

钢铁材料及有色合金构件的多段半固态成形工艺研究

汤京军¹, 庞佳丽², 潘成海³, 唐艳⁴, 陈颖⁴, 李茜⁴, 孟毅²

(1. 江南工业集团有限公司, 湖南 湘潭 411100; 2. 重庆大学, 重庆 400044; 3. 重庆大江杰信锻造有限公司, 重庆 401321; 4. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 为了有效抑制半固态成形过程中的液相偏析, 改善半固态成形构件微观组织和力学性能的均匀性。**方法** 提出了包括多段流变成形和多段触变成形在内的多段半固态成形工艺。多段半固态成形工艺均由半固态坯/浆料制备、预成形、控温冷却和终成形 4 个阶段组成, 分别在热模拟试验机和机械伺服压机上开展了 SKD11 工具钢和 6061 铝合金的半固态触变成形和半固态流变成形试验。**结果** 在初成形阶段, 具有较高液相分数的半固态坯/浆料以较高的应变速率初步充填型腔, 限制了液相外流的时间和空间; 在控温冷却阶段, 半固态坯/浆料的液相分数因部分凝固而降低; 在终成形阶段, 具有较低液相分数的半固态坯/浆料以较低的应变速率完成型腔的充填, 由于固相晶粒在此阶段发生塑性变形而提高了成形构件的力学性能。**结论** 获得了组织均匀性较好的钢铁材料和有色合金构件, 验证了多段半固态成形工艺的可行性。

关键词: 半固态成形; 液相偏析; 多段成形; 触变成形; 流变成形

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.03.013

中图分类号: TG312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)03-0113-07

Multi-stage Semisolid Forming of Ferrous and Non-ferrous Components

TANG Jing-jun¹, PANG Jia-li², PAN Cheng-hai³, TANG Yan⁴, CHEN Ying⁴, LI Qian⁴, MENG Yi²

(1. Jiangnan Industries Group Co., Ltd., Xiangtan 411100, China; 2. Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Chongqing Dajiang-Jiexin Forging Co., Ltd., Chongqing 401321, China; 4. No.59 Research Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: To effectively inhibited the occurrence of liquid segregation during semisolid forming and improve the homogeneities of microstructure and mechanical properties of semisolid formed components, multi-stage semisolid forming processes including multi-stage thixoforming and multi-stage rheoforming were proposed in this study. Multi-stage semisolid forming was composed of preparation of semisolid slurry, first forming, controlled cooling, and secondary forming. Multi-stage thixoforming of SKD11 tool steel and rheoforming of 6061 Al alloy were conducted on a Thermecmaster-Z compression machine and a mechanical servo press machine, respectively. In the first forming stage, the cavity was filled with semisolid slurry of high liquid fraction at high strain rate. The time and space for out-flow of liquid phase was restrict. In the controlled cooling stage, the liquid fraction of semisolid slurry was decreased by partial solidification. In the secondary forming stage, the cavity was filled with semisolid slurry of low liquid fraction at low strain rate. Plastic deformation of solid particles resulted in excellent mechanical properties of component. The feasibility of multi-stage semisolid forming processes on manufacturing ferrous and non-ferrous alloys components with homogenous microstructure and mechanical properties is verified.

收稿日期: 2020-04-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51975071); 国家工业和信息化部工业强基工程项目 (TC180A3Y1/18)

作者简介: 汤京军 (1973—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为机械制造与弹药。

通讯作者: 孟毅 (1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属塑性成形。

KEY WORDS: semisolid forming; liquid segregation; multi-stage forming; thixoforming; rheoforming

半固态成形技术由 Flemings 和其学生 Spencer 于 20 世纪 70 年代在麻省理工学院发明^[1]。半固态金属浆料的流动性和粘度可以通过控制液相的体积分数来调节,因此半固态成形具有许多优点^[2]。欧洲和亚洲的研究人员以及工程师对钢铁材料和有色合金的半固态成形进行了大量研究^[3-6],然而,半固态成形在工业制造中很难取代传统的锻造和铸造技术,其主要障碍是半固态成形制造构件的力学性能不均匀,构件的力学性能不均匀源于半固态成形过程中发生了液相偏析,而液相偏析是由于在成形载荷作用下固相和液相的成形性能不同引起的。

