

不同挤压比下 CNTs/Mg 复合材料成形模拟及试验

徐雅琪¹ 梁军浩² 白春龙² 刘 健¹ 高乙尊³

(1.西京学院计算机学院;2.西安工程大学材料科学与工程学院;3.西京学院机械工程学院)

摘 要 基于 Deform-2D 仿真软件,模拟研究了挤压比对碳纳米管(CNTs)含量为 1% 的 CNTs/AZ91D 复合材料挤压成形的影响。在不同挤压比下,对挤压过程中的应变值、应力值以及成形载荷力进行数值模拟分析。结果表明,挤压比越大,复合材料内部的应变值和应力值越大,成形所需载荷也越大;挤压比的变化对轴向中心位置的应变和应力影响不大,对径向方向的应变和应力有较大影响。复合材料中 CNTs 分布在晶界处,当挤压比为 64 : 1 时,CNTs 在复合材料组织中分布更加均匀。

关键词 镁基复合材料;数值模拟;模具设计;挤压模拟

中图分类号 TG376.2;TB331;TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation and Experiment on CNTs/Mg Composites under Different Extrusion Ratio

Xu Yaqi¹, Liang Junhao², Bai Chunlong², Liu Jian¹, Gao Yizun³

(1.School of Computer Science, Xijing University; 2.School of Materials Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University; 3. School of Mechanical Engineering, Xijing University)

Abstract: The influence of extrusion ratio on extrusion forming of 1.0% CNTs/AZ91D composites was simulated by Deform-2D software. Under different extrusion ratios, the strain value, stress value and forming load force during the extrusion process were analyzed. The results indicate that with increasing in the extrusion ratio, the strain and stress of the composites are increased, and the load force required for forming is increased. The variation of extrusion ratio has little effect on the strain and stress along the axial direction, which has great effect on the strain and stress along the radial direction. The carbon nanotubes in the composites are distributed at the grain boundary, which becomes more evenly distributed with the extrusion ratio of 64 : 1.

Key Words: Magnesium Matrix Composites, Numerical Simulation, Mold Design, Extrusion Simulation

镁合金是最轻的金属结构材料,同时还具有较高的阻尼容量和良好的减振性能,可承受较大的冲击振动负荷,适用于制造承受冲击和减振动的零部件。镁基复合材料因其密度小、比强度和比刚度高,且具有良好的尺寸稳定性和优良的铸造性能,在汽车制造工业中用于方向盘减震轴、活塞环、支架、变速箱外壳材料等^[1-5]。同

收稿日期:2022-10-08;**修改稿收到日期:**2022-12-10
基金项目:陕西省教育厅科研计划资助项目(21JK0954);陕西省重点研发计划资助项目(2022NY-085);西安市科技局高校院所科技人员服务企业资助项目(2022JH-RYFW-0045);西安工程大学博士科研启动基金资助项目(BS201863)
第一作者简介:徐雅琪,女,1989 年出生,讲师,西安(710123),E-mail: xuyaqi@xijing.edu.cn
引用格式:徐雅琪,梁军浩,白春龙,等. 不同挤压比下 CNTs/Mg 复合材料成形模拟及试验[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(7):949-954.
XU Y Q, LIANG J H, BAI C L, et al. Simulation and experiment on CNTs/Mg composites under different extrusion ratio[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7):949-954.

[2] 吴国华,陈玉狮,丁文江.镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J].载人航天,2016,22(3):281-292.

[3] 曾小勤,朱庆春,李扬欣,等.镁合金中的第二相颗粒强化[J].中国材料进展,2019,38(3):193-204,250.

[4] CHEN L Y, XU J Q, CHOI H, et al. Processing and properties of magnesium containing a dense uniform dispersion of nanoparticles[J]. Nature, 2015, 528: 539-543.

[5] 金培鹏,韩丽,王金辉.轻金属基复合材料[M].北京:国防工业出版社,2013.

[6] 余挺,王东新,秦春,等.强脉冲电流对 Cu-SiC_p/AZ91D 组织和性能的影响[J].真空科学与技术学报,2018,38(10):906-912.

