

挤压温度对石墨烯/7075Al 复合材料分流模挤压制品纵向焊缝微观组织和力学性能的影响

娄淑梅, 周 乐, 陈 鹏, 杜安博, 赵 豪, 苗 雨

(山东科技大学 智能装备学院, 山东 泰安 271019)

摘 要:为提高铝基复合材料分流模挤压过程中纵向焊缝的焊合质量,以石墨烯增强 7075 铝基复合材料(GNP/7075Al)分流模挤压制品为研究对象,主要探讨了挤压温度对铝基复合材料分流模挤压制品纵向焊缝微观组织和力学性能的影响。结果显示:随着挤压温度升高,金属原子的扩散速度增加,粗大的第二相明显减少,更多的第二相粒子逐渐溶解到铝基体和焊缝中。适当提高挤压温度,有利于形成良好的焊合界面,提高纵向焊缝的质量,但如果温度过高,一方面会引起基体过度动态再结晶等软化行为,从而削弱形变强化效果,另一方面会使焊合静水压力降低,影响增强相石墨烯的完整性,进而引起整体强度下降。在 480 °C 挤压温度下,基体适度的动态再结晶和固溶增强以及强化相石墨烯的最佳状态使得挤压态纵向焊缝的焊合线最窄,分流焊合效果最好,焊合质量和综合力学性能最优,纵向焊缝的横向抗拉强度为 279.98 MPa。

关键词:复合材料;分流模挤压;挤压温度;微观组织;力学性能

中图分类号:TG376.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)11-3575-08

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.202402147

Effect of extrusion temperature on the microstructure and mechanical properties of longitudinal weld in a porthole die extruded GNP/7075Al composite

LOU Shu-mei, ZHOU Le, CHEN Peng, DU An-bo, ZHAO Hao, MIAO Yu

(College of Intelligent Equipment, Shandong University of Science and Technology, Taian 271019, China)

Abstract: The effects of extrusion temperature on the microstructure and mechanical properties of longitudinal welds in aluminum matrix composites were investigated using graphene-reinforced 7075 aluminum matrix composites (GNP/7075Al) to enhance the welding quality during shunt die extrusion process. The results show that with the increase of extrusion temperature, the diffusion rate of metal atoms increases, the coarse second phases are obviously reduced, and more second phase particles are gradually dissolved into the aluminum matrix as well as the longitudinal weld. Appropriately increasing the extrusion temperature is conducive to forming a good welding interface and improving the quality of longitudinal

收稿日期:2024-03-11.

基金项目:国家自然科学基金项目(51705295);山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KE013).

作者简介:娄淑梅(1979-),女,教授,博士.研究方向:材料加工工艺控制与塑性成型过程数值模拟.

E-mail:msl7119@163.com

weld. However, if the temperature is too high, the soft processes for the matrix such as dynamic recrystallization will decrease the deforming hardening of the extrusion, the weld pressure decrease, and the structure integrity of the graphene will be destroyed, decreasing the properties of the extrudate. At the extrusion temperature of 480 °C, the welding line is the narrowest and the weld property is the best. Moderate dynamic recrystallization, solid solution strengthening of the matrix and the best state of the enhanced phase graphene brought the best weld quality and comprehensive mechanical properties of the extrudate with the tensile strength of 279.98 MPa.

Key words: composites; porthole die extrusion; extrusion temperature; microstructure; mechanical property

0 引言

石墨烯增强7075铝基复合材料具有质量轻、比强度和比刚度大、断裂韧度高、耐磨性能好等优点,在航空航天以及国防等领域应用前景广阔^[1,2]。平面分流模挤压是生产铝基复合材料复杂截面制品最常用的方法^[3-5],但其不可避免产生的纵向焊缝区域是整个挤压制品中综合力学性能最薄弱的部位^[6,7]。挤压温度是分流模挤压工艺中最关键的参数,直接影响到纵向焊缝的焊合质量。

近年来,许多学者对挤压参数对分流模挤压制品纵向焊缝质量的影响进行了研究。陈高进^[8]研究了挤压温度对7075铝合金分流模挤压制品微观组织演化和力学性能的影响规律。结果表明,随着挤压温度升高,分流模挤压制品纵向焊缝的焊合质量也得到提高。Yu等^[9]研究了挤压速度对铝合金分流模挤压制品纵向焊缝的微观组织及力学性能的影响。结果表明,提高挤压速度,挤压制品的硬度、强度和延展性也会提高。Liu等^[10]利用Deform-3D软件研究了挤压速度对AZ31镁合金分流模挤压过程中焊缝金属流动行为的影响。结果表明,随着挤压速度增加,焊合面温度、焊合压力、焊合平面上的有效应力会同时增加。Zhou等^[11]基于响应面分析方法,以7075铝合金为研究对象,分析了分流模挤压过程中挤压速度、摩擦因数和坯料初始温度对极限载荷的影响。结果表明,在一定的参数范围内,摩擦因数与极限载荷成正比,坯料初始温度与极限载荷成反比。对于加入石墨烯增强相的铝基复合材料,挤压温度不仅会对铝合金基体产生影响,还会对石墨烯的结构完整性产生影响,进而影响复合材料整体的力学性能^[12]。然而,有关石墨烯增强铝基复合材料分流模挤压制品的纵向焊缝和挤压温度对挤压制品微观组织和力学性能影响的研究却鲜

