

如何优化高强 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金型材挤压工艺？——实验与数值模拟揭示关键参数

Optimizing Extrusion of High-strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr Alloy: Revealing Critical Parameters through Experiments and Numerical Simulation

供稿|庄大勇¹, 任大为¹, 潘宏伟¹, 李洋¹, 刘杰² / ZHUANG Dayong¹, REN Dawei¹, PAN Hongwei¹, LI Yang¹, LIU Jie²

内容导读

Al-8.79Zn-2.16Mg-2.11Cu-0.12Zr 高强铝合金因其优异的比强度、成形性和耐蚀性，在航空航天、轨道交通等高端装备领域应用前景广阔。其挤压型材的质量（尺寸精度、力学性能）高度依赖于工艺参数（温度、速度）控制的精确性。传统试错法优化成本高昂且效率低下。本研究旨在通过实验表征与数值模拟的深度融合，系统揭示该合金挤压过程的变形行为与组织织构演变规律，并精准优化工艺窗口。结果显示：（1）速度主导流动均匀性：低速挤压（ $<0.3\text{ mm/s}$ ）时温升小、流动均匀，型材成形性佳；速度 $>0.3\text{ mm/s}$ 导致摩擦热剧增，引发截面流速不均和型材弯曲。（2）温度窗口优化： $390\sim 430\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间材料塑性最佳，挤压力适中，低于 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 则抗力过大，高于 $470\text{ }^{\circ}\text{C}$ 易过热。（3）组织织构演变：挤压后晶粒从等轴态（ $\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ ）显著细化拉长（ $\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ ），形成强的丝 $\{123\}<634>$ ， $<111>/\text{ED}$ ，柏瑞丝 $\{110\}<112>$ 织构。

铝合金挤压型材因其优异的成形性能、超高的比强度和耐腐蚀性能，被广泛地用于汽车、高速列车、武器装备和航空航天等领域^[1-2]，凸显了其越来越重要的地位。目前，日本和欧洲均已开始向万吨级别挤压机迈进，不再制造小吨位的铝合金挤压型

材产品。我国也已有上千家铝合金加工企业，但小吨位、低端、廉价、常规合金产品挤压占据很大的市场份额，而近些年航空运输业和轨道交通事业的飞速发展，推动着铝合金挤压型材综合性能不断提高。挤压型材的关键技术在于模具设计和挤压工艺

作者单位：1. 中船重工龙江广瀚燃气轮机有限公司，黑龙江 哈尔滨 150070；2. 东北轻合金有限责任公司，黑龙江 哈尔滨 150060

参数的优化等方面,然而,以往常规的模具设计和工艺参数的制订均基于模具设计人员的专业知识和实践经验,需要在工厂反复尝试和修复,这样不但耗费大量的人力、物力和时间,而且生产效率低下,不利于批量生产。采用有限元模拟软件和计算机技术的完美结合,使得这一问题得到完美的解决,大量的工艺实验和模具设计都在计算机上完成,不必担忧资源的过渡浪费。而且挤压模拟能够有效地预测材料缺陷类型和位置,并优化模具结构,为后续的挤压过程提供指导。现今已经有很多学者开展这方面的研究,Giarmas 等^[3]、Qamar 等^[4]、Ji 等^[5]和 Truong 等^[6]利用有限元的方法优化挤压模具结构,指出有限元模拟在消除型材缺陷和模具优化方面有着重要的作用。Lee 等^[7]、van Quwerkerk 等^[8]、Llorca-Schenk 等^[9]、Mayavaram 等^[10]、Nosrati 等^[11]采用有限元模拟的方法模拟了模具工作带长度,指出采用有限元模拟方法能够不断地修正和迭代,最终得到相对均匀的出口速度。Pathak 等^[12]、Bai 等^[13]、Bajor 等^[14]、Marin 等^[15]、Wang 等^[16]、Hu 等^[17]和 Berski 等^[18]研究了挤压工艺参数对挤压型材性能的影响,指出挤压坯料的应力状态和载荷均与工艺参数有关,合理的挤压工艺参数不但可以避免挤压机过载,而且可以得到最优截面形貌的铝合金挤压型材。此外 Chen 等^[19]和 Wu 等^[20]通过有限元模

拟研究工艺参数对型材纵向焊缝质量的影响,指出降低挤压速度和提高坯料温度有利于提高纵向焊接质量。这些学者均从有限元模拟的角度出发去研究挤压模具、挤压工艺参数以及型材的焊合质量等问题,目前更多的研究集中在有限元模拟研究,或者挤压型材微观组织和织构的研究,对于通过有限元模拟得到的最佳挤压工艺制备的型材的微观组织和织构演变很少有人研究。

本文利用铝合金的热压缩实验得到 Al-8.79Zn-2.16Mg-2.11Cu-0.12Zr 铝合金的本构关系方程,导入到 DEFORM 软件数据库中,进行不同温度、不同应变速率的挤压模拟,通过挤压型材的温度场、应力场和应变场研究铝合金挤压型材变形行为和演变规律,找出最佳挤压工艺参数,指导工业化大生产过程,同时对工业化大生产挤压的铝合金型材的微观组织和织构形式进行了研究。

