

焊接参数对异种铝合金搅拌摩擦焊公差容限的影响^①

刘家睿, 李庆乾, 李佳慧, 杨昭, 王孟君

(中南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 为了研究焊接参数对异种铝合金搅拌摩擦焊公差容限的影响, 采用显微硬度测试、拉伸力学性能测试、扫描电子显微镜 (SEM) 等分析测试手段研究了不同焊接工艺参数下的 A356 与 AA6061 异种铝合金搅拌摩擦焊焊接头的力学性能及组织。结果表明, 工件间隙从 0 mm 增至 1 mm, 焊接头抗拉强度显著下降, 并产生肉眼可见的焊接缺陷; 搅拌头规格保持不变, 将焊接速度从 120 mm/min 降至 80 mm/min, 可促进材料流动从而提高对工件间隙的容限; 搅拌针直径从 4 mm 增至 6 mm, 可提高焊接的公差容限, 且材料融合程度明显提高, 不再出现分层现象。

关键词: 搅拌摩擦焊; 异种铝合金焊接; 公差容限; 力学性能; 工件间隙; 焊接速度; 搅拌针直径

中图分类号: TG453.9

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.039

文章编号: 0253-6099(2024)02-0183-05

Effects of Welding Parameters on Tolerance in Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloys

LIU Jiarui, LI Qingqian, LI Jiahui, YANG Zhao, WANG Mengjun

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: To study the effects of welding parameters on the tolerance of friction stir welding (FSW) of dissimilar aluminum alloys, the mechanical properties and structure of joint of dissimilar aluminum alloys (A356 and AA6061) by FSW under different welding parameters were studied by means of micro-hardness testing, tensile mechanical properties testing, scanning electron microscopy among other analytical testing means. The results show that as for the workpieces with the gap from 0 mm to 1 mm, the welded joint has tensile strength decreased significantly and presents visible welding defects. With tool pin of the same specification, the material flow can be promoted by decreasing the welding speed from 120 mm/min to 80 mm/min, thus the tolerance of workpiece gap will be greatly improved. The tool pin with diameter increased from 4 mm to 6 mm can lead to higher tolerance for welding, but also the material with a higher fusion degree and without delamination.

Key words: friction stir welding (FSW); welding of dissimilar aluminum alloy; tolerance; mechanical properties; workpieces with the gap; welding speed; diameter of tool pin

铝合金汽车轮毂具有自重轻、制作工艺成熟等优势, 使用搅拌摩擦焊将 A356 铸造轮毂盘面与 AA6061 旋压轮圈^[1]焊接^[2]成具有中空结构的轮毂, 可在降低轮毂自重的条件下降低车辆运行时产生的噪音。实际生产中, 受待焊工件加工精度及装配等因素的影响, 可能导致焊缝无法对齐, 焊缝之间存在间隙或工件之间存在高低差^[3-6], 影响焊接头质量。两片式轮毂的盘面采用铸造工艺, 尺寸精度较低, 可能无法与轮圈部分良

好对接; 焊接过程中, 夹具夹持力不足也会导致对接件无法紧密接触^[6-8]。工件间存在间隙时, 搅拌头无法带动足够材料填补该间隙, 接触面积减少也会导致搅拌头热输入降低^[5,9], 进一步增加了焊接缺陷产生的可能性。本课题组前期研究表明, 对接公差达到 0.3 mm 时无法获得具有良好性能的焊接头^[10], 因此, 探寻提高搅拌摩擦焊公差容限的方法具有重要的工程应用价值。

① 收稿日期: 2023-10-27

作者简介: 刘家睿 (1999—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要研究方向为搅拌摩擦焊的残余应力。E-mail: JiaruiLiu@foxmail.com

通信作者: 王孟君 (1965—), 男, 湖南长沙人, 教授, 主要从事铝合金塑性成形方面的研究。E-mail: 1933582720@qq.com

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为 AA6061 铝合金与 A356 铝合金,热处理状态均为 T6,其成分如表 1 所示。

表 1 实验材料成分(质量分数) %

材料名称	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
AA6061-T6	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.25	0.04~0.35
A356-T6	—	0.05	0.30~0.45	0.05	—
材料名称	Ti	Fe	Si	Al	
AA6061-T6	0.15	0.70	0.4~0.8	余量	
A356-T6	0.2	0.12	6.5~7.5	余量	

