

TC11 钛合金压气机盘闭模锻造过程中的缺陷预测

张海燕¹, 张士宏¹, 程明¹, 李臻熙², 曹春晓²

(1. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: TC11 钛合金压气机盘在实际生产中存在各种缺陷, 降低了压气机盘的使用性能。将基于试验数据建立的 TC11 钛合金高温塑性变形时的延性损伤演化模型以及本构模型与有限元相结合, 对某 TC11 钛合金压气机盘等温闭模锻造过程中的温度、等效应变和损伤变量的分布进行了数值分析, 同时预测了塑性失稳区的位置。为优化其成形工艺提供了一种有效的方法。

关键词: 钛合金; 压气机盘; 损伤模型; 缺陷; 数值分析

中图分类号: TG316.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2009)01-0062-04

Prediction of Defects During Closed Die Forging of TC11 Alloy Compressor Disks

ZHANG Hai-yan¹, ZHANG Shi-hong¹, CHENG Ming¹, LI Zhen-xi², CAO Chun-xiao²

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: There are some defects in the actual forging of TC11 alloy compressor disks, which decreases the performance of the compressor disks. In this paper, a ductile damage evolution model and a constitutive model for TC11 alloy during high temperature deformation developed based on the data from experiments were coupled with a FE simulator. Furthermore, the distributions of temperature, equivalent strain and damage value of TC11 alloy compressor disk during closed die forging were simulated and analyzed, and the plastic instability areas were predicted. It has provided an effective method to optimize the forging process of TC11 alloy compressor disks.

Key words: titanium alloy; compressor disk; damage model; defect; numerical analysis

TC11 钛合金为($\alpha+\beta$)两相热强钛合金, 由于其具有较好的综合性能, 是生产发动机压气盘的重要材料。为保证发动机的安全可靠, 对压气机盘锻件的要求非常严格。该锻件具有尺寸大、形状复杂等特点, 同时 TC11 钛合金的变形性能对工艺参数很敏感, 成形难度较大^[1-2], 通常采用等温锻造工艺成形^[3-5]。在实际锻造过程中由于热变形工艺的不合理导致各种各样的缺陷, 如开裂、折叠和流线失稳等, 因此通过合理的模型预测其锻造过程中的缺陷

位置对改进热变形工艺得到合格的 TC11 钛合金压气机盘锻件有十分重要的意义。

在外部因素的作用下, 材料内部微观细结构发生变化, 引起微缺陷的形核、扩展和汇合, 最终形成宏观开裂破坏。对于延性材料, 微孔洞的形核、扩展和汇合是一种重要的损伤破坏方式^[6-7]。当材料内部生成微孔洞, 即产生损伤, 损伤累积到一定程度时, 材料就发生失稳断裂。因此, 基于微孔洞的延性损伤模型可以有效地预测金属材料在变形过程中的

收稿日期: 2009-04-20

作者简介: 张海燕(1981-), 女, 四川人, 在读博士研究生, 主要研究方向为高性能合金锻造过程中的组织演变与工艺优化。

塑性失稳。

数值模拟方法是分析材料塑性成形最为有效的方法,在锻造领域得到了广泛的应用。目前的商用有限元软件自有的损伤模型都没有考虑变形温度和变形速率对损伤变量的影响,因此,计算得到的损伤变量值与实际有较大的差异。

文中将建立的考虑了变形温度与应变速率影响的 TC11 钛合金高温塑性变形时延性损伤演化模型和双曲正弦本构模型与有限元相结合,对某 TC11 钛合金压机盘等温闭模锻造过程中的缺陷进行了预测。

1 损伤模型

传统的损伤模型或锻造破裂准则没有考虑应变历史和温度及应变速率的影响,为了研究 TC11 钛合金高温塑性变形过程中的损伤机理,笔者提出了一个新的变形破裂损伤预测准则^[8],新的准则考虑了应变积累、应变速率和温度的影响,经验证与实际情况非常吻合。文中进行了不同变形条件下的拉伸试验,其中通过弹性模量的测量确定损伤变量的值,具体的测试方法以及模型建立在文献[8]中有详细的介绍。根据拉伸试验数据,建立的 TC11 钛合金高温塑性变形时的延性损伤模型如公式(1)。其中 D 为损伤变量; σ_m, σ_{eq} 分别为静水压力和等效应力; ε_p 为等效塑性应变; $A(Z)$ 为考虑变形温度和变形速率的修正函数,表示为 Zener-Hollomon 参数 Z 的函数,如公式(2)。材料发生断裂时对应的损伤值称为临界损伤值 D_R ,其值为 Zener-Hollomon 参数 Z 的函数,如公式(3)。

