

高强韧镁合金大规格型材挤压成形的数值模拟及实验研究

王敬丰^{1,2}, 彭星^{1,2}, 王奎^{1,2}, 胡豪^{1,2}, 高诗情^{1,2}, 王金星^{1,2}, 潘复生²

(1. 重庆大学, 重庆 400044)

(2. 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

摘要: 本研究利用 HyperXtrude 软件对大规格高强韧 Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 合金轨道交通用支撑梁型材进行了型材结构优化前后的数值模拟, 在保证大规格高强韧镁合金支撑梁型材能成功挤压成形的前提下, 确定出了优选工艺, 即挤压温度 470 °C, 挤压速度 0.3 mm/s, 该工艺下所需最大挤压力为 34 606 kN。成功制备出了表面质量良好、成分均匀、组织均质的轨道交通用大规格高强韧镁合金支撑梁型材。型材各区域的抗拉强度在 370 MPa 以上, 延伸率在 10%以上, 最高强度达到 391 MPa; 时效态的强度提高明显, 达到 460 MPa 以上, 延伸率略微下降, 超过 8%, 最高强度达到 475 MPa。

关键词: 高强韧镁合金; 挤压成形; 数值模拟; 力学性能

中图分类号: TG379

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)05-1665-09

镁合金以密度小、比强度及比刚度高、阻尼性能优良、利于机械加工等优点, 近年来广泛应用于航空航天、国防军工、轨道交通以及 3C 产品等众多领域^[1-5]。对于 Mg-RE-Zn-TM 系高强合金, 稀土元素的加入会提高镁合金的强度^[6-8]; Zn 的加入, 会促使 LPSO 相(长周期堆垛有序相)的引入, 进一步提高镁合金的强度以及改善合金的塑性^[8-11]; Mn 的加入可以阻止晶粒长大, 进一步提高合金的力学性能^[12]。此外, Mg-RE 系合金含有大量的沉淀硬化相, 在高温固溶度高, 低温固溶度低使得其时效效果十分显著^[13,14]。因此, Mg-RE-Zn-TM 系高强合金具有很大的开发潜力, 目前已成为高强镁合金研究的热点^[15]。高强韧镁合金型材既满足产品尺寸要求, 又符合环保性和轻量化的趋势, 而且具有良好的抗拉强度和延伸率, 满足更高的性能要求, 进而能够扩大镁合金的应用^[16-18]。随着镁合金产业的扩大应用, 高强韧镁合金型材的需求日益增加, 尺寸及性能要求也越来越高, 对大规格高强韧镁合金型材挤压成形技术的研究开发, 已经逐渐成为国内外研究的热点之一。然而, 镁合金具有密排六方的晶体结构, 基面滑移系容易开动, 柱面及锥面滑移系难以开动, 导致镁合金协调塑性变形能力差; 高强镁合金合金化程度高, 变形抗力大, 加工区间窄, 塑性成形能力较差^[19]; 大规格型材流动应力大, 对挤

压设备的要求更高。因此, 大规格高强韧镁合金型材在常规技术下制备时, 试模成本高, 研发周期长, 挤压成形的难度很大。随着计算机仿真模拟技术的迅速发展, 数值模拟的方法在镁合金塑性成形中起到了越来越重要的作用^[20-25]。数值模拟与实验大数据的结合, 目前是镁合金型材研发技术的重要手段。基于 (ALE) Arbitrary Lagrange-Euler 的 HyperXtrude 软件是针对铝型材的挤压成形数值模拟而开发的, 目前常用于镁合金型材的挤压成形仿真, 而且在稳态分析时, 仿真效率高, 计算精度高, 方便用于挤压工艺优化的数值模拟研究。

许多学者深入研究了镁合金挤压成形的流变行为和工艺参数^[26-30]。张治民等对 AZ31 镁合金管材进行了挤压成形的数值模拟, 研究了在挤压过程中, 温度、速度、润滑等因素对其流动的影响, 为 AZ31 镁合金管材加工提供了科学依据^[31]。高飞等利用 DEFORM-3D 软件对 AZ31 镁合金连续挤压过程进行了数值模拟, 研究了连续挤压过程中不同阶段的温度、等效应力及等效应变分布, 模拟结果对最佳工艺制定和模具设计起到了指导作用^[32]。李永兵等利用 HyperXtrude 软件对 ZK60 镁合金空心型材进行了挤压过程的数值模拟, 通过模拟结果得到了合适的挤压工艺, 并在此工艺下做了验证试验, 得到形状性能合格

收稿日期: 2019-05-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0301102); 国家自然科学基金面上项目(51874062); 中央高校基本科研业务费专项项目(2018CDGFCL0005, 2019CDXYCL0031)

作者简介: 王敬丰, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 重庆大学国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044, 电话: 023-65112153, E-mail: jingfengwang@163.com

的产品，规格达到 225 mm，代表国内先进水平^[33]。管仁国利用数值模拟手段，分析了 AZ31 镁合金在连续流变挤压成形时的温度场与流场的分布规律^[34]。目前对于高强韧镁合金型材的挤压技术研究报道的很少，而随着镁产业的扩大应用和轨道交通行业的发展，对于大规格高强韧镁合金型材，迫切需要满足更高的尺寸及性能要求，必须进一步深入研发其挤压成形技术。

