

复合包套模锻新工艺^①

曾苏民

(西南铝加工厂, 重庆 631326)

摘 要 复合包套由金属套与隔热片组成, 运用复合包套模锻可获得理想的锻造温度, 降低变形抗力, 细化晶粒; 消除锻造裂纹, 改善锻件性能, 提高模具寿命。西南铝加工厂运用复合包套模锻新工艺首次在国内实现了大型难变形金属精密锻件的生产, 该文主要介绍其规律和实例。

关键词 复合包套 模锻 精密锻件

现代工业要求提供高难度变形金属的大型精密模锻件。如① $d\ 1\ 800\ \text{mm}$ 铝合金模锻件, 其投影面积达 $2.5\ \text{m}^2$; ②波音747客机 Tc4钛合金横梁长达 $7\ \text{m}$, 其投影面积达 $2.65\ \text{m}^2$ 。③ GH132高温合金燃气涡轮盘, 直径达 $d\ 1\ 200\ \text{mm}$, 其投影面积达 $1.2\ \text{m}^2$; ④FD8发动机 GH132的 Inology 901合金 $d\ 1\ 200\ \text{mm}$ 涡轮盘, 其投影面积达 $1.2\ \text{m}^2$ 。

国内模锻能力最大为三万吨水压机, 按常规工艺, 其模锻能力为:

①铝合金需 $300\sim 500\ \text{MPa}$ 的压力, 故铝合金模锻件最大投影面积为 $1\ \text{m}^2$ 。

②钛合金需 $500\sim 1\ 100\ \text{MPa}$ 的压力, 故钛合金模锻件的最大投影面积为 $0.6\ \text{m}^2$ 。

③高温合金需 $450\sim 1\ 050\ \text{MPa}$ 的压力, 故高温合金模锻件的最大投影面积为 $0.67\ \text{m}^2$ 。

显然, 必须在深刻掌握高难变形金属模锻规律的基础上, 开发新的工艺, 才能利用3万吨水压机实现前述大型精密锻件的国产化。

作者在西南铝加工厂经过11种合金, 25种模锻件的实践, 提出并形成了一套“复合包套模锻新工艺”, 成功地在三万吨水压机上实现了常规用五万吨压力模锻的高难度大型精密模锻件的生产, 如 $d\ 1\ 200\ \text{mm}$ GH132高温合金涡轮盘和 $d\ 1\ 800\ \text{mm}$ 大型铝合金模锻件等。

本文主要报导有关的工艺规律及实例。

1 复合包套模锻工艺规律

1.1 复合包套工艺简述

所谓复合包套模锻, 即是在模锻前将模锻坯料用金属板包裹好, 在坯料与金属套间隔以高温隔热片, 然后一起加热和模锻, 其结构如图1所示。

图1 复合包套结构图

隔热片起保温作用, 金属套在模锻过程中起固体润滑作用。

1.2 复合包套热交换系统

复合包套模锻不同于一般包套锻造, 在这里主要由金属片来起保持隔热片的作用, 由隔热片来起保温作用, 其目的是保持一定的模锻温度, 为了说明这个问题, 我们先对常规模锻及复合包套模锻的热交换系统进行对比计算, 弄清其温降规律。

以 GH169合金(Inconel 718) 涡轮盘作两

① 收稿日期: 1995- 09- 18; 修回日期: 1996- 01- 02

种模锻方法的比较。在模锻过程中,从上料到模锻终了,坯料传热是不稳定的过程,为了简化计算,我们将它作为一个瞬间的稳定过程进行计算,并忽略其形变过程热效应对温度的影响。涡轮盘坯料规格为 $d\ 435 \times d\ 160 \times 150$ mm。

1.2.1 上料过程热损失分析

(1) 常规模锻

常规模锻上料过程中的散热主要是通过热辐射进行的(对流和热传导很小,故忽略不计)。即单位面积上热损为: $dQ = C_0 \epsilon \left(\frac{T}{100}\right)^4 d\tau$ (这里略去室温项)^[1]。

坯料内部散热则通过热传导进行,设每瞬间为稳定导热,且热传导系数 λ 不变,则在一段时间内单位面积上的热损失为:

$$dQ = \frac{1}{2} C_p [(T_{\text{内}} - T_1) ds - s dT_1]$$

于是有:

$$C_0 \epsilon \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 d\tau = \frac{1}{2} C_p [(T_{\text{内}} - T_1) ds - s dT_1] \quad (1)$$

$$\text{而 } C_0 \epsilon \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 = \frac{\lambda}{s} (T_{\text{内}} - T_1)^{[1]}$$

$$\text{故有 } s = \frac{\lambda (T_{\text{内}} - T_1)}{C_0 \epsilon \left(\frac{T_1}{100}\right)^4} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),整理积分得:

$$\tau = \frac{100^8 C_p \lambda}{2 C_0^2 \epsilon^2} \left[\frac{T_{\text{内}} - T_1}{2 T_1^8} + \frac{T_{\text{内}}}{7 T_1^7} - \frac{1}{6 T_1^6} \right] \quad (3)$$

