套模具，各分

上、下模。第一、第三锻拔轴使用一套, 第二锻墩盘使用一套。模具简图见图 2。

第一锻进行两侧轴的锻造, 在锻造过程由于材料与环境的热交换使其温度下降, 塑性降低, 不宜继续进行锻造, 将材料回炉重新加热后进行第二锻墩盘, 变形满足要求后回炉重新加热后进行第三锻拔轴。

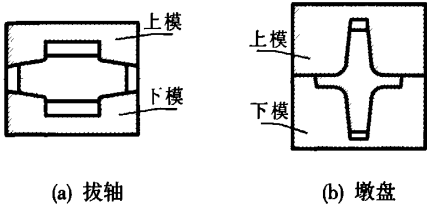


图 2 模具示意图
Fig. 2 Mould sketch diagrams

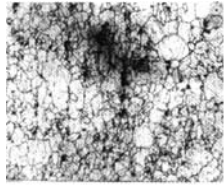
经过该锻造工艺成形后, 材料中如疏松、微裂纹等缺陷得到消除, 改善了组织致密性。锻造所形成的纤维组织的方向与实际工作中受力情况相适应, 满足要求。同时采用半模锻, 金属内部的应力状态相对较好。而实际锻造出的产品合格率低, 批次稳定性差, 产品成本高, 下面主要从影响锻造性能的其余两个方面进行分析。

从锻造温度上分析, 经过早期工艺摸索, GH4141 材料在接近 1110 °C 时晶粒会急剧长大, 1120 °C 以上时晶粒度变化不大。第一锻加热炉温度为 1120 °C, 锻件处于晶粒长大温度区域, 锻造时轴上粗大的晶粒在巨大的压应力作用下得到充分的破碎。再经过第二锻、第三锻的回炉加热, 由于温度 1120 °C 略超出了晶粒急剧长大温度, 轴上破碎的晶粒在经过回复和再结晶后部分晶粒会发生二次再结晶, 但在第三锻时轴上的晶粒在巨大的压应力作用下又得到了充分的破碎。在后续专门的热处理工艺中得到回复和再结晶, 晶粒细化, 以使轴的强度满足要求。第二锻后在进行第三锻时, 由于炉温偏高, 轮盘上破碎的晶粒在经过回复和再结晶后部分晶粒会发生二次再结晶, 使轮盘的机械性能有所降低。而在实际操作中各锻件的保温时间略有差异, 导致各锻件晶粒中出现二次再结晶程度有差异, 严重二次再结

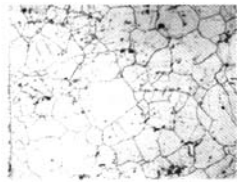
晶的锻件会使材料性能不合格。轮盘机械性能合格和不合格所对应的晶粒度见图 3。

从应变速率上分析, 共用三锻, 每轮变形速率偏大, GH4141 高温合金本身高温下塑性低, 变形抗力大, 会造成每轮锻造操作时间较长。尤其是轮盘直径由 $\Phi 90\text{mm} \rightarrow \Phi 185\text{mm}$ 只经一次墩盘, 变形过大, 锻造中随着材料与环境的热交换导致温度降低, 材料塑性变差, 在大的锻造应力作用下增大了发生断裂的可能性。

另外, 从操作方便程度上分析, 表面上看仅用 3 轮锻造便完成了锻造成型, 似乎操作工作量小。实际上考虑到每轮锻造时材料与环境的热交换导致温度降低, 塑性变差, 这就要求操作人员在尽可能短的时间内使材料的变形达到要求, 操作难度大。



(a) 性能合格晶粒度图 (7 级 轮盘×100 倍)



(b) 性能不合格晶粒度图 (4 级 轮盘×100 倍)