为了抑制半固态成形构件中的液相偏析,研究人员研究了成形参数对液相偏析的影响^[8-9]。他们发现在较高的成形温度下,以较低的成形速度进行半

固态成形时,液相的流出量增加^[10]。虽然可以通过降低成形温度和提高成形速度来抑制液相流出,但低成形温度和高成形载荷会导致成形载荷增大,并缩短模具和工具寿命。东京大学和重庆大学团队提出了在具有柔性运动的机械伺服压力机上进行多段半固态成形^[11-14]。根据不同的加热方式,将半固态成形分为流变成形和触变成形两种。如图 1 所示,多段半固态成形也可分为多段流变成形和多段触变成形。这两种工艺都分为半固态坯/浆料制备、预成形、控温凝固和终成形 4 个阶段。对于熔点较低的有色合金,多段流变成形是最理想的成形方法之一。多段触变成形因其熔点高而更适合于钢铁材料。文中通过在热模拟试验机上对 SKD11 钢进行多段半固态触变压缩试验,以及在机械伺服压力机上对 6061

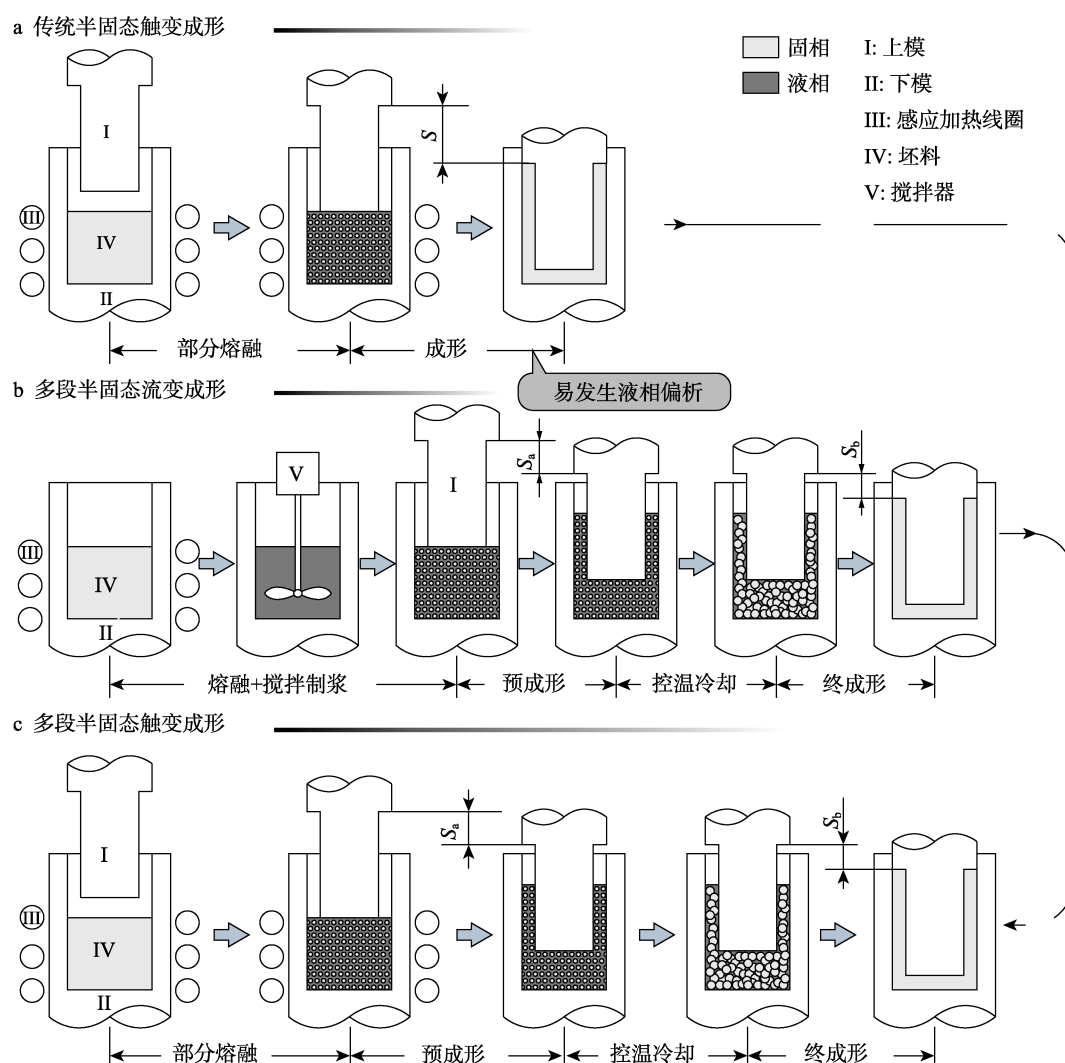


图 1 多段半固态成形和传统半固态成形示意图

Fig.1 Illustration of conventional and multi-stage semisolid forming processes

铝合金制件进行制造,分别验证了多段流变成形和多段触压成形在钢铁材料和有色金属部件制造中的可行性,研究了 SKD11 钢和 6061 铝合金在多段半固态成形过程中的微观组织演变,以及多段半固态成形的工艺参数对钢铁材料及有色合金构件组织均匀性和力学性能的影响。

1 实验

1.1 材料

选择 SKD11 钢和 6061 铝合金的工业轧制棒材作为典型的钢铁材料和有色合金。这两种合金的化学成分如表 1 所示。

表 1 SKD11 工具钢和 6061 铝合金的化学成分 (质量分数)
Tab.1 Chemical compositions of commercial SKD11 steel and 6061 aluminum alloy (mass fraction) %