大规格高强韧镁合金支撑梁型材的结构来源于铝合金型材，而挤压工艺参考的是实验室小规格的挤压产品，需要利用数值模拟手段，根据大规格镁合金型材挤压过程的流变行为进行结构优化及工艺优化，然后才能进行挤压试验。本研究利用 HyperXtrude 软件对大规格高强韧 Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 合金轨道交通用支撑梁型材进行型材结构优化前后的数值模拟，确定成形质量良好的优选工艺；最后根据数值模拟结果，在实际试验中进行支撑梁型材的挤压成形，并观察分析型材的微观组织，测试分析其力学性能，验证数值模拟结果的正确性。

1 型材结构优化前的数值模拟

1.1 模具模型建立

图 1 为轨道交通用支撑梁型材的截面图和相关尺寸，型材截面积约为 4200 mm²。采用 SolidWorks2012 软件，按照型材结构及相关尺寸建立挤压模具的几何模型，包括型模和模垫，利用软件的配合功能装配保存为 STEP 格式。

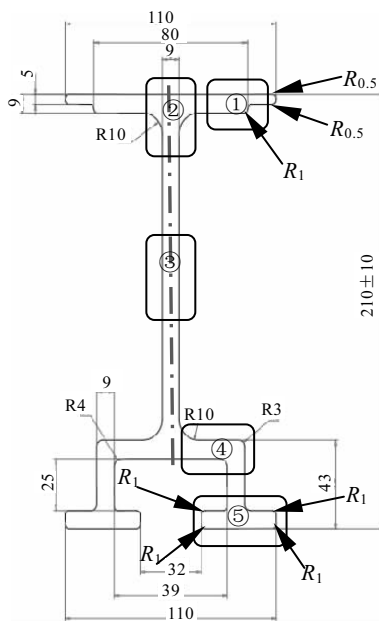


图 1 支撑梁型材断面结构与尺寸

Fig.1 Cross section structure and dimensions of the support beam profile

1.2 物理模型建立

在 HyperXtrude 软件中导入支撑梁型材模具的几何模型，置于原点，调整挤压方向与 Z 轴方向一致；提取流体，并删除多余固体；设置工作带长度为 20 mm，挤出型材长度为 60 mm；将流体划分为 30 mm 的导流板及 5 mm 的导流腔；根据 Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 合金的本构方程，定义该合金的材质，并选择其作为坯料的材料；坯料与挤压筒内壁、坯料与模具接触面设置成剪切摩擦类型，坯料与模具工作带设置成库伦摩擦类型。

支撑梁型材挤压试验拟采用 3600 T 的挤压机，其挤压筒直径为 $\Phi 309$ mm，因此坯料规格设定为 $\Phi 300$ mm \times 500 mm，挤压模型如图 2 所示。根据本课题组前期的实验结果，Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 合金棒材的挤压温度为 420~490 °C，挤压比为 11；支撑梁型材的挤压比约为 17.8，在保证能成功挤出的前提下，挤压温度选取 470 °C，挤压速度分别设定为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm/s，模拟实验编号及对应挤压工艺如表 1。

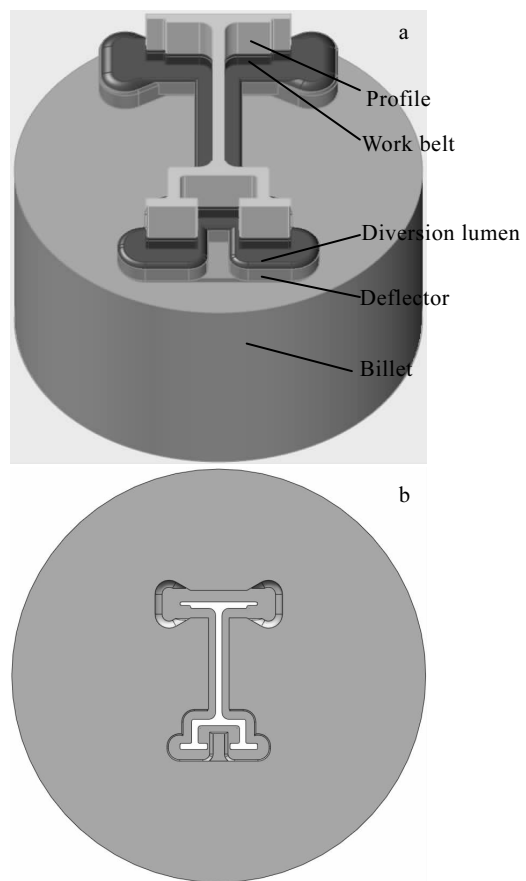


图 2 支撑梁型材挤压物理模型及模具

Fig.2 Extrusion physical model (a) of the support beam profile and die (b)

表 1 模拟实验编号及挤压工艺

Table 1 Simulation experiment numbers and extrusion processes

Number	Extrusion temperature/ °C	Extrusion speed/ mm·s ⁻¹
I	470	0.1
II	470	0.2
III	470	0.3
IV	470	0.4

