

# 超高强韧稀土镁合金直筒段锻造成形工艺

王 兵 刘 飞 胡婉婷 袁德勇 高 欢

(首都航天机械有限公司, 北京 100076)

**文 摘** 基于航天型号对超高强韧稀土镁合金构件产品的迫切需求,本文以航天器中的直筒段产品为研究对象,采用近等温锻造挤压成形工艺技术,开展VW84M高强韧稀土镁合金材料的锻造工艺性能研究,分析了直筒段的工艺结构特点,制定了直筒段的锻造成形工艺,通过三维建模、数值模拟技术和成形工艺试验,研究了直筒段的成形过程,分析了坯料的金属流动、温度变化特点,并通过成形工艺试验试制出锻件产品。结果表明,VW84M稀土镁合金在440℃的锻造温度时,在合适的挤压速度下具备良好的塑性成形性能,该材料具备实际工程应用能力;数值模拟得到的挤压载荷为64.72 MN,实际挤压载荷为60 MN,相差7.8%,数值模拟结果与工程试验有较高的结合度;工艺试验得到的直筒锻产品,切、轴向力学性能指标优于预期,抗拉强度不小于340 MPa、屈服强度不小于210 MPa、延伸率不小于6%的指标值。直筒段产品金属流线分布较为均匀,切向力学性能优于轴向。

**关键词** 稀土镁合金,直筒段,锻造成形,数值模拟,工艺试验

中图分类号: TG319

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.03.011

## Forging Process of Ultra-High Strength and Toughness Rare Earth Magnesium Alloy in Straight Tube Section

WANG Bing LIU Fei HU Wanting YUAN Deyong GAO Huan

(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

**Abstract** Based on the urgent demand of aerospace products for super-high strength and toughness rare earth magnesium alloy component, the isothermal forging forming technology was adopted in this paper, the forging process characteristics of VW84M rare earth magnesium alloy were studied. The forging process properties of VW84M high strength and toughness rare earth magnesium alloy were studied, the process structure characteristics of the straight cylinder were analyzed, the forging process of the straight cylinder was established, the forming process of straight cylinder section was studied by three-dimensional modeling, numerical simulation and forming process experiments, the forgings were produced by forming process test. The results showed that VW84M rare earth magnesium alloy has good plastic forming performance at 440 °C forging temperature and suitable extrusion speed, and the material has practical engineering application ability. The extrusion load obtained by numerical simulation is 64.72 MN, and the actual extrusion load is 60 MN, with a difference of 7.8%, the shear and axial mechanical properties were better than the requirement with tensile strength not less than 340 MPa, yield strength not less than 210 MPa and elongation not less than 6%. The metal streamline distribution of the straight cylinder is uniform, and the tangential mechanical property is better than the axial one.

**Key words** Rare earth magnesium alloy, Straight section, Forging forming, Numerical simulation, Process test

### 0 引言

镁及其合金具有比强度和比刚度高、耐振动性好、电磁屏蔽性佳及可回收性好、资源丰富等优点,被广泛应用于汽车、飞机和电子等行业<sup>[1]</sup>。然而低强

度限制了镁合金的广泛使用,尤其是在航空航天等高技术领域,因此,研究人员对镁合金的强度提出了更高的要求,通常要求其力学性能与2A14高强铝合金的力学性能相当<sup>[2]</sup>。稀土(RE)元素因其特殊的核

收稿日期: 2021-06-05

第一作者简介: 王兵, 1986年出生, 高级工程师, 研究方向为金属材料的塑性体积成形工艺研究。E-mail: 419092084@qq.com

外电子结构而具有独特的物理和化学性质,已成为镁合金中最有效和最具发展潜力的化学元素,稀土元素钆和钇在镁合金中具有最佳的固溶强化和时效强化效果,是超高强稀土镁合金设计的首选添加元素<sup>[3-5]</sup>。

稀土元素的加入虽然提升了镁合金材料的强度,但降低了其塑性变形能力,在锻造成形时极易开裂。为此,研究稀土镁合金的锻造成形工艺,对推广镁合金在航天领域的应用具有重要意义。虽然目前国内已经开发出镁稀土合金材料,但局限于小规格的产品,暂未见大规格零件产品的相关报告,国外因技术封锁,目前查不到相关资料。本文以稀土镁合金为成形用原材料,选取 $\Phi 750$  mm的长直筒段为研究对象,采用有限元模拟软件 Deform-3D 对成形过程进行数值模拟,并进行工艺试验,研究大规格稀土镁合金构件的锻造成形工艺,为高强韧性稀土镁合金在航天产品中的运用积累技术基础。

