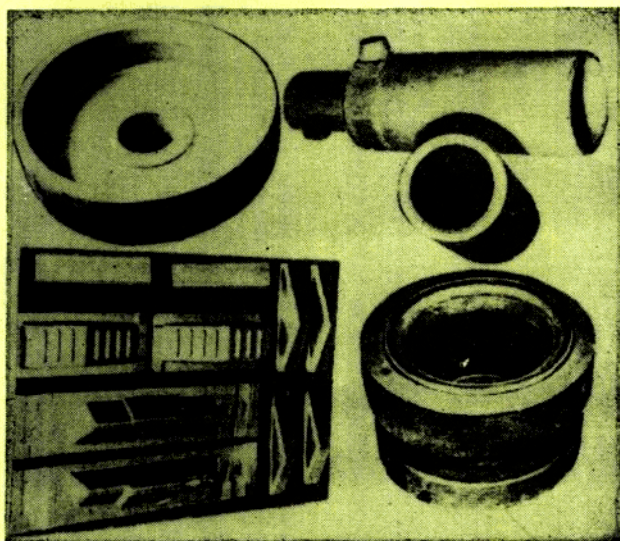


超塑成形及等温锻造技术译文集

主编 葛红林 庞克昌 徐金璋



上海钢铁研究所

1995年 上海

超塑性成形和等温锻造技术译文集

序 言

葛红林

金属的超塑性及其加工技术是近代发展起来的一项新工艺和新技术。所谓金属的超塑性是指金属在特定条件下具有极大的均匀变形的能力，虽然早在 1945 年，原苏联的 Боувар 等发现 Zn-Al 共析合金异常高的高温延伸率的实验结果并提出超塑性名词，之后，真正引起人们重视的是在 1962 年美国的 Underwood 发表了评论性解说文章，从冶金学的角度分析了实现超塑性的可能性、条件及基本原理。使人们对金属材料的研究从偏重于强度的提高方面，也开始重视对塑性极限的认识，并对超塑性合金研制、加工工艺及机理方面进行了大量深入细致的研究。某些金属如 Al 合金，Zn 合金的超塑性特性已在工业生产领域中获得了广泛应用。

钛合金超塑性等温锻造是钛合金加工的一项引人关注的新工艺。它利用钛合金，尤其是两相钛合金在超塑性状态下的低流变应力，进行恒定温度下的锻造成形，不仅能降低加工设备的锻造能力，而且能把形状复杂、尺寸精度高的零件近终形状加工。由此减少机加工余量，降低金属损耗，同时也能对合金的组织 and 性能进行严格的控制。随着现代工业的发展，国外对一些航空、航天、造船、化工和电力工业用的关键钛合金的结构件已普遍采用等温锻造工艺，用以确保安全服役。

上海钢铁研究所是我国最早开展钛合金超塑性等温锻造的研究开发单位之一，推广应用工作起步较早，早在 80 年代就生产提供锻件组织和性能符合航空零件要求的喷咀壳体 and 作动筒。最近，结合承担国家重点工程用的航空发动机钛合金压机盘、轴颈等多种零件等温锻造研究的攻关任务，巨额投资新建上海钢铁研究所超塑性研究加工中心，专门从事钛合金等温锻造的科研、试制和生产。

本译文集选编了近年来国外学术刊物以及国际会议上发表的有关钛合金等温锻造工艺及技术进展的报导，文集分一、总述；二、等温锻造技术；三、超塑性成形和扩散焊接；四、等温锻造设备和模具材料；五、基础研究等五部分加以介绍。希望对我国钛合金工作者进一步掌握该工艺的技术生产及应用起到促进作用。

本文集共包括译文 39 篇约 49 万字，仅供内部参考，限于编译者的业务水平有限，文中出现错误与缺点在所难免，望读者指正并谅解。

KWT1/23/02

TG 319
G 38

超塑性成形和等温锻造技术译文集

目 录

前言

一、总 述

1. 钛锻造技术的综述 Charlie C Chen (1)
2. 钛合金等温锻造的进展 A.Banik 等 (17)
3. 镍基超合金的等温锻造技术 大内清行等 (26)

二、等温锻造技术

4. 钛合金涡轮叶片的近终形状锻造 Akiyasu Morita 等 (39)
5. 经热等静压预成形后的 Ti-6Al-4V 合金的超塑性锻造 Y.Nishino 等 (47)
6. Ti-6Al-4V 合金的等温锻造法 浦川俊吉等 (53)
7. Ti-6Al-4V 合金带筋零件的热精密锻造 松下富春等 (60)
8. 超塑性状态下 BT6 合金的精密锻造 А.Г.Ермаченко 等 (67)
9. Ti-10V-2Fe-3Al 合金的热模锻造 H.Rydstad 等 (71)
10. 钛合金的等温锻造 D.J.Smith (76)
11. β 和近 β 钛合金的等温锻造 G.W.Kuhlman 等 (81)
12. TiAl 金属间化合物的等温锻造 春日克也等 (95)
13. TiAl 基金属间化合物的等温锻造 Nobuyuki Fujitsuna 等 (100)
14. 钛合金在超塑性的温度-速度条件下模锻过程的特征 Ф.В.Тулянкин 等 (109)
15. 运用超塑性效应生产精密叶片锻件的某些问题 N.A.Павлов 等 (114)
16. Ti 及 Ni 基合金环形件压缩试验 大内清行等 (119)
17. 镍基超合金盘件的超塑性锻造 松下富春等 (128)
18. 镍基超合金粉末的超塑性热模包覆锻造 乌阪泰亮等 (135)
19. 采用新型模具材料在空气中等温锻造 Waspaloy 合金 Takehiro Ohno 等 (144)
20. 加工条件对镍基合金粉末经热等静压-超塑性锻造的毛坯机械性能的影响 中泽静夫等 (154)
21. 用热等静压处理的镍基超合金粉末材料的超塑性变形行为 泷川博等 (161)
22. 用超塑性锻造法制造的粉末超合金的超塑性特性 古田诚矢等 (168)

三、超塑性成形与扩散焊接

23. Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si(IMI550)合金的超塑性变形 Jimin Ma 等 (175)