1.2 实验方法

采用 2518-3T 型龙门式搅拌摩擦焊机进行焊接,使用的两种搅拌头其搅拌针直径分别为 4 mm 和 6 mm,均附有名义螺距 1 mm 的螺纹,轴肩直径 15 mm,如图 1 所示。一端塞入 1.2 mm 塞规时,将两块待焊工件固定在夹具上,在焊接路径上形成 0~1.2 mm 连续变化的间隙,并采用如表 2 所示的焊接参数进行焊接。

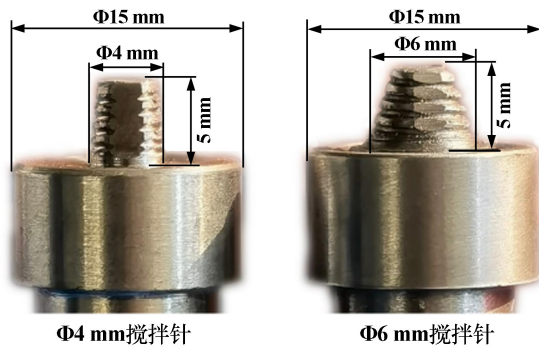


图 1 搅拌针示意图

表 2 焊接参数

实验组	轴肩尺寸/mm	行进速度/(mm·min ⁻¹)	搅拌针直径/mm
1	15	120	4
2	15	80	6
3	15	120	6

焊接完成后,沿焊接方向切割出拉伸试样,并使用 STS1000K 型万能力学试验机进行拉伸试验。使用 OLYMPUS BH2-UMA 型金相显微镜观察焊接接头金相组织;采用 TESCAN Mira3 型扫描电镜观察拉伸断口;采用 HVS-1000 显微硬度计测试焊接接头硬度分布情况,硬度点取样位置如图 2 所示,为 5×15 个横纵向点距均为 1 mm 的取样点。

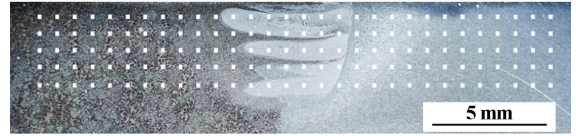
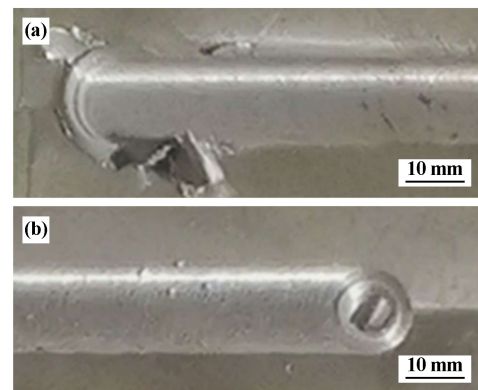


图 2 硬度点取样示意图

2 结果与讨论

2.1 焊缝宏观形貌

Φ6 mm 搅拌针在焊接速度 120 mm/min 下的焊缝宏观形貌如图 3 所示。由图 3 可知,在焊缝的起始阶段存在飞边缺陷,主要分布于后退侧母材表面,呈不规则形状或波浪形。产生飞边缺陷的原因是预热阶段搅拌头下压量过大,压缩了焊缝内空间,导致焊缝内的空间无法容纳过多被软化的金属,这些多余的金属在搅拌头的旋转作用下到达轴肩边缘并不断溢出^[2],形成飞边缺陷。焊缝表面附着有大小不一的铝合金颗粒,是因为焊接过程中表面的高温铝合金随轴肩滚动形成球形颗粒,降温后附着在焊缝表面^[10]。焊缝末端存在匙孔缺陷,除此之外,焊缝表面平整光亮,仅在边缘处产生少量毛刺。同时,焊缝表面洋葱环分布均匀。Φ6 mm 搅拌针在不同焊接速度下的焊缝飞边缺陷如图 4 所示。由图 4 可知,焊接速度 120 mm/min 时焊缝表面飞边缺陷更大且溢出的物质更多,起伏明显。