实验材料和程序

试样制备及性能表征

实验所用的铝合金挤压坯料来自于水冷铜模连续铸造的铝合金圆铸锭,具体成份如表 1 所示,圆铸锭在电阻炉中均匀化处理后被锯切成直径为 $\phi 400$ mm,长 1000 mm 的铝合金圆铸锭,均匀化热处理工艺为 420 °C/12 h+470 °C/72 h。

表 1 Al-8.79Zn-2.16Mg-2.11Cu-0.12Zr 合金铸锭的化学成分(质量分数)

Zn	Mg	Cu	Zr	Fe	Mn	Cr	Ni	Si	Ti	Al
8.798	2.160	2.111	0.123	0.099	0.005	0.005	0.033	0.008	0.017	余量

热模拟过程需要在均匀化处理后的 $\phi 400$ mm×1000 mm 的铝合金挤压坯料的一端截取 $\phi 400$ mm×100 mm 的圆柱试样,用于微观分析和热压缩实验材料的制备,力学性能测试和微观组织分析的试样均取自于圆柱试样的中心位置,切割的力学试样用于压缩实验,压缩实验在 Gleeble-1500 模拟试验机上进行,实验温度为 310~470 °C,应变速率为 0.005~5 s⁻¹,压缩实验过程中当试样升温至规定温度保温 5 min 后进行压缩实验,实验完成后试样应立即淬入水中冷却。

利用背散射扫描电子显微镜对压缩试样的中心

纵剖面进行微观组织和织构演变分析,压缩试样首先依次通过 500#、800#、1200#和 2000#砂纸进行机械抛光,抛光至试样表面无划痕后采用高氯酸体积分数为 10% 的无水乙醇电解液进行电解抛光。抛光后的试样在 JEOL-7900 场发射枪扫描电子显微镜和装备 EDAX Hikari XP EBSD 探头仪器上进行微观组织表征实验。采用 Channel5 软件和 AztecCrystal 软件对实验得到的数据进行分析。对 Gleeble-1500 模拟试验机得到的压缩数据进行处理得到铝合金挤压坯料的真应力-真应变曲线,通过数据整理得到 Al-8.79Zn-2.16Mg-2.11Cu-0.12Zr 合金的本构关系

方程, 将关系方程导入到 DEFORM 软件材料库中, 模拟不同温度 and 不同应变速率的 Al-8.79Zn-2.16Mg-2.11Cu-0.12Zr 合金的挤压, 通过模拟过程得出最优的挤压工艺参数, 用于指导工业化大生产。

材料本构关系的建立

为了获得 Al-8.79Zn-2.16Mg-2.11Cu-0.12Zr 铝合金的本构关系方程, 在不同温度 (310、350、390、430 和 470 °C) 和不同应变速率 (0.005、0.05、0.5 和 5 s⁻¹) 下进行了 Al-8.79Zn-2.16Mg-2.11Cu-0.12Zr 铝合金的热压缩模拟实验。图 1 所示为经过均匀化热处理的 Al-8.79Zn-2.16Mg-2.11Cu-0.12Zr 铝合金在不同应变速率及温度下得到的真应力-真应变曲线, 在低温和低应变速率下, 材料的真应力-真

应变曲线出现屈服平台, 有明显的 Portevin Le Chatelier (PLC) 效应存在^[21-24]。在相同应变速率下, 应变温度越低材料的应力值越大; 应变温度相同时, 材料的应力值随着应变速率的降低而降低。当材料处于低温低应变速率的情况时容易发生连续动态再结晶过程。随着应变速率和应变温度的增加, 材料真应力-真应变曲线的锯齿状消失, 转而发生不连续的动态再结晶行为。这说明整个软化过程不会立即发生, 需要加工硬化累积达到临界应力值后动态再结晶过程才会发生, 材料得到软化, 应力值减小, 后续一直处在加工硬化和动态软化的交互过程中。该过程材料的应变值可以通过阿伦尼乌斯方程 (见式 (1)) 计算得出。

$$\dot{\epsilon} = 4.3662 \times 10^{18} [\sinh(0.01142\sigma)]^{6.561344} \exp\left(\frac{-1.17816 \times 10^5}{RT}\right) \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 是应变率, s⁻¹; σ 是真应力, MPa; R 为材料常数, 取 8.314 J/(mol·K); T 是绝对温度, K。

有限元模拟过程

采用商用有限元软件 DEFORM-3D 模拟挤压进

程。挤压模具和挤压筒选用 AISI H13 材料, 坯料为直径 $d=405$ mm, 高度 $L=1000$ mm 的圆柱, 挤压筒的直径 $D=420$ mm。坯料和挤压筒、模具的摩擦行为用塑性剪切模型进行描述, 摩擦因子 $m=1.0$ 。坯料和挤压筒、模具的热传导系数设置为 25 kW/(m²·K),