图2 传热机制原理图

式中 s 为坯料散热层深度, ϵ 为坯料黑度系数, C_0 为黑体辐射系数, C 为坯料比热, ρ 为坯料密度, λ 为热传导系数, $T_{\text{内}}$ 为坯料内部温度。当上料时间为 60 min (即 $\tau = 60$ min), $T_{\text{内}}$

= 1020 °C, 则由计算得:

$$T_1 = 1189^\circ\text{K} = 916^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{上}} = T_{\text{内}} - T_1 = 104^\circ\text{C}$$

$$\text{温降深度 } s = 3.12 \text{ cm}$$

(2) 复合包套模锻

复合包套模锻在上料过程的坯料热辐射被包套阻隔(变为金属套的热辐射),故主要热散失是坯料与包套的热传导。据统计,金属套由于热辐射,出炉后即由加热温度(1020 °C)降至700 °C;但坯料内的温度梯度可忽略不计,并在上料时间(60 Sec)视为恒定。

包套模锻在上料过程的散热过程可以简化如图3。

图3 包套模锻锻前温度分布图

此时,通过隔热片的散热为

$$dQ = \frac{\lambda}{s} (T - 700) d\tau$$

坯料热损为

$$dQ_2 = -\frac{CG}{F} dT$$

由 $dQ = dQ_2$, 得:

$$\begin{aligned} d\tau &= -\frac{CG\delta}{\lambda F} \frac{1}{(T - 700)} dT \\ \therefore \tau &= \int_{T_{\text{始}}}^{T_{\text{终}}} \left[-\frac{CG\delta}{\lambda F} \frac{1}{(T - 700)} \right] dT \\ &= -\frac{CG\delta}{\lambda F} [\ln(T - 700)]_{T_{\text{始}}}^{T_{\text{终}}} \quad (4) \end{aligned}$$

式中 G 为坯料重量, F 为坯料表面积, δ 为隔热片厚度, λ 为隔热片导热系数

计算结果: 当 $\tau = 60$ Sec 时,

$$T_{\text{终}} = 1014.5^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = 5.5^\circ\text{C}$$

可见其温降及温降深度均可忽略。

1.2.2 模锻时的热损失

模锻过程中, 由于坯料与锻模紧密接触, 而且二者之间有一定的温差, 故主要的温降是由热传导产生的。为简化计算, 将坯料与锻模间传导简化为平板热传导, 并设坯料中心及锻模尾温度不变, 模锻时间为15Sec。

(1) 常规模锻温降

常规模锻时的传热机制如图4所示。

图4 模锻时锻件温度曲线图

设接触热阻为 R_c , 则有以下二式成立:^[1]

$$q = \frac{(T_{\text{内}1} - T_1)\lambda_1}{S_1} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_c} = \frac{(T_2 - T_{\text{内}2})\lambda_2}{\delta_2} \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{2}\delta_1(T_{\text{内}1} - T_1)C_1\rho_1 = \frac{1}{2}\delta_2(T_2 - T_{\text{内}2})C_2\rho_2 \quad (6)$$

式中 C_1, ρ_1, λ_1 与 C_2, ρ_2, λ_2 , 分别为坯料 (GH169) 和锻模 (3Cr2W8V) 的比热, 密度, 传热系数。经计算有:

$$\sqrt{\frac{C_1\rho_1\lambda_1}{C_2\rho_2\lambda_2}} = 1$$

故: $T_2 = T_{\text{内}1} + T_{\text{内}2} - T_1$

$$\tau = \frac{C_1\rho_1\lambda_1 R_c}{4} \left[\frac{(T_{\text{内}1} - T_1)^2}{(RT_1 - T_{\text{内}1} - T_{\text{内}2})^2} + \ln\left(T_1 - \frac{T_{\text{内}1}}{2} - \frac{T_{\text{内}2}}{2}\right) + \frac{T_{\text{内}1} - T_{\text{内}2}}{2T_1 - T_{\text{内}1} - T_{\text{内}2}} \right]^{T_1} \quad (7)$$