有报道^[14]。

本文在课题组前期采用粉末冶金法制备的0.5% GNP/7075Al复合材料基础上进行分流模挤压实验^[15],分析420~510 °C范围内挤压温度对铝基复合材料分流模挤压制品纵向焊缝微观组织和力学性能的影响,以期合理选择石墨烯增强铝基复合材料分流模挤压工艺提供参考依据。

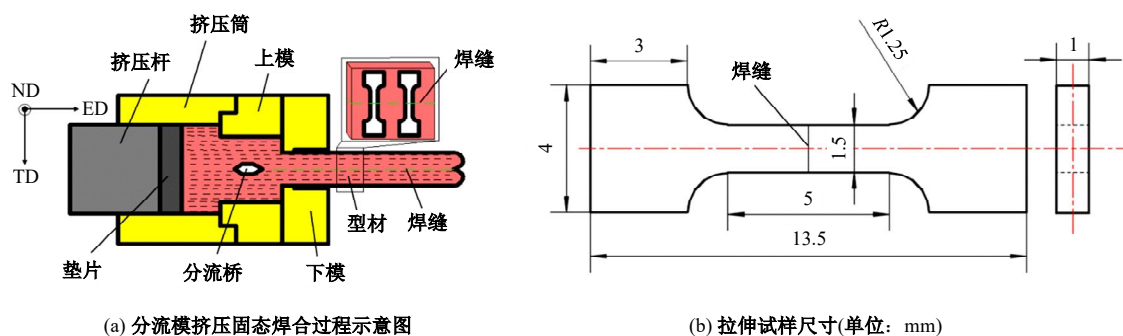
1 材料与方法

1.1 实验材料

以平均粒径约为33.9 μm的7075铝合金粉末作为基体材料,以石墨烯纳米片(GNP)作为增强体材料,采用超声分散和湿法球磨工艺制得0.5% GNP/7075Al复合材料粉末^[15]。首先对复合材料粉末进行热压烧结,加工成φ为40 mm×70 mm的圆柱坯料,随后进行均质化处理:将坯料放入箱式电阻炉,以10 °C/min的升温速率加热到475 °C,保温12 h后随炉冷却。将均质化处理后的圆柱坯料放入挤压模具,在载荷为200 t的微机控制伺服液压机上分流模挤压试验,设定挤压比为10.5,挤压速度为6 mm/min,挤压温度分别为420、450、480和510 °C,得到横截面为8 mm×15 mm的矩形挤压制品,焊合过程如图1(a)所示。其中挤压方向用ED表示,制品宽度方向用TD表示,厚度方向用ND表示。

1.2 实验方法

在制备金相、XRD和SEM试样时,观测面为TD-ED中心截面。金相试样尺寸为15 mm×10 mm×4 mm,经机械研磨抛光后使用Keller试剂对观察面进行表面腐蚀,腐蚀时间为20~30 s,在Primotech 50 X~1 000 X光学显微镜下观察金相的微观组织;采用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)观察试样拉伸断口形貌;第二相分布情况



(a) 分流模挤压固态焊合过程示意图

(b) 拉伸试样尺寸(单位: mm)

图 1 分流模挤压固态焊合过程示意图与拉伸试样尺寸

Fig. 1 Schematic diagram of welding in the porthole die extrusion and sampling of tensile specimen

使用 SEM-EDS 能谱测定,相应的物相分析选用 DX-2700X 射线衍射仪进行评定。在电子万能拉力试验机 Zwick Z2.5 TH 下进行小尺寸室温拉伸测试,设定应变率为 $0.5 \times 10^{-3}/s^{-1}$ 。为确保试样力学性能的稳定性,拉伸试样均在制品尾部中心处切取,取样方向垂直于挤压方向(90°试样)。根据标准确定测样尺寸,纵向焊缝区域在拉伸试样的标距中心处,拉伸试样尺寸如图 1(b)所示。采用显微硬度计(型号为 Q10M)沿焊合线向两侧进行硬度测试,硬度测试载荷为 0.5 kg,压针停留时间为 10 s。为确保测量结果准确,试样横向测量 9 个点的硬度值,点与点间隔 1 mm,每个横向位置进行 3 次测量并取平均值。