图 3 晶粒度图

Fig. 3 Crystallinity of superalloy GH4141

5.3 改进后的锻造工艺

鉴于原有锻造工艺种种缺点所导致锻造废品率较高, 批次一致性较差等原因, 对原有的锻造工艺进行了改进, 改进后的简要工艺见表 3。

采用半模锻造, 将整个锻造过程分为五个锻造阶段, 共使用三套模具, 各分上、下模。前两锻拔轴, 使用一套。第三、第四锻墩盘, 使用一套。第五锻拔轴, 使用一套。

表 3 简要锻造工艺
Tab. 3 Simplified forging techniques

锻造顺序	锻前炉温及保温时间	变形量/mm	设备	终锻温度
第一锻 拔轴	700 ℃入炉,在≥120 min 内升温到 900 ℃,转入 1130 ℃炉中保温 50 min~ 70 min	总长 224→250~260	2T 蒸气锤,电炉	≥980 ℃
第二锻 拔轴	1130 ℃,15~25 min	总长 250~260→280~290	2T 蒸气锤,电炉	≥980 ℃
第三锻 墩盘	1130 ℃,15~25 min	Φ90 部分长 110→38	3T 蒸气锤,电炉	≥980 ℃
第四锻 墩盘	1130 ℃,15~25 min	38→24	3T 蒸气锤,电炉	≥980 ℃
第五锻 拔轴	1040 ℃,15~25 min	总长达到 214	2T 蒸气锤,电炉	≥980 ℃

第一锻进行两侧轴的锻造，通过在模具上刻线来控制变形量，满足要求后将材料回炉重新加热进行第二锻拔轴，使用同样方法控制变形，之后将材料回炉加热进行第三锻墩盘，使用限位环来控制变形量，之后将材料回炉加热进行第四锻墩盘，靠模具本身形状控制变形，之后将材料回炉加热进行第五锻拔轴，模具上刻线来控制变形量。前四锻锻造炉温为 1130 ℃，第五锻锻造前炉温为 1040 ℃。

该工艺继承原有工艺中锻造后形成的纤维组织的方向与实际工作中受力情况相适应的优点，同时仍采用半模锻，保持了金属内部的应力状态相对较好的特点。改进后的工艺影响分析如下：

从锻造温度上分析，前四锻炉温为 1130 ℃，第五锻炉温为 1040 ℃。第一锻、第二锻拔轴，轴上晶粒在两次巨大的锻造压应力作用下均得到充分的破碎。之后均经过回复和再结晶，由于温度为 1130 ℃，高于晶粒急剧长大温度，保温时间为 15~25min，一部分晶粒会发生二次再结晶，但在第五锻拔轴时轴上的晶粒在巨大的压应力作用下又得到了充分的破碎。在后续专门的热处理工艺中又得到回复和再结晶，晶粒细化，以使轴的强度满足要求。第三、第四锻墩盘过程中轮盘上粗大的晶粒在巨大的锻造压应力作用下得到充分的破碎。由于第五锻炉温仅为 1040 ℃，低于

1110 ℃晶粒会急剧长大温度，保温过程中轮盘上晶粒只发生回复和再结晶，不会出现二次再结晶，晶粒不会长大。整个锻造过程温度合理，无论是轴上的还是轮盘上的晶粒均得到了细化，避免了二次再结晶发生，保证了强度。

从应变速率上分析，分为五次锻造，使变形速率降低，较好地适应了 GH4141 高温合金高温下塑性低、变形抗力大的特点，避免了发生破裂的可能性。同时由于变形速率降低，操作人员有较充分的时间来操作，降低了操作人员的工作强度。

