复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第 26 卷 第 5 期 10 月 2009 年
Vol. 26 No. 5 October 2009

文章编号：1000-3851(2009)05-0167-06

12 vol%SiC_P/2024Al 基复合材料热挤压过程有限元模拟与分析

刘 越*[1,2]，邵军超[1]，丁 莉[3]，杨 柯[1]
（1. 中国科学院 金属研究所，沈阳 110016；2. 东北大学 材料与冶金学院，沈阳 110004；3. 北京卫星制造厂，北京 100080）

摘 要： 基于 MSC. Marc 软件平台，建立了含 SiC_P 体积分数为 12% 的 SiC_P/2024Al 复合材料热挤压轴对称刚-塑性热力耦合有限元分析模型。利用该模型对复合材料的热挤压过程进行模拟，分析了热挤压过程中的载荷-行程曲线和材料流动状态，讨论了模具温度及挤压速度对挤压载荷的影响。模拟结果表明，该坯料在挤压比为 30∶1、挤压温度为 400～450℃、挤压速度为 0.1～1.0 mm/s、挤压载荷为 4.0×10^6～5.0×10^6 N 之间能够顺利挤出表面无缺陷的复合材料棒材。最后通过在 700 t 水压机上采用相同工艺挤出高质量的复合材料棒材验证该工艺的可行性。

关键词： 金属基复合材料；热挤压；有限元分析；热模拟；流线
中图分类号： TB331；TB330.1 **文献标志码：** A

Finite element simulation and analysis of 12 vol%SiC_P/2024Al matrix composites for hot extrusion process

LIU Yue*[1,2], SHAO Junchao[1], DING Li[3], YANG Ke[1]
(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China; 2. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. Beijing Spacecrafts, Beijing 100080, China)

Abstract: An axisymmetric rigid - plastic and coupled thermo-mechanical FEM model of SiC_P/2024Al composite (volume fraction of SiC_P 12%) for plat die hot extrusion process was established based on the software MSC. Marc. The model was used to simulate the hot extrusion process of the material. The pressure - stroke curves and flow lines were analyzed and the effects of temperature of billet and extrusion velocity were discussed. The results indicate that bars without surface defects can be obtained smoothly under the condition of the extrusion ratio 30∶1, temperature 400～450℃, extrusion rate 0.1～1.0 mm/s and extrusion pressure 4.0×10^6～5.0×10^6 N. The quality bars were got following the same process on 700 t hydraulic press to prove the feasibility of this process.

Keywords: metal matrix composites; hot extrusion; finite element analysis; thermo-simulation; flow lines

颗粒增强金属基复合材料(PRMMCs)由于具有高的比强度、比模量、低的膨胀系数和优良耐磨损性能等特征，被认为是一种较理想的轻质结构材料，并已经在航空航天、汽车机械及武器系统等领域得到初步地应用[1-5]。在颗粒增强金属基复合材料中 SiC_P/Al 复合材料应用最广泛，理论及制备工艺的研究也已经日趋成熟[1-2,5]，目前对该材料的研究重点已经逐步转向变形过程中力学行为的研究[6-9,15]。SiC_P/Al 复合材料的显著特点和优势之一就是可以利用常规的热加工方法进行二次加工，主要包括热挤压、轧制及锻造等，其中以热挤压加工成棒材的应用最为普遍[10-16]。但是由于 SiC_P/Al 复合材料的塑性相对较低，使该材料的热挤压工艺参数控制较严格。目前对 SiC_P/Al 复合材料热挤压工艺和性能的研究主要集中在实验方面[1-2,5,10-14]，有关该材料热挤压模拟的研究较少[15-16]。

本文中以 SiC_P 体积分数为 12% 的 SiC_P/2024Al 复合材料为研究对象，通过热压缩试验得到该材料在不同温度和应变速率下的真应力-真应变曲线；基于 Marc 软件平台建立该材料的数据库，建立

收稿日期： 2008-09-23；**收修改稿日期：** 2009-02-14
基金项目： 国家 973 重点基础研究发展计划项目(2006CB605306)
通讯作者： 刘 越，教授，主要研究方向为金属基复合材料、耐磨材料 E-mail：dbdxfhcl@yahoo.cn