### 1 直筒锻成形工艺分析

直筒段零件轮廓尺寸如图 1 所示,材质为稀土镁合金,材料牌号为 VW84M,锻件最终热处理状态为固溶时效态,零件壁厚 50 mm,净重 171 kg,属于大尺寸规格的稀土镁合金产品。

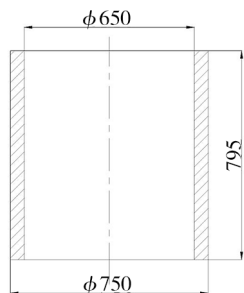


图 1 直筒段零件轮廓图

Fig. 1 Outline drawing of straight tube part

对于此类型零件,选用大尺寸规格的稀土镁合金铸锭作为原材料,采用塑性成形方式进行制造时,可选用挤压或辗环的方式进行。在选用辗环方式时,由于辗环工艺的限制,如坯料温度和工装温度无法准确控制,易造成锻坯开裂,对产品的尺寸及性能无法有效保证。锻造挤压工艺可保证成形时的温度条件,相对来说,更适用于对温度敏感的稀土镁合金产品的成形制造。基于 60 MN 模锻液压机装备,选用立式挤压成形工艺方式制造此直筒段产品。

根据直筒段零件图,确定产品的锻件如图 2 所示。在底部设置厚为 20 mm 的连皮,内外径壁厚单边余量 2~3 mm,锻件重约 205 kg。

在挤压成形时,为避免速度差的影响,挤压用毛坯要求外形尺寸均匀,据体积相等原则,并结合锻件余量,毛坯尺寸定为 $\Phi 640$  mm $\times$ 335 mm, $R_a$  不低于 12.5  $\mu$ m。

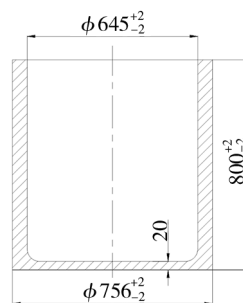


图 2 锻件产品轮廓图

Fig. 2 Outline drawing of forgings

## 2 数值模拟研究

### 2.1 模型建立

镁合金直筒段成形时,壁厚较薄,稀土镁合金对温度敏感,若温度与挤压速度控制不当,极易产生裂纹或过热现象。本研究采用 UG 软件建立成形模型,利用 Deform-3D 软件进行数值模拟,对成形过程进行仿真分析。零件为 VW84M 稀土镁合金,在带环境箱的 Instron5982 试验机上进行等温压缩实验,获得材料的应力应变曲线关系见图 3。模拟时,对于回转体对称结构的直筒段,选取八分之一模型进行计算。坯料与模具设为近等温状态,坯料加热温度 440  $^{\circ}$ C,为延长使用寿命,将模具定温 400  $^{\circ}$ C,模具材料选用 5CrMnMo,在锻造过程中,模具与坯料之间发生热交换,换热系数取 5 W/( $m^2 \cdot K$ )<sup>[6]</sup>。坯料网格划分网格 3 $\times$ 10<sup>4</sup> 个(图 4),最小网格尺寸 6.1 mm,挤压头压下速度定为 10 mm/s,数值模拟模型见图 5。

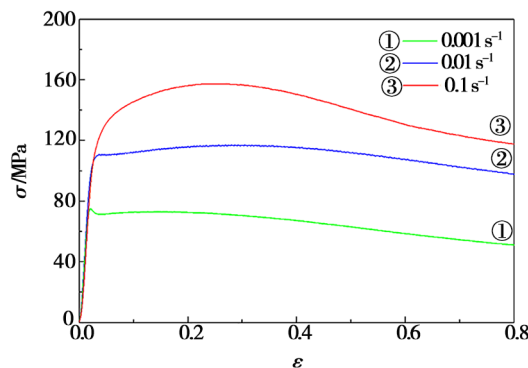


图 3 440 $^{\circ}$ C 时应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve at 440  $^{\circ}$ C

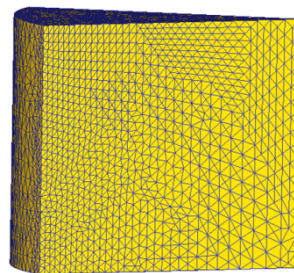


图 4 网格划分图

Fig. 4 Grid plot

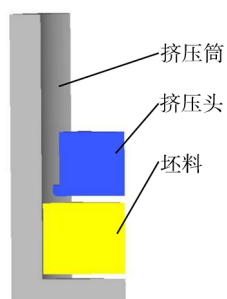


图5 数值模拟模型图

Fig. 5 Numerical simulation model diagram

## 2.2 成形阶段过程定义

直筒段的挤压成形过程,是在挤压头与挤压筒的作用下完成,挤压筒固定在下砧座上,挤压头固定在动梁上,随动梁上下运动。根据成形时金属流动情况,将直筒段的成形过程分为3个阶段(图6):(1)接触阶段,此时挤压头刚与坯料接触;(2)挤压阶段,此时金属反向流动,属于挤压成形中的主要阶段;(3)挤压末期阶段,此阶段底部连皮形成。可看出,整体成形过程平稳,金属流动无异常现象。