材料	C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Cr	V	Mo	Mg	Zn	Ti	Fe	Al
SKD11	1.46	0.26	0.44	0.26	0.11	0.20	11.56	0.22	0.82				余量	
6061		0.64	0.15		0.25		0.24			1.0	0.25	0.15	0.70	余量

1.2 多段半固态成形实验

由于钢铁材料触变成形模具材料昂贵,文中采用多段压缩试验的方法,对多段触变成形进行了物理模拟。材料加工的物理模拟是通过材料进行热加工和机械加工来准确模拟材料在实际制造或最终使用过程中的经历。SKD11 工具钢触变成形和 6061 铝合金杯型件多段流变成形的物理模拟实验方案分别如图 2a 和 2b 所示。以上实验分别在热模拟试验机和机械伺服压力机上进行,实验参数如表 2 所示。将原轧制棒直接加热至半固态温度区,得到 SKD11 工具钢半固态料浆。通过搅拌凝固过程中的熔融合金,得到了

6061 铝合金的半固态坯/浆料。

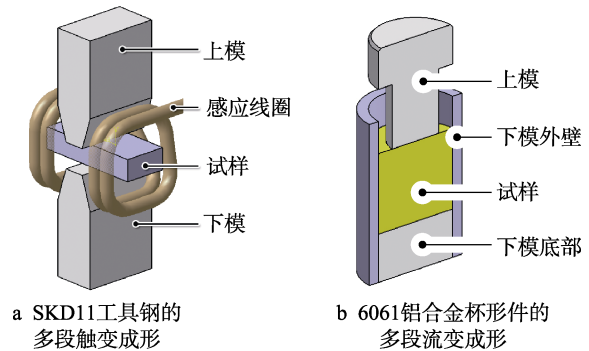


图 2 物理模拟实验装置
Fig.2 Experimental schemes of physical simulation

表 2 不同半固态成形工艺的成形参数
Tab.2 Forming parameters of different semisolid forming processes

材料	成形方式	预成形温度/℃	预成形压下量/mm	控温冷却/s	终成形温度/℃	终成形压下量/mm
SKD11 工具钢	传统触变成形	1280	6			
	多段触变成形	1280	4	24	1240	2
6061 铝合金	传统流变成形	625	16			
	多段流变成形	625	13.5	4	595	2.5