SiC_P/2024Al 复合材料热挤压过程的有限元模型。分析了热挤压过程中的载荷-行程曲线及材料流动情况，讨论了模具温度及挤压速度对挤压载荷的影响，并对优化得到的工艺参数进行了实验验证。

1　SiC_P/2024Al 复合材料热压缩试验

采用 Gleeble3500 热-力模拟试验机，对 SiC_P/2024Al 复合材料进行热压缩试验，获得在不同温度和变形速率下该材料的真实应力-真实应变曲线。

1.1　实验材料及方法

实验材料为采用元素粉末热压法制备的 SiC_P/2024Al 复合材料坯料，SiC 颗粒的平均尺寸为 3.5 μm。试样尺寸为 Φ8 mm×12 mm 的圆柱体，两端平滑，表面无缺陷。为减少端面摩擦对实验的影响，热压时在试样两端面涂抹 MoS_2 粉末作为润滑剂，防止高温压缩后试样粘在压头上；试样和压头之间用钽垫片隔开。

试样加热速率为 5℃/s，变形温度分别为 300℃、350℃、400℃、450℃、500℃，保温时间为 5～10 min，变形速率为 0.01 s^{-1}、0.1 s^{-1}、1 s^{-1}、5 s^{-1}和 10 s^{-1}，压下量为 50%。试样压缩后的显微组织照片如图 1 所示。

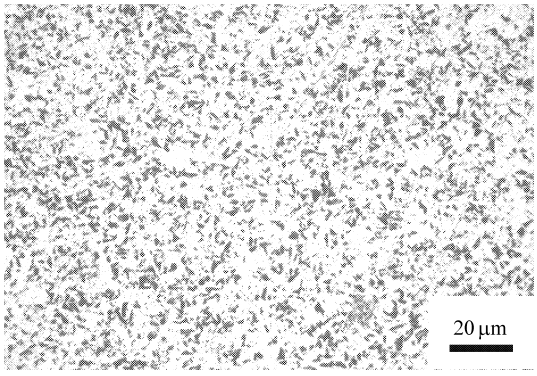

图 1　12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料试样压缩后的显微组织照片

Fig. 1　Optical micrograph picture of 12 vol%SiC_P/2024Al composites samples after compression

1.2　实验结果

通过 Gleeble3500 热-力模拟试验机得到数据如下，图 2 为相同应变速率(0.1 s^{-1})不同温度下和相同温度(350℃)不同应变速率下的真实应力-应变曲线。

由图 2 的实验曲线可以看出，12 vol% SiC_P/2024Al 复合材料流变应力的总体变化规律表现为：(1) 12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料的流变应力 σ 对

