

工艺优化设计

超大高径比棒料连续镦粗工艺及材料变形规律

陈孝学¹, 程仁策², 吕正风², 赵巍², 焦娟娟², 赵国群¹

(1.山东大学 材料科学与工程学院, 济南 250061;

2.山东南山铝业股份有限公司, 山东 烟台 265713)

摘要: **目的** 研究超大高径比棒料连续镦粗制坯的工艺方法及变形规律。**方法** 通过设计带有一定锥度的可拆卸凸凹模模块对坯料失稳进行约束, 通过选择合适的锥度、镦粗次数和锻造速度, 避免折叠现象的产生, 并研究棒料断面不平整对变形失稳的影响。**结果** 与常规镦粗方法相比, 可有效提高镦粗变形的均匀性。**结论** 提出了一种适用于超大高径比棒料连续镦粗的锥形模具结构及其成形工艺方法。

关键词: 大高径比; 锥形模具; 镦粗工艺; 失稳; 钛合金

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.022

中图分类号: TG316 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)05-0148-06

Continuous Upsetting Process and Material Deformation Rule of Large Height-diameter Ratio Bars

CHEN Xiao-xue¹, CHENG Ren-ce², LYU Zheng-feng², ZHAO Wei², JIAO Juan-juan², ZHAO Guo-qun¹

(1.School of Material Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2.Shandong Nanshan Aluminum Co., Ltd., Yantai 265713, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the continuous upsetting process and the material deformation rules of large height-diameter ratio bars. A series of detachable upper punch and lower die modules with a certain taper were designed to constrain the instability of bars. By choosing appropriate taper, upsetting times and forging speed, the folding phenomenon could be avoided effectively. Influences of bar cross section on deformation instability were also studied. Compared with the conventional upsetting method, the forming process and die presented in this paper could improve the uniformity of metal deformation effectively. A conical die structure and forming process suitable for the continuous upsetting of large height-diameter ratio bars is proposed.

KEY WORDS: large height-diameter ratio; conical die; upsetting process; instability; titanium alloy

钛合金飞机主轴、发动机、压气机盘、涡轮盘等关键零件的服役环境复杂且恶劣, 对其力学和组织性能要求较高^[1-3]。这些零件的成形制造一般采用锻造成形工艺, 而锻造过程中材料变形规律及其均匀性、不同温度和应变速率下微观组织演变规律及其调控是此类锻件成形技术研究的重点。这类锻件一般体积较大, 所用坯料直径一般受探伤检测限制, 例如钛合

金受 A 级探伤检测的要求, 其原始棒料直径一般不超过 250 mm, 这就使得原始棒料的高径比较大。在超大高径比棒料的镦粗制坯过程中, 镦粗件极易产生失稳和折叠现象, 因此, 如何保证超大高径比棒料在镦粗过程中不产生失稳和折叠现象, 是制坯工序需要解决的关键问题, 也是实现整个锻件最终成形过程的前提。

收稿日期: 2017-06-27

作者简介: 陈孝学 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为钛合金的锻造工艺及模具设计。

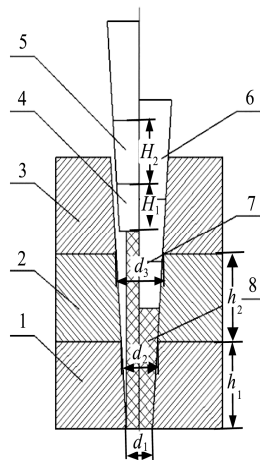
通讯作者: 赵国群 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为锻压工艺与装备。