2 结果及分析

2.1 挤压温度对纵向焊缝微观组织的影响

图 2 和图 3 分别为不同挤压温度下制品纵向焊缝的中心截面金相图和 SEM 图。从图 2(a)和图 3(a)可以看出,当温度为 420 °C 时焊缝区域明显,说明此时焊缝处石墨烯分布不均匀,团聚现象严重。从图 2(b)和图 3(b)可以看出,当温度为 450 °C 时焊缝区域仍较为明显。从图 2(c)和图 3(c)可以看出,当温度为 480 °C 时焊缝区域与基体区域区别不明显,焊合质量最好,说明此温度下,石墨烯均匀分布在铝基体中,且足以使 $MgZn_2$ 相充分溶于铝基体并几乎消失。从图 2(d)和图 3(d)可以看出,当挤压温度升高到 510 °C 时,焊缝处颜色逐渐加深,焊合线变得明显,这是因为当挤压温度升高到固液相线附近时,制品的金属流动应力减小,致使焊合室内的静水压力减小,焊合质量下降,焊缝重新变得明显;另一方面,挤压温度过高也会发生晶粒严重长大现象,导致焊缝重新变得明显^[16,17]。从图 3 的 SEM 图中可以看到材

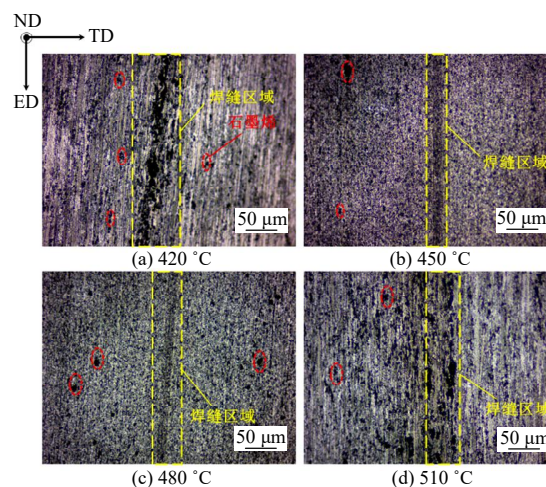


图 2 不同挤压温度的分流模挤压制品金相图

Fig. 2 Metallographic diagram of extrudate with different extrusion temperatures

料中包含多种第二相,对其进行 EDS 能谱分析,EDS 检测位置如图中字母所示。第二相粒子的 EDS 图如图 4 所示,其中较粗大的第二相中含有 Al、Cu、Mg 元素,含量分别为 49.60%、26.80%、23.60%(图 4(a)),三者比例约为 2:1:1,可确定其为 Al_2CuMg 相,在图 3 中用蓝色箭头标注。亮白色细小的第二相粒子含有 Al、Zn、Mg 元素,Zn 元素与 Mg 元素的比例约为 2:1(图 4(b)),可确定其为 $MgZn_2$ 相^[18],在图 3 中用黄色椭圆标注。链条状第二相粒子含有 Al、Cu、Fe 元素(图 4(c)),三者比例约为 23:1:4,推测其为含 Fe 的 $Al_{23}CuFe_4$ 相^[19],在图 3 中用绿色箭头标注。石墨烯用黑色箭头标注。有些块状的第二相不是单一的第二相,而是由两种或两种以上的第二相组成的复合相,有的由 Al_2CuMg 相和 $MgZn_2$ 相组成,还有的由 Al_2CuMg 相和 $Al_{23}CuFe_4$ 相组成(图 4(d))。随着挤压温度升高,金属原子的扩散速度增加,第二相逐渐溶解到铝基体中,更多的第二相