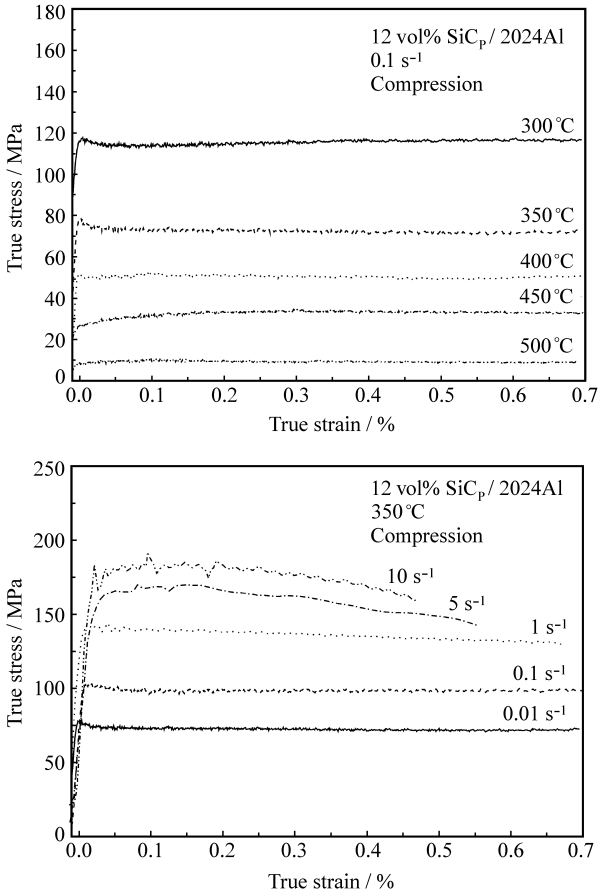

图 2　$\dot{\varepsilon}$ = 0.1 s^{-1}及 350℃时的真实应力-应变曲线

Fig. 2　True stress - strain curves at $\dot{\varepsilon}$ = 0.1 s^{-1} and 350℃

变形温度 T 和应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 2 个因素十分敏感，应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 一定时，流变应力 σ 随着变形温度 T 的升高而降低；变形温度 T 一定时，流变应力 σ 随着应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 的增大而升高。(2) 12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料变形初期有明显的应力峰值并且峰值前应变量很小，压缩变形时存在明显的稳态流变特征。即随着变形量的增加，曲线材料的应变硬化效果并不十分明显，真实应力并不随着真实应变的继续增大而发生明显变化。因此变形温度和应变速率是影响流变应力的主要因素[17]。

2　12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料数据库的建立

由于 Marc 中没有 12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料的数据库，需要自建[18]。对于绝大多数体积成形过程，材料的塑性变形量很大，采用刚塑性有限元法的求解精度完全可以满足工程需要。根据该