针对大高径比棒料的镦粗工艺, 人们开展了诸多研究^[4-17]。对于小直径大高径比的棒料, 可采用电镦方式^[4]或带有浮动凹模的双向挤压技术, 但对于较大直径的棒料, 这种镦粗工艺对镦粗件变形均匀性的控制较差, 模具制造和加热方式控制复杂, 成本较高^[5-6]。梁秀春提出了一种镦粗大高径比锻件的方法^[7], 适用于大高径比汽车后桥半轴头部的局部镦粗。钟诚道等发明了一种自由锻高径比超极限镦粗法及镦粗砧^[8], 适用于高径比稍大于3的铝合金开坯镦粗。张治民等发明了一种大高径比镁合金棒料均匀镦粗成型的方法^[9], 适用于约束条件下的镁合金镦粗挤压成形。

上述研究虽可以完成对坯料的镦粗制坯, 但其镦粗适用范围较窄, 棒料的高径比仍然受到一定限制, 且镦粗过程中材料的变形均匀性也有待于进一步提高, 对于超大高径比的棒料, 其镦粗成形效果也不易保证。为此, 文中提出了一种用于超大高径比棒料连续镦粗的锥形模具结构及其成形工艺方法, 分析了不同镦粗速度下材料的变形规律和失稳情况, 并确定了预制坯镦粗成形的合理工艺参数。

1 连续锥形镦粗工艺及模具结构设计

超大高径比棒料的连续锥形镦粗模具见图1, 包括相互配合的凹模和凸模, 凹模和凸模的成形壁面具有相同的锥度, 其锥角大小可根据镦粗效率、失稳程度和变形均匀性来确定。凸、凹模均由沿轴向分布的、若干层可拆卸的凸、凹模模块安装而成, 且凸、凹模的层数均与设定的镦粗次数相等。一般地, 原始坯料高径比越大, 所需镦粗次数和凸、凹模层数就越多。



1.第1层凹模模块 2.第2层凹模模块 3.第3层凹模模块 4.第1层凸模模块 5.第2层凸模模块 6.第3层凸模模块 7.原始棒料 8.第1次镦粗件

图1 连续锥形镦粗模具结构

Fig.1 Structure of the continuous conical upsetting die

锥度是指圆锥的底面直径与锥体高度之比, 如果是圆台, 则为上、下2底圆的直径差与圆台高度的比值; 锥角为圆锥轴截面2条母线之间的夹角; 成形壁面是指凹模的内侧壁面和凸模的外侧壁面, 凹模内壁的最小直径可比原始棒料的直径大2~3 mm, 以方便原始棒料在镦粗模具中的初始定位。

根据凸模与凹模的配合关系可知, 凸模的外表面是倒置的圆台形, 凹模的内凹腔同为倒置的圆台形, 随着凸模下压, 凸模的外侧面与凹模的内壁面逐渐靠近, 由于凸模角部和凹模壁面形成的拐角处是金属最难充满的区域, 所以在凸模和凹模的缝隙处, 镦粗件不易形成毛刺。通过控制凸模的压下量, 可防止凸模外壁与凹模内壁完全接触, 以保护模具, 防止产生过载。

模具的各层模块之间通过长螺栓连接固定, 连接结构的大小可进行相应调整。当完成第1次镦粗后, 对模具进行拆卸重组。其方法是: 拆开连接结构, 将最小平均外径的第1层凸模模块和最小平均内径的第1层凹模模块拆卸掉, 然后再利用连接结构对剩余的模块进行组装固定, 进行下一次镦粗, 以此类推。通过拆卸重组可进行多次镦粗, 从而实现超大高径比棒料的镦粗成形, 直至获得所需高径比的镦粗件。

凹模内壁和凸模外壁均具有相同的锥度, 在镦粗变形过程中, 模具壁面锥度给棒料施加一定的约束, 当棒料产生一定失稳时, 失稳弯曲的棒料会很快接触到凹模内壁, 并在凹模内壁的约束作用下, 失稳弯曲会很快得以抑制和矫正, 从而可防止棒料在镦粗过程中产生折叠, 模具壁面设置锥度又扩大了镦粗变形过程中材料的变形空间, 既改善了镦粗效果, 又可提高镦粗变形均匀性。