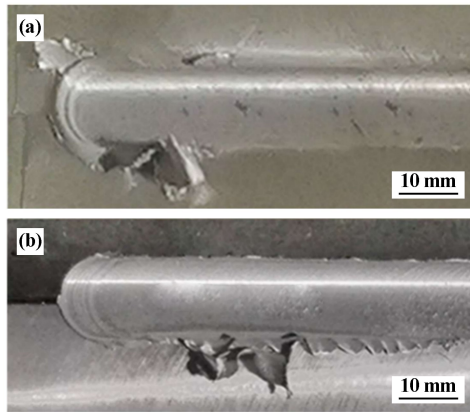


(a) 焊接起始位置; (b) 焊接结束位置

图 3 Φ6 mm 搅拌针在 120 mm/min 下的焊缝宏观形貌

2.2 隧道孔缺陷

使用不同焊接参数焊接产生的隧道孔缺陷如图 5 所示。采用 Φ6 mm 搅拌针,行进速度 120 mm/min,工件间隙大于 0.6 mm 时出现隧道孔缺陷,且随着工件间隙扩大,隧道孔缺陷有增大的趋势;搅拌针直径 6 mm,焊接速度 80 mm/min,工件间隙大于 0.9 mm 后出现微小隧道孔缺陷;搅拌针直径 4 mm,焊接速度 120 mm/min 时,隧道孔缺陷贯穿整个焊接行程,未能形成良好的焊



(a) 80 mm/min; (b) 120 mm/min

图 4 不同焊接速度下 $\Phi 6$ mm 搅拌针焊缝飞边缺陷

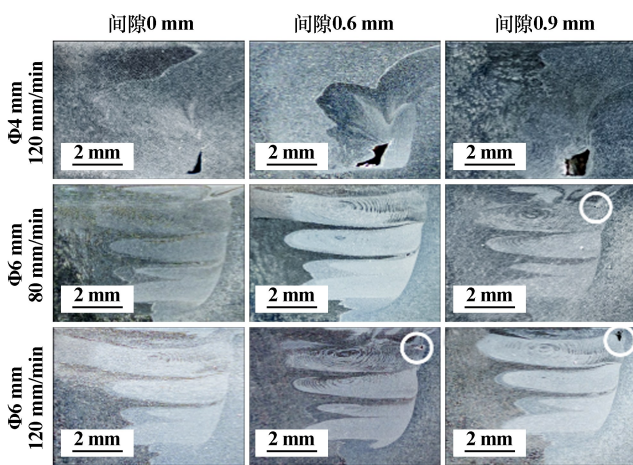


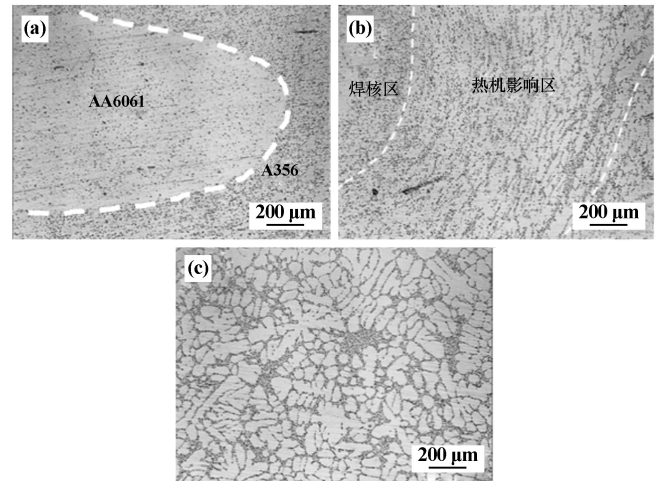
图 5 焊接头截面宏观形貌

接头,且随着工件间隙增大,隧道孔缺陷明显增大。搅拌针直径 6 mm 时,焊接样品隧道孔缺陷产生于前进侧焊核区边缘靠近焊缝表面的位置,如图 5 中白色圆圈位置所示。搅拌针直径 4 mm 时,隧道孔缺陷位于热机影响区底部。隧道孔缺陷产生的原因与材料流动性有关^[4],搅拌头行进速度过快时,工件受热不足^[11],材料流动性下降,导致金属无法被完全软化并被搅拌头带动,较小的搅拌针也无法带动足够的材料流动以填补搅拌过程中产生的空隙,出现隧道孔缺陷^[5]。

2.3 焊接头微观金相组织

图 6 为焊接头不同区域的金相显微组织。焊核区

材料在搅拌头的作用下产生剧烈塑性变形,其中 A356 的微观组织为细小等轴晶,母材中 Si 被打碎后呈颗粒状弥散分布于铝基体中,A356 与 AA6061 之间存在明显分界线。从焊合区到热影响区之间的晶粒形态可见,焊合区由细小等轴晶组成,中部的热机影响区内部晶粒变形程度较低且不发生动态再结晶,因此为沿界面方向伸长的长条状;右下部分热影响区内晶粒仅受热循环作用而没有机械作用,因此晶粒形态与母材基本一致,但尺寸相比母材稍大^[12]。母材由树枝晶组成。