[7] 余挺,王东新,秦春,等.微重力磁场对 Cu-SiC_p/AZ91D 复合材料组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(10):1112-1115.

[8] 李紫阳,薄文杰,张清林,等.外场对 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料组织和性能的影响[J].复合材料学报,2022,39(1):275-284.

[9] CHEN T J, MA Y, LÜ W B, et al. Grain refinement of AM60B magnesium alloy by SiC particles[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(6): 6732-6738.

[10] 郭学锋.细晶镁合金制备方法及组织与性能[M].北京:冶金工业出版社,2010.

时,也能作为通讯电子产品中的手机、便携电脑等外壳材料^[6-9]。在各种金属基复合材料中,镁基复合材料现已成为最有潜力的金属基复合材料之一^[10-12]。

近年来,研究者对镁合金的挤压过程进行了大量的模拟研究工作。干松林等^[13]采用 Deform-3D 软件对镁合金板材的挤压-剪切过程进行数值模拟,探索塑性变形机理,研究成形过程中温度场、速度场以及成形载荷的演变规律。王敬丰等^[14]采用 Deform-3D 数值模拟软件对超大规格的宽幅薄壁中空型材进行结构优化,明显改善速度分布不均匀的现象,规避充填不足、变形等问题,确定了具有一定成形速度及最小速度均方差的优选工艺,成功制备出光亮平直的超大规格宽幅薄壁中空镁合金型材。黄宣彬等^[15]采用 Deform-3D 软件对 AZ80 镁合金管材静液挤压工艺进行了数值模拟,详细分析了挤压比对静液挤压成形过程的影响。梁书锦等^[16]采用 Deform-2D 软件对 AZ31 镁合金的挤压变形过程进行了数值模拟,得到了坯料温度场分布、应力场分布及挤压载荷等数据,建立了不同工艺参数与形变载荷之间的关系。EIVANI A R 等^[17]对 AZ31 镁合金包套等通道角挤压进行模拟,发现 AZ31 合金的可加工性随着包套厚度的增加而增加,在 175 ℃下获得了具有均匀晶粒结构,平均晶粒尺寸为 11 μm 的试样。FERNÁNDEZ D 等^[18]对钛合金(Ti-6Al-4V)包套镁合金(AZ31B)的挤压过程中产生的损伤进行了模拟分析,在 15°模具外角下,损伤与截面减小无关,在 60°模具外角下,损伤达到最大值,套管内的损伤分布不遵循任何模式,以随机方式出现在不同区域。FARAJI G 等^[19]对 AZ91 镁合金的反挤压过程进行了有限元分析,研究变形比和模具行程对塑性变形行为的影响,发现增加变形率和变形深度可导致更好的变形均匀性和更多的塑性应变。

但目前针对碳纳米管增强镁基复合材料的挤压过程模拟研究报道较少。与镁合金相比,碳纳米管增强镁基复合材料挤压过程中的应力、应变、成形载荷的变化尚未见报道。因此本研究采用 Deform-2D 有限元软件对 CNTs 含量为 1% 的 CNTs/AZ91D 复合材料挤压变形进行数值模拟,研究了挤压比对 CNTs/AZ91D 复合材料的应力、应变和成形载荷的影响,以期为 CNTs/AZ91D 复合材料的热挤压变形提供参考。

1 数值模拟

采用 Deform-2D 有限元软件,其常被用于锻压、挤压、开式和闭式模锻等金属的大变形加工过程研究。采用 CNTs 含量为 1% 的 CNTs/AZ91D 复合材料,在 400 ℃下热挤压,模具材质为 4Cr5MoSiV 模具钢。

为了简化计算,将复合材料平面坯体视为 240 mm×100 mm 的简单矩形,采用 CAD 软件将图形文件输出为 STL 文件,并导入有限元软件。主要模拟坯体的力学行为,忽略模具的力学及热学特性,复合材料挤压几何模型见图 1。