凸模与凹模的锥度选择很重要。若锥度过大, 尽管每次镦粗的凸模压下量较大, 坯料变形量大, 镦粗次数减少, 但易增加棒料失稳程度, 甚至造成折叠; 若锥度较小, 则每次镦粗的凸模压下量较小, 增加了镦粗次数及更换模具次数, 因此, 合理锥度的选择既要考虑镦粗质量, 又要考虑镦粗效率。

根据成形壁面的锥角、棒料高度和每次镦粗比, 可确定镦粗次数、凸模和凹模的层数以及每层凸、凹模模块的高度。每层凹模模块的高度见式(1)。

$$h_n = \frac{d_{n+1} - d_n}{2 \tan(\alpha/2)} \quad (1)$$

式中: h_n 为沿凹模内径逐渐变大方向的第 n 层凹模模块的高度; α 为凸凹模模块的锥角; d_n 为第 n 次镦粗时凹模的最底端内直径; d_{n+1} 为第 $n+1$ 次镦粗时凹模的最底端内直径, n 为正整数。

每层凸模模块的高度见式(2)。

$$H_n = \frac{D_{n+1} - D_n}{2 \tan(\alpha/2)} \quad (2)$$

式中: H_n 为沿凸模外径逐渐增大方向的第 n 层凸模模块的高度; α 为凸凹模模块的锥角; D_n 为第 n 次镦粗完成时坯料充满型腔后的大端直径; D_{n+1} 为第 $n+1$ 次镦粗完成时坯料再次充满型腔后的大端直径, n 为正整数。

凸模安装在上模座上, 凹模安装在凹模固定板上, 当在较高温度下进行等温锻造时, 凸模与凹模周围可设置加热装置, 以维持模具温度。为减少凸凹模的热量损失和保护上下模座, 在凸、凹模与模座之间可安装隔热垫板, 凹模的底部安装有活动的顶杆, 镦粗完成后, 利用顶杆将镦粗件顶起, 方便镦粗件取出。

超大高径比棒料连续锥形镦粗工艺流程为: 根据原始棒料的直径和终锻件的体积, 计算原始棒料的高度; 将棒料、凹模和凸模涂抹润滑剂, 然后加热到设定温度; 进行第 1 次镦粗操作, 当凸模压入到一定深度, 即凸模与凹模的成形壁面几近重合时, 坯料几乎充满模具型腔, 第 1 次镦粗完成; 然后将最小平均外径的凸模模块和最小平均内径的凹模模块拆卸掉, 并将剩余的凸模模块和凹模模块重新安装固定, 进行第 2 次镦粗; 按照相同的方法进行后续镦粗, 直至镦粗件的高径比达到所要求的大小; 每次镦粗中的镦粗比可以相同, 也可以不同。通过该工艺获得的最终镦粗件, 无折叠现象产生, 且各部分变形相对均匀, 流线分布也合理, 符合后续锻造成形过程的要求。

2 连续锥形镦粗过程中材料的变形规律

为了研究连续锥形模具镦粗过程材料的变形规律, 文中按照某一锻件的制坯要求, 以直径为 250 mm、高径比达 6.5 的 Ti6Al4V 钛合金棒料, 镦粗至高径比为 0.256 的制坯过程为例, 分析镦粗过程材料的变形规律和失稳情况。

2.1 凸、凹模成形壁面锥角 α 的选择

根据给定的钛合金原始棒料尺寸, 对比分析了不同 α 角条件下第 1 次镦粗坯料的变形情况, 结果见图 2。 $\alpha=4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 20^\circ$ 时, 其镦粗件的平均等效应变分别为 0.3080, 0.3668, 0.6466, 0.8709, 对应的等效应变均方差分别为 0.1714, 0.2521, 0.3210, 0.4074。由此可见, 随着锥度的增加, 镦粗件的平均等效应变及其均方差增加。为兼顾镦粗效率、镦粗过程中的变形均匀性和无折叠现象产生, 锥角 α 可在 $6^\circ \sim 12^\circ$ 范围内选择。

