

## 喷射成形 7055 铝合金的显微组织和力学性能

李先聚, 杨 杰, 张 豪, 张 捷, 张 荻

(上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030)

**摘 要:** 采用全自动控制往复喷射成形工艺制备了 7055 铝合金的大规格喷射成形锭坯。通过显微组织分析和力学性能测试, 研究工业规格喷射成形 7055 铝合金的初始组织、挤压工艺及热处理制度对显微组织和力学性能的影响。结果表明, 喷射成形 7055 铝合金锭坯规格可达  $d\ 260\ \text{mm} \times 1600\ \text{mm}$ , 晶粒为等轴状, 粒度宏观均匀, 主要在  $20\sim 30\ \mu\text{m}$ , 组织无明显宏观偏析, 锭坯致密度达到 98.2%。喷射成形态材料的 T6 态  $\sigma_b$  为 500~543 MPa, 显示控制往复喷射成形铝合金锭坯冶金质量优越。喷射成形锭坯经过小挤压比变形后达到全致密, 大规格产品的 T6 态纵向  $\sigma_b$  提高到 745 MPa,  $\delta$  为 12.8%。

**关键词:** 7055 铝合金; 喷射成形; 热处理; 显微组织; 力学性能

**中图分类号:** TG 146.2

**文献标识码:** A

## Microstructure and mechanical properties of 7055 Al alloys by spray forming

LI Xian-ju, YANG Jie, ZHANG Hao, ZHANG Jie, ZHANG Di

(State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** A large-scale 7055 Al alloy billet with a size of  $d\ 260\ \text{mm} \times 1600\ \text{mm}$  was prepared by fully automatic controlled reciprocating spray forming technology. The initial microstructure and the effect of subsequent treatment (including extrusion and heat treatment) on the microstructures and mechanical properties of the 7055 alloy were studied. The results show that the as-deposited billet has an equiaxed and homogeneous structure with a grain size of  $20\sim 30\ \mu\text{m}$  and no macro-segregation structure. The relative density of the as-deposited alloy gets up to 98.2%. The ultimate tensile strength of as-deposited materials after T6 heat treatment gets up to 500~543 MPa, which indicates that there is little defect in the as-deposited billets produced by fully automatic controlled reciprocating spray forming technology. After deformation at small extrusion ratio, the billets could be fully densified. The ultimate tensile strength of the large-scale materials at T6 state rises to 745 MPa, and the elongation is 12.8%.

**Key words:** 7055 Al alloy; spray forming; heat treatment; microstructure; mechanical properties

自英国 Swansea 大学的 Singer 教授在 1968 年提出喷射成形的概念和原理以来<sup>[1-2]</sup>, 该技术获得迅速发展, 到 20 世纪 90 年代中期, 已经在高性能钢、铝、铜等金属领域形成产业<sup>[3-5]</sup>。与传统的铸造工艺相比, 喷射成形工艺的冷却速度可以达到  $10^2\sim 10^3\ \text{K/s}$ , 所以喷射成形工艺制备的材料元素固溶度大、晶粒细小、组织均匀、偏析程度小<sup>[6-8]</sup>。我国在新材料制备、热处

理和后续加工方面取得了丰富的研究成果, 有些成果已经达到国际先进水平<sup>[9]</sup>, 但是目前在产品工业化水平上, 与国际先进水平相比仍存在显著差距。

Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金是以航空航天用材为背景研制并发展起来的一类铝合金材料, 长期以来被广泛用于各种飞机机身、机翼梁、机舱壁板和火箭高强度结构件的制造, 是世界各国航空航天工业中不可

缺少的重要材料<sup>[10-12]</sup>。7055 铝合金是由美国开发的超高锌含量的新型铝合金,是当前实际使用的最高强度铝合金,按美国军标其强度达 648 MPa。国内很多研究单位利用传统工艺对 7055 铝合金做了大量研究,该合金抗拉强度已经超过了 700 MPa,甚至接近 800 MPa。但是这些数据是从铸造的小样品上获得的,无法代表大规格产品的真实性能。铸造大尺寸的 7055 铝合金锭坯时,由于锌含量比较高,因此合金成分偏析严重且易于形成热裂。虽然开发 7055 铝合金产品早被我国列入重点攻关项目,但迄今为止,我国铝加工企业尚无法浇铸出具有工业实际应用规格的铸件,严重制约了相关应用领域的发展。另外,我国尚未见到开展喷射成形 7055 铝合金研究工作的公开报道。