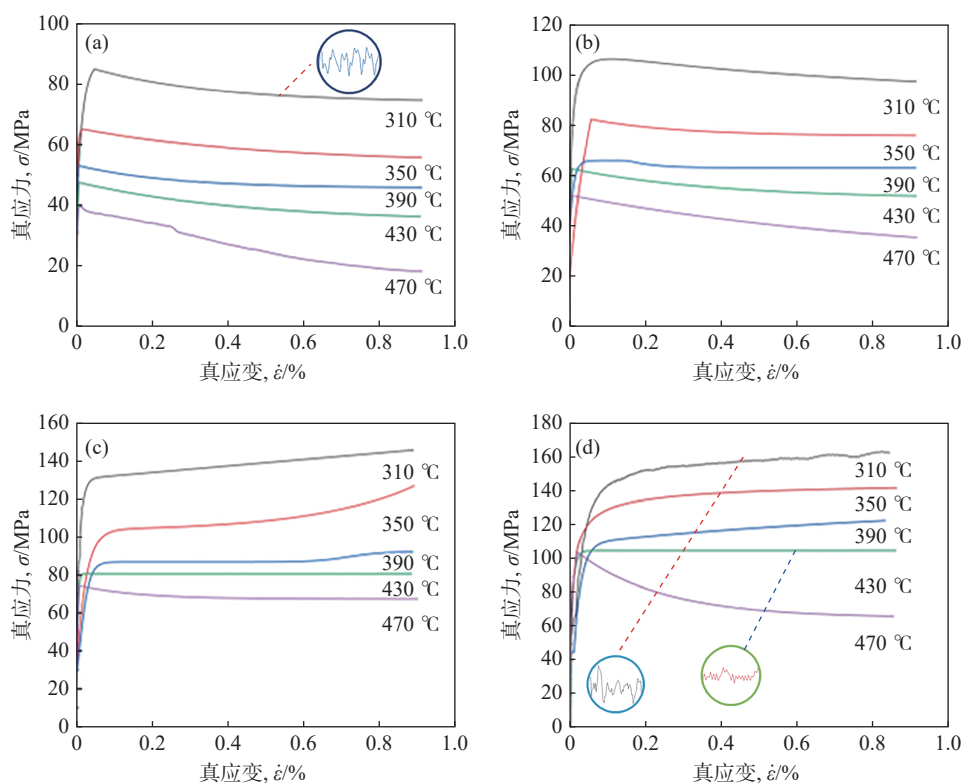


图 1 不同应变速率不同温度下铝合金真应力-真应变曲线: (a) 0.005 s⁻¹; (b) 0.05 s⁻¹; (c) 0.5 s⁻¹; (d) 5 s⁻¹

空气的热交换系数的平均值为 $0.02 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。通过 JmatPro 软件模拟获得材料的物理参数。由于挤压过程为大塑性变形行为,故认为挤压材料为刚塑性材料,其它物体为刚性材料。最初设定的模型参数遵循挤压试验:挤压杆温度设定为 250°C ,模具和挤压筒的最初温度均为 400°C ,坯料的温度为 350°C 、 400°C 和 450°C 。挤压速度设定为 0.03 、 0.3 和 3 mm/s 。

图 2 所示为挤压型材的数值网格变形图,型材坯料被划分 40 万个网格,从图中可以看出在挤压过程中,大部分坯料没有出现明显变形。只有当物料到达模口时,坯料发生严重变形。

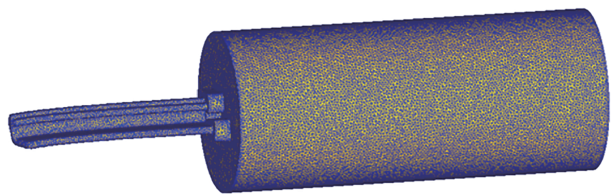


图 2 挤压坯料的网格划分

挤压过程

铝挤压过程可以看作一种材料成型过程,即通过挤压力的作用将挤压坯料从一个变截面的模具流出形成恒定截面的长型材的过程。铝挤压是一个非常难控制的过程,仅知道摩擦力 F 、挤压比 R 、挤压速度 V 和挤压温度 T 等相关参数对加工效率、型材的表面质量和型材的力学性能有影响,但是对于其内部复杂的材料变形特性和铝挤压过程中力学行为演变的理解仍然十分有限。图 3 所示为型材挤压装置的示意图,可以看出挤压设备主要由挤压杆、挤压筒、挤压模具和挤压垫等组成。挤压杆和挤压垫与挤压筒紧密贴合,防止铝向后泄露的同时,迫使挤压杆推动铝合金挤压坯料向前流动,形成恒定截面的铝合金型材。整个挤压过程不使用润滑剂,坯料的外层与模具发生摩擦被挤压到型材的尾端,最终被锯切掉。挤压过程非常复杂,包含过程变量与材料高温特性之间的相互作用,容易出现金属流不均匀、尾端缺陷和粗晶环,如何避免这些缺陷一直是行业挑战。

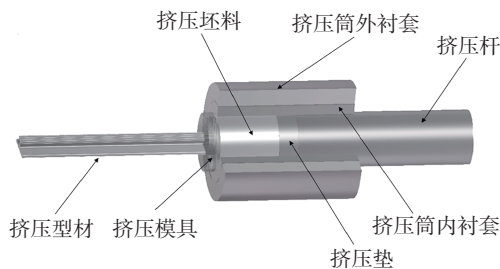


图 3 型材挤压装置示意图

挤压模具和型材尺寸

挤压模具是改变型材形状的最关键因素,直接决定着型材的形状、尺寸以及力学性能,合理的模具设计是一个复杂的过程,需要考虑的因素很多,不仅要考虑材料的强度和耐久性,而且要考虑模具的尺寸精度、表面质量和模具工作带的抖动性。一般情况下工作带的厚度越大,越有利于控制工作带的抖动和摩擦,但是工作带厚度的过分增加会增大临界挤压力,并且需要更大的挤压机方可实现。图 4 所示为挤压模具和挤压型材尺寸图,可以看出挤压型材截面呈现实心“土字”形状。