1.3 模拟结果分析

图 3 所示为支撑梁型材在不同工艺下的温度分布情况。首先，在 4 种不同工艺下支撑梁型材都呈现出中下部温度最高，底部两脚处温度次之，顶部温度相对最低分布情况。由于坯料心部散热慢，变形热大，使得型材中下部温度最高；底部对应的坯料靠近表面，散热较快，此区域壁厚和中下部壁厚相同，变形热相当，因此温度比中下部更低；顶部对应的坯料同样靠近表面，散热较快，而且此区域的壁厚小于底部和中下部，变形热较小，因此温度比底部更低。其次，在其他条件相同时，随着挤压速度的增大，支撑梁型材的最高温度呈升高趋势，图 3a, 3b, 3c, 3d 最高温度依次为 485, 499, 511, 522 °C。随着挤压速度的增大，在其他条件不变的情况下，坯料在挤压成形过程中的应变速率增大，单位时间内的应变量增大，同时，产生的变形热也相应增加，因而支撑梁型材温度整体升高，其最高温度也随之升高。此外，挤压速度每增加 0.1 mm/s，支撑梁型材的最高温度升高 11~14 °C。

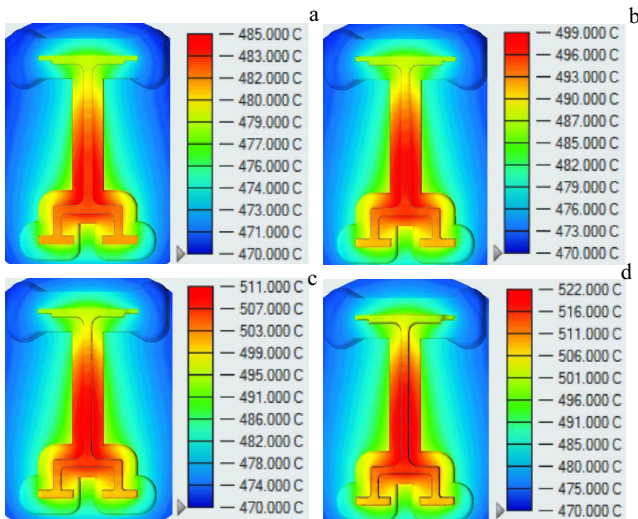


图 3 支撑梁型材不同工艺下的温度分布

Fig.3 Temperature distribution of the support beam profile in different processes: (a) process I, (b) process II, (c) process III, and (d) process IV

图 4 是支撑梁型材在不同工艺下的速度分布情况。可以看出，支撑梁型材在 4 种不同工艺都呈现出基本相同的温度分布情况，中下部速度最快，两脚处较慢，底部相对最慢；这与温度分布情况类似。心部坯料散热慢，温度高，中下部壁厚大，金属流充填快，因此中下部速度最快；底部壁厚虽然和中下部相同，金属流充填速度相当，但是其对应的坯料靠近表面，散热快，温度相对较低，因而底部速度相对较慢；而顶部壁厚较小，金属流充填速度较慢，而且其对应的坯料靠近表面，散热快，温度相对较低，故其速度最慢。此外，如图 3a~3d 所示，支撑梁型材在每种工艺下的出模最快速度分别为 2.668, 5.069, 7.503, 9.937 mm/s，都在合理范围内，未有速度过大的区域。

1.4 挤压力的预判

HyperXtrude 的模拟结果可以得出型材在挤压成形过程中的最大压力，根据最大压力值，可以计算出型材成功挤出所需要的最大挤压力值。通过对最大挤压力的预判，就能够对挤压机的选取、挤压工艺的设定以及型材成形质量的预判提供可靠科学的参考依据。挤压力计算公式如下：

$$F = Ps \tag{1}$$

$$s = \pi r^2 \tag{2}$$

其中， F 为挤压力(N)， P 为坯料底部的压力(MPa)， s 为挤压筒的内筒面积(mm²)， r 为挤压筒内筒半径(mm)。

挤压筒内筒的半径为 154.5 mm， π 取 3.14，根据公式(1)(2)得出挤压力的公式：

$$F = 74953P \tag{3}$$

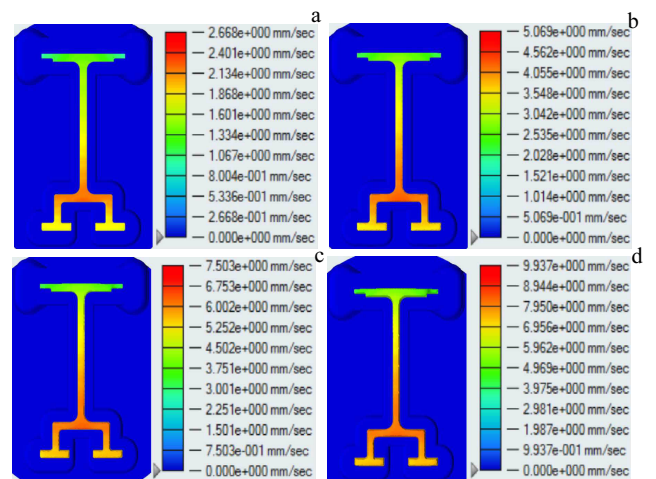


图 4 支撑梁型材不同工艺下的速度分布

Fig.4 Velocity distribution of the support beam profile in different processes: (a) process I, (b) process II, (c) process III, and (d) process IV