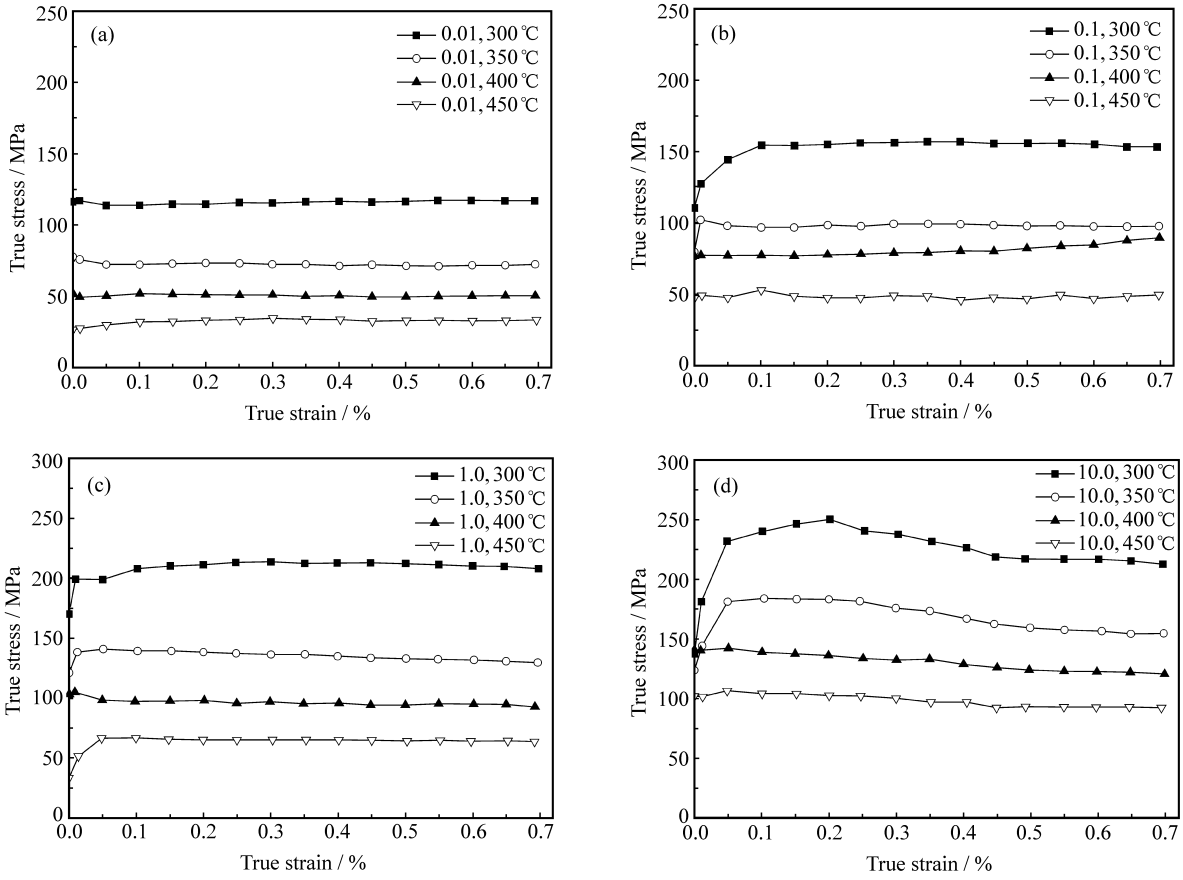

图 3　12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料的流变应力-应变曲线

Fig. 3　Flow stress - strain curves of 12 vol%SiC_P/2024Al composites

材料热加工变形的一般温度和应变速率范围，结合热压缩模拟实验得到的流变应力曲线，取 300～450℃和 0.01～10 s^{-1} 范围的有效数据建立 usr_sical.mat 数据文件，数据点如图 3 所示。软件在模拟材料变形过程中，采用插值的方法得到所需的流变应力数据。

3　热挤压过程数值模拟分析

3.1　挤压模型的建立

模拟采用 Marc 通用非线性有限元模拟软件，根据上面的数据，导入已建立的材料库文件进行模拟，模拟的几何模型如图 4 所示。采用轴对称模型，坯料原始尺寸为 Φ100 mm×150 mm，挤压筒直径为 Φ110 mm，直角凹模直径为 Φ20 mm。原始网格尺寸为 5 mm，由于挤压比比较大，故采用网格重新划分，最小单元尺寸为 1 mm。由于金属热加工属于大变形问题，故采用更新的拉格朗日法求解。

3.2　热挤压工艺参数的确定

材料性能数据和工艺参数的确定对于模拟结果的准确性有着重要的影响，合理的数据决定着模拟结果能否反映结论的可靠性。根据实际生产工况，选取 400℃ 和 450℃ 2 个温度、挤压速度为 0.1 mm/s和 1 mm/s 进行模拟。采用滑动库仑摩擦模型，坯料和模具间的摩擦系数为 0.15。考虑材料和周围环境之间的热量传递和塑性变形做功产生的热量，模具的温度略低于坯料的温度，都为 400℃，挤压过程中假设模具温度不变。坯料和模具间的接触传热系数和挤压过程中的压力、温度、接触状态等因素有关，可利用外延法传热模型来估测界面接触传热系数为 5 mJ·(mm^2·℃)$^{-1}$。

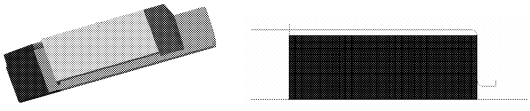

图 4　挤压模拟几何模型

Fig. 4　Geometry model of extrusion simulation

3.3　模拟过程及结果分析

3.3.1　热挤压过程分析

热挤压 12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料的过程

分为以下 3 个阶段。以挤压温度为 400℃和挤压速度为 0.1 mm/s 为例，图 5 为该热挤压过程中所得的载荷-行程曲线(横坐标为动模行程，纵坐标为动模载荷)。

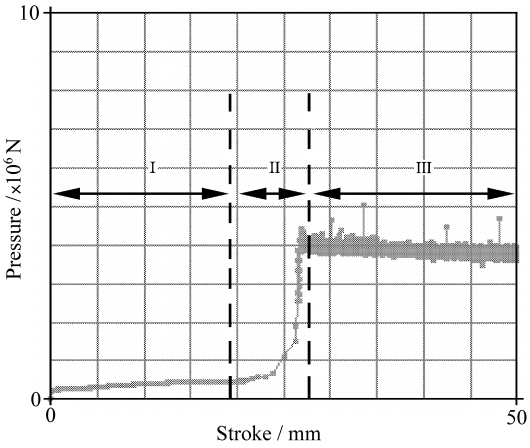

图 5　挤压过程中的载荷-行程曲线

Fig. 5　Pressure - stroke curve of extrusion process

阶段Ⅰ——填充挤压阶段。凸模镦粗挤压毛坯，使材料充满凹模和凸模之间的挤压筒空间。从图 5 可以看出，该阶段挤压载荷与挤压位移呈线性关系增加，压力较平稳。

阶段Ⅱ——强化挤压阶段。复合材料毛坯已经完全充满凹模和凸模之间的空间，开始从凹模孔挤出。该阶段中挤压载荷迅速增加至最大值，变形主要在挤压筒内壁与凹模的模孔区域，并在凹模出口处形成应力场集中区。