结果与讨论

微观组织演变和织构分析

图 5 所示为铝合金挤压坯料和挤压型材的微观组织形貌和织构分析图,可以看出均匀化热处理态铝合金挤压坯料和挤压型材展现出了不同的微观组织和织构形式,图 5(a) 所示为铝合金挤压坯料的反极图,可以看出晶粒组织非常均匀,呈现明显的等轴晶组织。图 5(b) 所示为挤压坯料初始组织的晶粒尺寸分布图,晶粒尺寸主要分布在 $100\sim 300 \mu\text{m}$ 的范围内,平均晶粒尺寸为 $199.9 \mu\text{m}$ (参考标准 ASTM E112—2013)。图 5(c) 所示为挤压坯料的极图,挤压坯料并无明显织构,最大织构强度为 2.476。图 5(d) 所示为铝合金挤压型材的反极图,从图中可以看出晶粒组织以严重变形引起的碎化状态的拉长晶粒组织为主,部分碎化的亚晶和再结晶为辅,图 5(e) 所示为铝合金挤压型材的晶粒尺寸分布图,晶粒尺寸主要分布在 $0\sim 40 \mu\text{m}$ 和 $50\sim 70 \mu\text{m}$ 范围内,平均晶粒尺寸为 $29.9 \mu\text{m}$,图 5(f) 为铝合金挤压型材的极图,从图中可以看出铝合金挤压型材有强织构存在。

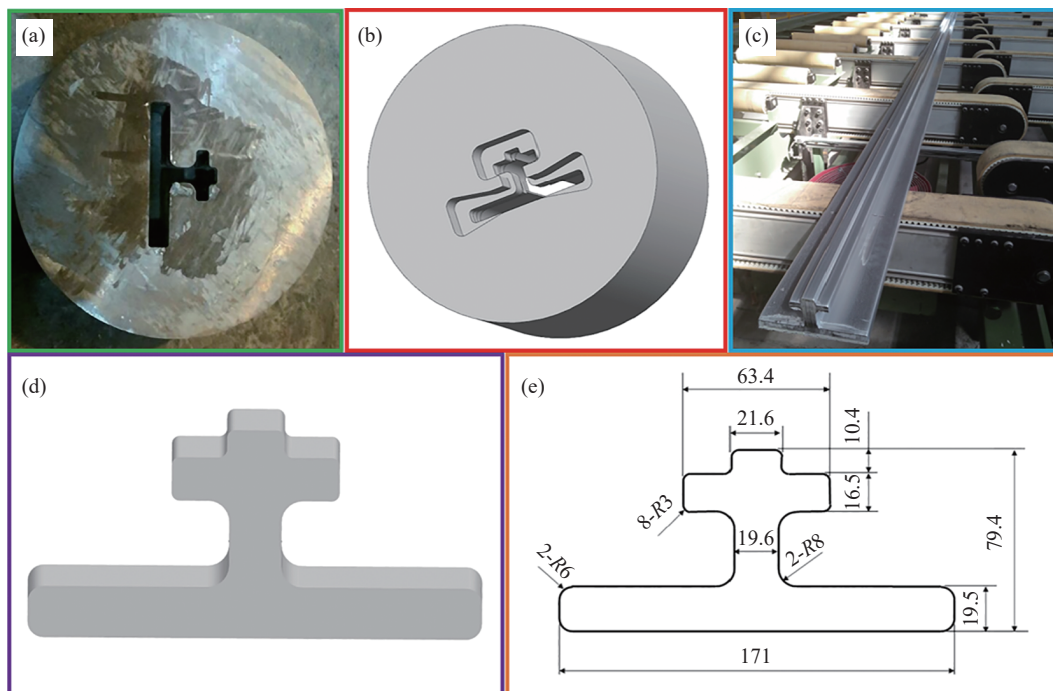


图4 挤压模具和挤压型材尺寸图: (a) 挤压模具; (b) 挤压模具三维构造模型; (c) 挤压型材; (d) 挤压型材三维构造模型; (e) 挤压型材尺寸 (单位: mm)

图6所示为铝合金挤压坯料和挤压型材在欧拉空间中 φ_2 为 45° , 65° 和 90° 时取向分布函数(ODF)截面图, 可以看出均匀化热处理的铝合金挤压坯料