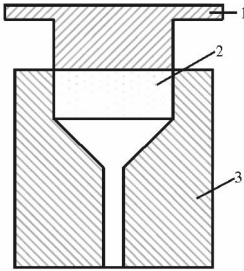


图 1 复合材料挤压几何模型
Fig.1 Geometrical model of extrusion composite
1.凸模 2.坯体 3.凹模

在软件里导入模具及坯体后,对模具及坯体进行参数调整及设定,设定的参数如下:前处理划分网格时,工件采用的是绝对网格划分方式,坯体材料为 1.0% 的 CNTs/AZ91D 复合材料,模具材料为 4Cr5MoSiV,挤压温度为 400 ℃,摩擦介质为润滑油+石墨,摩擦因数为 0.1,步长值为 0.2 mm,模具运动速度为 3 mm/s。

考虑计算精度与模拟速度平衡的前提下,网格单元数为 2 000,既可以保持计算精度,模拟所需要的时间也会减少,同时,将 detailed settings 中 size ratio 设置为 1,以调整窗口内部单元与外部单元的比率。在有限元软件中建立一个新的 CNTs/AZ91D 复合材料模型,将复合材料的应变-流动应力数据导入建立的新材料库,并将材料属性赋予坯体材料。模具材料从有限元软件自带材料库中选取。

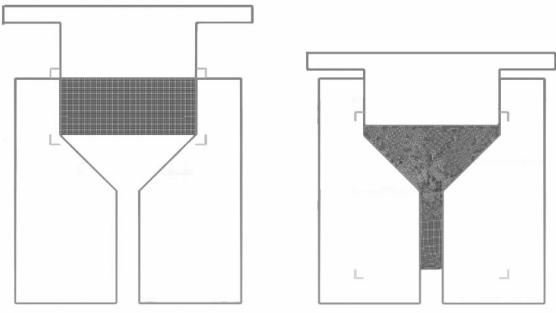
2 模拟及试验结果分析

在模拟中主要是通过使用不同的挤压比来分析其对挤压过程产生的影响,挤压比是坯体挤压前的横截面积与挤压后的工件横截面积之比。设置 4 种挤压比进行模拟,分别为 36∶1、64∶1、100∶1 和 144∶1。坯体的直径为 240 mm,坯体与凹模挤出的尺寸见表 1。

表 1 挤压比与坯体挤出尺寸

Tab.1 Extrusion ratio and extrusion size of body		
挤压比	坯体直径/mm	凹模挤出直径/mm
36∶1	240	40
64∶1	240	30
100∶1	240	24
144∶1	240	20

CNTs/AZ91D 复合材料在挤压下会发生形变,在模拟时对坯体进行网格化的处理,图 2 为挤压前后坯体的网格状态。



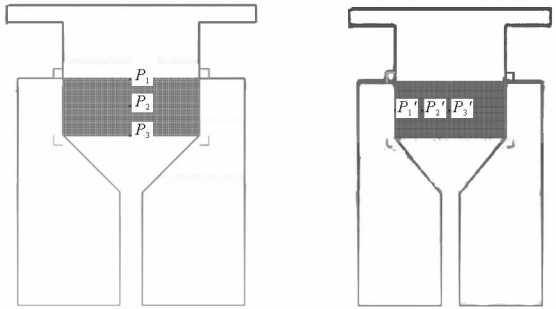
(a) 未挤压坯体网格状态 (b) 挤压过程中坯体网格状态

图 2 复合材料坯体的网格状态

Fig.2 Mesh state of the composite blank

2.1 挤压比对复合材料应变的影响

采用 Deform-2D 软件中的点追踪 (Point Tracking) 功能,在坯体中选择几个点来分析挤压的应力、应变,见图 3。在模拟挤压的过程中,选择了坯体被凸模下压到相对于整个坯体的高度 80% 的节点,然后根据坯体中标记的点来分析不同挤压比对挤压过程产生的影响。