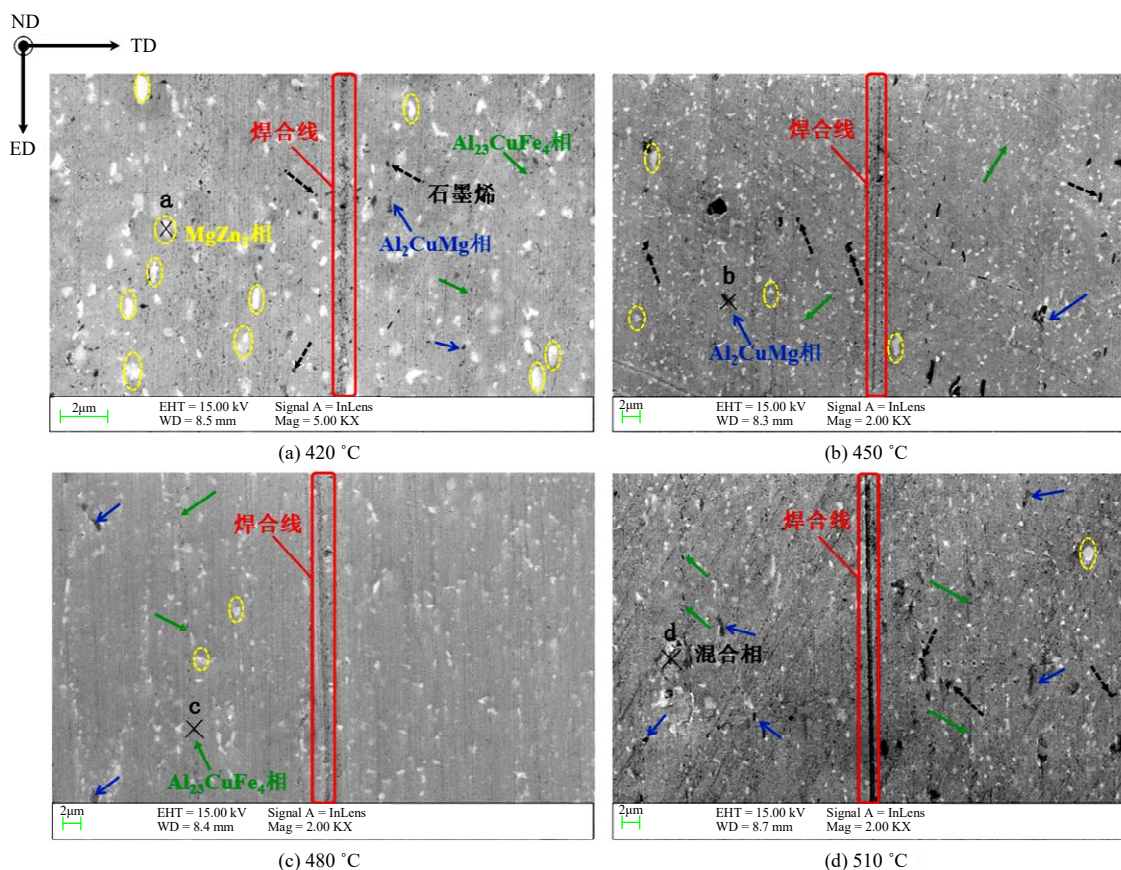


图 3 不同挤压温度的分流模挤压制品 SEM 图

Fig. 3 SEM images of the porthole die extrudate with different extrusion temperatures

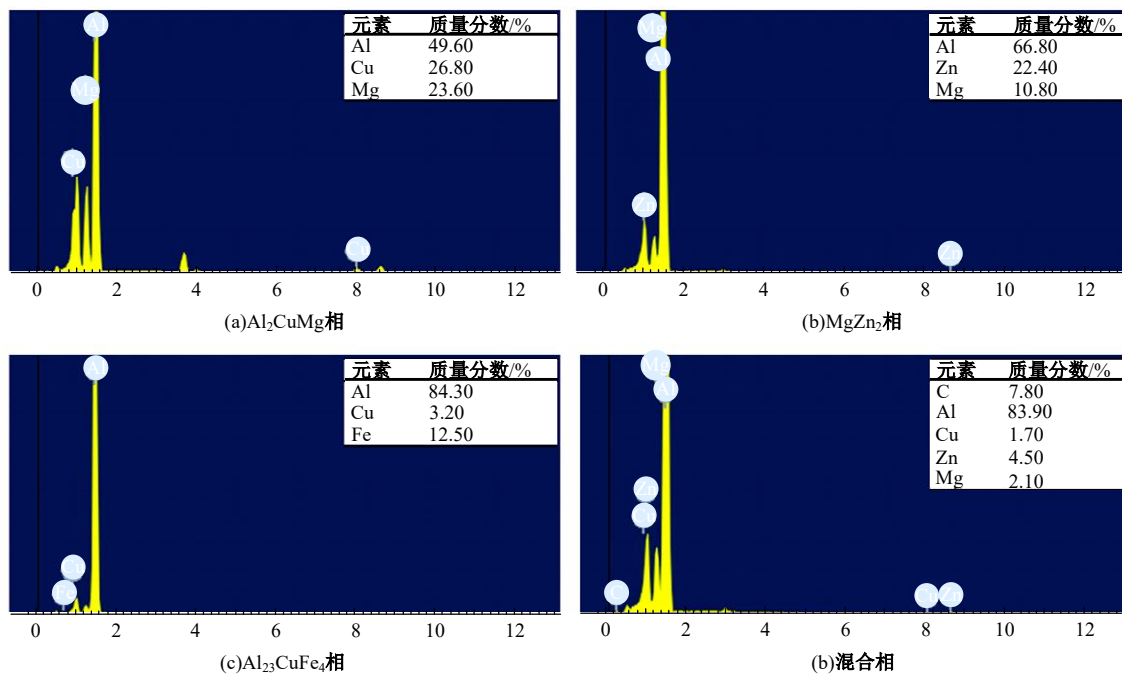


图 4 挤压制品第二相粒子 EDS 图

Fig. 4 EDS diagram of the second phases of the extrudate

呈细小状分布,焊合线宽度先减小后变大^[20]。

为进一步确定 GNP/7075Al 复合材料经过不

同挤压温度分流焊合后的物相组成,采用 XRD 测试挤压制品焊缝区第二相的种类及其衍射峰,如

图 5 所示^[21]。从图谱中可以看出,当挤压温度为 420、450、480 和 510 °C 时,分流模挤压试样的所有衍射峰位置几乎完全相同,包含 MgZn_2 相、 Al_2CuMg 相和 $\text{Al}_{23}\text{CuFe}_4$ 相,这与图 4 的 EDS 能谱分析结果一致。随着挤压温度升高,第二相的峰值强度都呈现升高的趋势,说明第二相粒子随着挤压温度的升高都发生了长大,这是由于挤压温度升高,对再结晶产生促进作用的第二相团簇减少,对再结晶的促进作用产生不利影响,晶粒反而长大^[22]。当挤压温度为 510 °C 时,除包含以上各种第二相的衍射峰外,还出现了较明显的脆性相 Al_4C_3 衍射峰, Al_4C_3 过量会对铝基复合材料的综合力学性能产生不利影响^[23]。当挤压温度为