以上模拟结果得出的支撑梁型材最大压力值如图 5a, 计算得到的最大挤压力如图 5b。在其他条件相同时, 随着挤压速度的增加, 支撑梁型材的最大压力明显增大。挤压速度的增加, 使得支撑梁型材在挤压成形时的应变速率增大, 单位时间内的变形量增大, 导致合金的变形抗力增大, 因而坯料底部的最大压力也随之增大。支撑梁型材拟选取的挤压机的吨位是 3600 T, 能提供的最大挤压力约为 36 000 kN, 如图 5b 红色虚线所示。37 312, 39 553 kN 超出了 3600 T 挤压机的公称挤压力, 因此 470 °C 时挤压速度为 0.3, 0.4 mm/s 的挤压工艺在 3600 T 挤压机上不能实现。在保证能成功挤出型材的前提下, 挤压速度尽量选取较大的, 以保证一定的生产效率, 故此挤压速度设定为 0.2 mm/s。

综上, 支撑梁型材的优选工艺为 470 °C, 0.2 mm/s, 此时型材的最高温度达到 499 °C, 最快出模速度为 5.069 mm/s, 坯料底部最大压力达到 445.6 MPa, 所需的最大挤压力高达 33 399 kN。此时既能成功挤出质量良好的型材, 又能保证一定的生产效率。

2 型材结构优化后的数值模拟

2.1 型材结构优化

为了减小支撑梁型材在挤压成形过程中的变形抗力, 进一步提高挤压速度, 提高生产效率, 对支撑梁型材的结构进行优化。如图 1 箭头所示, 原来顶部 4

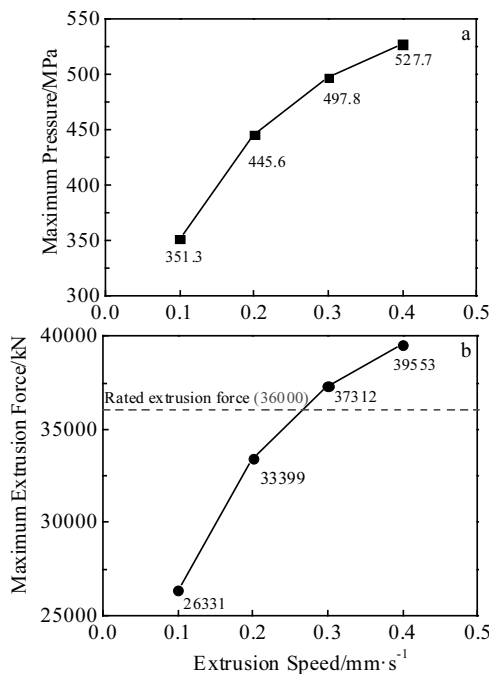


图 5 支撑梁型材不同工艺下的最大压力和最大挤压力

Fig.5 Maximum pressure and extrusion force of the support beam profile in different processes: (a) maximum pressure and (b) maximum extrusion force

个 $R_{0.5}$ 和 2 个 R_1 的圆角, 以及底部 8 个 R_1 的圆角, 都改成 R_2 的圆角, 以减小合金在挤压时的变形抗力。此外, 支撑梁型材型模的厚度从 170 mm 减少到 140 mm, 模垫的厚度从 190 mm 减少到 130 mm, 从而减小合金的流动阻力。

2.2 模拟结果分析

在 HyperXtrude 软件中按照 1.2 中的步骤建立支撑梁型材结构优化后的数值模拟物理模型, 挤压工艺如表 1 所示, 得到支撑梁型材结构优化后的模拟结果。如表 2 所示, 支撑梁型材在挤压成形过程中的最高温度及最快出模速度与优化前的模拟结果的数值基本一致, 其增加趋势也基本一致。最高温度与出模时的最快速度主要与坯料温度、型材壁厚、挤压速度等有关, 型材结构优化后, 这些主要因素基本未发生改变, 故此其数值基本和未优化前的一致。

支撑梁型材结构优化后, 坯料的压力分布如图 6 所示。在其他条件相同时, 随着挤压速度的增加, 支撑梁型材的最大压力呈增大趋势, 与型材结构未优化的模拟结果一致, 4 种工艺下的最大压力依次为 352.9, 438.1, 461.7, 495.0 MPa。此外, 相同挤压工艺下, 型材结构优化后的最大压力都小于未优化的最大压力, 说明支撑梁型材的结构优化, 减小了合金在挤压成形过程中的变形抗力和流动阻力。分析原因, 各处圆角增大, 使得该区域的挤压比减小, 合金更容易充填成形; 同时, 模具长度的缩短, 降低了挤压时的摩擦阻力。因此, 型材结构优化后坯料底部的最大压力都呈下降趋势。

根据公式(3)和上文中支撑梁型材结构优化后的最大压力值计算得到支撑梁型材结构优化后的最大挤压力, 如图 7 所示。当挤压速度为 0.1, 0.2, 0.3 mm/s 时, 支撑梁型材成功挤压成形所需的最大挤压力分别为 26 451, 32 837, 34 606 kN, 小于 3600 T 挤压机的公称挤压力 36 000 kN, 表明这 3 种工艺下, 型材能够顺利挤压成形; 而当挤压速度达到 0.4 mm/s 时, 最大挤压力超出了挤压机的公称挤压力范围, 型材难以挤压成

表 2 支撑梁型材结构优化后的模拟结果

Table 2 Simulation results of the support beam profile after structural optimization

Number	Maximum temperature/°C	Maximum speed/mm·s ⁻¹
I	484	2.663
II	497	5.093
III	510	7.482
IV	520	9.927