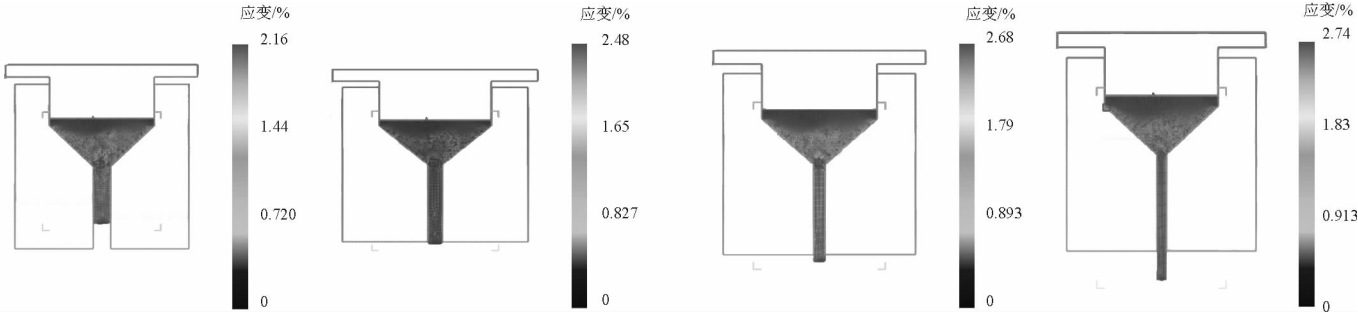


(a) 轴向点 (b) 径向点

图 3 挤压坯体分析点的分布

Fig.3 Point distribution of the squeezing blank

图 4 为不同挤压比下复合材料的应变分布。可以看出,随着挤压比增大,坯体的最大应变值逐渐增大,导致坯体在挤压过程中发生的形变越大。坯体与凸模接触区的网格未发生形变,所以在坯体与凸模接触区的应变值为 0。因为在凹模挤压口的尺寸相较于型腔内的尺寸大幅减小,在凹模挤出口坯体发生的形变最大,坯体在凹模挤压口的应变值最大。因此,在复合材料挤出区从端面到中间应变值越来越大,尤其是在凹模的挤压



(a) 36 : 1 (b) 64 : 1 (c) 100 : 1 (d) 144 : 1

图 4 不同挤压比下复合材料坯体的应变分布

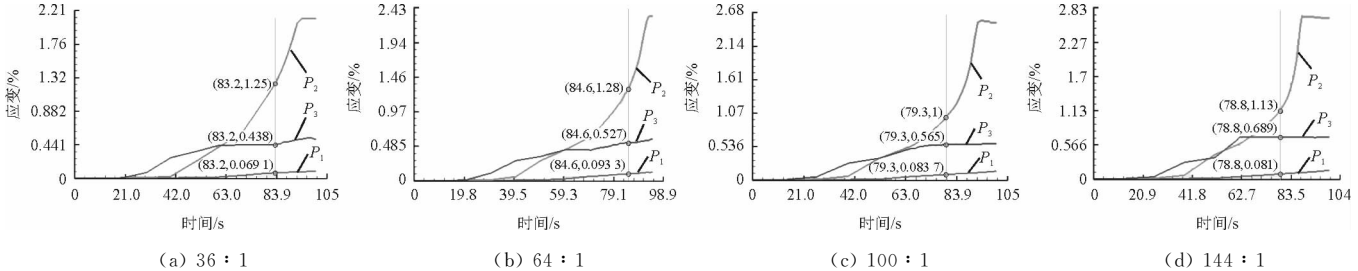
Fig.4 Strain distribution of composite blank under different extrusion ratios

口,应变值最大。

由图 4 还可以看出,复合材料变形量越大,最大应变值越大。与挤压比为 36 : 1 的复合材料相比,挤压比为 144 : 1 的复合材料最大应变值增大了 26.9%。

不同挤压比对复合材料挤压成形过程中轴向点追踪的应变见图 5。可见随着挤压进行,3 个追踪点的应

变值也随之变化,在挤压之初,应变值的大小分别为 P_3 、 P_2 和 P_1 。 P_3 点离凹模挤压口的距离最近,因挤压产生的形变最大,所以对应的应变值最大。当挤压进行到 60 s 时, P_3 点已经通过凹模的挤压口,且通过的坯体不会再产生形变,应变值随着挤压的进行趋于稳定。当 P_2 点接近凹模的挤压口,应变逐渐增加,直到