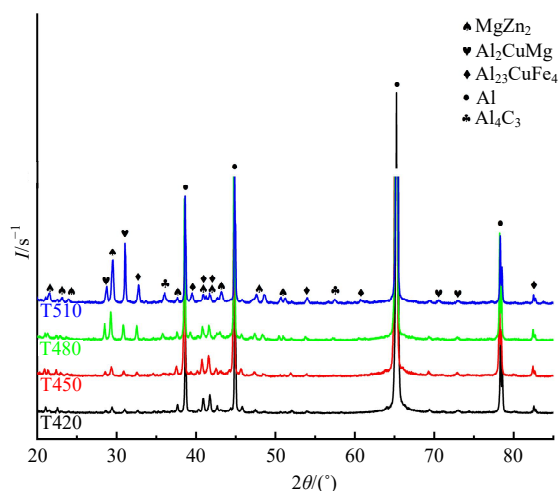


图 5 不同挤压温度制品 XRD 表征图谱

Fig. 5 XRD characterization of the extrudate according to different extrusion temperature

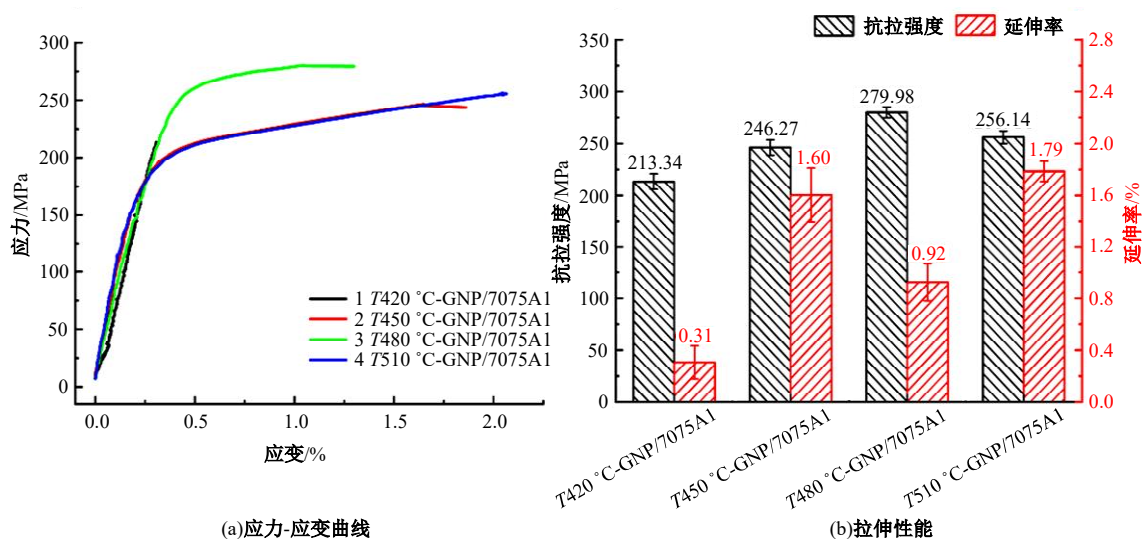


图 6 不同挤压温度下制品拉伸试验工程应力-应变曲线与制品的拉伸性能

Fig. 6 Engineering stress-strain curves and tensile properties at different extrusion temperatures

480 °C 时,虽然可以观测到 Al_4C_3 衍射峰,但强度比 510 °C 时低很多,适量的 Al_4C_3 有利于 Al 和 C 形成良好界面^[13]。

2.2 挤压温度对纵向焊缝力学性能的影响

研究表明,分流模挤压制品的力学性能受纵向焊缝处微观组织和焊合质量的共同影响^[24],图 6(a)为不同挤压温度下制品拉伸试验的工程应力-应变曲线,图 6(b)为挤压温度与制品拉伸性能的关系。可以看出,随着挤压温度升高,制品抗拉强度先逐渐上升,当挤压温度达到 510 °C 时又出现下降。当挤压温度为 480 °C 时,抗拉强度为 279.98 MPa,相较于 420 °C 时提高了 31.24%,在此温度下抗拉强度达到最大值。这主要是由于挤压温度升高,一方面金属原子在焊合室固态焊合过程中扩散速度加快,使焊合更加牢固,从而提升了制品的焊合质量;另一方面,480 °C 高于 7075 铝合金基体的固溶温度,且动态再结晶程度有所提高,而适当的动态再结晶和固溶强化效果均有利于制品抗拉强度提高。当挤压温度为 510 °C 时,抗拉强度为 256.14 MPa,相较于 480 °C 时降低了 8.51%。过高的温度会促使石墨烯与铝基体产生反应,生成脆性相 Al_4C_3 , Al_4C_3 作为裂纹源易引起碳/铝界面应力开裂^[25],同时界面反应破坏了石墨烯作为增强相的结构完整性,从而进一步降低制品的力学性能^[26]。此外,此温度下延伸率较大,这主要是因为温度升高,基体的再结晶程度提高,金属塑性成型过程中的动态软化作用明显。