阶段Ⅲ——平流挤压阶段。凸模继续运动，迫使复合材料从凹模口中流出形成棒材，挤压载荷基本保持不变或略有降低(挤压过程中塑性变形做功，机械能转化为热能使得坯料在大塑性变形区温度升高，抵抗塑性变形能力下降)，塑性区的形状也基本保持不变。

3.3.2　挤压过程材料流动模拟

图 6 为 12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料挤压过程中的流线图 6(a)和材料流动矢量图 6(b)。从图 6(a)可以看出，在材料挤出过程中存在明显的被拉长而形成的流线，然而在凹模直角处的材料几乎没有发生流动。靠近凹模底部材料在流动过程中，断面网格发生畸变，该区材料一部分流向模口被挤出，另一部分沿底部向凹模侧壁流动，使得材料被剪裂而发生卷曲折叠。从图 6(b)也可以看到，越靠近凹模出口处，材料的位移矢量越大，流动速度越快，而在凹模直角处，材料位移矢量几乎为零，即此处存在材料流动的“死区”。“死区”的存在表明直角凹模挤压，凹模直角处金属流动极为不利，从而影响整个凹模内金属流动的均匀性。在图 6(b)中作出与水平呈 45°～50°斜线，在斜线左下方材料流动情况较好。因此光从有利用材料流动角度考虑，将凹模设计成 45°～50°更有利于材料的挤出流动。

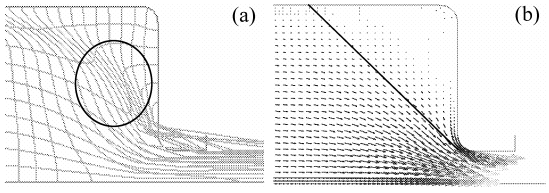

图 6　挤压过程中的流线图(a)和材料流动矢量图(b)

Fig. 6　Flow lines (a) and vector plot of materials (b) of extrusion process

3.3.3　温度和挤压速度对挤压过程的影响

挤压温度和挤压速度是挤压过程中的 2 个基本参数。对 12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料在挤压温度和挤压速度分别为 400℃和 0.1 mm·s^{-1}、450℃和 0.1 mm·s^{-1}、400℃和 1.0 mm·s^{-1}、450℃和 1.0 mm·s^{-1}的条件下进行了热挤压模拟。图 7 分别为不同挤压状态下的挤压载荷-行程曲线。

从图 7 可以看出，4 种状态的挤压载荷-行程曲线形态几乎完全相同，只是在平稳挤压阶段时的挤压载荷不同。一般是温度越高，挤压载荷越小；挤压速度越高，挤压载荷也随之变大；同时摩擦力等也是影响挤压载荷的主要因素之一。在相同的挤压温度(400℃)条件下，挤压速度为 1.0 mm·s^{-1}时的挤压载荷比 0.1 mm·s^{-1}时的挤压载荷高出近 1×10^6 N，如图 7(a)和 7(c)所示。

图 8 为 450℃和 0.1 mm·s^{-1}挤压条件下，凸模移动 40 mm 后，从坯料开始沿棒材轴线方向的温度分布。如图 7(a)和 7(b)所示，在挤压速度为 0.1 mm·s^{-1}的条件下，450℃和 400℃时的挤压载荷很接近，根据图 8 分析可知，这主要是由于挤压速度很慢，坯料和模具之间长时间的热传递导致坯料温度下降至 400℃左右。同时由于在凹模出口处存在大剪切变形区，塑性变形做功，使得该区域温度升高，出现温度峰。因此当挤压速度较小时，必须适当提高模具温度，降低坯料的热量损失。图 9 为模具温度为 430℃、挤压速度为 0.1 mm·s^{-1}时的载荷-行程曲线，同图 7(a)对比可以看出载荷值比模具温度为 400℃时的载荷值明显下降。