(a) 36 : 1 (b) 64 : 1 (c) 100 : 1 (d) 144 : 1

图 5 轴向点追踪应变值

Fig.5 Axial point tracking strain value

挤压完成时, P_2 点的应变值达到最大。 P_1 点紧贴在凸模的下壁, 在挤压过程中不会产生形变, 因此 P_1 点的应变值趋于 0。

不同挤压比对复合材料挤压成形过程中径向点追

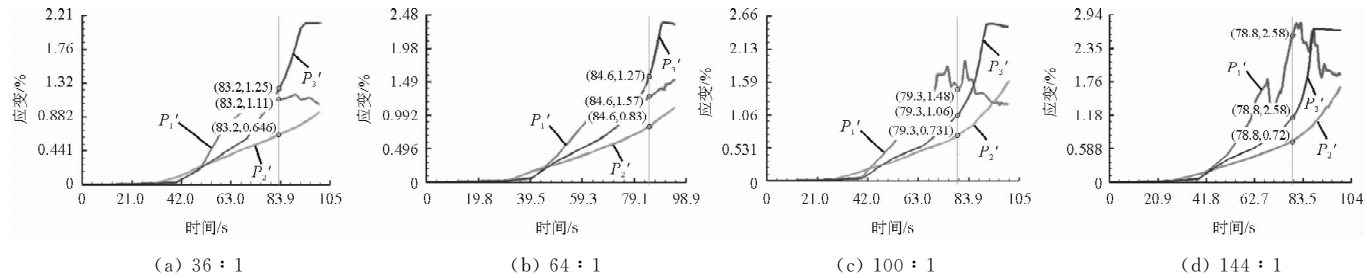


图 6 径向点追踪应变图
Fig.6 Radical point tracking strain diagram

2.2 挤压比对复合材料应力的影响

不同挤压比对复合材料挤压成形过程中最大应力的影响见图 7。可以看出, 随着挤压比增大, 坯体的最大应力值也会逐渐增大。挤压过程中坯体的内部会受到连续挤压, 由于挤压比变大, 会使挤压过程中坯体的变形量增大, 坯体内部受到的应力也会增大。坯体受到的挤压比对凹模挤出部分的应力值无影响, 其应力值为

0。在挤压成形后的部分由于挤出了模具, 坯体不会再发生形变, 所以不再受应力。在凹模的型腔内复合材料从凸模壁到靠近挤压口处的应力值越来越大, 尤其是在凹模的挤压口, 应力值最大, 因坯体在型腔内部变形量大, 其内部受到的应力值也会随着挤压比的增大而增大。