无明显织构组织存在, 铝合金挤压型材有明显的织构存在, 由图6(a)可以看出均匀化热处理的铝合金挤压坯料无明显的典型织构组织存在, 仅存在少量

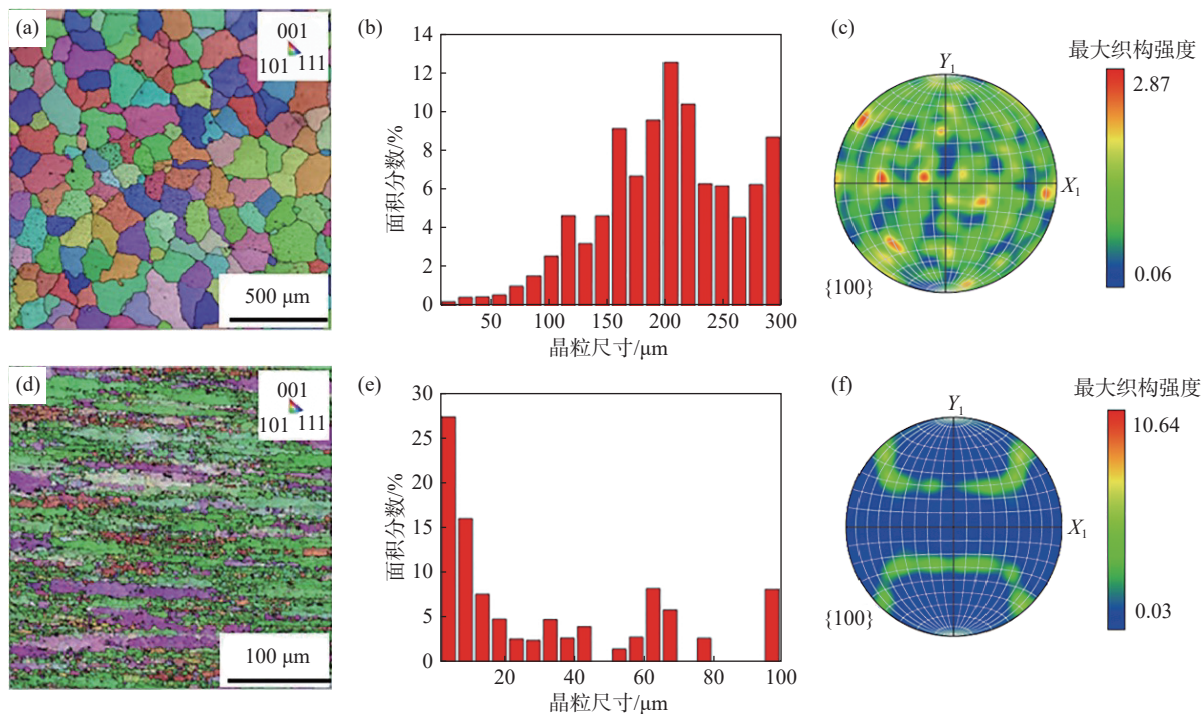
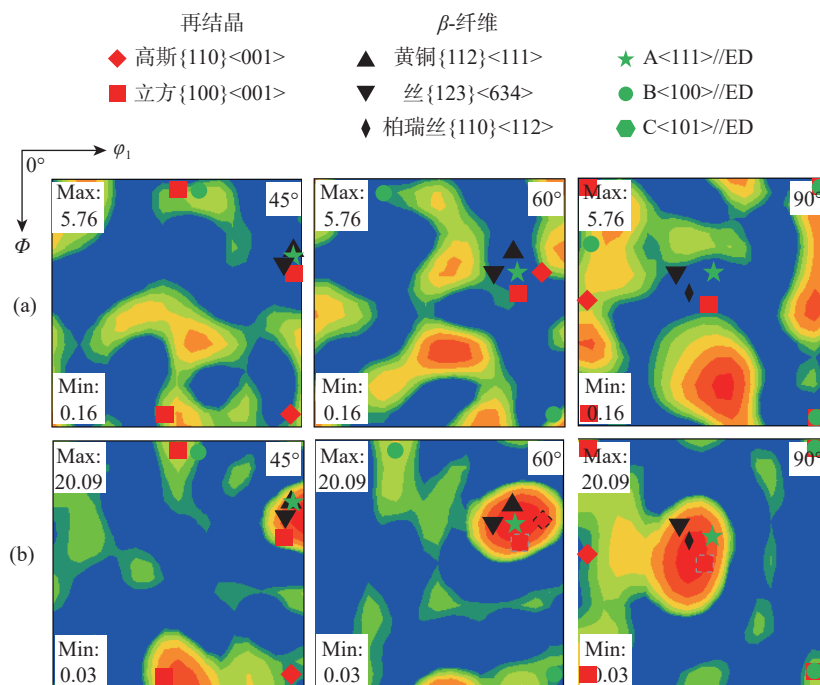


图5 铝合金挤压坯料和铝合金挤压型材的微观组织形貌与织构分析图: (a) 挤压坯料微观结构图; (b) 挤压坯料晶粒尺寸分布图; (c) 挤压坯料极图; (d) 挤压型材微观结构图; (e) 挤压型材晶粒尺寸分布图; (f) 挤压型材极图

的立方 $\{100\}<001>$ 织构, 最大织构强度为 5.76, 由图 6(b) 可知铝合金挤压材的典型组织组织有强的丝 $\{123\}<634>$ 织构, $<111> // ED$ (挤压方向), 柏瑞丝

$\{110\}<112>$ 和黄铜 $\{112\}<111>$ 织构和一些弱的高斯 $\{110\}<001>$ 和 $<100> // ED$ 织构存在, 最大织构强度为 20.09。