1.3 力学性能测试及微观组织分析

采用维氏硬度试验、压缩试验和室温拉伸试验,分别研究了多段触变成形和多段流变成形制备的 SKD11 工具钢和 6061 铝合金试样,不同区域的力学性能。采用光学显微镜和扫描电子显微镜对不同多段半固态成形工艺制备的 SKD11 工具钢和 6061 铝合金试样,在不同区域的不同部位进行了显微组织分析。多段触变成形制备的 SKD11 工具钢试样的力学性能测量和微观组织分析位置如图 3b 所示。图 4b 为多段流变法制备的 6061 铝合金杯型件的力学性能测试和微观结构分析位置。分别在 Thermecmastor-Z 压缩试验机、Shimadzu 拉伸试验机和 DUH-211 硬度计上进行了压缩试验、拉伸试验和硬度测量。在力学性能测

试中,每个条件下至少测试 3 个样本,并计算力学性能测试值的平均值。

2 结果与讨论

2.1 钢铁材料的多段半固态触变成形

多段触变成形的 SKD11 工具钢不同区域的微观组织扫描电子显微镜照片如图 3 所示。通过对传统和多段触变成形的 SKD11 工具钢的不同区域进行图像分析和力学测量,得到的触变成形 SKD11 钢试样中液相分布和力学性能的分布情况如图 4 所示。由液相转化而来的共晶化合物主要分布在多段触变成形 SKD11 钢试样的边缘区域。由于共晶化合物的体积分数较高,在距触变成形 SKD11 钢试样中心区域较

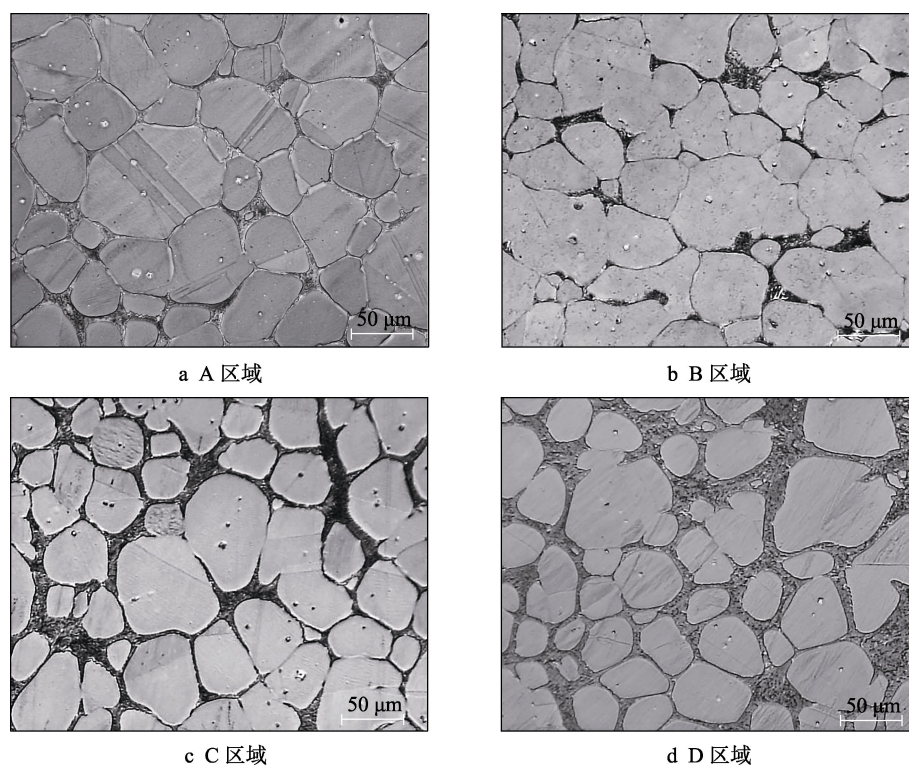


图3 多段触变成形 SKD11 工具钢试样不同区域的微观组织的扫描电子显微镜照片

Fig.3 SEM micrographs of different positions in the multi-stage thixoformed SKD11 tool steel specimens