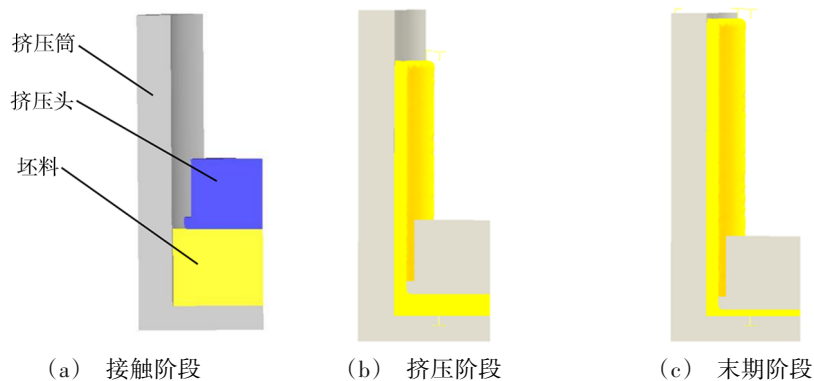


图6 成形过程

Fig. 6 Forming process

## 2.3 数值模拟结果分析

### 2.3.1 速度场分析

图7为成形过程不同阶段速度场云图,在挤压头与坯料刚接触阶段,坯料的上端部流动速度最大,最大值为13.4 mm/s,坯料其他处金属在挤压模具的作用下呈现反向流动的趋势。在挤压阶段,已经挤压成形的直壁段相对静止,主要大变形流动处于挤压头大端部与坯料的接触处,金属流动速度较大,最大

值为14.8 mm/s,底部处金属的流动方向相比于接触阶段的“由里向外”变化为“近垂直向下”。在末期阶段,已成形直壁段保持相对静止,底部金属呈现“垂直向下”流动趋势,在末期阶段,底部金属为锻件的连皮部分,随着挤压接近尾声,此处金属厚度较小,变形抗力急剧增加,在额定的挤压力作用下,金属流动十分困难,速度场接近静止。