223651

24. BT3-1 钛合金锻坯采用渗氢增塑工艺等温成形后的真空退火 … B.K.Носов 等 (190)
25. 钛的超塑性加工在齿科材料上的应用 …………… 冈田稔等 (195)
26. 钛基合金的超塑性锻造 / 扩散焊接 …………… C.Hammond (199)
27. 扩散焊接的 Ti-Ni 界面的显微组织 …………… S.Hinotani 等 (210)
28. 高温钛合金 IMI834 的扩散接合 …………… A.Wisbey 等 (219)
29. 超塑性 Ti-6Al-4V 的等压扩散焊 …………… M.T.Salehi (224)
30. 超塑性成型和超塑性成型 / 扩散焊接的应用 …………… H.B.Bomberger 等 (230)

四、等温锻造设备和模具材料

31. 用于生产钛合金及超合金大型转动部件的等温锻造设备 …………… F.Hugo 等 (234)
32. 大气中进行超合金等温锻造用模具材料的开发 …………… Takehiro Ohno 等 (237)

五、基础研究

33. 具有显微双重组织的 Ti-6Al-4V 合金的超塑性变形特性 …………… M.T.Cope 等 (248)
34. Ti-6Al-4V-1Co 和 Ti-6Al-4V-1.8Ni 合金的超塑性变形机制
及合金元素的偏析 …………… Jimin Ma 等 (256)
35. 具有不同氢含量钛合金等温锻造的研究 …………… B.K.Носов 等 (262)
36. 超塑性条件下模锻最佳工艺制度的设计 …………… E.H.Чумаченко 等 (269)
37. Ti-Al-V 合金中 α 和 β 相的体积分数对超塑性行为的影响
…………… Yoshikaza Ro 等 (276)
38. 超塑性状态下模锻带榫头锻件的应变场分析 …………… J.Sinczak 等 (285)
39. 接触和速度条件对超塑性钛合金薄盘等温锻造过程的影响 …… M.Ф.А.Фуад 等 (294)

钛锻造技术的综述

Charlie C. Chen

摘要

钛合金近净形部件和净形部件的热模锻造已成为可接受的、经济可行的，用于飞机结构、发动机和导弹部件的生产工艺。本文将论述的70年代以来钛锻造技术取得显著进步的成果。由于钛合金的机械性能很大程度上取决于其显微组织，锻件所要求的综合性能只能通过控制锻造工艺和热处理参数获得。本文也将论述在锻造工艺中的各种状态下，工艺/组织/性能之间的关系，以及未来的发展。

1. 前言

金属的可锻性可确认为：为成功地生产成品进行的锻造中金属塑性变形的相对能力。它既是指材料裂纹开裂和锻造压力的能力，又是指材料有关形状、组织和性能的技术条件^[1-5]。材料的实际锻造加工性明显地随工艺参数、机械参数、设计要求、锻造方法、原始坯料质量以及其它因素的变化而变化。

随着锻造材料的化学成份越来越复杂，可锻性也越来越差。由于大量的部件是采用昂贵又难机加工的合金，因此需要比较精确的锻件尺寸和公差。为了有效地利用材料，使之具有最小重量又能保证强度的锻件更为人们所重视。为了获得高性能低成本的锻件，对使用高性能合金和合金的加工性能更为关注。由于锻件的使用要求更为苛刻，把机械参数综合起来的冶金研究方法正在逐渐代替某些合金系统的机械锻造的概念。

2. 闭式模锻

目前，闭式模锻的设计很大程度上仍

然以多年来积累的经验数据为基础。闭式模锻技术近年来的发展已经扩大了锻造产品的形状、尺寸和使用性能的范围。闭式模锻操作必须使金属充满形状复杂的模腔，而没有任何形状缺陷，如折叠和卷边。设计的金属流动和工具应确保模腔充填，良好的流动特性，优越的成本和低的模具损耗。由于产品部件的形状很少简单到只用单一模腔锻造，一般要进行预锻、初锻和/或预成型加工。合适的模具、预锻模、初锻模、和/或预成型和终锻模的设计对成功，经济地生产闭式模锻件是最重要的。

设计可行性随工艺性明显变化，在普通锻造和精密锻造的成型性方面存在着很大的不同。一般来说，普通锻造必须在厚度基面上加 0.25~0.5 英寸 (6.4~12.7mm) 的余量。直径、圆角、公差、表面光洁度和表面完整性都比精锻工艺差。目前，精密锻件在锻造平面 (水平面) 加 0.00~0.09 英寸 (0.2~2.3mm) 的余量。在边缘部位 (直径) 加 0.09~0.125 英寸 (2.3~3.0mm) 的余量。

对一个给定锻件来说，其主要的成本要素是：原材料，坯料检验、坯料包装及修整模型锻模、加工系统，粗机加工、工具装配、锻造工艺及操作，热处理、化学-抛光、综合产品测试、检验，无损检验和破坏试验，成品机加工，固定生产费用，一般和行政管理费用以及利润。这些要素通常随采用的生产方法的变化而显著变化，对其中任何一项要素的控制可使锻造总成本低于其他方法。

在锻造产品的生产中，当数量少于100件时，质量对平衡模具制造成本/机加工工艺成本/材料成本来说是极为重要的。机加工产品成本通常比单纯锻造成本高。模具/工具成本因素涉及到模具/工具系统、模具材料等。尺寸/形状因素必须考虑到增加形状复杂性的能力。并随着

锻件尺寸的减少和/或形状复杂性的增加而变得更重要。经济可行性也与诸如质量、技术和设备因素有着复杂的关系。

钛合金加工通常需要很大的能量。影响锻件生产的能耗因素有：合金、工具种类，锻造温度、变形量、变形速率、操作工序、加热炉、燃料种类、热处理温度和周期⁽⁶⁾。

3. 航空材料的现代锻造技术

传统的锻造生产方法常使产品具有很长的生产周期，表面需大量机械加工。虽然用近净形/净形技术精密锻造已经可望改变用传统方法生产昂贵的航空材料，但传统锻造方法仍占主导地位。图1示出航空合金锻件工业生产技术状况。