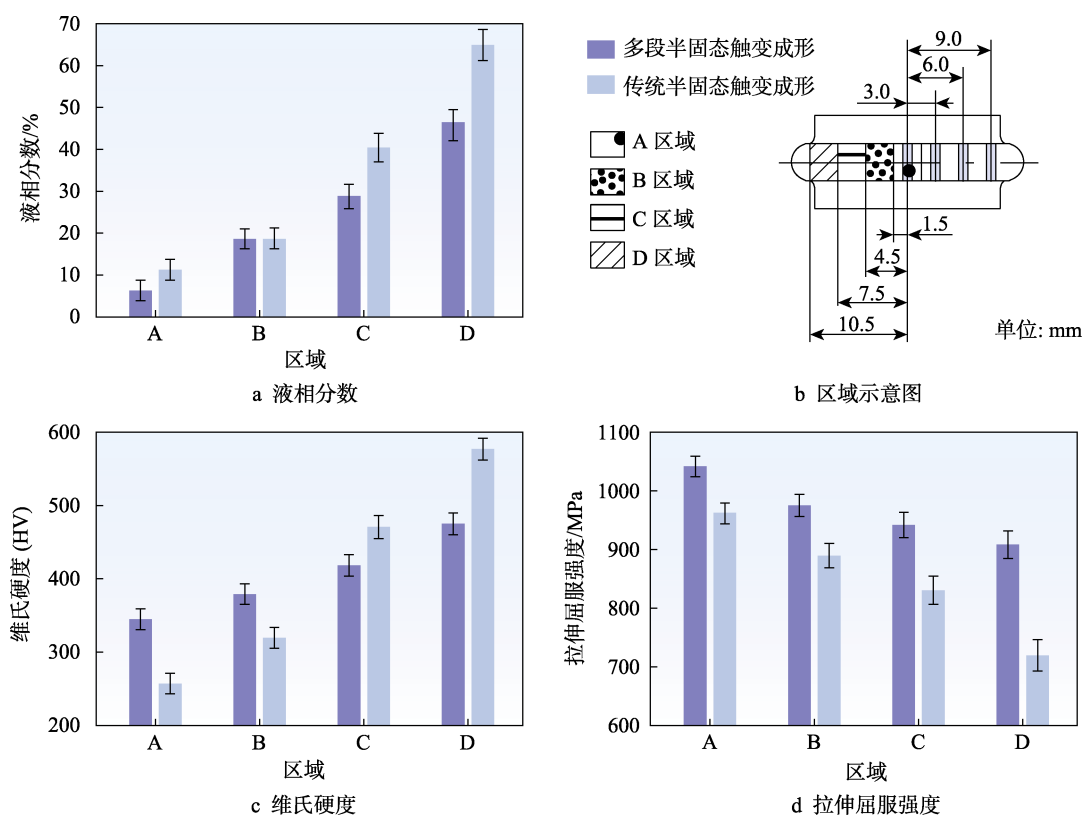


图4 多段触变成形 SKD11 钢试样中液相分、维氏硬度和拉伸屈服强度

Fig.4 Distributions of former liquid fraction, Vickers hardness and tensile yield strength in the multi-stage thixoformed SKD11 tool steel specimens

远的区域硬度较高, 屈服强度较低。利用 A 区和 D 区的液相体积分数的差异来量化触变成形中发生的

液相偏析。如图 4a 所示, SKD11 钢在多段触变成形过程中发生的液相偏析要比传统触变成形过程中发

生的液相偏析轻微。多段半固态触变成形制造的 SKD11 钢试样中，由液相和固相转变而来的共晶化合物和奥氏体晶粒分布更加均匀，导致该试样的力学性能分布更加均匀。

2.2 铝合金的多段半固态流变成形

多段触变成形的 SKD11 工具钢不同区域的微观组织扫描电子显微镜照片如图 5 所示。通过对传统和多段流变成形工艺制造的 6061 铝合金杯型件的不同区域进行图像分析和力学测量，得到 6061 铝合金杯型件的液相分数和力学性能的分布情况如图 6 所示。