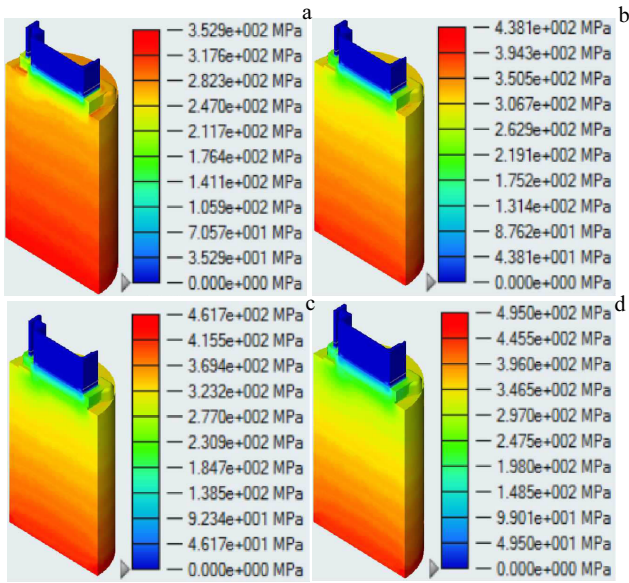


图 6 支撑梁型材结构优化后不同工艺下的压力分布

Fig.6 Pressure distribution of the support beam profile after structural optimization in different processes: (a) process I, (b) process II, (c) process III, and (d) process IV

形。与未结构优化前相比，每种工艺下的最大挤压力都呈下降趋势，说明型材的结构优化减小合金在挤压成形过程中的变形抗力和流动阻力，在保证能成功挤出的前提下，挤压速度有提高的空间。

综上，在支撑梁型材结构优化后，挤压成形的优选工艺为 470 °C，0.3 mm/s，此时型材的最高温度达到 511 °C，型材出模最快速度为 7.482 mm/s，坯料底部所需最大压力达到 461.7 MPa，所需最大挤压力高达 34 606 kN。此时，既能保证支撑梁型材能够成功挤压成形，又提高了型材的挤压速度。

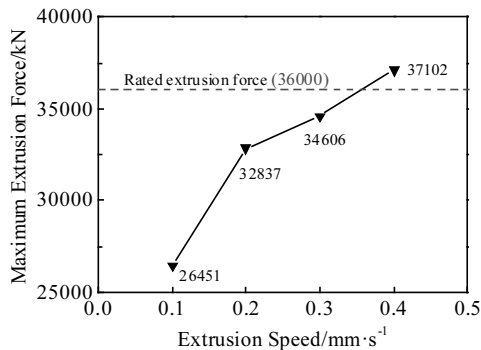


图 7 支撑梁型材结构优化后不同工艺下的最大挤压力

Fig.7 Maximum extrusion force of the support beam profile after structural optimization in different processes

3 大规格高强韧型材的挤压试验

3.1 挤压试验过程

将 Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 合金 $\Phi 300$ mm \times 500 mm 的铸锭经 500~525 °C 均匀化退火后置于 470 °C 电阻炉中预热 8 h， $\Phi 300$ mm \times 500 mm 的纯镁铸锭在感应炉中预热到 470 °C，模具在 470 °C 电阻炉中预热 4 h，采用 3600 T 挤压机，温度设为 460 °C，待挤压力平衡后，挤压速度稳定在 0.3 mm/s 左右。挤压时，先挤纯镁铸锭，以达到洗筒、洗模和保温的目的，再进行高强镁合金的挤压成形。

图 8 所示是支撑梁型材挤压试验的结果。图 8a 是支撑梁型材挤压现场的照片，型材挤出时比较平直，未发现开裂的现象。图 8b 是型材整体的照片，除去头部和尾部长度约为 8000 mm，表面光亮，没有流动异常导致的弯曲、扭转现象。图 8c 所示是支撑梁型材的切割截面照片，通过卡尺等工具进行尺寸检验，各个区域的壁厚都在允许的误差范围内。图 8d 中，是支撑梁型材顶部表面的照片，没有出现过烧等现象，其中有发黄的区域，是由于 Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 合金中稀土元素很高，高温挤压后表面会出现类似的现象。总体来说，初步说明支撑梁型材的挤压试验比较成功，同时初步验证模拟结果的正确性。

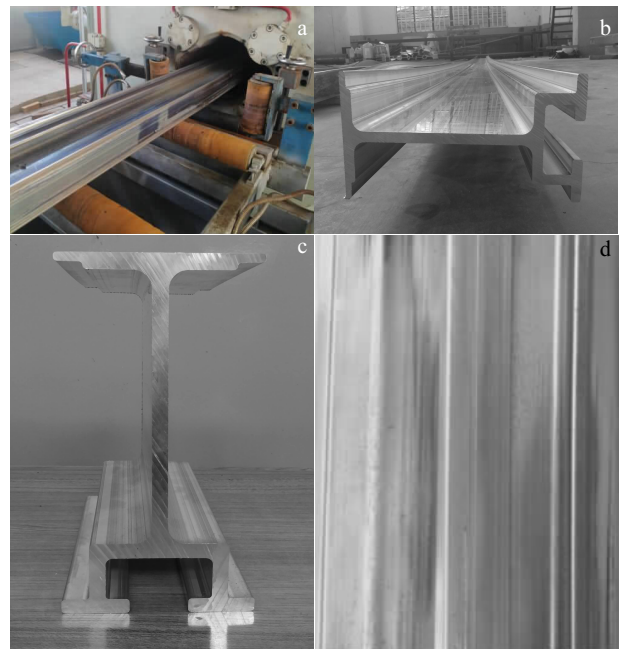


图 8 支撑梁型材的挤压成形结果

Fig.8 Extrusion results of the support beam profile: (a) extruded profile at the scene, (b) overall profile, (c) cross profile, and (d) upside