由图7还可看出, 复合材料变形量越大, 最大应力

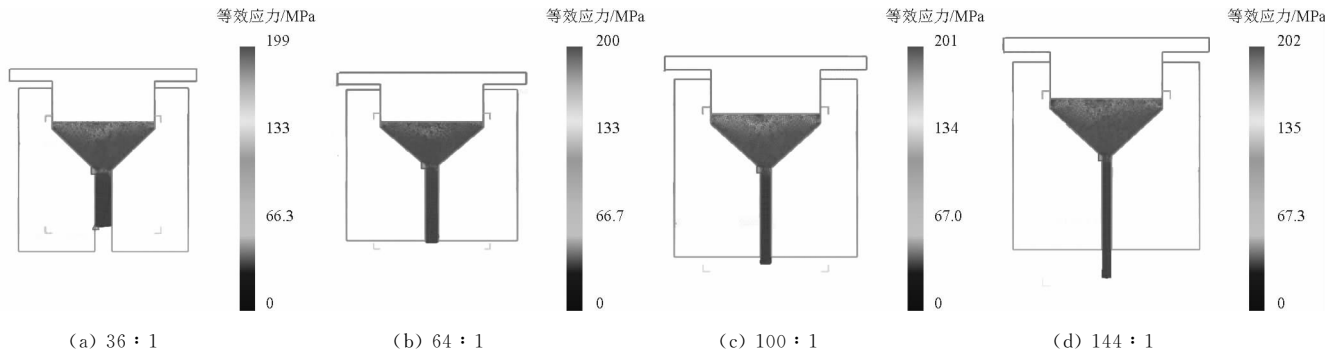


图 7 不同挤压比下复合材料的应力分布

Fig.7 Stress variation of the composites under different extrusion ratios

值越大。与挤压比为 36 : 1 的相比, 挤压比为 144 : 1 的复合材料最大应力值增大了 1.5 %。

不同挤压比下复合材料挤压成形过程中轴向点追踪的应力见图 8。 P_3 还在型腔内部时受到的应力值最大, 当坯体被挤出型腔之后应力值突然下降至 0, 这是

因为 P_3 在型腔内部的变形量最大, 挤出型腔之后, 不会再发生形变。被挤出型腔之前, P_2 受到内部的挤压变形量最大, 直到被挤出型腔之前都是一直增大状态, 当 P_2 被挤出型腔后, 不再发生形变, 应力值减小到 0。 P_1 与凹模内壁相接, 受到的变形量不大, 所以其应力值

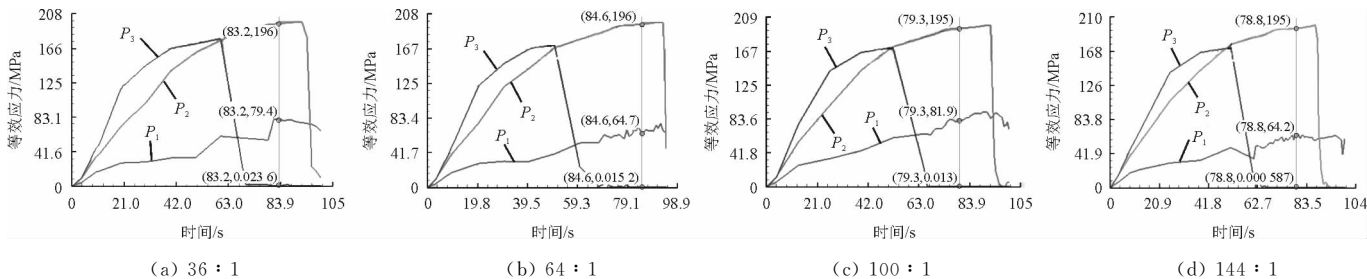


图 8 复合材料不同挤压比下轴向点应力图

Fig.8 Axial point stress diagram of the composites with different squeezing ratios

会随着挤压过程的进行缓慢增长。

2.3 挤压比对复合材料成形载荷的影响

在挤压过程中,因为挤压比的不同,当挤压速度一定时,挤压过程中的成形载荷也会因为挤压比的改变而改变,所以需要分析成形载荷的大小是否会被不同挤压比所影响。图 9 为不同挤压比下复合材料的成形载荷力曲线。可以看出,随着挤压比增大,坯体受到的最大

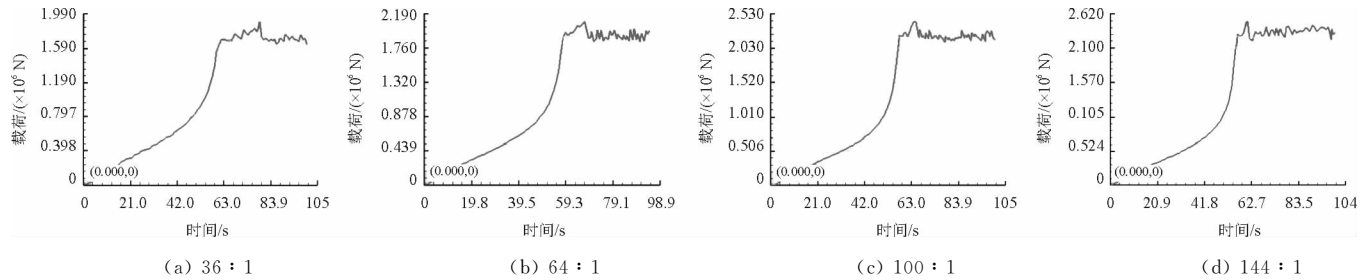


图 9 不同挤压比下复合材料的成形载荷力曲线

Fig.9 Forming load force curves of the composites under different extrusion ratios