ϕ_1 ——绕Z轴旋转的旋转角, ϕ ——绕X轴旋转的旋转角, Max——最大织构强度, Min——最小织构强度

图6 铝合金挤压坯料和铝合金挤压型材 $\phi_2=45^\circ, 65^\circ$ 和 90° 取向分布函数截面图: (a) 挤压坯料; (b) 挤压型材 (注: A, B, C 分别代表平行挤压方向的 $<111>$, $<100>$, $<101>$ 方向的纤维织构)

挤压过程中的有限元模拟

对于挤压生产来说, 挤压温度和挤压速度是最基本、最关键的技术因素, 对产品质量、生产效率、模具寿命和能耗等都有很大影响。在挤压过程中, 挤压物的温度变化主要受模具传热、摩擦热和塑性变形热的影响。当坯料通过模孔时, 温度明显升高, 微观结构的变化主要由材料当时通过模具的条件决定。

图7所示为挤压温度为 350°C 时, 不同挤压速率下温度场和等效应力场分布图, 从图中可以看出, 当挤压速率为 3 mm/s 时, 坯料的温度有所提升, 材料的软化作用显著, 摩擦力作用增强。挤压模具工作带流速不均匀的现象彻底显现: 在型材的头端位置呈现向下弯曲现象, 此处为流速不均匀最明显的位置。 0.3 mm/s 的挤压速率导致坯料的温升相对较小, 软化作用不明显, 材料成形性良好。但

是由于摩擦力的作用, 在型材挤压的初期阶段, 十字型材截面上端和下端流速有细微差别, 加上没有坯料的金属内应力约束, 所以在挤压型材的初期阶段, 型材呈现头端弯曲, 随着挤压的进行, 内应力的相互作用增强, 流速不均匀的现象得到缓解。挤压速率为 0.03 mm/s 时, 挤压型材的成形性非常好, 无弯曲现象出现, 温升和等效应力呈减小的趋势。故在条件允许的情况下, 尽量采用小的应变速率进行挤压试验。如果采用较大的应变速率进行挤压试验, 不但增加挤压变形所需要的挤压力, 而且增加了坯料的温度, 增强软化效果, 提高摩擦力的作用。如果选择不当的挤压温度还可能导致低熔点相熔化和过烧现象, 使得成形性和尺寸精度都无法保证, 极大地缩短了模具的使用寿命, 需要反复修模进行调整, 更需要后续矫直处理, 增加工艺成本。通过等效应力图可以看出, 等效应力的分布不均

匀,在坯料的前端等效应力较大,但在坯料的末端偏后部位等效应力相对较小。在变形过程中,坯料的前端边缘受到模具死区位置的限制,材料无法流动,在前端边缘位置堆积,故变形较大,等效应力较高;而坯料后端受挤压杆的激冷作用和摩擦力的

作用,反而紧贴挤压杆位置的坯料等效应力较小,随着挤压速率的增加坯料变形所需的等效应力也增加,需要更大吨位的挤压机进行挤压操作。所以在实际生产中不得不兼顾设备能力和生产效率的双重考虑选择 0.3 mm/s 的挤压速率。

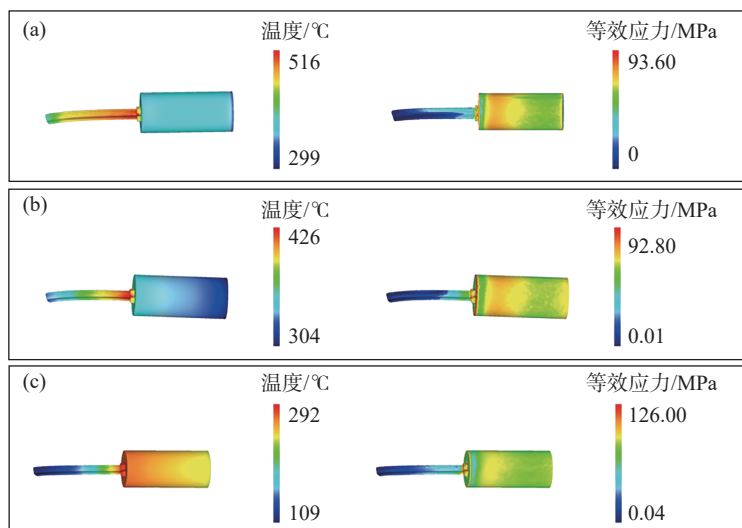


图 7 挤压温度为 350 °C 时不同应变速率的温度场和等效应力场图: (a) 3 mm/s; (b) 0.3 mm/s; (c) 0.03 mm/s

图 8 所示为挤压速率为 0.3 mm/s 时不同温度条件下的温度场和等效应变场图。从图中可以看出,随着挤压温度的增加,金属变软,外摩擦力的作用增加,坯料的成型性逐渐变差,同时等效应变呈减小趋势,挤压所需的挤压力减小,降低了对挤压设备的要求。挤压温度为 350 °C 时,较高的温度出现在截面的外侧和头端,坯料内部和尾端的部分温度较低,在头端边缘的位置,变形较大,温度升高的