(a) 焊核区; (b) 焊核区到热机影响区的过渡区; (c) 母材

图 6 $\Phi 6$ mm 搅拌针在 120 mm/min 下的焊接头不同区域金相照片

2.4 焊接头硬度分布

$\Phi 6$ mm 搅拌针在焊接速度 120 mm/min、无间隙条件下得到的无缺陷焊接头剖面显微硬度分布如图 7 所示。图中左侧为硬度较高的 AA6061 母材,右侧为硬度较低的 A356 母材。由图 7 可知,焊核区域硬度显著低于母材,且硬度最低值出现在热机影响区内部的轴肩影响区和搅拌针影响区的交界处,略低于焊核区硬度,且与特定焊接参数下隧道孔缺陷产生的位置一致。结合 Hall-Petch 公式及金相照片可知,热影响区仅受热循环影响,晶粒粗化,硬度下降,焊核区组织同时受到热输入和机械搅拌作用,主要由细小的等轴晶组成,但由于晶粒破碎过程中铝合金强化相易析出,破坏了原有晶格组织,焊核区硬度仍低于母材^[10]。热机

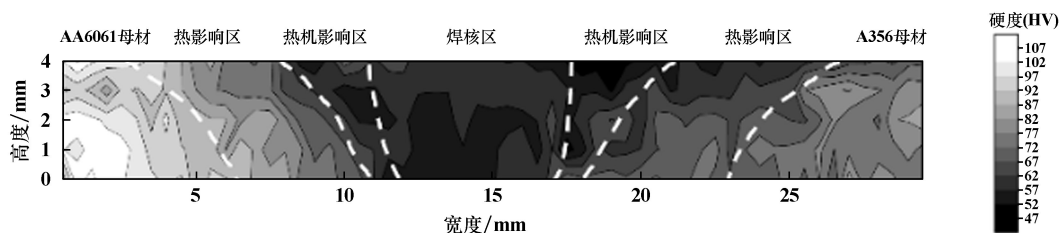


图 7 $\Phi 6$ mm 搅拌针在 120 mm/min 下的焊接头截面硬度等高线图

影响区内部的低硬度区域恰好与特定焊接参数下隧道孔缺陷产生的位置一致,表明在焊接过程中此区域材料回填能力差,易于产生隧道孔缺陷。由此可知,热机影响区内部的低硬度区域是焊接头中最薄弱的位置。

2.5 焊接头抗拉强度

不同焊接参数下焊接头抗拉强度见图8。由图8可知,不同焊接参数下,焊接头抗拉强度均出现不同程度的下降。 $\Phi 6$ mm 搅拌针在焊接速度 120 mm/min 下的焊接头抗拉强度下降明显,工件间隙 0.9 mm 时,焊接头抗拉强度仅为无间隙样品的 86%。焊接速度降至 80 mm/min 时,抗拉强度下降幅度减小,工件间隙 0.9 mm 时焊接头抗拉强度相较无间隙样品仅下降 4.9%。焊接速度提高后,对工件的热输入减小,工件材料无法完全软化,流动性不佳,工件间隙扩大时,焊接头内产生隧道孔缺陷,导致焊接头有效承载面积显著下降,同时冷却速度过快会导致焊后沉淀析出相减少,力学性能下降^[13]。 $\Phi 4$ mm 搅拌针在焊接速度 120 mm/min 时无法获得良好的焊接头,无工件间隙时依然存在大尺寸隧道孔缺陷,使得其抗拉强度处于较低水平。

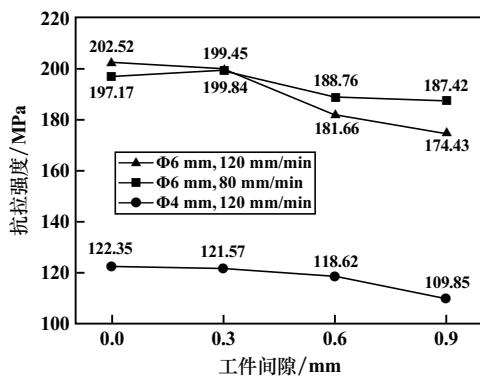


图8 焊接头抗拉强度

2.6 断口形貌

图9为焊接速度 120 mm/min 下焊接头的拉伸断口宏观及微观形貌。焊接头通常在硬度最低的区域断裂,但由于本实验采用的样品保留了未焊透的部分,在焊核区底部受未焊透部分影响,不同工艺参数下的样品裂纹均从焊接头底部未焊透处开启,沿焊核区前进侧边缘向上扩展。样品中存在隧道孔缺陷时,其附近出现应力集中,造成裂纹扩展前端应力状态改变,裂纹扩展方向改变且途经隧道孔缺陷。由图9可知, $\Phi 6$ mm 搅拌针、工件间隙 0 mm 时,断口内未见隧道孔缺陷。从断口表面看,两种材料融合良好,没有出现明显分层,断口表面分布着许多尺寸不等、深浅不一的韧窝,在韧窝底部可以观察到第二相颗粒,表