由图 9 还可以看出,复合材料变形量越大,成形载荷越大。与挤压比为 36 : 1 的复合材料相比,挤压比为 144 : 1 的复合材料成形载荷增大了 31.6%。

2.4 复合材料挤压成形试验

通过以上分析可知,随着挤压比增大,复合材料挤压所需载荷逐渐增大,在挤压比为 64 : 1 时,所需成形载荷更趋近于稳定,且应力分布更加均匀。为了验证模拟结果,采用半固态加工技术制备了 CNTs/AZ91D 复合材料坯体,在挤压温度为 400 ℃,挤压速度为 3 mm/s,挤压比为 36 : 1 和 64 : 1 下制备了挤压态的 CNTs/AZ91D 复合材料,并对挤压态的复合材料进行 T6 热处理(400 ℃×2 h 固溶处理和 168 ℃×16 h 时效处理)。

挤压态 CNTs/AZ91D 复合材料的微观组织见图 10。可以看出,复合材料由 α-Mg(白色)和 β-Mg₁₇Al₁₂(灰色)组成。当挤压比为 36 : 1 时,晶粒尺寸约为 1.9 μm,挤压比增加至 64 : 1 时,晶粒尺寸约为 1.4 μm,减小了 26.3%,同时组织中的 β-Mg₁₇Al₁₂ 分布更加

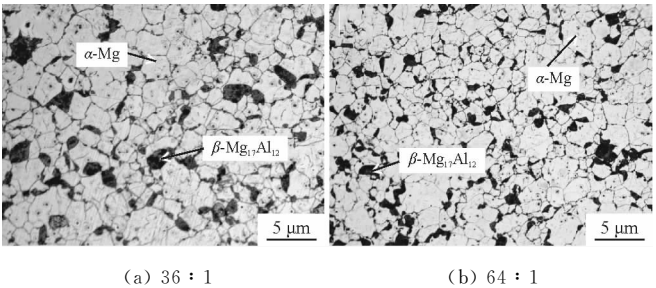


图 10 不同挤压比下 CNTs/AZ91D 复合材料的微观组织
Fig.10 Microstructures of CNTs/AZ91D composites under different extrusion ratios

成形载荷逐渐增大。在挤压比为 36 : 1 时的最大成形载荷为 1.9 MN,挤压比为 64 : 1 时的最大成形载荷为 2.1 MN,在挤压比为 100 : 1 时的最大成形载荷为 2.41 MN,144 : 1 的最大成形载荷为 2.50 MN。当挤压比增大时,凹模的型腔挤出口会随之减小,挤压变困难,挤压时所需要的成形载荷越大,所以最大成形载荷会随着挤压比的增大而增大。

均匀,即碳纳米管更加均匀地分散在组织中,这与挤压过程中应力分布均匀性有关,也验证了模拟结果的有效性。图 11 为 CNTs/AZ91D 复合材料晶界处的 SEM 形貌。可以看出,在热处理后碳纳米管存在晶界处,在 β-Mg₁₇Al₁₂ 中呈絮状形态。

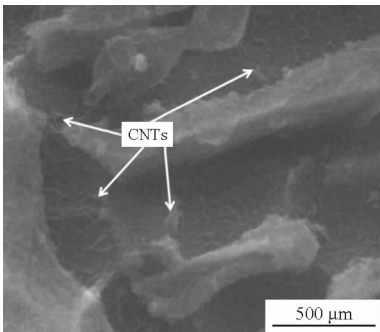


图 11 CNTs/AZ91D 复合材料晶界处 SEM 形貌
Fig.11 SEM morphology of CNTs/AZ91D composites at grain boundary