图 7 为不同挤压温度下制品沿挤压方向上的显微硬度分布图。可以看出,当挤压温度为 420、450、480、510 °C 时制品基体区的平均显微硬度值分别为 106.5、112.33、126.67、119.67 HV; 制品焊缝区的平均显微硬度值分别为 93.1、101.4、118.7、112.4 HV。随着挤压温度升高,挤压制品的平均显微硬度值先增大后降低,当挤压温度为 480 °C 时,制品基体区和焊缝区的平均显微硬度都达到最大值,这是受晶粒尺寸大小和分流模挤压出口温度的影响。挤压温度越高,第二相粒子更易溶解到铝基体中,固溶强化效果越好^[27];制品在出口处的温度越高,挤出后的过饱和度就越大,有利于制品显微硬度提高。当挤压温度为 510 °C 时,再结晶等软化行为消除了挤压的形变强化作用,从而使平均显微硬度值降低。对于同一挤压温度下的分流模挤压制品来说,焊缝区平均显微硬度值最低。这是由于分流模挤压制品在焊缝区几乎没有强化相析出,且受到巨大的焊合压力后,制品发生剧烈变形,动态再结晶消耗了大量的位错能,削弱了焊缝区的硬度,导致焊缝区出现软化现象^[28]。随着与焊缝距离增大,制品的平均显微硬度值逐渐增大,当距离焊缝 2 mm 时显微硬度值趋于稳定。随着挤压温度增加,制品在基体区和焊缝区的平均显微硬度差值越来越小,当挤压温度为 510 °C 时,制品基体区和焊缝区的平均显微硬度差值最小,这主要是因为此温度下生成了较多的 Al_4C_3 ,缩小了焊缝区和基体区的硬度差。综上所述,制品的显微硬度受动态软化程度和第二相粒子的析出情况等多重因素的

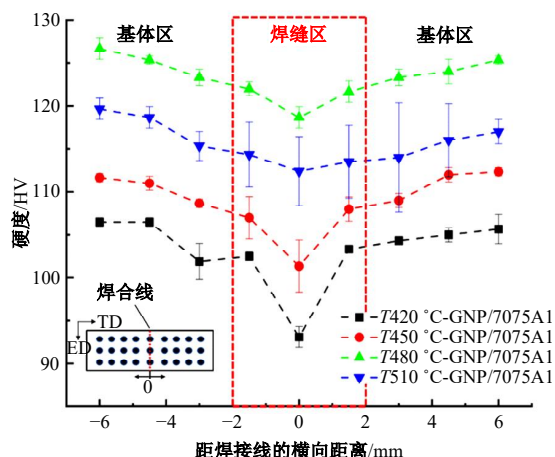


图 7 不同挤压温度下制品显微硬度分布图

Fig. 7 Microhardness distribution of products at different extrusion temperatures

影响^[29]。

2.3 分流模挤压制品拉伸断口形貌

图 8 为不同挤压温度分流模挤压制品拉伸断口形貌图。可以看出,不同挤压温度下的试样断口都具有较深韧窝的韧性断裂特征。Shen 等^[30]指出韧窝深浅反映了原子相互结合的强弱,较深的韧窝预示着较强的原子结合。从图中可以看出,450 °C 时的韧窝比 420 °C 时更深,这与图 6(b)当温度上升到 450 °C 时,抗拉强度和延伸率均升高的结果一致。当挤压温度为 480 °C 时,韧窝均匀且较深,撕裂棱光亮,表现出明显的韧性断裂特征,说明挤压制品金属原子间结合强度较高。同时观察到有石墨烯附着在韧窝内壁上,说明此温度更有利于发挥石墨烯作为增强相的作用,纵向焊缝焊合效果更好,这与图 6(b)当温度上升到 480 °C 时,抗拉强度达到最大值的结果一致。另外,510 °C 时的韧窝分布比 480 °C 更均匀且更深,同时可以看到韧窝内部和韧窝壁上有破碎的块状物,这是因为石墨烯与铝基体在高温下反应生成 Al_4C_3 ,导致抗拉强度降低。

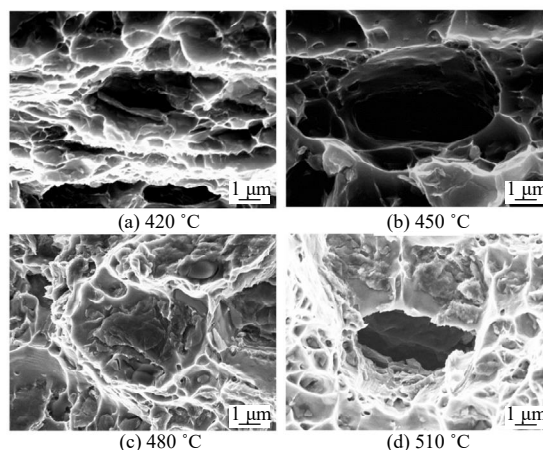


图 8 不同挤压温度制品的拉伸断口图

Fig. 8 Tensile fractographies of the extrudate according to different extrusion temperatures