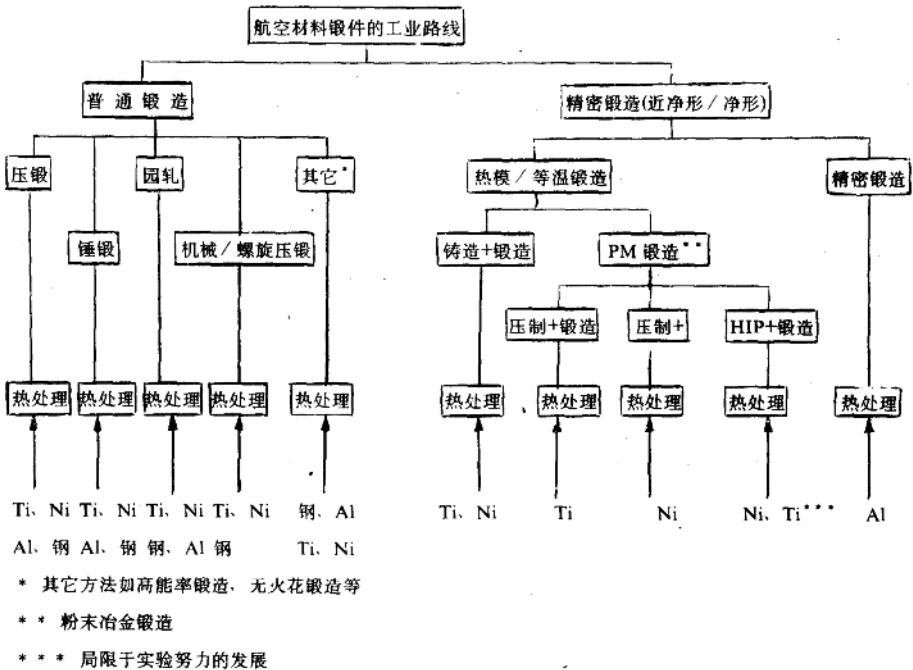


图1. 航空合金锻件生产的工业化锻造工艺

最普遍使用的钛合金常规锻造方法包括压锻、锤锻、轧环、螺旋/机械压锻。

精密锻造可以定义为将工件锻至接近成品/成品组装件形状,其公差达到采用现有传统工艺和技术并经过精加工的水平。成型部件一般只需少量的机械加工和钻孔。该工艺涉及到全封闭模具加工和/或加热系统,即具有组合脱模系统的冲压和模具腔型工具。

粉末冶金提供了另一种工艺,即利用更少的材料,最少的机加工生产出近净形/净形部件,可以获得更均质的材料,并能提供可能的新型合金成份和显微组织。近来,业已证明,通过热等静压或挤压的粉末预成形件的热模锻造或等温锻造可以获得形状相当复杂的粉末部件。粉末预成型的冶金工艺可通过挤压+锻造、挤压+热模锻(gatorize),和热等静压+锻造方法达到。与热等静压态的产品不同,锻造要提供压缩和剪切变形的联合作用,这可能是改善粉末冶金部件质量的一个主要关键。经过热等静压或挤压的粉末预成品的锻造过程并非超塑性变形,而是一种柔和应变锻造过程。进一步的研究证明,粉末冶金高强钛坯料具有网篮状 α 显微组织,

通常具有优良的断裂韧性、抗蠕变和裂纹扩展性能,但其疲劳强度和抗拉塑性低,可锻性差。从冶金学角度来讲,钛的粉末冶金预成型件在转变点以下低得多的温度加工将优化合金锻件的显微组织和性能^(8,9)。

在航空用合金锻造中常发生流变不稳定性;它和工艺可变参数间有着密切的相互作用⁽¹⁰⁾。金属流变的强烈束缚常常是由于模具激冷和部件几何形状而引起。经常可观察到在大变形区产生局部相变和开裂。锻件的宏观组织和显微组织对锻造温度、模温、压下速度、冷却速度、予成形显微组织,应变和部件几何形状是敏感的。另外,当部件截面变化和几何形状不规则加大时,要控制组织和性能均匀性的工艺参数变得更加困难。

对钛合金来说,最普遍使用的固体金属成形工艺是锻造、制管、轧环、轧棒、挤压、板成形。在实际锻造加工中,合金加工能力是金属在锻造中塑性变形而没有断裂的相对能力,决定实际合金加工性能的主要因素列于表1。

表1. 合金的可加工性

锻造参数	坯料温度,模温,变形率,变形量,初始显微组织
特殊需要	需要的显微组织和性能
坯料条件和质量	化学成分均匀性,组织一致性,可加工性,物理性能
锻造方法	敞式模,闭式模
设备类型	锤锻机,液压机,机械,螺旋压机
产品几何要求	形状,尺寸,厚度,公差
工具系统	几何,温度,稳定性,加热方法
界面条件	摩擦因素,润滑剂,热-交换
其它因素	合金元素,相转变温度,热传导

4. 钛锻造的冶金学

一般来说,在需要强度、可靠性、耐疲劳和其它关键性能等不可缺少的地方才考虑使用钛合金锻件。钛及其合金通常是

可锻的(见表2)。用于锻造钛的设备和用于其它金属锻造的设备一样,如液压机、锤锻机、机械和螺旋压机以及各种改良的高能设备。

表 2 钛合金的可锻性和锻造特性的一般范围

合金系统	锻造温度 °F	所需压力 KSi	裂纹阻力
CP-Ti	1550~1700	65~75	一般~好
Ti-5Al-2.5Sn	1775~1850	75~85	一般~好
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	1675~1800	75~85	一般~好
Ti-6Al-4V	1650~1800	75~85	好
Ti-6Al-6V-2Sn	1575~1675	65~75	极好
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	1550~1700	55~75	极好
Ti-10V-2Fe-3Al	1300~1550	45~75	极好
Transage-Ti(Al-V-Sn-Zr)	1250~1500	45~75	极好

从钛的转化和合金稳定性的本质来说, 根据相(或各相)显示的显微组织, 钛可分为三个主要类型: α 近 α 相, $\alpha+\beta$

相和近 β / $+\beta$ 相。表 3 示出三种类型钛合金的冶金、机械、物理性能的基本变化, 其中也包括了商业用锻造合金系。

表 3. 不同合金类型的商业钛锻造合金的冶金、机械、物理性能的基本变化

α /近 α				$\alpha+\beta$				近 β / β					
Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	
5Al-	5Al-	8Al-	6Al-	6Al-	6Al-	6Al-	5Al-	10V-	Ti-	8Mo-	3Al-	11.5	13V-
2 1/2	6Sn-	1Mo0	2Sn-	4V	6V-	2Sn-	2Sn-	2Fe-	s	2Fe-	6Cr-	6Zr-	3Al
Sn	2Zr-	1V-	4Zr		2Sn	4Zr-	2Zr-	3Al	g	3Al	4Mo-	4.5Sn	
	1Mo-		2Mo-			6Mo	4Mo-		e		4Zr	(β -III)	
	0.2Si		0.1Si				4Cr		Ti		(β -C)		
							(Ti-17)						