下面以锥角 $\alpha=8^\circ$ 为例, 分析锥形模具镦粗过程中材料的变形规律, 成形壁面倾斜角度为 4° , 将凸凹模设计成 3 层, 即进行 3 次连续镦粗。设置凹模模块内部直径 d_1, d_2, d_3 分别为 252, 350, 450 mm, 根据式 (1) 和 (2) 可计算出凸、凹模各模块的高度 H_1, H_2 分别为 372 和 506 mm, h_1, h_2 分别为 701 和 715 mm。

2.2 镦粗速度对变形失稳的影响

对第 1 次锥形镦粗过程进行了有限元数值模拟, 分析了不同锻造速度下镦粗件的失稳情况, 不同镦粗速度下镦粗件的变形失稳情况和等效应变分布见图 3。可见, 在其他镦粗参数相同的条件下, 镦粗速度较低时 (见图 3a 和 3b), 镦粗件上端会发生严重的局部变形, 导致局部失稳, 甚至出现了材料上翻和包裹凸模的现象, 无法获得合格的镦粗件。镦粗速度为 1 mm/s 时见图 3c, 棒料的上端和下端开始变形, 下端模腔被充满, 镦粗件上端产生局部变形; 随镦粗速度继续增加, 在变形初期, 棒料的变形区几乎扩大至整个长度范围, 棒料底端先产生镦粗变形, 且在凹模内壁的约束下, 由下而上逐步充满凹模型腔, 且凸模和凹模的交汇的角度区域为最难充满区域, 不易形成毛刺, 无折叠现象产生, 且镦粗件的变形均匀性得以提高, 见图 3d 和 3e。可见镦粗过程中凸模的压下速度应不低于 2 mm/s。