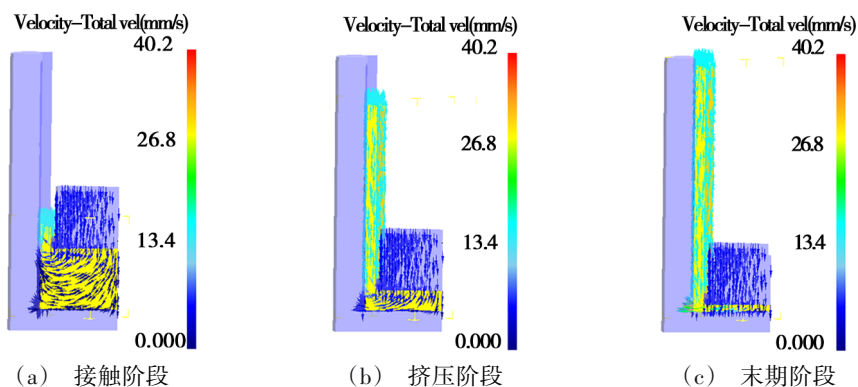


图7 成形阶段速度场云图

Fig. 7 Velocity field nephogram of forming stage

### 2.3.2 应力场分析

图8为成形过程中不同阶段应力场云图,在3个阶段坯料的应力变化趋势相近,主要表现为已经成形的直壁段的应力为零,待流动成形处金属的应力

趋于一致,这一现象与挤压成形工艺的局部变形特性相匹配,由此可知,通过挤压工艺能有效避免低塑性VW84M稀土镁合金在体积成形工艺中开裂现象的产生。

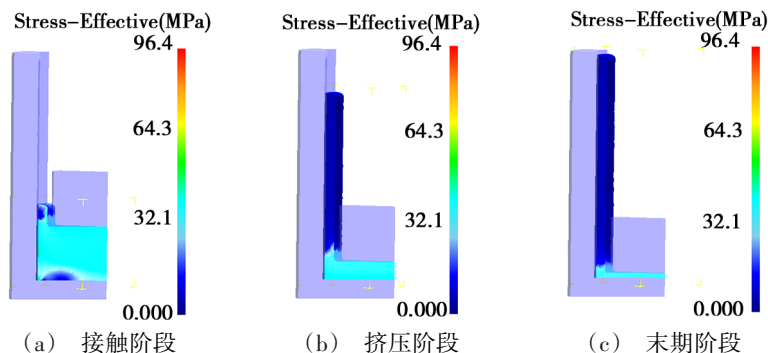


图8 成形阶段应力场云图

Fig. 8 Stress field nephogram of forming stage

### 2.3.3 温度场分析

图9为成形过程中坯料的温度变化情况。在接触阶段,坯料变形量较小,坯料热传递主要是在与模具接触之间,在研究中,挤压速度恒定为10 mm/s,在挤压阶段坯料与挤压段过渡处金属存在温升,最高

约459 °C,此处主要是由于变形热造成坯料温升。在已成形成端处,坯料温度降低至430 °C左右,主要是坯料与外界热传导降低,整体而言,坯料与始锻温度相差不大,在整个变形过程中,坯料接近于等温状态,在模拟时所设定的工况条件可借鉴用于工艺试验研究。

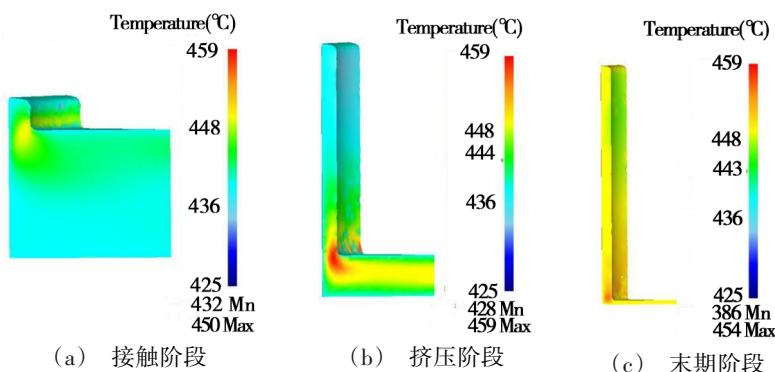


图9 成形阶段温度场云图

Fig. 9 Temperature field nephogram of forming stage

### 2.3.4 挤压载荷分析

在成形过程中,挤压吨位变化明显(图10),与成形所分的3个阶段吻合度较高。在挤压接触阶段,挤压载荷从0增加至6.32 MN,主要是因为挤压头与坯料接触,需要一定的作用力使坯料发生塑性变形。在挤压阶段,挤压载荷变形不大,呈水平线性波动,主要是由于变形过程中产生一定的变形热,使金属的变形抗力减小。当底部金属厚度达到50 mm时,

此时成形吨位58.4 MN,挤压载荷开始快速增加,直到连皮厚度达到所设定厚度20 mm时,此时载荷值达到80.90 MN,可计算出完整模型载荷值为64.72 MN。在挤压后期,由于连皮较薄,使金属流动时所需载荷值极速增加。

## 3 工艺试验结果

挤压成形试验在60 MN模锻液压机上进行,坯料加热温度440 °C,模具加热温度400 °C,挤压速度设定为定速10 mm/s。在整个挤压过程中,从坯料入模到出模,整个过程耗时105 s,过程平稳,实际所用压力机吨位达到满载60 MN,与前面模拟得到的成形力64.72 MN相差7.8%,在合理范围之内。所得到的产品实物如图11所示,其内外表面质量完好、无肉眼可见裂纹及折叠等缺陷。在产品的上端处,存在不平整现象,最高点与最低点差值约8 mm。这是由于:(1)VW84M的塑性相对较差;(2)因挤压头与挤压筒之间存在小量的偏心,同时挤压时各部处摩擦条件不完全相同,导致各部金属流动不一致造成,后续可通过机加工方式将端面进行平整。