由液相转化而来的共晶化合物主要分布在 6061 铝合金杯型件的顶部区域。由于共晶化合物的体积分数较高，在距 6061 铝合金杯型件底部较远的区域硬度较高，但屈服强度较低。结果表明，6061 铝合金杯型件顶部区域共晶化合物体积分数较高的原因是在传统流变和多段流变过程中发生了液相偏析。与传统流变法制备的 6061 铝合金杯型件相比，多段流变法制备的 6061 铝合金杯型件中存在轻微的液相偏析，因此，多段流变法制备的 6061 铝合金杯型件的力学性能分布更加均匀。

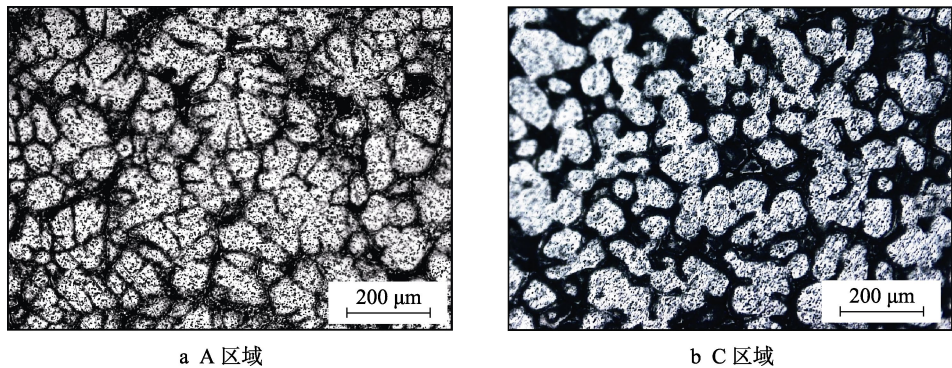


图 5 多段触变成形 6061 铝合金杯型件微观组织的扫描电子显微镜照片

Fig.5 SEM micrographs in the cup-shaped 6061 aluminum components by multi-stage thixoforming