- ← ($\alpha+\beta$)/ β 转变
- ← H-形变应力
- ← 可产生(可成型性)
- ← 应变速率敏感性
- ← 可热处理性
- ← 可硬化性
- ← RT 强度
- ← 韧性
- ← HT 容量
- ← 可焊性
- ← α -稳定化
- ← β -稳定化
- ← 密度
- ← 模数

当前, 用作高性能航空部件的钛合金最多的是 $\alpha+\beta$ (如 Ti+6Al+4V)和近 α (如 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo)合金⁽¹¹⁾。这些合金锻件的生产商业重点主要放在 ($\alpha+\beta$) 钛合金的加工, 以确保足够的强度

和塑性。($\alpha+\beta$) 合金是最普遍使用的钛合金, 被设计作为低到中等强度用于飞机结构和发动机。(近 α / α) 合金具有优异的高温性能, 通常被设计作为在高温需要高蠕变性能的部件, 可用作 600~1100° F

(300~600℃) 喷气发动机部件。然而，由于在固溶处理和时效条件下缺乏韧性，和相对差的淬硬性，这些合金通常在退火后使用。因此，钛合金的强度性能不能被有效利用。很明显，为了改善高强钛合金的结构效率，必须使用(近β/β)钛合金代替(近α/α)合金。

从冶金学角度来讲，(近β/β)合金具有优良的可锻性、淬硬性和可热处理性，对产品的强度、韧性综合性能及性能均匀性有显著改善。对(近β/β)合金锻造性能的最近研究表明，高强度钛锻造产品有良好的经济和商业前景^(12,13)。该类合金还有优良的高温可成形性能，用热模工艺只需不太贵的工具^(14,15)。(近β/β)合金与钢和Ti-6Al-4V相比，具有更高的比强度(抗拉强度/密度)，重量减少更多。由于合金偏析和显微组织不均匀性，必须严密控制整个锻造和热处理过程，以达到应用所需的高强度。到目前为止发展

的各种(近β/β)合金成分，只有很少获得了商业应用。Ti-13V-11Cr-3Al合金已在60年代得到应用，但只限于作为飞机结构件，而后来也终止了使用。直到最近发展了Ti-10V-2Fe-3Al合金，其锻件用作需要高综合性能的部件获得了工业应用，这类合金的更广泛生产才得到解决。

5. 热可锻性和变形性能

在1974~1975年，Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo和Ti-10V-2Fe-3Al合金的变形特性首先在整个温度和压下率范围被确定⁽¹⁵⁻¹⁸⁾。这是了解钛合金锻造的发展开端。在这些研究中，表明了工艺参数对锻造压力和最终显微组织的影响，热拉伸性能和温度及原始显微组织、应变速度之间的关系。(见图2)，特别是首次报导了预成形坯料的显微组织对变形性能的影响。这些成果为近年来进一步广泛研究提供了技术指导⁽¹⁹⁻²²⁾。

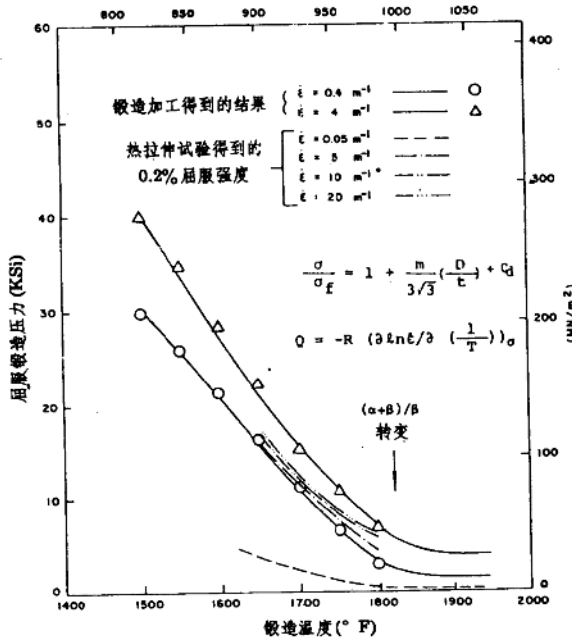


图2 Ti-6Al-4V 圆盘形锻件屈服锻造压力随温度的变化，作为比较由室温拉伸试验得到的屈服强度也在图中示出

锻造变形中钛合金的变形特性一般为：(1) 锻造压力和变形性质，取决于锻造温度、模温、锻造速度、预成形显微组织、部件几何尺寸、形状、设计因素和其它冶金参数。(2) 应力-应变曲线一般显示在 $\alpha+\beta$ 相区温度-流变应力有很大关系，显示出负斜率。随温度增加，斜率变小；在 β 转变温度以上的试验温度曲线基本上是平的。(3) 根据活化能分析理论，热模锻造的变形特性与合金的热变形性能有定量关系。锻件变形的活化能 (Q) 可用关系式计算：

$$Q = -R \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial (1/T)} \right) \sigma$$

由 Arrhenius 速率控制方程式得出：

$$\dot{\epsilon} = -A \exp(-Q/RT)$$

式中， A 是常数， R 是气体常数， $\dot{\epsilon}$ 是压下速率， σ 是流变应力或锻造压力。(4) 在锻造变形中引起组织变化，工业锻造可变参数中的热可加工性以组织敏感问题出现。

从这些研究中获得的最有吸引力的特点之一是，用材料性能的物理模拟在整个平面锻造中开放模确立锻造压力和流变应力之间的良好关系。对平模间压缩的锻压力而言，主要取决于合金的流变应力，它受摩擦损失，几何效应 (D/t) 和模子激冷因素 (Cd) 影响。 Cd 是一个经验常数，取决于模温和施加的压下速率。对实心圆盘的锻造而言，相对压力，摩擦，几何形状和模子激冷效应之间的相互关系可表示为：

$$\frac{\sigma}{\sigma_f} = 1 + \frac{m}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{D}{t} + Cd$$