本研究组开展了全自动控制往复喷射成形装备及工艺的大量前期工作<sup>[13-16]</sup>,制备出  $d\ 260\ \text{mm} \times 1\ 600\ \text{mm}$  的 7055 铝合金工业规格的锭坯。本文作者研究了该工业规格喷射成形 7055 铝合金锭坯的原始组织、挤压及热处理工艺对产品的组织和性能的影响,将对我国喷射成形工业生产工艺的发展及其产品的后续加工工艺起到基础性指导作用。

## 1 实验

7055 铝合金名义成分为 Al-8.2Zn-2.2Mg-2.4Cu-0.2Zr(质量分数, %),熔炼在中频炉中进行,熔炼温度控制在 700~740 °C。熔体经过精炼和除渣后,在自主开发的全自动控制往复喷射成形设备上制备了  $d\ 260\ \text{mm} \times 1\ 600\ \text{mm}$  的铝合金锭坯。喷射工艺雾化气体为氮气。基本工艺参数如下:斜喷角 10°~30°,接收距离 600 mm,接收盘转速 40~60 r/min,下降速度 2~4 mm/s,雾化温度 750~850 °C,雾化压力为 0.8 MPa。将完整的锭坯车圆,测量体积,精度为 1 mm,称量质量,精度为 1 kg,计算致密度。挤压温度为 420 °C,选择  $d\ 270\ \text{mm}$  挤压筒,分别挤压成  $d\ 120\ \text{mm}$  和  $d\ 110\ \text{mm}$  的棒材,挤压比分别约为 5 和 6。选择合适的模具,将材料挤压成外径  $d\ 127\ \text{mm}$ ,内径  $d\ 78\ \text{mm}$  的管,挤压比约 6.1。

利用光学显微镜观察了合金不同状态的显微组织,以 X 射线衍射技术(XRD)对组织进行了物相分析。拉伸力学试样按照 GB/T228—2002《金属材料 室温拉伸实验方法》制成圆棒形拉伸试样,同一状态取 3 根。拉伸实验在 SHIMADZU AG-100KNA 的万能实验机上进行。断口形貌观察在飞利浦 S-515 的扫描电镜上进行。

## 2 实验结果

### 2.1 喷射成形坯宏观形貌

图 1 所示为 7055 铝合金的喷射成形坯的宏观照片,本文研究对象是图中最高的锭坯,其直径约 260 mm,高约 1 600 mm,喷射成形坯上下均匀,表面细致,表面车圆 2~3 mm 即可。车圆后经过测量,喷射成形坯致密度达到 98.2%。



图 1 喷射成形坯形貌

Fig.1 Appearance of as-deposited billet

### 2.2 合金的显微组织及其演变

#### 2.2.1 喷射成形坯显微组织观察及其物相分析

对喷射成形坯件不同部位的组织进行了显微观察,如图 2 所示。对比圆心处(图 2(a)),截面半径中点处(图 2(b))和边缘处(图 2(c))三处的金相组织可知,三处金相组织非常接近,晶粒均为等轴状,粒度宏观均匀,主要在 20~30  $\mu\text{m}$ ,组织无明显宏观偏析。晶内弥散分布着大量细小的一次析出相,晶界上则析出不连续的条状相。

喷射成形坯的 XRD 谱如图 3 所示。经分析得知喷射成形坯组织主要由  $\alpha(\text{Al})$  和  $\text{MgZn}_2$  组成,同时有少量的  $\text{Al}_2\text{Cu}$  和  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ 。

#### 2.2.2 挤压态显微组织观察

图 4 所示为经过热挤压的金相组织。经过挤压后,等轴晶被破碎,组织明显的致密化,且第二相分布更加均匀,整体上孔隙基本消除。如图 4(b)所示,组织有明显的方向性,析出相沿挤压方向分布。