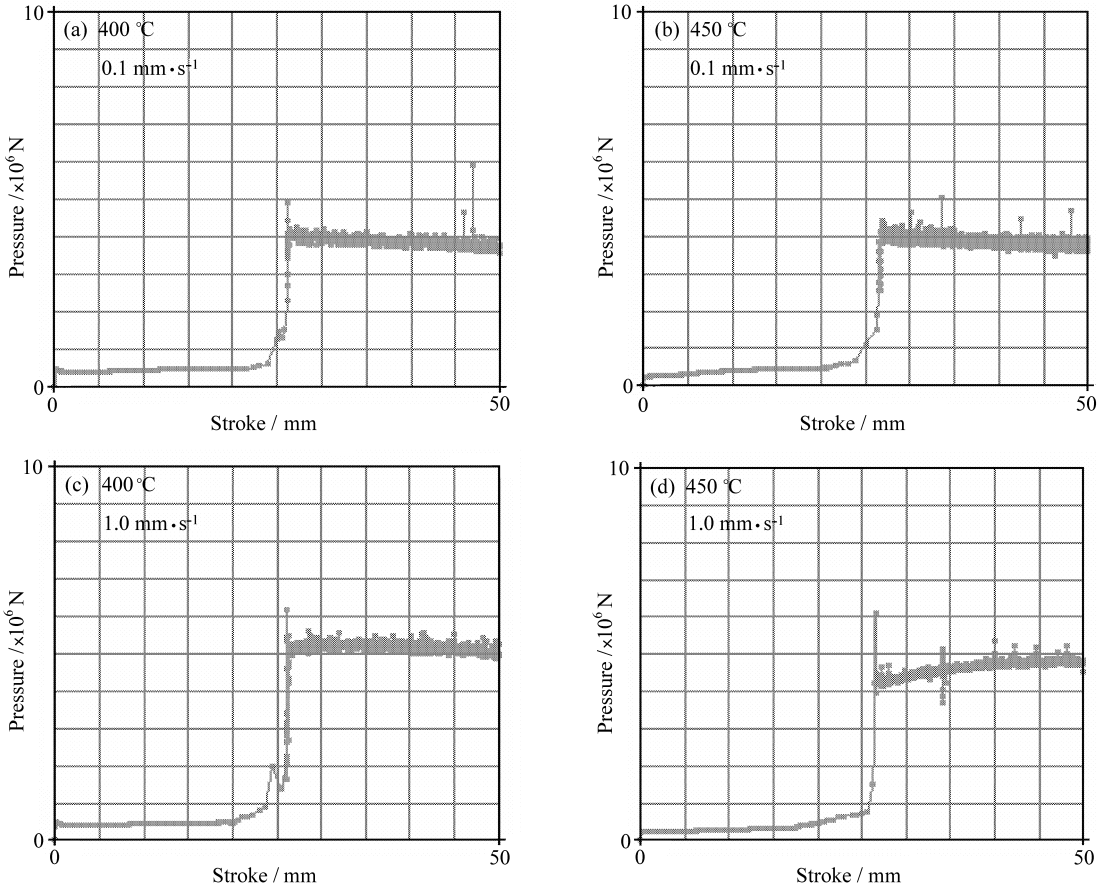

图 7　不同挤压温度和挤压速度下的载荷-行程曲线

Fig. 7　Pressure - stroke curves at different temperatures and velocities

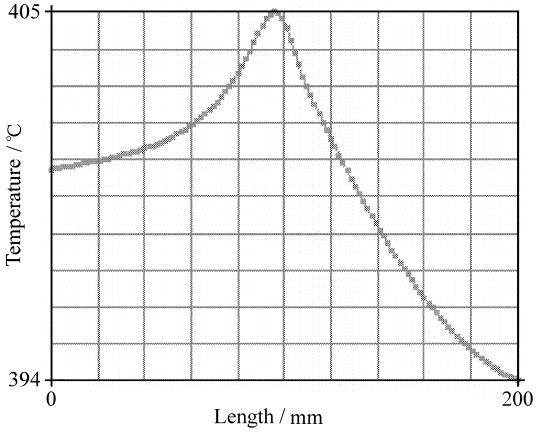

图 8　挤压过程中沿棒材轴线方向温度分布

Fig. 8　Temperature of billet axis in extrusion process

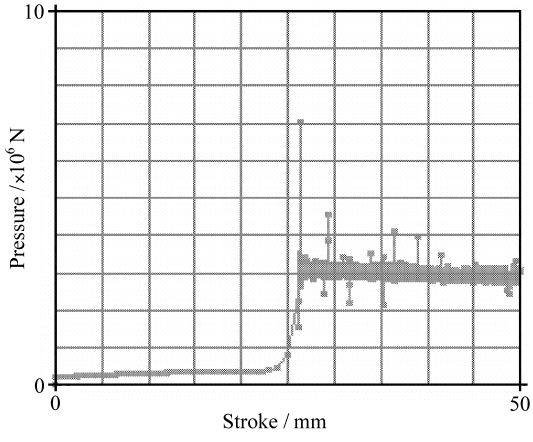

图 9　模具温度为 430℃时载荷-行程曲线

Fig. 9　Pressure - stroke curve when die is 430℃

通过上面模拟所得的载荷-行程曲线可以看出，对于 12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料在挤压比为 30∶1、挤压温度为 400～450℃、挤压速度为 0.1～1.0 mm·s^{-1}的热挤压过程中所需的挤压载荷在 4.0×10^6～5.0×10^6 N 之间，所以该条件下需要挤压机的吨位至少为 500 t。

为了验证模拟结果，采用某公司 700 t 水压机，对 12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料热压锭进行平模热挤压。具体工艺参数为：挤压比为 30∶1，挤压温度为 420℃，挤压速度为 1.0 mm·s^{-1}。图 10 为

12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料挤压后的棒材。从图 10 可以看出棒材表面光滑无裂纹，表明采用工艺参数合理。