式中， σ 是平均锻造压力， σ_f 是合金的流变应力， m 是固定摩擦因子， D 是圆

盘直径， t 是圆盘厚度。该关系式指出，当模温接近等温状态（即， Cd 接近零）时，在锻压下，变形性能密切地接近材料在锻造温度下的真实塑性性能。^[16] 这样，在一种特殊的工艺参数研究装置中，材料基本流变性能可确定为锻造变形。

对封闭式模锻件加工的物理模拟也进行了研究。锻造试验通常在实验室规模进行，以确定材料性能和成形性^[23]。锻造压力随合金流变性能变化很大。此外，随摩擦，几何形状和激冷因素变化。从几何和摩擦角度，模具结构对确定完全充满模腔所需的锻造压力起着重要作用。当模温下降和/或形状复杂性增加时，模具结构变得特别重要。应该注意到，金属可锻性也与表面裂纹抗力有关。在封闭式模锻中的折叠缺陷常与预变形几何形状有关。热机械加工产生的球状 α 和转变产物的性质和分布的控制对钛锻件的机械性能是非常重要的。通过在 β 转变温度以上和/或以下控制适当的热加工，合金逐渐再结晶和/或变形，获得最好的最终产品。为了获得要求的最终组织，必须仔细确定和控制锻造各阶段的温度和变形路线的详细工序。

6. 近净形 / 净形热模锻造

虽然经济可行性和商业应用取决于部件几何尺寸、形状、数量和质量，而采用现代技术的热模锻造的生产能力已经在广泛的发动机部件生产中得到了证明^[1-4]。热模减少了锻造坯料和模具之间的温度差，使更精密的锻件形状可以在给定的操作工艺中生产。

热模锻工艺使锻模保持在/或稍低于合金的变形温度。通过热模锻造，模具激冷和材料的变形硬化的影响可以减少或消除。这样，合金的可锻性可以达到最大，

锻件组织和性能可最优化。结果，锻件形状可以更精密，锻件材料利用率提高，锻造操作次数减少，增加压机能力可实现，工艺参数和显微组织得到精确控制。

对一个给定用途来说，选择适当的模具材料取决于操作温度、锻造压力、精度要求、商业可行性、模具材料及其制作成本。目前用于 $(\alpha+\beta)$ 钛合金热模锻的镍基合金，在空气中的模温达 1400°F (750°C)时，仍有满意的性能。在更高的操作温度、模具材料的组织和性能稳定性需要提高，必须使用极昂贵的TZM模具。用TZM，锻造操作必须在真空中或保护性气体中进行，以防止模具氧化。钴基合金如NX-188已经实验性开发，但商业可行性还没有得到证明。

热模的三种加热方法（感应、气体燃烧辐射，电阻加热）发展中，感应加热被最为普遍地使用于工业实践。加热方法必须确保模腔从外部到中央模温的均匀性，以及保持足够的热范围。模具材料必须适当选择，以便能经受住高温锻造压力，以及从模衬到压机基面平台的较高的温度梯度。

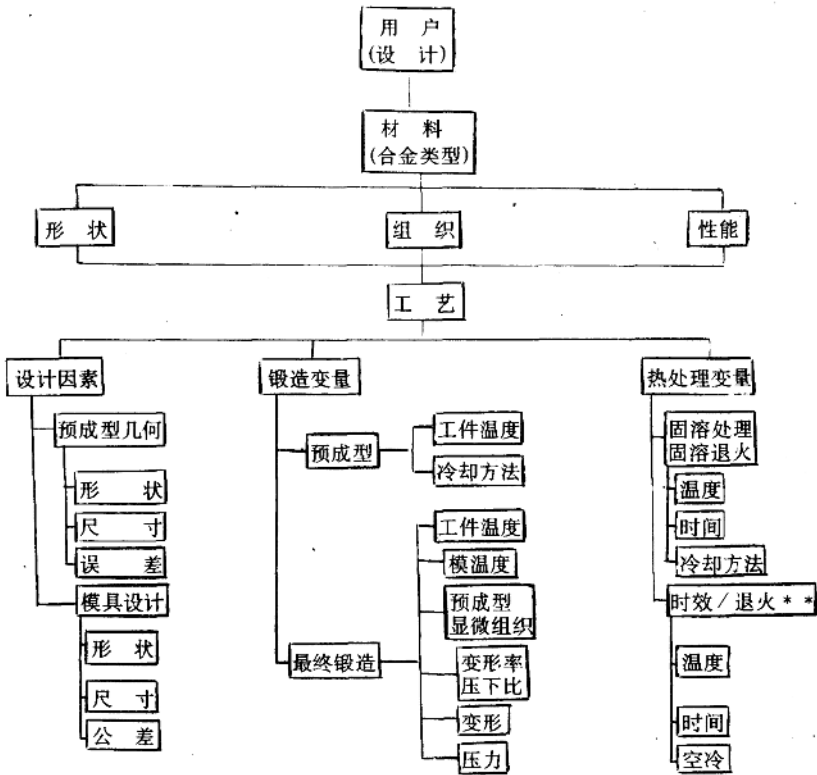
近年来，已经发展了多种润滑剂用于钛合金热模锻造^{〔24,25〕}，其中的：Archeson's Deltaglaze-69(称为D-69)，

D-149, TRN's OPT-112, GFBN-8, A.O.smith's CG-54, Markal's CRT 和 CRT HA。据报导，这些润滑剂具有高润滑性，优良的附着性能，长期热稳定性和与模具材料有良好的化学相容性。润滑剂发展的基本概念一般根据所使用载体的本质分成不同种类。例如水基或二甲苯基、乙醇基和等丙酮基载体。水基润滑剂的发展趋于与基体润滑特性，环境和安全要求有关。与普通锻造的二元润滑剂（锻件和模具润滑材料）不同，现代热模锻造只用单一润滑剂，一般在工件表面涂覆一层玻璃型涂层。由于与热模强烈作用，模具润滑剂并不是都可用。

7. 工艺 / 组织 / 性能之间的关系

钛合金部件要求的性能显微组织的关系，常常需要对工艺参数进行适当的控制，这是普通锻造操作很难达到的。小规模实验所得结果的可用性相对来说是差的，钛合金的可加工性已经进行了大量的工作。然而，最近加工技术和对材料性能认识的进展使钛合金工艺 / 组织 / 性能之间关系得到了理解^{〔10-29〕}。