幅度也较大,可能是摩擦和局部变形结合的结果,等效应变值最大值达到 7.91。当挤压温度为 390 °C 时,坯料的头端温度和表面温度高于尾端和芯部温度,这是由于挤压筒的温度超过坯料温度,对坯料的表面起到加热的作用,加上摩擦力的作用,使得表面温度高于芯部温度,而尾端温度较低是因为挤压杆的激冷作用,在工作带位置由于变形剧烈,温升也相对较高,此时等效应变值最大值达

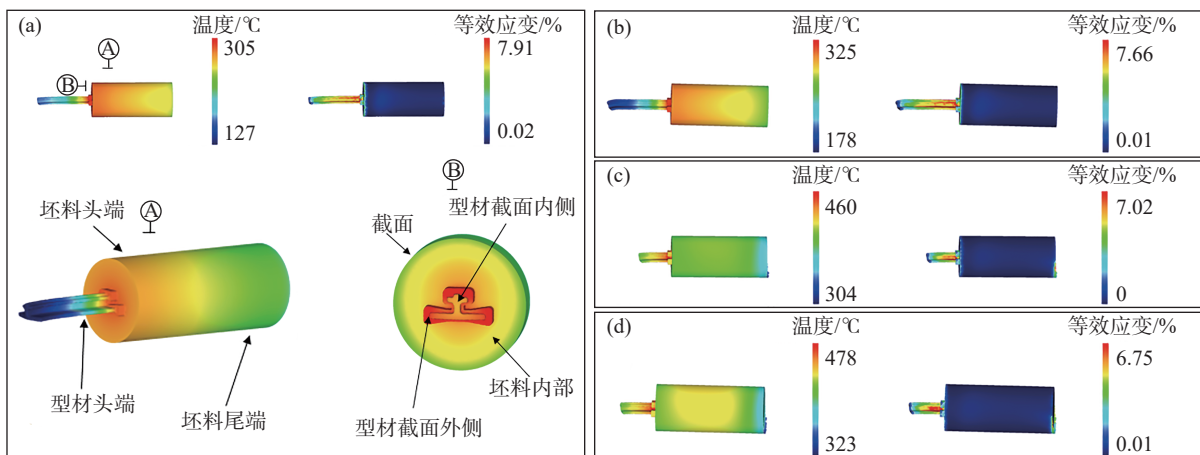


图 8 挤压坯料在不同温度条件下挤压的温度场和等效应变场图: (a) 350 °C; (b) 390 °C; (c) 430 °C; (d) 470 °C

到 7.66。当挤压温度为 430 °C 时, 坯料的整体升温趋于一致, 只有在型材头端挤压带附近温升较大, 这主要是挤压筒温度和坯料温度一致所致, 坯料变形更为均匀, 同时从图中可以看出坯料的变形量更大, 挤压出的型材也更短, 说明坯料在此温度下的塑性更佳, 坯料的延伸率也更好, 等效应变值最大值达到 7.02。当挤压温度为 470 °C 时, 坯料的表面温度明显低于 470 °C, 这是由于挤压筒的激冷作用, 使得表面温度低于芯部温度, 又由于采用 0.3 mm/s 的挤压速率, 温升相对较小, 所以挤压坯料表面温度较芯部低。同时等效应变值最大值达到 6.75, 并且该温度下挤压得到的型材表面质量较差。为了保证挤压型材质量, 故本实验建议选择最佳挤压温度为挤压温度 390~430 °C。

结束语

1) 铝合金挤压坯料微观结构显示晶粒组织非常均匀, 有明显等轴晶组织存在, 平均晶粒尺寸为 199.9 μm。铝合金挤压型材晶粒形貌以严重变形引起的碎化状态的拉长晶粒组织为主, 平均晶粒尺寸为 29.9 μm, 有强的织构组织存在。

2) 均匀化热处理态铝合金挤压坯料无明显的典型织构组织存在, 仅有少量的立方 {100} <001> 织构存在, 最大织构强度为 5.76, 而铝合金挤压型材有强的丝 {123} <634> 织构, <111> // ED, 柏瑞丝 {110} <112> 和 黄铜 {112} <111> 织构和一些弱的高斯 {110} <001> 和 <100> // ED 织构存在, 最大织构强度为 20.09。

3) 由真应力-真应变曲线可以看出, 在低温和低应变速率下, 材料的真应力-真应变曲线出现屈服平台。这也证明了低应变速率下主要以连续动态再结晶。在高温和高应变速率下, 可能发生不连续的动态再结晶。

4) 通过模拟显示在慢速挤压过程中, 材料的成形性更好, 等效应变较小, 随着挤压速率的增加, 坯料的温升增加, 温度的软化作用增强, 摩擦力的作用变得显著, 材料的成形性变差, 流速不一致变得明显, 型材出现了弯曲, 如果继续加大挤压速率和温度, 就会因为材料温升严重, 坯料和型材中出现过烧组织或导致锯齿状型材的出现, 建议选择最