$$D = A(Z) \int_0^{\varepsilon_p} \exp\left(\frac{3\sigma_m}{2\sigma_{eq}}\right) d\varepsilon_p \quad (1)$$

$$A(Z) = 1.415 - 0.036 \ln Z + 0.00043 \ln^2 Z \quad (2)$$

$$D_R = 1.204 \times 10^5 (\ln Z)^{-2.87} \quad (3)$$

由于该损伤模型考虑了变形温度和变形速率对材料损伤过程的影响,计算得到的损伤变量值和实际情况更接近。材料在外力作用下发生塑性变形,当累积的损伤值 D 大于相应变形条件下的临界损伤值 D_R 时,材料就发生塑性失稳。

虽然该模型是基于拉伸试验数据建立的,但运用此损伤模型对 TC11 钛合金的压缩试验进行了预测^[8],预测结果与试验相吻合,证明了该模型也可

用于压缩变形中损伤的预测。锻造过程中,虽然主要变形区为压缩变形,然而拉应力在某些部位起重要作用,并且往往是破裂损伤的内在原因。

文中对该损伤模型在商用有限元软件 MSC. Superform 进行了用户子程序的二次开发,在有限元分析中运用该损伤模型可以对 TC11 钛合金热变形过程中的塑性失稳位置进行动态预测,为进一步改进其热变形工艺提供了技术依据。

2 模拟条件

2.1 本构模型

本构模型是塑性加工过程中材料的动态响应与热力参数间的关联关系,是用数值分析方法对材料塑性加工过程进行模拟的前提条件。因此,建立准确的材料本构模型对有限元结果的准确性十分重要。

合金在高温变形时,应用较为广泛的本构模型为 Sellars 和 Tegart 提出的 Arrhenius 方程,该方程有 3 种形式^[9]。公式(4)为指数方程,适合于材料高温变形时流动应力高的情况。公式(5)为幂指数方程,适合于材料高温变形时流动应力低的情况。公式(6)为双曲正弦函数方程,能够描述所有材料高温变形时的流动应力。因此,文中采用公式(6)的双曲正弦形式表示 TC11 钛合金高温变形时的本构模型。

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q_{DEF}}{RT}\right) \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q_{DEF}}{RT}\right) \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon} = A [\sin h(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q_{DEF}}{RT}\right) \quad (6)$$

式中, $A_1, A_2, A, \beta, \alpha, n_1, n$ 为材料常数或应变的函数; Q_{DEF} 为变形能, kJ/mol; σ 为流动应力, MPa; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; R 为气体常数; T 为热力学温度, K。

由于材料在锻造变形过程中的受力情况与单向压缩过程相似,因此,通常采用单向压缩试验研究材料的变形本构模型。

为了研究 TC11 钛合金高温变形时的变形行为,进行了一系列的等温恒应变速率压缩试验。通过热模拟压缩试验得到了 TC11 钛合金不同温度和

应变速率下的真应力-真应变曲线。根据热模拟压缩试验数据和通过线性回归得到了 TC11 钛合金的本构模型,其中双曲正弦函数中的 A, n, Q_{DEF} 和 α 均为应变的函数(公式(7))。

$$\begin{aligned} \alpha &= -0.7035\varepsilon^4 + 0.8456\varepsilon^3 - 0.3648\varepsilon^2 + \\ & 0.0761\varepsilon + 0.0365 \\ n &= 15.432\varepsilon^4 - 14.254\varepsilon^3 + 4.6686\varepsilon^2 - \\ & 0.7849\varepsilon + 3.7009 \\ Q_{DEF} &= -8889.8\varepsilon^4 + 11725\varepsilon^3 - 6006.8\varepsilon^2 + \\ & 1606.2\varepsilon + 334.2 \\ \ln A &= -963.87\varepsilon^4 + 1256\varepsilon^3 - 623.41\varepsilon^2 + \\ & 157.04\varepsilon + 24.396 \end{aligned} \quad (7)$$