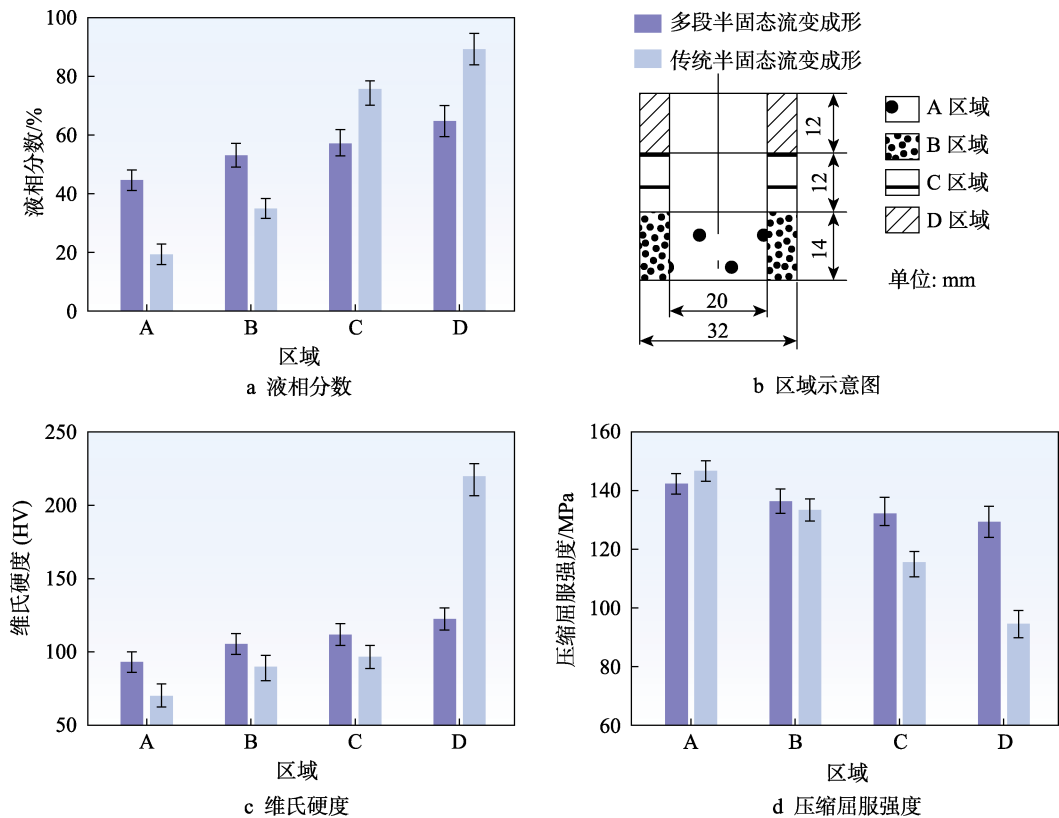


图 6 多段流变成形法制备的 6061 铝合金杯型件的液相分数、维氏硬度与压缩屈服强度的分布

Fig.6 Distributions of former liquid fraction, Vickers hardness, and compressive yield strength in the cup-shaped 6061 aluminum components manufactured by multi-stage rheoforming

2.3 多段半固态成形机理

半固态坯/浆料在传统和多段半固态成形过程中的微观结构演变如图 7 所示。半固态成形过程中,液相流出受到局部凝固的干扰。由于半固态坯/浆料中

的液相分数在局部凝固过程中降低,二次成形时液相流出变得困难,因此,在多段半固态成形构件的构件中,液相偏析要轻得多。在二次成形过程中,固体颗粒的塑性变形改善了多段半固态成形构件中心区域的力学性能。

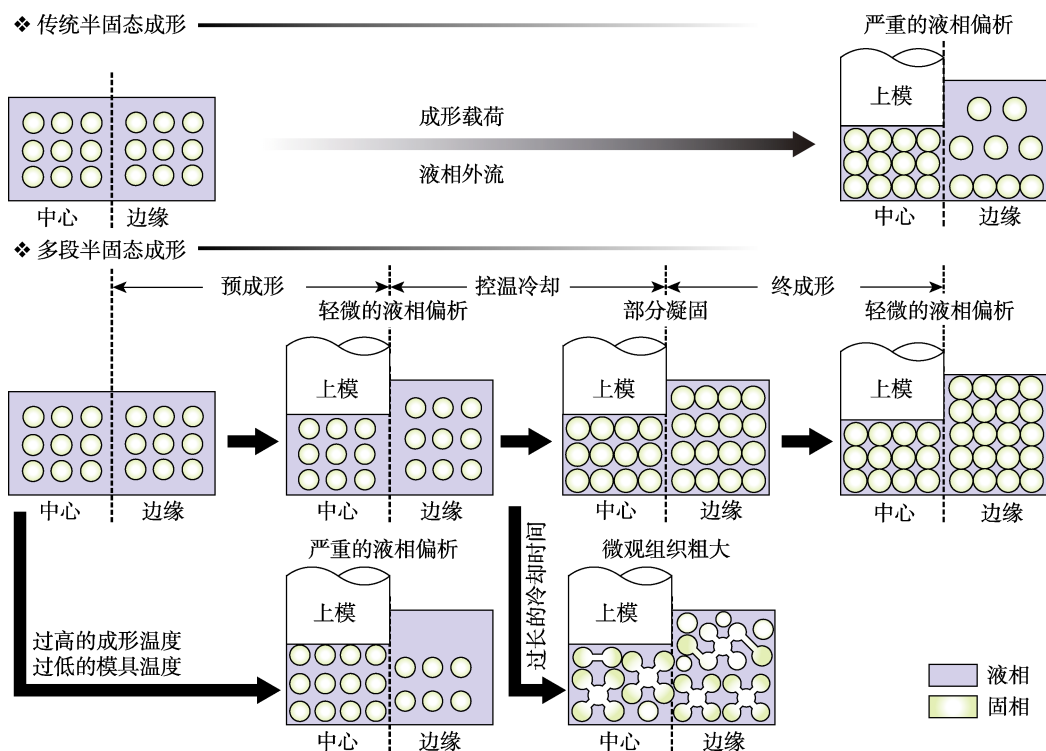


图 7 半固态坯/浆料在不同半固态成形过程中的微观结构演变示意图

Fig.7 Microstructural evolutions of semisolid slurry during different semisolid forming processes.