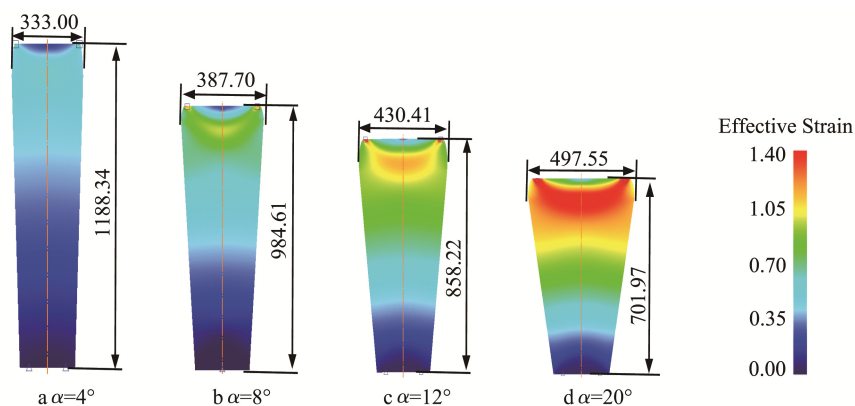


图 2 一次镦粗时镦粗件的等效应变分布

Fig.2 Effective strain distribution of the upsetting after first upsetting

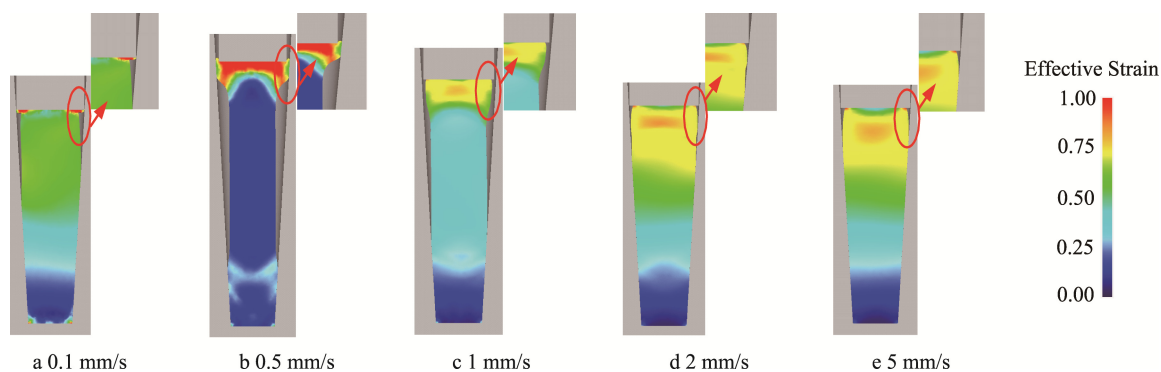


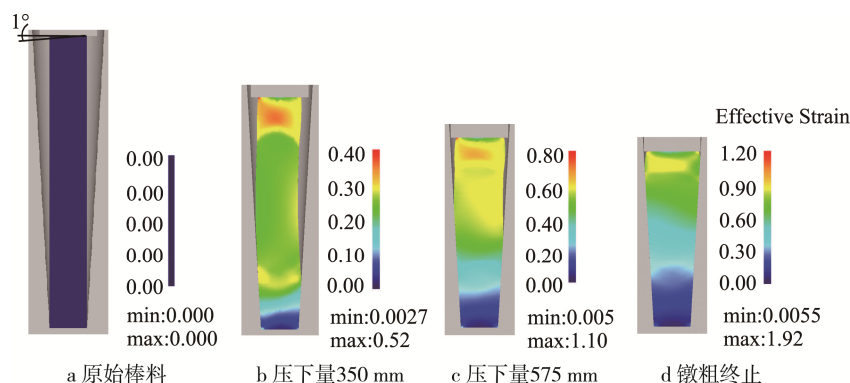
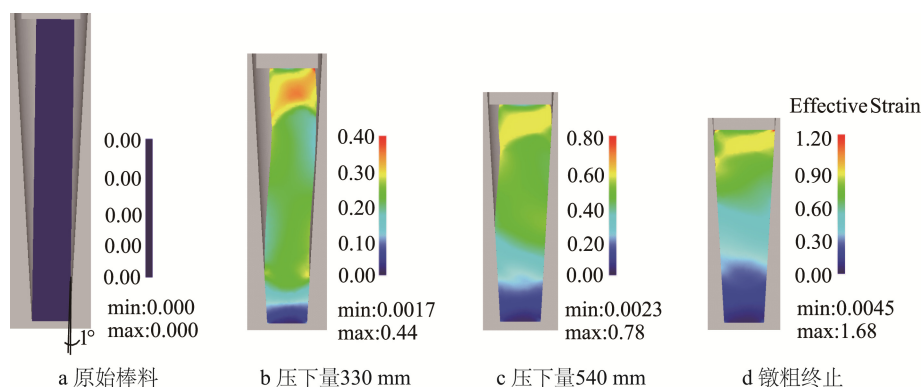
图3 镦粗速度对变形失稳的影响规律

Fig.3 Rule of influence of upsetting speed on metal deformation instability

2.3 棒料断面不平整对变形失稳的影响

在实际生产中,因下料工艺会造成坯料上下端面存在一定的不平度,为研究棒料断面不平这种特殊情况对镦粗变形失稳的影响,文中假设原始坯料上、下端分别存在 1° 倾斜角度,分析这种极端状态下材料的镦粗变形失稳情况。坯料上、下端存在 1° 倾斜角度时的镦粗变形结果分别见图4和图5。可以看出,

随镦粗过程进行,坯料首先发生失稳弯曲现象,但当弯曲坯料接触到凹模内壁后,在倾斜壁面的约束作用下,失稳现象得到抑制,坯料弯曲得以矫正,最后仍能获得无折叠缺陷的镦粗件。对比2种情况可知,坯料下端面倾斜 1° 时的弯曲失稳程度大于坯料上端面倾斜 1° 时的程度。但无论哪种情况,模拟结果表明,锥形模具结构能够很好地抑制这种极限状态下大高径比棒料镦粗过程的失稳现象。