文中将回归得到的该双曲正弦本构模型在有限元软件中进行了相应的用户子程序的二次开发,因此,可以更准确地对 TC11 钛合金热变形过程进行数值模拟分析。

2.2 有限元模型

由于压气机盘为轴对称件,且 TC11 钛合金的变形性能对工艺参数很敏感,因此,采用二维轴对称热力耦合刚粘塑性有限元法对压气机盘的等温闭模锻造工艺进行数值分析。图 1 为根据实际锻造工艺建立的有限元模型,其中上模为可动模,下模为不动模。

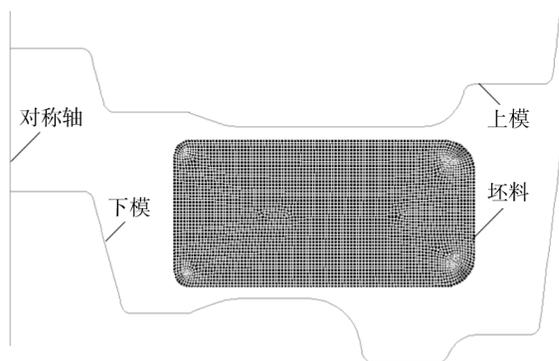


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

TC11 钛合金压气机盘在实际锻造中以玻璃润滑剂为润滑材料,能够有效地降低成形过程中坯料与模具之间的摩擦,并起到一定保温作用。因此,模拟过程中取摩擦因子为 0.2,坯料与模具之间的换热系数为 $20000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,坯料与环境之间的换

热系数为 $20\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

3 结果与讨论

图 2 为终锻时压气机盘内的温度分布场和等效

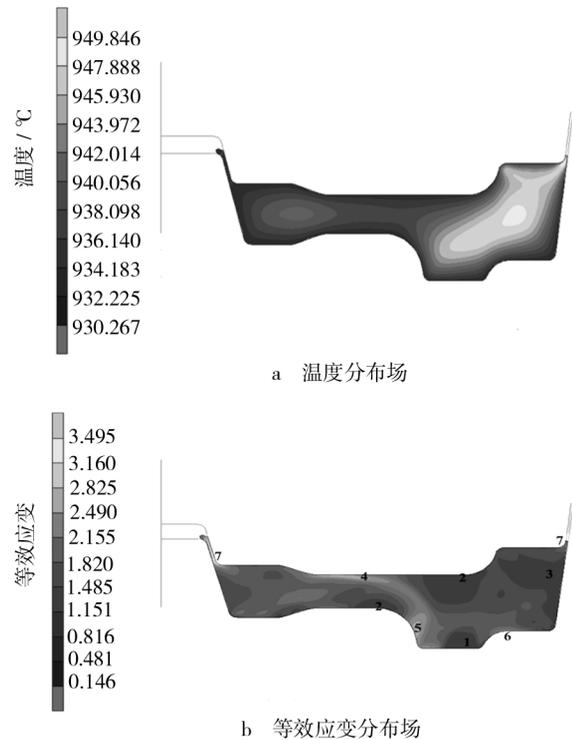


图 2 终锻时压气机盘内的温度分布场和等效应变分布场

Fig. 2 Distributions of temperature and equivalent strain at the end of forging

应变分布场。等温闭模锻造工艺为:坯料初始温度 970°C ,模具温度 930°C ,上模运动速度 0.3mm/s 。由图 2a 可知,终锻时压气机盘内的温度梯度较小,最大温差大约为 20°C 。由图 2b 知,终锻时压气机盘内的变形不均匀,其中轮毂底部位置 1 处、辐板与轮毂过渡圆角 2 处和轮缘外侧 3 处的变形量较小;而辐板 4 处、轮毂内侧 5 处、下轮毂与轮缘的过渡圆角 6 处和飞边 7 处的变形较剧烈,应变较大。

图 3 为根据所建立的 TC11 钛合金高温塑性变形时的延性损伤模型预测得到的终锻时压气机盘内损伤变量 D 的分布场。由图 3 可知,损伤变量 D 的值的分布规律和等效应变的分布规律接近,其中轮毂底部位置 1 处、辐板与轮毂过渡圆角 2 处和轮缘外侧 3 处的损伤变量值较小;而辐板 4 处、轮毂内侧