3 结 论

(1) 综合分析 0.5% GNP/7075Al 复合材料分流模挤压制品的微观组织和力学性能,可以看出,随着挤压温度升高,第二相粒子在 Al 基体中分布更均匀。制品纵向焊缝处力学性能受挤压温度的影响很大,适当提高挤压温度,有利于形成良好的焊合界面,提高纵向焊缝的力学性能。

(2) 当挤压温度为 480 °C 时,观察到制品韧窝

均匀且较深,撕裂棱光亮且较薄,表现出明显的韧性断裂特征,说明此温度条件下石墨烯与铝基体界面结合良好,更有利于发挥石墨烯作为增强相的作用,纵向焊缝焊合效果最好。

(3)从焊缝区到基体区,分流模挤压制品的显微硬度随挤压温度升高而升高,当挤压温度为480℃时,分流模挤压制品焊缝区和基体区的显微硬度都达到最大值,分别为118.7、126.67 HV。同时,在此温度下,挤压制品包含焊缝的横向综合力学性能也为最佳,抗拉强度达到最大,为279.98 MPa,延伸率为0.92%。

参考文献:

- [1] Sachin R, Raj S R K, Ahmad K K L, et al. Effect of process parameters on mechanical properties of aluminum composite foam developed by friction stir processing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(12): 1892-1903.
- [2] Mao Y, L J X, Anupam V, et al. High strength impact welding of 7075 Al to a SiC-reinforced aluminum metal matrix composite[J]. Materials Letters, 2021, 303:130549.
- [3] 殷本珂. 含(Sr, Ba)TiO₃铜基复合材料制备及热成型性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2015.
Yin Ben-ke. Research on the thermoformabilities of (Sr, Ba)TiO₃ particle reinforced copper matrix composites[D]. Harbin: Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 2015.
- [4] Yu J Q, Zhao G Q, Chen L. Analysis of longitudinal weld seam defects and investigation of solid-state bonding criteria in porthole die extrusion process of aluminum alloy profiles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 31-47.
- [5] Xu X, Zhao G Q, Wang Y X, et al. Microstructural evolution and its effect on mechanical properties of spray deposited 2195 alloy during porthole die extrusion process[J]. Vacuum, 2019, 167:28-39.
- [6] 姬浩. 7000系高强铝合金的发展及其在飞机上的应用[J]. 航空科学技术, 2015, 26(6): 75-78.
Ji Hao. Development and application of 7000 high strength aluminum alloys on airplane[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(6):75-78.
- [7] 赵国群, 陈良, 喻俊荃. 铝合金制品分流模挤压过程焊合行为的研究进展[J]. 锻压技术, 2018, 43(7): 49-55.
- Zhao Guo-qun, Chen Liang, Yu Jun-quan. Research progress on welding behavior during porthole die extrusion process for aluminum alloy profile[J]. Forging Stamping Technology, 2018, 43(7): 49-55.
- [8] 陈高进. 7075铝合金分流模挤压型材微观组织与力学性能研究[D]. 济南: 山东大学材料科学与工程学院, 2018.
Chen Gao-jin. Research on microstructure and mechanical property in porthole die extrusion of 7075 aluminum alloy[D]. Jinan: College of Materials Science and Engineering, Shandong University, 2018.
- [9] Yu J Q, Zhao G Q. Interfacial structure and bonding mechanism of weld seams during porthole die extrusion of aluminum alloy profiles[J]. Materials Characterization, 2018, 4: 56-66.
- [10] Liu Z W, Li L X, Yi J, et al. Influence of extrusion speed on the seam weld quality in the porthole die extrusion of AZ31 magnesium alloy tube[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(1/4): 1039-1052.
- [11] Zhou F J, Li F, Shi L S, et al. An optimizing process of profiled cross-sectional aluminum alloy porthole die extrusion using response surface methodology[J]. Modern Physics Letters B, 2016, 30(8): 1650098.
- [12] 吴海峰, 李建超, 张学习, 等. 石墨烯/铝复合材料热挤压过程组织演变[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(4): 14-19.
Wu Hai-feng, Li Jian-chao, Zhang Xue-xi, et al. Microstructural evolution of graphene/6061Al composites during hot extrusion[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(4): 14-19.
- [13] Cheng B J, Lou S M, Li Y M, et al. Effects of welding chamber height on properties of porthole die extrudates made of 0.5% GNPs/Al composite[J]. Vacuum, 2023, 214: 112184.
- [14] Lou S M, Li Y M, Cheng B J. et al. Effects of extrusion temperature on the properties of a 0.5 wt% GNP/Al composite in porthole die extrusion [J]. Metals and Materials International, 2023, 29(12): 3607-3617.
- [15] 姜淑梅, 李一明, 李鑫, 等. 基于BP神经网络和Arrhenius本构模型的GNP/7075Al复合材料热变形行为[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2024, 54(5): 1237-1245.
Lou Shu-mei, Li Yi-ming, Li Xin, et al. Thermal deformation behavior of graphene nanosheets reinforced 7075 aluminum based on BP neural network [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Tech-