式中 R_c 为接触热阻, $T_1, T_2, T_{\text{内}1}, T_{\text{内}2}$ 分别为坯料和锻模膛的表面温度和中心温度。当

$T_{\text{内}1} = 968^\circ\text{C}, T_{\text{内}2} = 400^\circ\text{C}$, 模锻时间为 15 Sec 时, 计算得出: $T_1 = 689^\circ\text{C}, \delta_1 = 1.84\text{cm}, T_2 = 679^\circ\text{C}, \Delta T_{\text{锻}} = 279^\circ\text{C}$ 。

(2) 复合包套模锻温降

在此, 主要用式(5) 计算复合包套模锻时的坯料温降, 接触热阻, 隔热片热阻 (R)。

因为 $\dot{R} = \frac{\delta}{\lambda}$

由式(5) 得出:

$$\tau = \frac{C_1\rho_1\lambda_1 R^2}{4} \left[\frac{(T_{\text{内}1} - T_1)^2}{(2T_1 - T_{\text{内}1} - T_{\text{内}2})^2} + \ln\left(T_1 - \frac{T_{\text{内}1} + T_{\text{内}2}}{2}\right) + \frac{T_{\text{内}1} - T_{\text{内}2}}{2T_1 - T_{\text{内}1} - T_{\text{内}2}} \right]^{T_1} \quad (8)$$

上式中, 上料后的坯料温度 $T_{\text{内}1} = 1014.5^\circ\text{C}$, 当 $\tau = 15\text{Sec}$ 时, 由计算得出:

$T_1 = 965^\circ\text{C}, T_2 = 449.5^\circ\text{C}, \delta = 1.27\text{cm}, \Delta T_{\text{锻}} = 49.5^\circ\text{C}$ 。

应当指出, 隔热片在模锻过程中被压薄展宽, 隔热性能恶化, 热阻降低, 计算时要适当考虑这一情况。

综上所述, 与常规模锻相比, 复合包套模锻在上料过程中的坯料温降由 104°C 减少到 5.5°C ; 在模锻过程中, 模锻件表面温降由 279°C 减少到 49.5°C 。且实测值与计算值基本一致。

1.3 复合包套模锻的工艺实质及效果

从大量的生产实践, 测量数据及以上的计算中证实复合包套模锻对于高温合金、钛合金、铝合金模锻具有很大的优越性, 其主要点如下:

1.3.1 可选择合适锻造温度实现细晶锻造

由于复合包套有很强的保温作用, 使坯料从出炉到模锻终了的整个过程中温降较小, 这就为各种合金模锻提供了较宽的对模锻温度选择的余地; 为在国产普通水压机上实现高温合金细化晶粒工艺和模锻大型复杂的钛合金、铝合金模锻件成为可能创造了必要条件。

高温合金随其晶粒度的减小, 综合性能大幅度改善。但获得细晶材料有很多困难, 如变形温度低, 则变形抗力大, 要求有较大的锻造设备; 锻造时模具的损耗大^[2], 且模锻件可能

出现表面裂纹。对此,国外主要采用等温模锻来解决。由于航空工业发展的需要,我国必须生产细晶GH169合金涡轮盘,它的模锻工艺十分苛刻,加热温度为1 000℃,终锻温度为950℃左右,温度间隔只有50℃左右,要求采用大型、昂贵的等温锻造设备,但国内暂时没有。如采用常规模锻,则会由于变形温度的差异,而造成组织性能的不均,甚至会出现裂纹,而且总压力将超过三万吨。为此,我们用复合包套模锻来解决这个问题,结果晶粒度达到ASTM 12级,这一工艺和产品均为国内首创。

1.3.2 模锻过程中锻件内外温差小,解决了锻造裂纹的难题

由于高温合金有较低的导热系数,在模锻过程中锻件的温降往往集中于表面,使表面温度强烈降低、强度急剧上升,而塑性急剧下降、变形困难增加,以致不能承受模锻变形而出现表面裂纹。采用复合包套模锻后,这一问题便迎刃而解,原因是复合包套有良好的保温作用,使模锻过程中的温降及模锻件内部的温度梯度减小,不但避免了表面裂纹的出现,而且大大减少了由于锻件内外温差使锻件各部分因变形温度、变形量的不同而造成的组织(如晶粒度、第二相量等)性能的不均匀性。

1.3.3 大幅度降低模锻变形抗力,实现大型难变形金属模锻

在常规模锻中,由于上料过程较大的温降,尤其在模锻过程中模具的急冷作用,使得坯料的表面层有较大的温降,而强度急剧上升,致使模锻的变形抗力也急剧上升,而在包套模锻中,这种作用很小。由于常规模锻终锻时表面层强度急剧上升,从内部的100 MPa增大到外面的1000 MPa,由于这一高强度层的包裹,将大大地增加模锻时的变形抗力,使所需的模锻压力也急剧上升。而在复合包套模锻中,其表面强度只上升40 MPa(100 MPa~140 MPa),在模锻时保持了低的变形抗力和高塑性,加之金属套在模锻过程中起固体润滑作用,大大降低了模锻件与模具之间的摩擦系