3.2 型材成分分析

按照图 1 中方框的 5 个区域对支撑梁型材进行取样, 样品质量在 0.1~0.2 g 范围内, 然后进行 ICP 成分测试。支撑梁型材各区域的成分测试结果如表 3 所示, 1~5 区域的合金成分都在设计的误差范围内, 且各区域成分均匀, 挤压变形未使合金发生过度氧化、组织过烧等能导致合金成分出现较大差异的现象, 表明上文的优选挤压工艺是基本合理的, 同时再次验证模拟结果的正确性。此外, 支撑梁型材中, 每个区域的 Fe 含量都超标, 除了合金在熔炼过程中带入 Fe, 在高温挤压过程中, 合金与挤压筒、模具等长时间接触, 也会带入部分 Fe。

3.3 金相组织观察

金相试样在图 1 中 5 个方框处分别取样, 观察到垂直于挤压方向平面的金相组织如图 9 所示。其中, 图 9a~9e 分别对应区域 1、2、3、4、5, 图中 5 个区域的晶粒都比较细小且均匀, 晶粒尺寸在 20~50 μm, 基本呈等轴晶分布, 说明挤压成形后基本都发生了完全再结晶。不同区域的金相组织差别不大, 都存在较多的第二相, 颗粒状第二相分布在晶界处和晶粒内部, 块状第二相分布在晶粒内部; 许多晶粒内部还存在大量的 LPSO 相 (长周期堆垛有序相)。说明在优选挤压工艺下, 能够成功挤出组织均匀、晶粒细小的支撑梁

型材, 进一步证明了模拟结果的正确性。图 9f 为压余中心区域的金相照片, 由于压余只经过压缩镦粗, 没有经过挤压变形, 晶粒直径特别大, 大部分超过 100 μm, 在挤压力的作用下, 只发生了晶粒回复和部分再结晶。同时, 金相组织中的第二相很少, 没有 LPSO 相的析出。

3.4 力学性能测试

按图 1 所示 1、2、3、4、5 共 5 个位置沿挤压方向取样, 进行室温拉伸试验, 测试支撑梁型材的力学性能。对部分支撑梁型材进行时效处理, 时效工艺为 400 °C 保温 10 h, 水冷后在 200 °C 保温 50 h。对时效后的型材以相同方式取样, 进行室温拉伸试验, 2 次

表 3 支撑梁型材不同区域的成分

Table 3 Composition of the support beam profile in different areas (wt%)

Area	Mg	Gd	Y	Zn	Mn	Fe	Si
1	Bal.	8.75	3.80	1.34	0.84	0.0137	0.0005
2	Bal.	8.76	3.81	1.44	0.82	0.0167	0.0008
3	Bal.	8.78	3.81	1.19	0.83	0.0154	0.0011
4	Bal.	8.66	3.82	1.23	0.86	0.0123	0.0009
5	Bal.	8.75	3.80	1.32	0.85	0.0134	0.0006
Range	Bal.	8.5~9.0	3.8~4.5	1.0~1.5	0.8~1.0	<0.003	<0.003

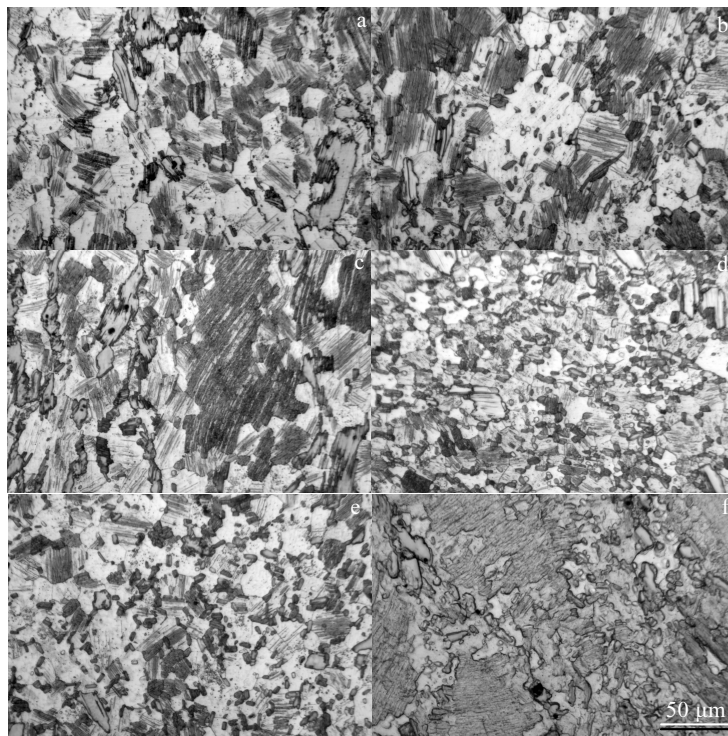


图 9 支撑梁型材不同区域的微观组织

Fig.9 Microstructures of the support beam profile in different areas: (a) area 1, (b) area 2, (c) area 3, (d) area 4, (e) area 5, and (f) extrusion oddment