图4 坯料上端面倾斜 1° 的变形过程Fig.4 The deformation process of the billet with 1° tilted on the top surface图5 坯料下端面倾斜 1° 的变形过程Fig.5 The deformation process of the billet with 1° tilted on the bottom surface

2.4 连续镦粗过程材料流动规律

基于上述模具结构和有关参数研究,建立了整个锥形镦粗过程的数值模拟模型,其中凸凹模模块锥角

α 为 8° , 锻造速度为 2 mm/s , 材料的本构模型是根据热模拟试验获得的应力应变曲线经拟合后得到的本构关系模型。整个镦粗过程为:对超大高径比钛合金棒料进行2次连续锥形镦粗,获得高径比低于常规镦

粗不失稳的最大高径比的镦粗件, 然后进行平砧镦粗, 直至镦粗件高径比达到 0.256。整个镦粗过程中材料的流线分布见图 6, 金属流动方向基本垂直于锻造方向, 沿锻造方向金属变形量相对均匀, 沿预制坯径向金属变形量越来越大, 从整体变形程度来看金属流线分布较合理。

每次镦粗工序结束后镦粗件的等效应变分布规律见图 7, 由于凹模倾斜内壁的约束作用, 使得镦粗过程中坯料由下而上变形量逐渐增大。平砧镦粗后预制坯的最大及最小等效应变值分别为 $\bar{\varepsilon}_{\max}=2.442$ 和 $\bar{\varepsilon}_{\min}=1.567$, 整体变形均匀性相对较好, 能够为终锻成形提供合适的预制坯。