数,因而与常规模锻相比,复合包套模锻大幅度地降低了模锻时的变形抗力。

1.3.4 改善模具工作条件,显著提高模具寿命

在采用复合包套模锻时,高温合金模锻件的模具寿命是低的。如斯贝涡轮盘的模具在模锻三个盘件后就发生断裂, GH698二级涡轮盘的模具在模锻四个盘件后就发生龟裂。这是由于模具的高应力、高温以及由此而引起的低强度、高温差应力、高热疲劳所造成的,这必然导致模具寿命的降低。而在复合包套模锻中,由于模锻压力的降低,模具温升(在模锻GH169时温升约为50℃)、温差应力和热疲劳应力也低,模具仍然差不多保持原有的高强度(1520 MPa)这使模具寿命得到很大的提高,如GH169一级涡轮盘模具模锻110个盘件后仍完好无损。

2 高温合金、铝合金复合包套模锻实例

2.1 $d1\ 200\text{ mm}$ (GH132合金, W4燃气涡轮盘) 高温合金特大型模锻件的研制

由于模锻新工艺所具有的优点,我们在 $d1\ 200\text{ mm}$ 盘的研制中采用了较低的模锻加热温度 $1\ 080^{\pm 10}\text{ }^{\circ}\text{C}$,比常规模锻温度 $1\ 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3]降低70℃,使其获得较细的晶粒,较好的综合性能,各方面的检验表明完全超出了技术标准的要求,并且已在使用厂顺利投产,装机使用。

众所周知,高温合金常规模锻需要450~1100 MPa的压力, $d1\ 200\text{ mm}$ 模锻件一般需要5万吨水压机才能锻出,而我们只用了2.9万吨压力,也就是说采用复合包套模锻新工艺用3万吨水压机完成了需5万吨水压机才能完成的任务。

2.2 $d1\ 800\text{ mm}$ 、LD2铝合金特大型模锻件研制

$d1\ 800\text{ mm}$ LD2铝合金特大型模锻件也是采用复合包套模锻新工艺在3万吨水压机上进

行模锻的。模锻前加热温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[4]，模具温度为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，终锻温度为 $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，总压力为2.8万吨。模锻件经过热处理后，晶粒细小，其性能完全超出技术标准要求，使用效果良好。铝合金常规模锻件需要300~ 500 MPa 的压力， $d1\ 800\text{ mm}$ LD2铝合金特大型模锻件也需要五万吨水压机才能胜任，我们同样采用复合包套模锻新工艺在3万吨水压机上模锻成功。

3 结论

- (1) 复合包套模锻新工艺为高难变形合金模锻创造了良好的变形条件，坯料能在比较稳定均匀的温度下，以相对较小的变形抗力进行均匀的金属流动，完成整个模锻过程。
- (2) 理论和实验证明包套模锻所需的压力比常规模锻降低40%~ 60%，从而能在3万吨

- 水压机上模锻需5万吨的水压机才能锻成产品。
- (3) 锻件变形温度及流变均匀，组织晶粒细密，表面裂纹消除，机械性能优良，其效果与等温模锻、热模锻相当。
- (4) 模具寿命可比常规模锻提高10~ 20倍。

参考文献

- 1 范治新(编). 工业传热原理. 北京: 中国化工出版社, 1982.
- 2 冶 军(编). 美国镍基高温合金. 北京: 冶金工业出版社, 1978.
- 3 北京钢铁研究院高温合金教研室. GH132合金. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- 4 The Aluminum Association(ed). Aluminum Standards and Data. 1993.

A NEW TECHNOLOGY OF DIE FORGING WITH COMPOUND JACKET

Zeng Suming
The South West Aluminium Works, Chongqing 631326

ABSTRACT A new technology of die forming, with a metallic jacket intercalated heat insulating sheet to envelope the hot metallic work-piece and keep its temperature to be decreased only a little, has been developed and used to produce large work-pieces. The results showed that this technology could obtain ideal forging temperature, reduce forging loads, fine crystal grains, eliminate forging cracks, improve the properties of the forged work-piece and lengthen the service life of the mould. For the first time, some large precise forged work-pieces of unmanageable metals are produced in China.

Key words compound jacket die forging aluminium titanium steel

(编辑 朱忠国)