拉伸试验结果如图 10 和表 4 所示。图 10a 是支撑梁型材挤压态的力学性能，各个区域差异不明显，极限抗拉强度(UTS)都在 370 MPa 以上，延伸率(EL)在 10% 以上，最好的综合力学性能为抗拉强度 391 MPa，延伸率 11.3%。该结果表明，Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 合金在优选工艺下挤压成形后，得到了综合力学性能优良的支撑梁型材，最终又证明了模拟结果的正确性。图 10b 是支撑梁型材时效态的力学性能，各区域同样差异不明显，在延伸率改变不大的情况下，抗拉强度都大幅提高，各区域的抗拉强度都达到 460 MPa，约提高了 70~100 MPa，最好的综合力学性能为抗拉强

度 475 MPa，延伸率 9.7%。合金在时效时析出 Mg-RE 沉淀硬化相与 LPSO 相，同时提高了强度；此外，在时效前进行 400 °C 的固溶处理，使得第二相先固溶进 Mg 基体，然后再弥散析出，同时，促进层状 LPSO 相向块状 LPSO 相转变。弥散的第二相对塑性的恶化影响不明显，而块状 LPSO 相有助于提高合金的塑性。因此，支撑梁型材时效态的强度明显提高，而且塑性改变不明显。

4 结 论

1) 大规格高强韧镁合金支撑梁型材在挤压成形过程中，随着挤压速度的增大，型材最高温度、出模最快速度、坯料最大压力及所需最大挤压力都呈增大趋势；型材温度和速度都呈现出中下部最大、底部次之、顶部最小的分布情况，但各区域差别不明显。

2) 支撑梁型材结构优化后，型材最高温度、出模最快速度基本不变，坯料最大压力及所需最大挤压力明显降低；在保证大规格高强韧镁合金支撑梁型材能成功挤压成形的前提下，确定出了优选工艺，即挤压温度 470 °C，挤压速度 0.3 mm/s，该工艺下所需最大挤压力为 34 606 kN。

3) 在优选工艺下，成功制备出了光亮平直、尺寸正常、表面质量良好的大规格高强韧镁合金支撑梁型材，并且型材的成分均匀且组织均质，验证了模拟结果的正确性。

4) 型材各区域挤压态的抗拉强度都在 370 MPa 以上，延伸率在 10% 以上，最高强度达到 391 MPa，综合力学性能优良，进一步证明了模拟结果的正确性；时效处理后，型材各区域的强度提高明显，达到 460 MPa 以上，延伸率略微下降，超过 8%，最高强度达到 475 MPa。

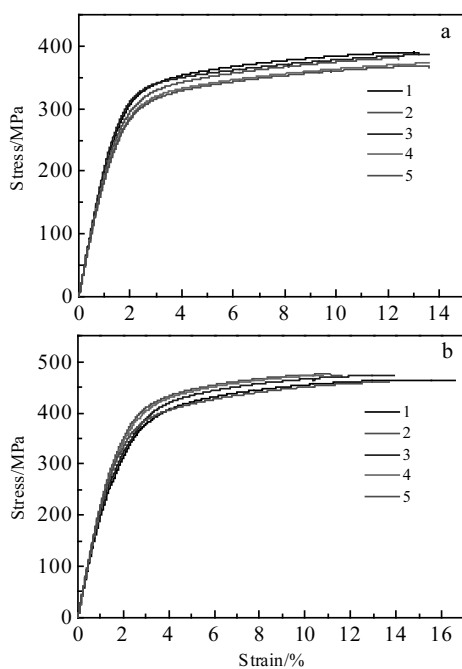


图 10 支撑梁型材不同区域的力学性能

Fig.10 Mechanical properties of the support beam profile in different areas: (a) extruded mechanical properties and (b) aged mechanical properties

表 4 支撑梁型材不同区域的力学性能

Table 4 Mechanical properties of the support beam profile in different areas

Area	UTS/MPa		YTS/MPa		EL/%	
	Extruded	Aged	Extruded	Aged	Extruded	Aged
1	391	464	266	262	11.3	14.7
2	382	475	232	316	10.7	9.7
3	388	471	246	280	11.8	11.9
4	373	475	237	314	11.5	8.8
5	370	460	241	303	11.6	11.7

参考文献 References

[1] Yu Kun(余 琨), Li Wenxian(黎文献), Wang Richu(王日初) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2003, 13(2): 277

[2] Friedrich H, Schumann S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2001, 117(3): 276

[3] Yu Kun(余 琨), Li Wenxian(黎文献), Wang Richu(王日初). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2005, 15(7): 1081

[4] Kojima Y, Aizawa T, Kamado S et al. *Mater Sci Forum*[J], 2000, 350-351(7): 3

[5] Wang Jingfeng(王敬丰), Gao Shan(高 珊), Pan Fusheng(潘复生) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金