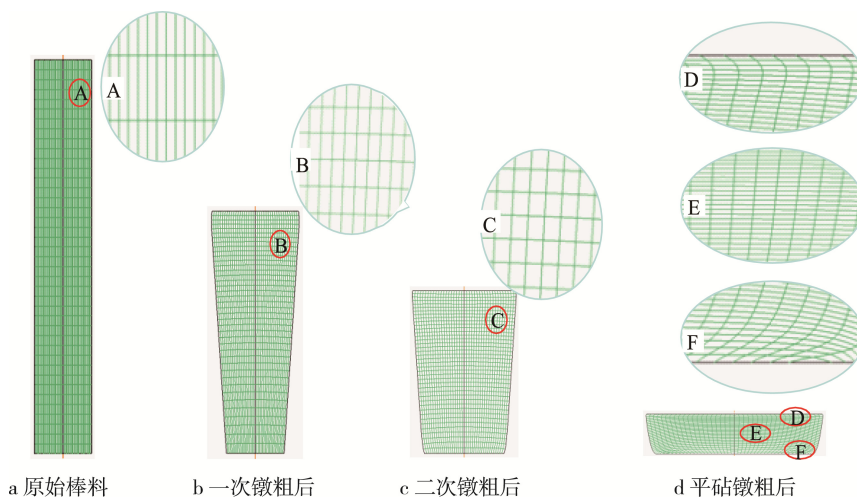


图 6 镦粗过程材料流线分布

Fig.6 Metal flow line distribution of the upsetting process

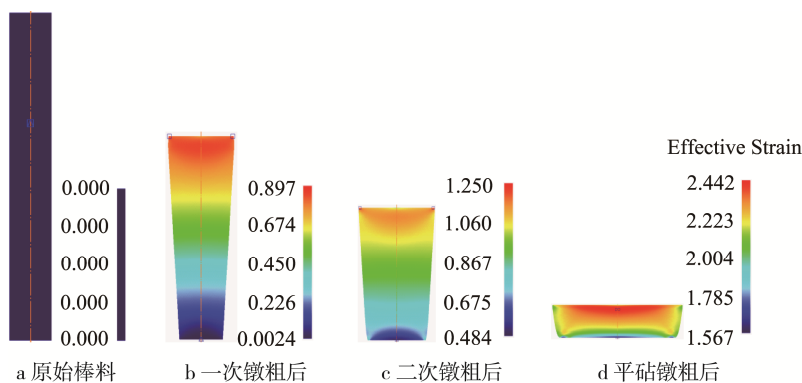


图 7 镦粗过程等效应变分布

Fig.7 Effective strain distribution of the upsetting

3 结论

1) 文中提出了一种用于超大高径比棒料连续镦粗成形的锥形模具结构。其凸、凹模均由沿轴向分布的若干层可拆卸的凸、凹模模块安装而成, 凸模和凹模的成形壁面具有一定的锥度。根据成形壁面的锥角、棒料的高度和每次的镦粗比, 确定镦粗次数、凸模和凹模的层数以及每层凸凹模模块的高度。第 1 次镦粗成形后, 卸掉最小平均外径的凸模模块和最小平均内径的凹模模块, 将剩下的凸凹模模块重新组装成新的模具结构进行第 2 次镦粗, 以此类推, 从而保证所得镦粗件的高径比小于不失稳镦粗的最大高径比。

2) 以高径比为 6.506 的 Ti6Al4V 钛合金棒料连续镦粗为例, 获得了不同锥角和镦粗压下速度对镦粗过

程材料流动规律的影响, 确定了合理的模具锥角和镦粗速度, 研究表明, 当镦粗速度不小于 2 mm/s 时, 可有效控制镦粗件的局部变形失稳, 锥形凹模的斜壁可有效抑制坯料的失稳弯曲变形和避免折叠现象的产生。

3) 文中提出的超大高径比棒料连续镦粗的锥形模具结构及工艺方法, 不仅能够实现超大高径比棒料的镦粗, 而且镦粗件的等效应变分布相对均匀, 金属流线分布合理, 能够满足后续锻造成形过程要求, 为超大高径比棒料的镦粗制坯提供了有效的方法。

参考文献:

- [1] 李梁, 孙健科, 孟祥军. 钛合金的应用现状及发展前景

- [J]. 钛工业进展, 2004, 21(5): 19—24.
LI Liang, SUN Jian-ke, MENG Xiang-jun. Application State and Prospects for Titanium Alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2004, 21(5): 19—24.
- [2] 朱知寿, 王新南, 童路, 等. 中国航空结构用新型钛合金研究[J]. 钛工业进展, 2007, 24(6): 28—32.
ZHU Zhi-shou, WANG Xin-nan, TONG Lu, et al. Studies of New-Type Titanium Alloys for Aviation Industry Application in China[J]. Titanium Industry Process, 2007, 24(6): 28—32.
- [3] JACKSON M, DRING K. A Review of Advances in Processing and Metallurgy of Titanium Alloys[J]. Materials Science & Technology, 2006, 22(8): 881—887.
- [4] 权国政, 潘佳. 大规格电镦技术研究方法及研究目标的新突破及进展[J]. 精密成形工程, 2014, 6(5): 18—24.
QUAN Guo-zheng, PAN Jia. New Breakthrough and Progress of Research Methods and Objectives about Large Size Electric Upsetting Technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(5): 18—24.
- [5] 张力, 卢立伟, 刘天模, 等. AZ31 镁合金双向挤压有限元模拟与实验分析[J]. 材料导报, 2009, 23(5): 75—78.
ZHANG Li, LU Li-wei, LIU Tian-mo, et al. Simulation and Experiment Analysis of Dual-directional Extrusion of AZ31 Mg Alloy[J]. Materials Review, 2009, 23(5): 75—78.
- [6] 龚龙清, 许川, 袁宝国. 钛合金多向锻造数值模拟[J]. 精密成形工程, 2016, 8(6): 54—59.
GONG Long-qing, XU Chuan, YUAN Bao-guo. Numerical Simulation Study of Multi-directional Forging of Titanium Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(6): 54—59.
- [7] 梁秀春. 一种镦粗大高径比锻件的方法[J]. 山西机械, 1999(S1): 131—132.
LIANG Xiu-chun. An Upsetting Method for Forgings with Large Height-to-diameter Ratio[J]. Shanxi Machinery, 1999(S1): 131—132.
- [8] 钟诚道, 林海涛, 王献文, 等. 自由锻高径比超极限镦粗法及镦粗砧: 中国, CN101491822A[P]. 2009-07-29.
ZHONG Cheng-dao, LIN Hai-tao, WANG Xian-wen, et al. An Upsetting Method and Anvil Applied to the Process of Free Forging of Ultra Conventional Height-to-diameter Ratio Parts: China, CN101491822A[P]. 2009-07-29.
- [9] 张治民, 于建民, 王强, 等. 一种大高径比镁合金棒料均匀镦粗成形方法: 中国, CN105772614A[P]. 2016-07-20.
ZHANG Zhi-min, YU Jian-min, WANG Qiang, et al. An Uniform Upsetting Method for Magnesium Alloy Bars with Large Height-to-diameter Ratio: China, CN105772614A[P]. 2016-07-20.
- [10] 梁强. 长轴类大高径比凸台冷镦成形工艺研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2013.
LIANG Qiang. Process Research on Long Shift of Large Ratio of Height to Diameter Boss Cold Upsetting[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2013.
- [11] 张智, 巨建辉, 戚运莲, 等. 钛合金锻造工艺及其锻件的应用[J]. 热加工工艺, 2010, 39(23): 34—37.
ZHANG Zhi, JU Jian-hui, QI Yun-lian, et al. Forging Technology of Titanium Alloy and Application of Forgings[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(23): 34—37.
- [12] 江双双, 汤泽军, 杜浩, 等. 钛合金电流辅助成形工艺研究进展[J]. 精密成形工程, 2017, 9(2): 7—13.
JIANG Shuang-shuang, TANG Ze-jun, DU Hao, et al. Research Progress of the Forming Process of Titanium Alloy Assisted by Current[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(2): 7—13.
- [13] 尹雪雁, 于建民, 张治民. Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 镁合金多向锻造组织和性能研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(6): 68—71.
YIN Xue-yan, YU Jian-min, ZHANG Zhi-min. Microstructure and Performance of Mg-13Gd-4Y-0.5Zr Magnesium Alloy under Multi-directional Forging[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(6): 68—71.
- [14] 李治华, 牛昌安, 佗劲红, 等. 利用圆环镦粗与有限元法测定 TC4 钛合金高温变形的摩擦系数[J]. 精密成形工程, 2013, 5(2): 11—15.
LI Zhi-hua, NIU Chang-an, TUO Jin-hong, et al. On the Measurement of Friction Coefficient of TC4 Titanium Alloy Using Ring Compression Experiments and FEM Simulation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(2): 11—15.
- [15] 胡成亮, 刘全坤, 刘永熙, 等. 齿轮锻造金属流动规律分析及工艺改进[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 186—190.
HU Cheng-liang, LIU Quan-kun, LIU Yong-xi, et al. Analysis of Metal Flow and Technology Improvement on Gear Forging[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 186—190.
- [16] 张艳芳, 周敏. 大高径比凸台冷镦成形极限研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(23): 160—165.
ZHANG Yan-fang, ZHOU Min. Research on Cold Upsetting Forming Limit of Large Height-diameter Ratio Boss[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(23): 160—165.
- [17] 庞晓琛. 钛合金大型航空结构件等温锻造工艺设计[J]. 铸造技术, 2016, 37(12): 2707—2710.
PANG Xiao-chen. Design of Isothermal Forging Process for Large Aircraft Structure Titanium Alloy[J]. Foundry Technology, 2016, 37(12): 2707—2710.