改进后的锻造工艺很好地解决了原有工艺的缺点，可操作性强。产品合格率得到大大提高，批次稳定性好，节约了成本。

6 结 论

依据锻造原理，从影响金属塑性的因素以及锻造对金属组织和性能的影响等方面，对原有的 GH4141 材料涡轮转子毛坯的锻造工艺和改进后锻造工艺进行了分析，结论如下：

1) 原有的锻造工艺中轮盘处晶粒存在二次再结晶的可能，导致部分晶粒粗大，材料性能下降；改进后的锻造工艺，轮盘和轴中晶粒不存在二次再结晶问题，有效保证了强度要求。

2) 原有的锻造工艺中, 每次锻造变形速率偏大, 在大的锻造应力作用下增大了发生破裂的可能性。改进后锻造工艺变形速率降低, 避免了破裂的发生。

3) 原有的锻造工艺对操作人员的技术水平要求高, 操作难度大。改进后锻造工艺降低了操作人员的难度。

4) 改进后锻造工艺产品合格率高, 可操作性强, 批次稳定性好, 节约了成本。

参考文献:

- [1] 张志文. 锻造工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- [2] [美]SHERIDAN S A. 锻件设计手册[M]. 陆索, 译. 北京: 国防工业出版社, 1972.
- [3] 李家枢, 严绍华. 实用锻工手册[M]. 北京: 中国劳动出版社, 1990.
- [4] 史美堂. 金属材料及热处理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1991.
- [5] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册 2: 变形高温合金铸造高温合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [6] 高鑫, 王汉功, 康兴无. 基于裂尖塑性区的复合型裂纹断裂准则[J]. 固体火箭技术, 2009, 32 (1): 86-89.

(编辑: 王建喜)

(上接第 24 页)

4 结论

本文在 FLUENT 软件平台上, 对 LOX/HTPB 为推进剂的固液火箭发动机燃烧室和喷管添加扰流板以增加燃烧效率的方法进行了数值模拟。计算结果表明:

1) 固液火箭发动机在纯气相反应条件下, 在固体药柱中添加扰流板可以提高燃烧效率, 但提高的程度有限, 且不能改变喷管入口处温度分布不均匀的问题; 在后燃室中添加扰流板可以明显地提高喷管入口处的平均温度, 而且温度分布基本均匀;

2) 由于固液火箭发动机燃烧的特点是反应发生在火焰层中, 在反应条件是纯气相时, 固体药柱中添加扰流板可以改变火焰层的位置, 在后燃室中添加扰流板后, 由于火焰层位置相对固定, 所以反应开始时和反应进行一段时间后, 喷管入口处的温度分布没有发生太大的变化, 可以使固液火箭发动机维持一个相对稳定的燃烧情况。

参考文献:

- [1] 田辉. 固液混合火箭发动机工作过程数值仿真[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2005.
- [2] GROSSE Matthias. Development of a hybrid rocket motor using a diaphragm for a small test rocket, AIAA 2008-4831 [R]. USA: AIAA, 2008.
- [3] 诸毓武. 固液火箭发动机燃烧室工作过程数值模拟[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [4] 胡建新, 夏智勋, 张为华, 等. 固液混合火箭发动机简单反应流模拟[J]. 弹道学报, 2002, 14 (4): 19-24.
- [5] 李君海, 吴俊峰, 田辉等. “北航 2 号”固液火箭发动机设计与研制 [C]//中国航天液体动力技术发展高峰论坛. [出版地不详]: [出版者不详], 2010.
- [6] 田辉, 蔡国飙. 固液混合火箭发动机燃烧室和喷管流动数值模拟[J]. 宇航学报, 2006, 27 (2): 281-285.
- [7] CHENG G C, FARMER R C, JONES H S, et al. Numerical simulation of the internal ballistics of a hybrid rocket motor, AIAA 1994-0554 [R]. USA: AIAA, 1994.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [9] 阎超. 计算流体力学方法及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [10] 高玉闪, 杜正刚, 金平, 等. 气氧/甲烷同轴剪切喷注器燃烧特性数值模拟[J]. 火箭推进, 2009, 35 (5): 18-23.
- [11] 肖虎斌, 赵世平. 燃气蒸汽式发射动力装置复杂内流场数值模拟[J]. 固体火箭技术, 2009, 32 (4): 392-395.

(编辑: 马 杰)