钛基航空部件的生产工序



* 可以单独、两种或三种固溶处理/固溶退火

** 可以直接进行时效/退火，或者固溶处理/退火处理后进行。

图3 航空钛锻件的生产工序

钛合金锻件生产一般首先用由用户确定技术条件，按性能状态设计，示于图3，随着钛技术的进步，这些技术条件要求已经越来越复杂和完善。特别是一些重要部件，如涡轮发动机的风扇盘，压气机盘、叶轮、直升飞机的水平旋翼毂，压力容器和一些飞机结构部件。由于这些锻件尺寸和横截面厚度的增加，要满足这些重要应用的组织要求变得更加困难。重要用途经常需要选择使用和严密控制加工参数，以获得最合适的性能和最大的成形加工能力。

通过控制热机械加工，工业钛合金可得到范围很宽的组织 and 机械性能^(27,28)。通过热机械加工产生的等轴 α 相和转变产物的性质和分布，决定了锻件的机械性能。图4所示为钛合金锻件显微组织的例子，这些组织可通过各种工艺组合形成。

用于钛锻件生产的工业工艺路线通常有3条，每条都有与其最终组织和性能有关的优点和缺点：

- $(\alpha+\beta)$ 预成型+ $(\alpha+\beta)$ 成型：普通工艺路线一般用于使锻件有等轴初生 α

相显微组织，锻件具有好的抗拉强度、塑性和低周疲劳性能。

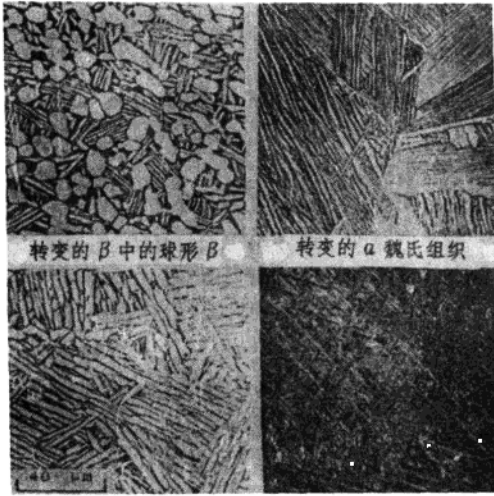


图4 由不同工艺组合生产的钛合金锻件的典型显微组织

- β 预成型+ β 成型：锻造工艺特别设计以改善合金可锻性，断裂韧性，蠕变性能和抗裂纹扩展性能。这条工艺路线产生细长的魏氏组织或密集 α 组织。
- β 预成型+ $(\alpha+\beta)$ 成型：该工艺路线通常用于改善 β 钛合金锻件的塑性的低周疲劳性能，通过产生混合等轴/细长的 α 组织平衡性能。

虽然诸如疲劳、裂纹生长速率、应力腐蚀和其它性能对飞机结构锻件是重要标准，但基本设计 requirements 是抗拉强度、塑性和韧性。业已表明：对于生产钛合金锻件，特别是高强度钛合金来说，要获得希望的强度、塑性和韧性平衡，热机械加工压缩手段通常是必要的^[12,13]。图5例举了在两相区 $(\alpha+\beta)$ 变形程度， α 相结构、 β 相晶粒尺寸，锻件最终塑性和断裂韧性之间的相互作用。从冶金学观点看， $(\alpha+\beta)$ 大变

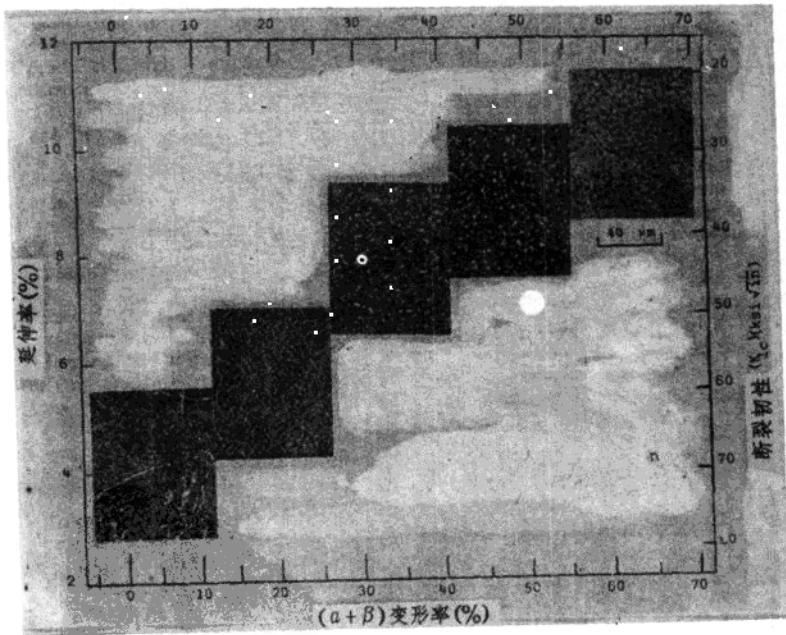


图5 $\alpha+\beta$ 加工对高强度 Ti-10V-2Fe-3Al 合金锻件的拉伸延伸率和断裂韧性的作用 (Ti-10V-2Fe-3Al)合金锻件,最大抗拉强度 1242-1380MPa (180-200Ksij)

形的锻造工艺，一般用来改善显微组织，以确保整个锻件有一致的高塑性和要求的抗拉强度。然而，生成的等轴 α 结构对断裂韧性不利。另一方面，由 β 加工工艺产生的细长晶粒降低塑性，同时又改善断裂韧性。

有时，在光学显微镜下的锻件显微组织特性，是发动机用钛合金锻件的主要设计性能要求的特征（强度 / 塑性 / 韧性）。如上所述，Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si 合金的高温性能可大致分为取决于初生 α 和转化产物的八种显微组织⁽²⁸⁾，并可进一步分为不同的三组类型(见图6)，分别具有高(A和B)、中(C、D、E和F)和低(G和H)蠕变抗力。条状魏氏(A)和类 β 组织(B)的显微组织表现出最高