现为良好的韧性断裂特征。工件间隙增至 0.6 mm 及 0.9 mm 时,断口表面可观察到沿焊接方向分布的隧道孔缺陷,其尺寸随着工件间隙增大而增加。受隧道孔缺陷影响,断口受力及裂纹扩展方向均发生改变,断口表面除等轴韧窝外还出现了尺寸较大的拉伸撕裂韧窝,韧窝较深,表明材料塑性良好。 $\Phi 4$ mm 搅拌针焊接的焊接头内部分层明显,材料融合情况差且出现隧道孔缺陷。

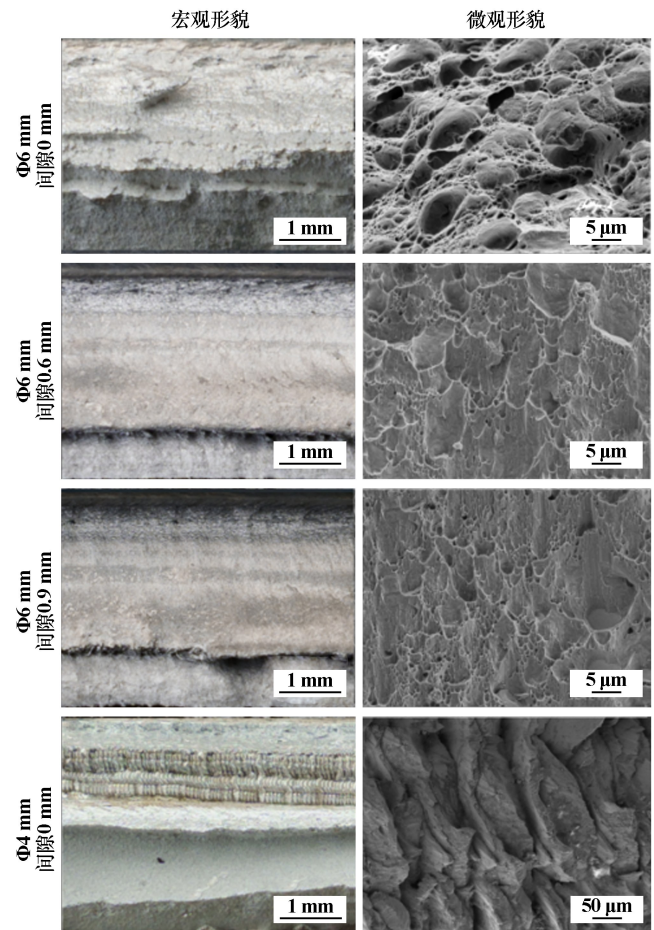


图9 焊接速度 120 mm/min 下焊接头拉伸断口宏观及微观形貌

3 结 论

1) 待焊工件间隙从 0 mm 增至 1 mm 时,焊接头抗拉强度显著下降,并产生肉眼可见的焊接缺陷。

2) 焊接速度从 120 mm/min 降至 80 mm/min 或搅拌针直径从 4 mm 增至 6 mm 后,工件间隙容限有所增加。焊接速度 80 mm/min、搅拌针直径 6 mm 时,工件间隙的容限较高。

参考文献:

- [1] 柯黎明,邢丽,刘鸽平. 搅拌摩擦焊工艺及其应用[J]. 焊接技术, 2000(2):7-8.