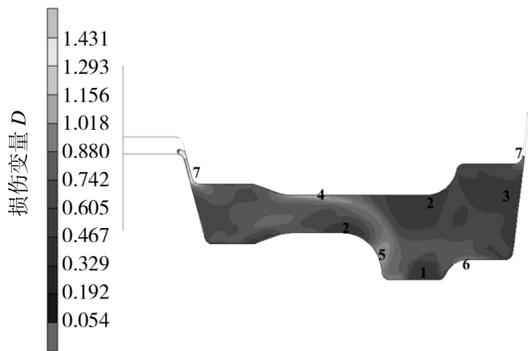
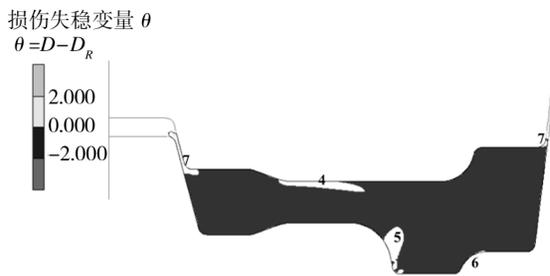


图3 终锻时压气机盘内的损伤变量分布场

Fig.3 Distribution of damage values at the end of forging

5处、下轮毂与轮缘的过渡圆角6处和飞边7处的损伤变量值较大。这说明该压气机盘的4,5,6和7处在变形过程中易发生塑性失稳。

图4为终锻时压气机盘内的损伤失稳变量 θ 分布

图4 终锻时压气机盘内损伤失稳变量 θ 分布场Fig.4 Distribution of damage instability parameter θ at the end of forging

布场,其中损伤失稳变量 θ 的值为 $(D-D_R)$,当变量 θ 的值大于零时表示发生了塑性失稳。由图4可知,终锻时,压气机盘的辐板4处、轮毂内侧5处、下轮毂与轮缘的过渡圆角6处和飞边7处的损伤失稳变量 θ 的值大于零,发生了塑性失稳。

4 结论

建立了TC11钛合金高温变形时的延性损伤演变模型以及本构模型,并进行了有限元用户子程序的二次开发,运用这些模型对某TC11钛合金压气机盘等温闭模锻造工艺进行了数值模拟分析,结果表明如下。

1) 在该压气机盘的成形过程中,轮毂底部位

置、辐板与轮毂过渡圆角和轮缘外侧的变形量较小,相应的损伤变量值也较小。

2) 该压气机盘的辐板、轮毂内侧、下轮毂与轮缘的过渡圆角和飞边的变形较剧烈,应变较大,相应的损伤变量值较大,并发生了塑性失稳。

参考文献:

- [1] 吴静,鲁世强,刘志. TC11 钛合金的热态变形行为研究[J]. 南昌航空工业学院学报,2006,20(2):29-33.
- [2] 陈慧琴,林好转,郭灵. TC11 钛合金高温流变行为及组织演变[J]. 航空材料学报,2007,27(3):1-5.
- [3] 魏志坚. TC11 钛合金压气机盘等温锻造工艺研究[J]. 机械工人,2003(3):45-48.
- [4] 李苏洋,罗迎社,李颂文,等. TC11 钛合金盘等温流变成形的数值模拟及其生产应用[J]. 热加工工艺,2001(1):22-25.
- [5] WU M, LUO Y S, PENG X H. Numerical Simulation and Its Application of Theological Forming of Titanium Alloy Vane Disk[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(Supplement): 671-675.
- [6] 董杰,李永池,陈学东. 一种新型微孔洞损伤模型[J]. 高压物理学报,2007,21(4):414-418.
- [7] 余寿文,冯西桥. 损伤力学[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [8] 张士宏,陈学伟,王忠堂,等. TC11 钛合金热锻成形过程中延性损伤演化模型的建立[J]. 塑性工程学报,2008,15(3):128-131.
- [9] SELLARS C M, MCG W J. Tegart: La Relation Entre la Resistance et la Structure Dans la Deformation a Chaud[J]. Membr Sci Rev Met, 1966, 63: 731-746.