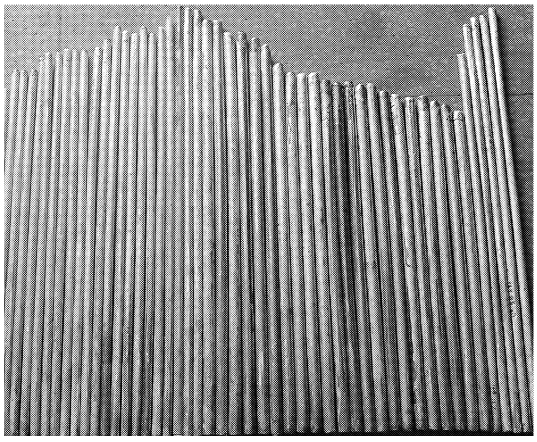

图 10　12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料挤压棒材

Fig. 10　12 vol%SiC_P/2024Al composites bar after extrusion

4　结　论

（1）12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料的平模热挤压过程分为填充挤压、强化挤压和平流挤压 3 个阶段，由于在强化挤压阶段在凹模出口处会形成应力集中区，挤压载荷会迅速大幅度增加，同时塑性变形功转化为热能使得该区域温度上升。

（2）从载荷-行程曲线可以看出，对于 12 vol%SiC_P/2024Al 复合材料在挤压比为 30∶1、挤压温度为 400～450℃、挤压速度为 0.1～1.0 mm·s^{-1}的热挤压过程中所需的挤压载荷在 4.0×10^6～5.0×10^6 N 之间，所以该条件下需要挤压机的吨位至少为 500 t。

（3）通过采用相同工艺，证明模拟结果与实验结果相吻合，说明该工艺的合理性和可行性。

参考文献：

[1] Chawla N, Chawla K K. Metal matrix composites [DB]. USA: Springer Science and Business Media, 2006.

[2] Kainer K U. Metal matrix composites [DB]. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Company KGaA, 2006.