的蠕变抗力。实践中具有高蠕变抗力的显微组织可以通过 β 锻造或 β 预成型再进行 $(\alpha+\beta)$ 成形锻造生产。在 β 相区的冷却速度对限制条状魏氏体的大小是重要的。等轴 α (G) 和转变马氏体 α (H) 显著降低蠕变性能。等轴 α 显微组织可通过在 $(\alpha+\beta)$ 相区的锻造，随后经 $(\alpha+\beta)$ 固溶处理得到。等轴 α 与转变网状显微组织相比，明显改善低周疲劳，也稍增加强度和塑性。转变马氏体组织通过在 β 相区温度水淬得到。这样一种显微组织已知有利于高周疲劳，通常使铸件有相当高的强度和低塑性。具有中等蠕变抗力的显微组织(C、D、E和F)与高抗蠕变抗力显微组织的完全转变物的显微组织比较，一般特征为更粗的魏氏 α 和或近 β 显微组织。

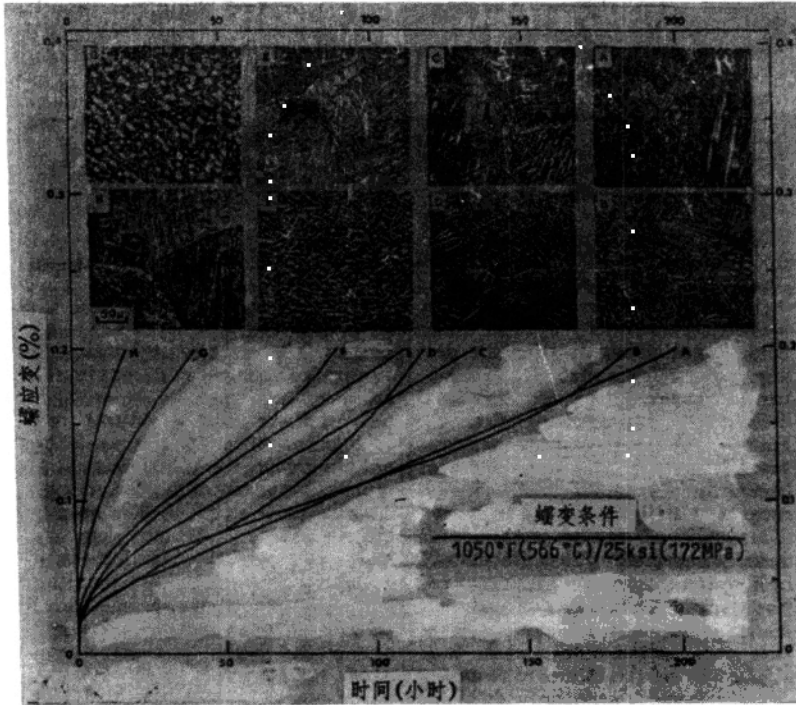


图6 8种不同微观组织的Ti624ZSi合金园盘试样的蠕变应变与时间的关系曲线
(蠕变条件: 1050° F(566°C) / 25Ksi(172MPa))

类似于高抗蠕变条件，这些显微组织是通过 $(\alpha+\beta)$ 或 β 锻造随后通过 $(\alpha+\beta)$ 或 β 固溶处理获得。但锻造温度、固溶温度和 / 或冷却速度是不同的。蠕变性能和光学显微组织之间的关系只限于几个极为不同的情况，即转变马氏体 α 、等轴 α 和魏氏显微组织。

8 形变和组织控制

现代钛合金锻造的生产实践是在 $(\alpha+\beta)$ 两相区和 α 相区温度下进行，一般

采用普通锻造工艺。虽然锻件的可锻性和性能已知取决于工艺参数和合金的显微组织，但合金变形加工及锻件的宏观和显微组织的精密控制在普通锻造的实践中由于激烈的模具冷却作用以没有得到解决（见图 7）。然而，随着热模锻造技术的发展，在锻造条件下对实际工艺参数和材料性能系统化控制已成为可能。也能生产具有所要求的组织和性能的钛合金锻件。特别是可以用热模加工生产具有可控制的形变和组织的钛合金盘^[29,30]。

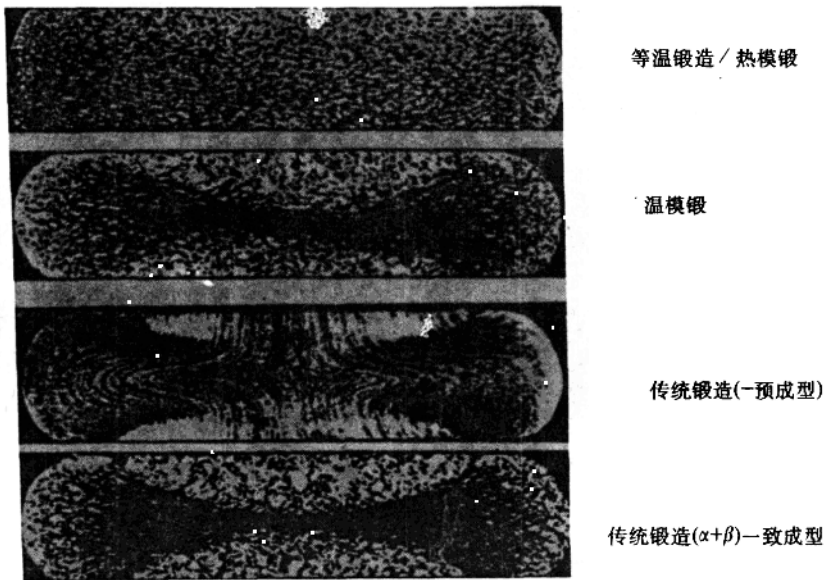


图 7 等温锻造和常规锻造的 Ti6242S1 合金园盘试样之间的宏观组织比较

普通 $(\alpha+\beta)$ 锻件在给定锻造温度下，等轴 α 的数量少于等温 / 热模锻件的数量。而且，普通锻件的 α 片状群的比热模锻件的更少被限制。普通 β 锻造件下转变显微组织的性质明显随锻造温度变化。等温锻件一般可看到马氏体转变 α 和魏氏转化 α 。钛合金的断裂韧性和塑性性能都由于马

氏体 α 组织的存在而恶化。 β 锻造和热模加工都表明对蠕变性能具有重要的作用^[4]。

由于热模锻造减少或消除了模具激冷和材料变形硬化的影响，这一工艺可以更大的控制加工参数和显微组织，并获得更精密的形状和性能。热模锻造技术的使用

对加工参数和显微组织需要进行精密控制的锻造技术是非常有益的。因此，该技术有巨大的潜力用于生产具有选择性性能梯度的钛部件，以改善锻件效率和经济效益。最近已经证明了结合热模锻造和后热处理操作的局部流变和再结晶工艺控制组织和性能梯度的概念^[30,31]。作为生产过