佳挤压工艺参数为: 挤压温度 390~430 °C 和挤压速率 0.3 mm/s。

参考文献

- [1] Hwang Y M, Hsu I P. Die design and finite element analysis of welding seams during aluminum alloy tube extrusion. *Metals*, 2023, 13(5): Art No. 911
- [2] Song X, Wu Y, Wu Y. Application of artificial intelligence extrusion die model based on finite element simulation in decorative material aluminum alloy. *Math Probl Eng*, 2022: Art No. 2992479
- [3] Giarmas E, Tzetzis D. Optimization of die design for extrusion of 6xxx series aluminum alloys through finite element analysis: a critical review. *Int J Adv Manuf Technol*, 2022, 119: 5529
- [4] Qamar S Z, Pervez T, Chekotu J C. Die defects and die corrections in metal extrusion. *Metals*, 2018, 8(6): Art No. 380
- [5] Ji H C, Qiao J H, Kang N Z, et al. Optimization of hot extrusion process parameters for 7075 aluminum alloy rims based on HyperXtrude. *J Mater Res Technol*, 2023, 25: 4913
- [6] Truong T T, Hsu Q C, Tong V C. Effects of solid die types in complex and large-scale aluminum profile extrusion. *Appl Sci Basel*, 2020, 10(1): Art No. 263
- [7] Lee G A, Kwak D Y, Kim S Y, Im Y T. Analysis and design of flat-die hot extrusion process 1. three-dimensional finite element analysis. *Int J Mech Sci*, 2002, 44(5): 915
- [8] van Ouwerkerk G. CAD implementation of design rules for aluminum extrusion dies [Dissertation]. Enschede: The University of Twente, 2009
- [9] Llorca-Schenk J, Sentana-Gadea I, Sanchez-Lozano M. Design of porthole aluminium extrusion dies through mathematical formulation. *Mater Today Commun*, 2021, 27: Art No. 102301
- [10] Mayavaram R, Sajia U, Secli C, et al. Optimization of bearing lengths in aluminum extrusion dies. *Procedia CIRP*, 2013, 12: 276
- [11] Nosrati A S, Abrinia K. A new method for bearing design in the metal extrusion of profiled sections. *Int J Adv Manuf Technol*, 2020, 106(3/4): 1069
- [12] Pathak K K, Kumar J, Sharma M. A study on the effects of the extrusion process parameters using FEM. *Mater Sci*, 2013, 9(7): 247
- [13] Bai S W, Fang G. Experimental and numerical investigation into rectangular tube extrusion of high-strength magnesium alloy. *Int J Lightweight Mater Manuf*, 2020, 3(2): 136
- [14] Banerjee M, Verma T N, Nashine P. Experimental and numerical analysis of extrusion process for AA7178 alloy with varying process parameters. *Mater Today Proc*, 2018, 5(2): 6837
- [15] Marin M M, Camacho A M, Perez J A. Influence of the temperature on AA6061 aluminum alloy in a hot extrusion process. *Procedia Manuf*, 2017, 13: 327
- [16] Wang Y L, Zhao G Q, Sun L, et al. Effects of billet heating temperature and extrusion speed on the microstructures and

- mechanical properties of the longitudinal welds in aluminum alloy profiles with complex cross-section. *Vacuum*, 2023, 207: Art No. 111578
- [17] Hu H J. The effects of process parameters on evolutions of thermodynamics and microstructures for composite extrusion of magnesium alloy. *Adv Mater Sci Eng*, 2013, 2013: Art No. 259594
- [18] Bajor T, Kawalek A, Berski S, et al. Analysis of extrusion process of aluminium alloy profiles. *Materials*, 2022, 15(23): Art No. 8311
- [19] Chen W L, Xu C, Pan P L, et al. Effect of process parameters on longitudinal weld seam quality of aluminum alloy profile for an automobile fuel tank protector. *Procedia Manuf*, 2020, 50: 159
- [20] Wu X H, Zhao G Q, Luan Y G, et al. Numerical simulation and die structure optimization of an aluminum rectangular hollow pipe extrusion process. *Mater Sci Eng A*, 2006, 435/436: 266
- [21] Chen X X, Zhao G Q, Liu G L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of 2196 Al-Li alloy in hot extrusion process. *J Mater Process Technol*, 2020, 275: Art No. 116348
- [22] Zhang Y, Jiang J F, Wang Y, et al. Recrystallization process of hot-extruded 6A02 aluminum alloy in solid and semi-solid temperature ranges. *J Alloys Compd*, 2022, 893: Art No. 162311
- [23] Wang Y X, Zhao G Q, Xu X, et al. Effect of extrusion parameters on microstructure, texture and mechanical property anisotropy of spray deposited 2195 Al-Li alloy profile. *Mater Sci Eng A*, 2021, 818: Art No. 141406
- [24] Halim H, Wilkinson D S, Niewczas M. The Portevin-Le Chatelier(PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy. *Acta Mater*, 2007, 55(12): 4151

基金项目：国家重点研发计划资助项目（2016YFB0300903）。

作者简介：庄大勇（1985—），男，黑龙江省哈尔滨人，中船重工龙江广瀚燃气轮机有限公司工程师。2016年毕业于哈尔滨工程大学材料科学与工程专业，主要研究方向：铝合金，镍基高温合金热处理，塑性成型和发动机叶片热障涂层制备。通信地址：黑龙江省哈尔滨市道里区洪湖路31号；E-mail: zhuangdayongyong@163.com。