- nology Edition), 2024, 54(5): 1237-1245.
- [16] 李世康. 6063 铝合金分流模挤压焊合组织及力学性能研究[D]. 长沙: 湖南大学机械与运载工程学院, 2020.
- Li Shi-kang. Study on the welding microstructure and mechanical property of 6063 aluminum alloy porthole die extrusion[D]. Changsha: College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, 2020.
- [17] Liu F, Sun L, Zhao G Q, et al. Microstructure and mechanical properties of longitudinal weld in 6005A aluminum alloy profile extruded by a porthole die[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 2552-2571.
- [18] Zhang Y L, Yang H F, Sun P, et al. Effect of aging time on precipitation of $MgZn_2$ and microstructure and properties of 7075 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33: 6601-6611.
- [19] Chen G J, Chen L, Zhao G Q, et al. Microstructure analysis of an Al-Zn-Mg alloy during porthole die extrusion based on modeling of constitutive equation and dynamic recrystallization[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 710: 80-91.
- [20] 范相坤. 异种铝合金材料分流模挤压工艺与组织性能研究[D]. 济南: 山东大学材料科学与工程学院, 2018.
- Fan Xiang-kun. Research on microstructure and mechanical property of dissimilar al alloys extruded by porthole die [D]. Jinan: College of Materials Science and Engineering, Shandong University, 2018.
- [21] 赵然, 王莹, 赵增武, 等. 独居石负载 Fe_2O_3 矿物催化材料的 NH_3 -SCR 脱硝性能研究[J]. 稀有金属, 2022, 46(7): 913-925.
- Zhao Ran, Wang Ying, Zhao Zeng-wu, et al. NH_3 -SCR denitrification properties of monazite-supported Fe_2O_3 mineral catalytic materials[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46(7): 913-925.
- [22] 徐潇. 铝锂合金分流挤压型材纵向焊缝固态焊合行为及其组织与性能研究[D]. 济南: 山东大学材料科学与工程学院, 2021.
- Xu Xiao. Investigation on solid-state welding behavior, microstructure and properties of longitudinal weld in Al-Li alloy porthole die extrusion profiles[D]. Jinan: College of Materials Science and Engineering, Shandong University, 2021.
- [23] 雷洋, 田文明. 放电等离子烧结制备石墨烯增强 7075 铝基复合材料的显微组织与力学性能[J]. 航空制造技术, 2019, 62(5): 74-79.
- Lei Yang, Tian Wen-ming. Microstructure and mechanical properties of graphene-reinforced 7075 aluminum composites prepared by SPS[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(5): 74-79.
- [24] 张树刚. TiB_2 /2024Al 复合材料挤压型材组织与性能研究[D]. 济南: 山东大学材料科学与工程学院, 2021.
- Zhang Shu-gang. Research on microstructure and properties of extruded profile of TiB_2 /2024Al composite [D]. Jinan: College of Materials Science and Engineering, Shandong University, 2021.
- [25] 李肖亮, 李昱桦, 董正学, 等. 碳/铝复合材料界面 Al_4C_3 相的形成与调控研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(5): 1453-1474.
- Li Xiao-liang, Li Yu-hua, Dong Zheng-xue, et al. Reviews on formation and tailoring of interfacial Al_4C_3 phase in carbon/aluminum composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(5): 1453-1474.
- [26] Lou S M, Cheng B J, Li Y Q, et al. Influence of extrusion temperature on the microstructure and mechanical properties of a 0.5% graphene nanoplatelet-reinforced aluminum composite[J]. Journal of Materials Engineering and Performance. 2023, 32: 9344-9356.
- [27] 徐仁杰. 不等厚方管铝型材横向/纵向焊缝及组织性能研究[D]. 济南: 山东大学材料科学与工程学院, 2022.
- Xu Ren-jie. Study on charge/longitudinal welds and microstructure properties of aluminum profiles of unequal thickness square tubes[D]. Jinan: College of Materials Science and Engineering, Shandong University, 2022.
- [28] Xu X, Ma X W, Zhao G Q, et al. Abnormal grain-growth of 2196 Al-Cu-Li alloy weld seams during extrusion and heat treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 867: 159043.
- [29] 李玉强. 7075 铝合金挤压平模优化设计与型材组织性能研究[D]. 济南: 山东大学材料科学与工程学院, 2019.
- Li Yu-qiang. Optimization design of 7075 aluminum alloy flat extrusion die and research on microstructure and mechanical property of extruded profiles[D]. Jinan: College of Materials Science and Engineering, Shandong University, 2019.
- [30] Shen Z K, Yang X Q, Yang S, et al. Microstructure and mechanical properties of friction spot welded 6061-T4 aluminum alloy[J]. Materials & Design (1980-2015), 2014, 54: 766-778.