- [2] Mishra R S, Mahoney M W, Sato Y, et al. Friction stir welding and processing VI[M]. Cham: Springer International Publishing, 2011.
- [3] Takahara H, Motoyama Y, Tsujikawa M, et al. Allowance of deviation and gap in butt joint on friction stir welding[J]. *Advanced Materials Research*, 2007, 15-17(2):375-380.
- [4] Chiuzuli F R, Batisto B F, Bergmann L A, et al. Effect of the gap width in AZ31 magnesium alloy joints obtained by friction stir welding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15:5297-5306.
- [5] MA H, WANG Y, TIAN Z, et al. Gap-tolerance control for friction stir butt welding of 2A14 aluminium alloy[J]. *Measurement*, 2019, 148:106915.
- [6] Schulze S, Bel G G, Richter-Trummer V, et al. The influence of gaps and misalignment on friction stir welded butt joints of medium-sized parts[J]. *Materials Science Forum*, 2014, 783/786 (Pt. 2):1788-1793.
- [7] Cole E G, Fehrenbacher A, Shultz E F, et al. Stability of the friction stir welding process in presence of workpiece mating variations[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 63(5-8):583-593.
- [8] Firouzidor V, Kou S. Al-to-Mg friction stir welding: effect of material position, travel speed, and rotation speed[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2010, 41(11):2914-2935.
- [9] Kosturek R, Sniezek L, Torzewski J, et al. The influence of welding parameters on macrostructure and mechanical properties of Sc-modified AA2519-T62 FSW joints[J]. *Manufacturing Review*, 2020, 7:2020025.
- [10] 黄紫玲, 杨昭, 范纲衍, 等. 对接间隙对 A356 铝合金 FSW 接头组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2022(9):26-31.
- [11] 肖毅华, 张浩锋. 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊温度场的数值模型和参数影响分析[J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(1):119-126.
- [12] 王森, 刘强, 李天景. 6061 铝合金 FSW 焊缝时效组织与力学性能研究[J]. *矿冶工程*, 2021, 41(5):163-169.
- [13] Bijanrostami K, Barenji R V, Hashemipour M. Effect of traverse and rotational speeds on the tensile behavior of the underwater dissimilar friction stir welded aluminum alloys[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2017, 26(2):909-920.

引用本文: 刘家睿, 李庆乾, 李佳慧, 等. 焊接参数对异种铝合金搅拌摩擦焊公差容限的影响[J]. *矿冶工程*, 2024, 44(2):183-187.

(上接第 177 页)

- [14] 万斯雨, 孙有平, 何江美, 等. 降温轧制对 ZK60 镁合金显微组织及力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(11):87-91.
- [15] 刘华燊, 孙有平, 何江美, 等. 轧制压下量对 ZK60 镁合金组织和阻尼性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(2):154-159.
- [16] Al-Samman T, Li X, Chowdhury S G. Orientation dependent slip and twinning during compression and tension of strongly textured magnesium AZ31 alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(15):3450-3463.
- [17] Al-Samman T, Gottstein G. Dynamic recrystallization during high temperature deformation of magnesium[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 490(1-2):411-420.
- [18] REN L B, QUAN G F, XU Y G, et al. Effect of heat treatment and pre-deformation on damping capacity of cast Mg-Y binary alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 699:976-982.
- [19] TANG Y T, ZHANG C, REN L B, et al. Effects of Y content and temperature on the damping capacity of extruded Mg-Y sheets[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019, 7(3):522-528.
- [20] Kocks U F, Mecking H. Physics and phenomenology of strain hardening: the FCC case[J]. *Progress in Materials Science*, 2003, 48(3):171-273.
- [21] 王仕村. 轧制变形对 Mg-3%Al 合金阻尼性能和力学性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

引用本文: 刘华燊, 孙有平, 何江美, 等. 轧制应变速率对 Mg-1%Al 合金组织、阻尼和力学性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2024, 44(2):172-177.

(上接第 182 页)

- [8] LI J, Inukai K, Takahashi Y, et al. Formation mechanism and dispersion of pseudo-tetragonal BaTiO₃-PVP nanoparticles from different titanium precursors: TiCl₄ and TiO₂[J]. *Materials*, 2017, 11(1):51.
- [9] Lencka M M, Riman R E. Thermodynamic modeling of hydrothermal synthesis of ceramic powders[J]. *Chemistry of Materials*, 1993, 5(1):61-70.
- [10] 翟学良, 李纪标, 杨永社. 电镜在 BaTiO₃ 晶相转化机理研究中的应用[J]. *电子显微学报*, 2000, 19(4):469-470.
- [11] ZHANG M, Falvey J, Hector A L, et al. Effects of the reaction temperature and Ba/Ti precursor ratio on the crystallite size of BaTiO₃ in hydrothermal synthesis[J]. *RSC Advances*, 2022, 12(43):27809-27819.

引用本文: 盖卉妍, 戴超华, 杨林. 基于异丙醇溶剂热合成四方相 BaTiO₃ 工艺探索及机理研究[J]. *矿冶工程*, 2024, 44(2):178-182.