3 结论

1) 提出了包括多段流变成形和多段触变成形在内的多段半固态成形工艺。通过实验验证了这两种多段半固态成形工艺在钢铁材料和有色金属构件加工中的可行性。

2) 通过实验研究了 SKD11 工具钢和 6061 铝合金在多段半固态成形过程中的微观组织演变行为,研究了不同阶段半固态成形工艺中成形条件对 SKD11 工具钢和 6061 铝合金构件的微观组织和力学性能的影响。

3) 采用多段半固态成形工艺制备的 SKD11 工具钢和 6061 铝合金构件,其组织和力学性能的分布比传统半固态成形工艺制备的组织 and 力学性能的分布更为均匀。

参考文献:

[1] FLEMINGS M C. Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1991, 22A: 957—981.

[2] NADAL R L, ROCA A S, FALS H D C, et al. Mechanical Properties of Thixoformed Hypoeutectic Gray Cast Iron[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 226: 146—156.

[3] OMAR M Z, PALMIERE E J, HOWE A A, et al. Thixoforging of a High Performance HP9/4/30 Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 395: 53—61.

[4] CHEN G, ZHANG S, ZHANG H, et al. Controlling Liquid Segregation of Semi-solid AZ80 Magnesium Alloy by Back Pressure Thixoextruding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259: 88—95.

[5] LI J, SUGIYAMA S, YANAGIMOTO J, et al. Effect of Inverse Peritectic Reaction on Microstructural Spheroidization in Semisolid State[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208: 165—170.

[6] HIRT G, SHIMAHARA H, SEIDL I, et al. Semi-Solid Forging of 100Cr6 and X210CrW12 Steel[J]. CIRP Ann-Manufacturing Technology, 2005, 54: 257—260.

[7] ROGAL Ł, DUTKIEWICZ J. Deformation Behavior of High Strength X210CrW12 Steel after Semi-solid Processing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 603: 93—97.

[8] KHOSRAVANI A, AASHURI H, DAVAMI P, et al. Liq-

- uid Segregation Behavior of Semi-solid AZ91 Alloy during Back Extrusion Test[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 477: 822—827.
- [9] SONG R, KANG Y, ZHAO A. Semi-solid Rolling Process of Steel Strips[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198: 291—299.
- [10] LI J, SUGIYAMA S, YANAGIMOTO J. Microstructural Evolution and Flow Stress of Semisolid Type 304 Stainless Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 161: 396—406.
- [11] YANAGIMOTO J, TAN J, SUGIYAMA S, et al. Controlled Semisolid Forging of Aluminium Alloys Using Mechanical Servo Press to Manufacture Products with Homo- and Heterogeneous Microstructures[J]. Materials Transactions, 2013, 54: 1149—1154.
- [12] MENG Y, TAN J, SUGIYAMA S, et al. Effects of Forming Conditions on Homogeneity of Microstructure and Mechanical Properties of A6061 Aluminum Alloy Manufactured Bytime-dependent Rheoforging on a Mechanical Servo Press[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 3037—3047.
- [13] MENG Y, ZHANG J, YI Y, et al. Study on the Effects of Forming Conditions on Microstructural Evolution and Forming Behaviors of Cr-V-Mo Tool Steel during Multi-stage Thixoforging by Physical Simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 248: 203—212.
- [14] MENG Y, ZHANG J, ZHAN H, et al. Effects of Subsequent Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of SKD11 Tool Steel Samples Processed by Multi-stage Thixoforging[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 762: 138070.