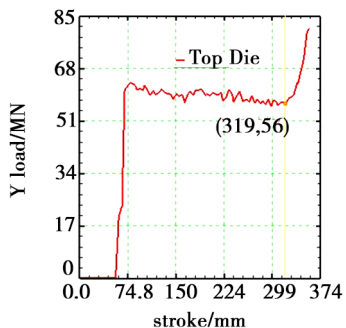


图10 挤压载荷曲线

Fig. 10 Extrusion load curve

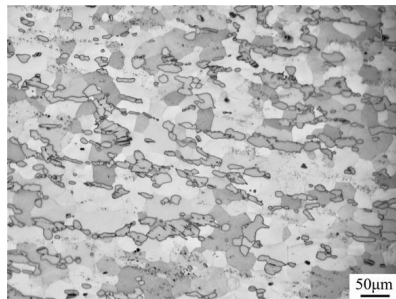




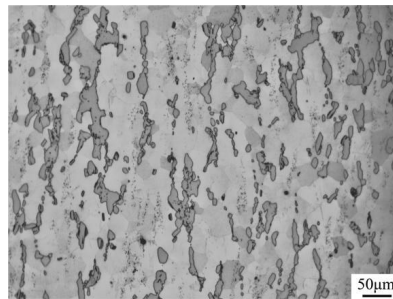
图 11 直筒段产品实物

Fig. 11 Straight tube product

对直筒段整体进行热处理后取样检测,力学性能相关值见表 1,直筒段切向方向抗拉强度达到 380 MPa 以上,屈服强度 270 MPa 以上,延伸率 7.0 % 以上,轴向方向抗拉强度达 360 MPa 以上,屈服强度值 260 MPa 以上,延伸率 6.0 % 以上,性能满足设计指标要求。其中切向方向力学性能略高于轴向方向,切向方向的抗拉强度标准差优于轴向,屈服强度低



(a) 轴-切方向



(b) 轴-径方向

图 12 热处理后金相组织照片

Fig. 12 Photos of metallographic structure after heat treatment

#### 4 结论

(1)通过分析直筒段产品的工艺结构特点,采用锻造工艺中的挤压成形方式制定了该产品成形工艺,并结合数值模拟技术,分析了 VW84M 稀土镁合金直筒段产品的成形过程中金属流动、温度变化的特点,VW84M 稀土镁合金在 440 °C 的锻造温度时,在合适的挤压速度下具备良好的塑性成形性能,该材料具备实际工程应用能力,具有较好的运用前景。

(2)数值模拟得到的挤压载荷为 64.72 MN,实际挤压载荷为 60 MN,相差 7.8%,数值模拟结果与工程试验有较高的结合度,可为后期其他类型的产品开发提供技术保障。

(3)工艺试验得到的直筒锻产品,切、轴向力学性能指标优于预期,抗拉强度不小于 340 MPa、屈服强度不小于 210 MPa、延伸率不小于 6 % 的指标值。直筒段产品金属流线分布较为均匀,切向力学性能优于轴向。

#### 参考文献

[1] 林淑霞. AZ31 镁合金温热变形行为及机理研究. [D]. 济南:山东大学,2015.  
LIN Shuxia. Research on warm-hot deformation behavior

于轴向,相差不大,两者延伸率标准差相同。金相组织如图 12 所示,可以看出,显微组织主要由  $\alpha$ -Mg 基体和块状相组成,在挤压变形过程中,块状相破碎充分且沿变形方向呈流线分布。

表 1 力学性能值

Tab. 1 Mechanical property value

试样 编号	切向			轴向		
	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%
设计 指标	≥340	≥240	≥6	≥340	≥210	≥6
1-1	398	287	7.5	375	265	6.5
1-2	402	270	7.5	360	258	6.5
1-3	388	272	7.0	368	260	6.0
1-4	390	280	7.5	378	268	6.5
均值	394.5	277.3	7.4	370.3	262.8	6.4
标准差	6.6	7.8	0.25	8.0	4.6	0.25

and mechanism of AZ31 magnesium alloy sheet [D]. Jinan: Shandong University, 2015.

[2] 郑明毅,徐超,乔晓光. 超高强韧 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 变形镁合金研究进展[J]. 中国材料进展,2020,39(1):19-20.

ZHENG Mingyi, XU Chao, QIAO Xiaoguang. Research progress on ultra-high strength and toughness Mg-Gd-Y-Zn-Zr wrought magnesium alloys [J]. Materials China, 2020, 39(1): 19-20.

[3] ROKHLTN L L. Magnesium alloys containing rare earth metal[M]. Lond: Taylor & Francis, 2003.

[4] ZHANG J H, LIU S J, WU R Z, et al. Journal of magnesium and Al-loys [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2018, 6(3):277-291.

[5] ZENG Z R, STANFORD N, DAVIES C H J, et al. International materials review[J]. International Materials Review. 2019, 64:1-36.

[6] 何海林. 镁合金支撑梁等温半闭式模锻成形工艺传真与实验研究[D]. 中南大学,2014.

HE Hailin. Simulation and experimental research on isothermal semi-closed die forging of magnesium support beam [D]. Central South University, 2014.