[3] Clyne T, Withers P. An introduction to metal matrix composites [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

[4] Maruyama B. Progress and promise in aluminum metal matrix composites [J]. Advanced Materials and Process Technology, 1998, 2(3): 3-17.

[5] Warren H, Hunt Jr, Darrel R H. Aluminum metal matrix composites [J]. Advanced Materials & Processes, 2004(2): 39-42.

[6] Li Y, Ramesh K T, Chin E S C. The compressive viscoplastic response of an A359/SiC_P metal-matrix composite and the A359 aluminum alloy matrix [J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37: 7547-7562.

[7] Xu Q, Hayes R W, Hunt J R W H. Mechanical properties and fracture behavior of layered 6061/SiC_P composites produced by spray atomization and Co-deposition [J]. Acta Mater, 2000, 97(1): 43-53.

[8] Chawla N, Shen Yulin. Mechanical behavior of particle-reinforced metal matrix composites [J]. Advanced Engineering Materials, 2001(6): 58-67.

[9] Rahmani F, Akhlaghi R. Effect of extrusion temperature on the microstructure and porosity of A356/SiC_P composites [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187/188(12): 433-436.

[10] 曾凡文，张绪虎，胡欣华，等. SiC_P/2A14Al 复合材料的挤压研究 [J]. 稀有金属，1999，23(3)：177-180.
Zeng Fanwen, Zhang Xuhu, Hu Xinhua, et al. Study on extrusion of SiC_P/2A14Al composites [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 1999, 23(3): 177-180.

[11] 张文龙，丁冬雁，姜传海，王德尊. SiC_W/Al 复合材料热挤压模具设计及其对挤压棒材组织和性能的影响 [J]. 宇航材料工艺，1999(1)：32-35.
Zhang Wenlong, Ding Dongyan, Jiang Chuanhai, Wang Dezun. Design of dies for hot extrusion SiC_W/Al composites and its effect on the microstructure and properties of extruded rods [J]. Aerospace Materials & Technology, 1999(1): 32-35.

[12] 贾玉玺，王广春，赵国群. SiC 颗粒增强铝基复合材料的热挤压工艺研究 [J]. 锻压技术，1999(6)：9-10.
Jia Yuxi, Wang Guangchun, Zhao Guoqun. Research on hot extrusion process aluminum alloy matrix composites reinforced by SiC particles [J]. Forging & Stamping Technology, 1999(6): 9-10.

[13] 谢　文，刘　越，张振伟，李德松，毕　敬. 挤压温度对 15 vol%SiC_P/Mg-9Al 镁基复合材料性能与断口形貌的影响 [J]. 复合材料学报，2006，23(6)：127-133.
Xie Wen, Liu Yue, Zhang Zhenwei, Li Desong, Bi Jing. Influence of extrusion temperature on the tensile properties of 15 vol% SiC_P/Mg-9Al composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(6): 127-133.

[14] Lahaie D J, Embury J D, Zok F W. Damage accumulation and mechanical properties of particle-reinforced metal-matrix composites during hydrostatic extrusion [J]. Composites Science and Technology, 2004, 64: 1539-1549.

[15] Herba E M, McQueen H J. Influence of particle reinforcements on 6061 materials in extrusion modeling [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 372(1/2): 1-14.

[16] 雷　敏，张　辉，李落星. 喷射沉积 7075/SiC_P铝基复合材料挤压变形的数值模拟 [J]. 中国有色金属学报，2007，17(12)：2054-2058.
Lei Min, Zhang Hui, Li Luoxing. Numerical simulation on extrusion deformation of spray-deposited 7075/SiC_P aluminum matrix composite [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(12): 2054-2058.

[17] 赵明久，刘　越，毕　敬. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiC_P/2024Al)的热变形行为 [J]. 金属学报，2003，39(2)：221-224.
Zhao Mingjiu, Liu Yue, Bi Jing. Hot deformation behavior of silicon carbide particle reinforced 2024 aluminum-based composite [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(2): 221-224.

[18] 陈火红，尹伟奇，薛小香. MSC. Marc 二次开发指南 [M]. 北京：科学出版社，2004：348-353.