3 结 论

(1)CNTs/Mg 复合材料棒材的挤压应力、应变和成形载荷均随着挤压比的增大而增大。

(2)随着挤压比增加,CNTs/Mg 复合材料沿径向方向由中心到表面应力值逐渐减小;沿轴向方向距模口越近,应力值越小。

(3)随着挤压比从 36 : 1 增大至 64 : 1,CNTs/Mg 复合材料晶粒尺寸减小了 26.3%,其中碳纳米管分散更加均匀,和当挤压比为 64 : 1 时,复合材料内部应力分布更加均匀的模拟结果一致。

参 考 文 献

- [1] 武高辉, 匡泽洋. 装备升级换代背景下金属基复合材料的发展机遇和挑战[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 79-90.
- [2] 周国华, 曾效舒, 袁秋红. 铸造法制备 CNTs/AM60 镁基复合材料的研究[J]. 铸造, 2009, 58(1): 43-46.
- [3] 李新林, 王慧远, 姜启川. 颗粒增强镁基复合材料的研究现状及发展趋势[J]. 材料科学与工艺, 2001, 9(2): 219-224.
- [4] PUROHIT R, DEWANG Y, RANA R S, et al. Fabrication of magnesium matrix composites using powder metallurgy process and testing of properties[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 6 009-6 017.
- [5] EBRAHIMI M, ZHANG L, WANG Q, et al. Damping performance of SiC nanoparticles reinforced magnesium matrix composites processed by cyclic extrusion and compression[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 11(5): 1 608-1 617.
- [6] 闫蕴琪, 陈琦, 翁文凭, 等. AZ31 合金板材的显微组织、拉伸性能与冲压工艺探索[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(4): 670-673.
- [7] 廖利华, 滕新营, 张修庆, 等. 镁基复合材料界面显微结构与优化[J]. 热加工工艺, 2004(5): 53-55.
- [8] MA G, XIAO H, YE J, et al. Research status and development of magnesium matrix composites[J]. Materials Science and Technology, 2020, 36(6): 645-653.
- [9] TURAN M E, SUN Y, AKGUL Y. Mechanical, tribological and corrosion properties of fullerene reinforced magnesium matrix composites fabricated by semi-powder metallurgy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 1 149-1 158.
- [10] 丁鑫, 陈瑞润, 陈晓宇, 等. 镁基储氢合金吸放氢机理及组织与性能调控[J]. 自然杂志, 2020, 42(3): 179-186.
- [11] SARDAR S, KARMAKAR S K, DAS D. Ultrasonic assisted fabrication of magnesium matrix composites: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 3 280-3 289.
- [12] GUPTA N, LUONG D D, CHO K. Magnesium matrix composite foams-density, mechanical properties, and applications[J]. Metals, 2012, 2(3): 238-252.
- [13] 干松林, 胡红军, 张慧玲, 等. AZ31 镁合金板材连续挤压-剪切成形的数值模拟及实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(1): 1-17.
- [14] 王敬丰, 彭星, 王奎, 等. 超大规格宽幅薄壁中空镁合金型材挤压成形的数值模拟及实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2 809-2 819.
- [15] 黄宜彬, 吴志林, 袁人枢, 等. AZ80 镁合金扩管静液挤压成形的数值模拟与试验[J]. 热加工工艺, 2017, 46(11): 102-106.
- [16] 梁书锦, 刘祖岩, 王尔德. AZ31 镁合金挤压过程的数值模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(10): 2 471-2 475.
- [17] EIVANI A R, MIRGHASEMI S M, SEYEDEIN S H, et al. Simulation of deformation and fracture initiation during equal channel angular pressing of AZ31 magnesium alloy with covered tube casing [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021(12): 1 913-1 923.
- [18] FERNÁNDEZ D, RODRÍGUEZ A, CAMACHO A M. Analysis of AZ31B-Ti-6Al-4V bimetallic extrusion by numerical simulation and Taguchi method[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1 193(1): 012 080.
- [19] FARAJI G, JAFARZADEH H, JEONGH J, et al. Numerical and experimental investigation of the deformation behavior during the accumulative back extrusion of an AZ91 magnesium alloy[J]. Materials & Design, 2012, 35: 251-258.

(编辑:刘卫)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司



地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