- 属材料与工程[J], 2016, 38(6): 1029
- [6] Li Jiehua(李杰华), Jie Wanqi(介万奇), Yang Guangyu(杨光昱). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(9): 1751
- [7] Liu Huaqiang(刘华强), Tang Di(唐 荻), Hu Shuiping(胡水平) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(7): 1372
- [8] Lv Binjing(吕滨江), Peng Jian(彭 建), Liang Peng(梁 鹏) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(11): 109
- [9] Zhang Jinghui(张景怀), Tang Dingxiang(唐定骧), Zhang Hongjie(张宏杰). *Rare Metals*(稀有金属)[J], 2008, 32(5): 559
- [10] Nishijima M, Hiraga K, Yamasaki M *et al. Materials Transactions*[J], 2006, 47(8): 2209
- [11] Honma T, Ohkubo T, Hono K *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 395(1-2): 301
- [12] Zhang Dingfei(张丁非), Qi Fugang(齐福刚), Shi Guoliang(石国梁) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(12): 2205
- [13] Gao X, Nie J F. *Scripta Materialia*[J], 2007, 56(8): 645
- [14] Saito K, Hiraga K. *Materials Transactions*[J], 2011, 52(10): 1860
- [15] Hu Yaobo(胡耀波), Yang Shengwei(杨生伟), Yao Qingshan(姚青山) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(1): 139
- [16] Wang Zhutang(王祝堂). *Non-ferrous Metal Processing*(有色金属加工)[J], 2004, 33(1): 31
- [17] Wang Rui(王 锐). *Thermal Processing*(热加工工艺)[J], 2012, 41(13): 95
- [18] Li Xiaohui(黎小辉), Feng Xiaowei(冯晓伟), Wang Shuncheng(王顺成) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(12): 2927
- [19] Lv Binjiang(吕滨江), Peng Jian(彭 建), Tong Xiaoshan(童小山) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(4): 841
- [20] Stone R B, Wood K L, Crawford R H. *Design Studies*[J], 2000, 21(3): 239
- [21] Kurt. *Extrusion: Processes, Machinery, Tooling*[M]. Ohio: American Society for Metals, Metals Park, 1976: 152
- [22] Tang J, Wu W T, Walters J. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1994, 46(1-2): 117
- [23] Zhou Fei(周 飞), Peng Yinghong(彭颖红), Ruan Xueyu(阮雪榆). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 1998, 8(4): 637
- [24] Zhang Baojun(张保军), Yang He(杨 合), Guo Lianggang(郭良刚) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(12): 2178
- [25] Chang Qunfeng(苳群峰), Li Dayong(李大永), Peng Yinghong(彭颖红) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2006, 16(4): 580
- [26] Zhang Baojun(张保军), Yang He(杨 合), Guo Lianggang(郭良刚) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2012, 22(10): 2713
- [27] Liu Xiao(刘 筱), Zhu Biwu(朱必武), Li Luoxing(李落星) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2016, 26(2): 288
- [28] Meng Shuaiju(孟帅举), Yu Hui(余 晖), Cui Hongwei(崔红卫) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2017, 27(5): 894
- [29] Hu Zhongju(胡忠举), Liu Yanfeng(刘雁峰), Lu Liwei(卢立伟) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2018, 28(5): 923
- [30] Liang Shujin(梁书锦), Wang Xin(王 欣), Lin Zuyan(刘祖岩) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(7): 1276
- [31] Li Linlin(李琳琳), Zhang Zhimin(张治民), Xue Yong(薛勇). *Forging Equipment and Manufacturing Technology*(锻压装备与制造技术)[J], 2006, 41(2): 70
- [32] Wu Guimin(吴桂敏), Gao Fei(高 飞), Fu Rong(符 蓉). *Thermal Processing*(热加工工艺)[J], 2009, 38(17): 39
- [33] Guo Lili(郭丽丽), Li Yongbin(李永兵), Pei Jiuyang(裴久杨). *Forging Technology*(锻压技术)[J], 2015, 40(6): 138
- [34] Guan Renguo(管仁国), Zhao Zhanyong(赵占勇), Chen Liqing(陈礼清) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(5): 923

Numerical Simulation and Experimental Study on Extrusion Forming of High Strength Tough Magnesium Alloy Large Size Profiles

Wang Jingfeng^{1,2}, Peng Xing^{1,2}, Wang Kui^{1,2}, Hu Hao^{1,2}, Gao Shiqing^{1,2}, Wang Jinxing^{1,2}, Pan Fusheng²

(1. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(2. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing 400044, China)

Abstract: HyperXtrude software was used to simulate the profile structure of the large-size high-strength and tough Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn alloy rail transit support beam. Under the premise of ensuring the successful extrusion of large-size high-strength and tough magnesium alloy support beam profiles, the preferred process was determined, in which the extrusion temperature is 470 °C, the extrusion speed is 0.3 mm/s, and the maximum pressing force required under the process is 34 606 kN. The large-size high-strength and tough magnesium alloy support beam profile used in rail transit with good surface quality, uniform composition and homogeneous structure was successfully prepared. The tensile strength of each part of the profile is above 370 MPa, the elongation is above 10%, and the highest strength is 391 MPa. The strength of the aging state is obviously improved, reaching 460 MPa or more, and the elongation is slightly decreased, exceeding 8%. The highest strength reaches 475 MPa.

Key words: high strength tough magnesium alloy; extrusion; numeric simulation; mechanical properties

Corresponding author: Wang Jingfeng, Ph. D., Professor, National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China, Tel: 0086-23-65112153, E-mail: jingfengwang@163.com