程热模锻造具有巨大的潜力，经济地生产某些用途需要的双性能钛锻件。例如，需要在轮缘具有更好抗蠕变性能和在辐板具有高疲劳性能的高温喷气发动机压缩机盘(图8)。这种双性能的钛锻件具有改善锻件组织性能和成本可行性的主要优点。

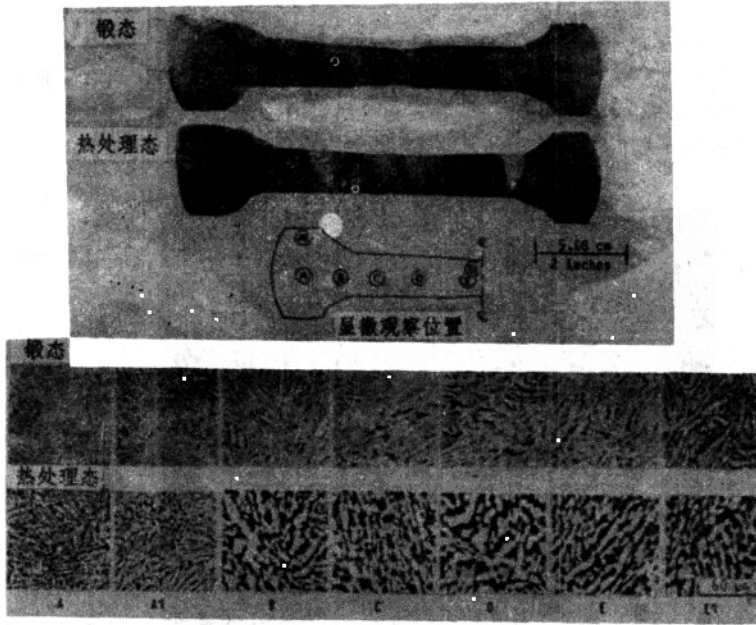


图8 采用热模锻技术通过选择锻造和热处理参数组合生产的Ti6424Si 涡轮盘的组织特点和最终性能

9 现在和未来的需求

在需要锻件作为主要受力结构件的航空和运输工业中，为了满足系统在应力增大，温度升高和腐蚀环境中运行的工作特性，对钛锻件的需求不断增大。为了满足这些需求，高技术工艺正在逐渐代替一些传统的锻造操作。这些技术是精密近净形/净形锻造，精密铸造，近净形粉末冶金，热等静压和超塑性成型。技术执行过程的实时程度化和生产方法的现代化，计

算机操作模拟、计算机辅助设计和生产的有效设计，已经用于改善生产性能和可加工性。

从生产观点来看，钛航空部件的现在和未来的主要技术要求是减少成本和提高性能。这些要求可通过以下获得：

- 成本可行的锻造工艺
- 改善成形能力
- 计算机辅助试验(计算机半自动设计

/ 检查和自动监控)

- 精密冶金控制(工艺、流变、组织)
- 改善质量和性能能力

10 形状制造能力

商业应用最多的钛合金系统是 $\alpha+\beta$ 和近 α 合金。这些合金一般在高温下($>1755^{\circ}\text{F}[955^{\circ}\text{C}]$)进行锻造,因此成本可行的热模锻件的迅速实现已经受到高成本的模具材料、工具和工艺所限制。虽然为了经济地发展适合于在空气中热模锻造的模具材料许多努力在不断地进行,但成功已经受到了限制。最近证明,近 $\beta+\beta$ 钛合金的热模锻造是优越的^(1,4)。由于和传统的 $\alpha+\beta$ 合金相比它们在高温显示较低的流变应力、较低的 β 转变温度和更好的成形性。这样,锻造加工和模具的温度可以明显降低,从而改善了模具稳定性、成本、润滑剂的有效性、加热时间和保温成本。

11 更高的性能和质量能力

最近几年来,航空工业对更高性能和改善组织性能的钛合金的需求不断增加,使更高强度的近 β/β 钛合金获得了发展和应用。这种合金系列的飞机结构和发动机部件的应用,诸如连接装置,起落架,涡轮压缩机,汽轮机及其部件已经被实际采用。然而,由于合金系统接近最大性能容量、锻造和热处理边界受到了限制。对一些特殊的用途锻造和热处理参数的选择性使用应进行研究,以获得最大的性能能力和均匀性。控制强度、塑性、韧性、疲劳、裂纹生长抗力、抗冲击等之间的密切相互关系。热分析经常被用来确定由于淬火前滞后时间而产生的不同厚度截面的温度变化,以精确控制热处理参数和获得最

大的性能能力和均匀性。

钛铝、Ti3Al和TiAl具有相当大的潜力作为航空发动机零件。这些种类的金属间化合物比普通钛合金更轻、更硬,表现出非常高的氧化抗力和蠕变强度,大大超过传统合金可以获得的上述性能。由于在低温塑性和韧性很受限制,已进行了很大的努力,采用热模锻造方法来生产这些锻件。

12 计算机辅助工程系统(CAE)的实现

锻造工业最主要的技术革命之一将是依靠CAE进行锻造模具的生产。这将淘汰模具制造的传统切削和试验方式。坯料和锻件的计算机辅助设计提供了自动化设计,改善了操作效率。生产锻造模具的传统方法是制造包含各种修正形状的参数(如根据锻造合金、锻造温度、模具合金和操作温度计算的收缩参数)的锻件形状的木模。采用CAE系统,将锻件形状数字化地确定在一些坐标系统中,并根据温度影响因素和后加工进行修改。CAE将为对整个模具加工的全自动化数字控制(N/C)提供准备整个模具的补缩措施与定位点、工具变化等的机会,这样,具有最少经验的设计人员采用N/C技术完成采用N/C技术不仅能完成模具设计也能完成模具粗加工,这些目前只被由模具加工者根据经验数据来进行。

计算机辅助锻造和预成型设计的部件近年来已经实际地在飞机结构和发动机部件上实现。根据锻造设计性质如锥形锻模型号、常规的、精密的、接近形状的,最终形状的等,以及各种锻造工艺如冷模、温模、热模和锻造合金系统、锻造设备、尺寸控制和质量保证,各种设计原理需要采用系统化方法。这样,主要的推动是把