#### 2.2.3 挤压后 T6 态显微组织观察及其物相分析

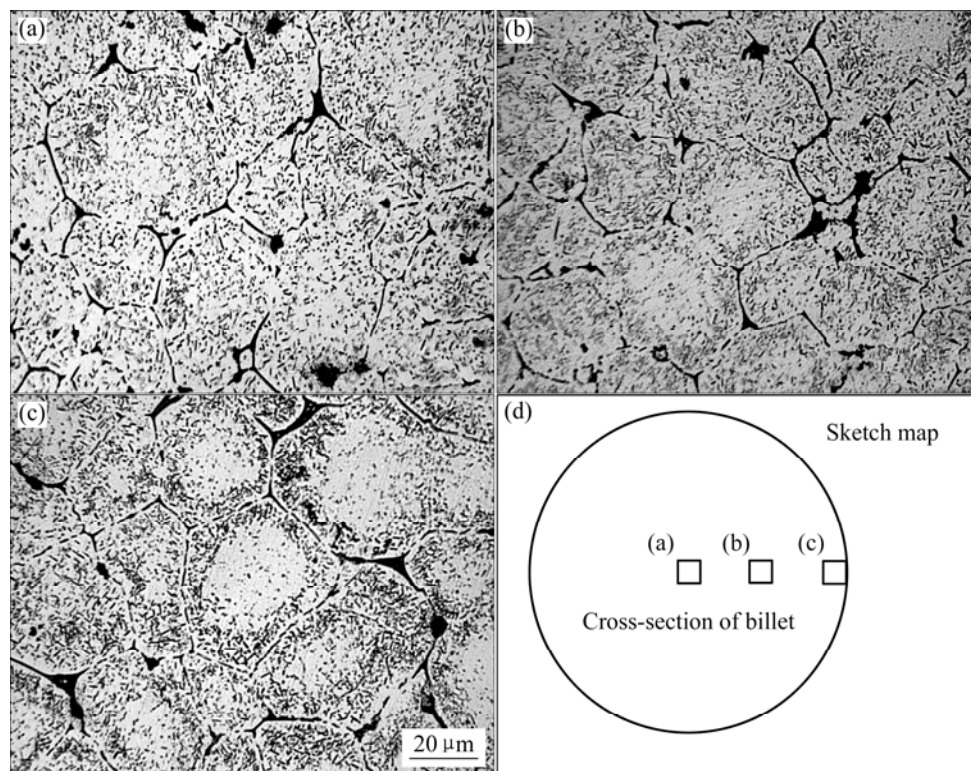


图 2 喷射成形坯横截面上不同区域的显微组织

**Fig.2** Microstructures of different areas on cross section of as-deposited billet: (a) Center; (b) Center of semidiameter; (c) Edge

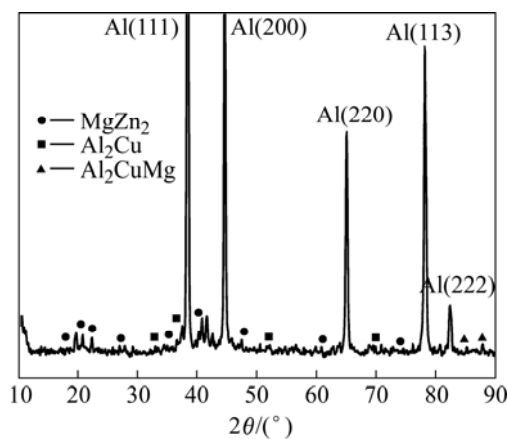


图 3 喷射成形坯的 XRD 谱

**Fig.3** XRD pattern of as-deposited billet

图 5 所示为挤压后经过 T6 热处理的金相显微组织。由图 5(a)和(b)所示的金相组织可以看出, 大量细小的第二相在晶内和晶界上析出。在图 5(b)中还可以发现组织有明显的方向性, 基体之间有第二相析出。

对挤压后 T6 态组织进行了 XRD 物相分析, 实验结果如图 6 所示。经过分析可以得知, 析出相大部分为  $\eta'$ ( $\text{MgZn}_2$ )和少量  $S$ ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ )。与图 3 对比,  $\text{Al}(220)$  峰消失,  $\text{Al}(222)$  峰强度明显增加, 这显示挤压使合金

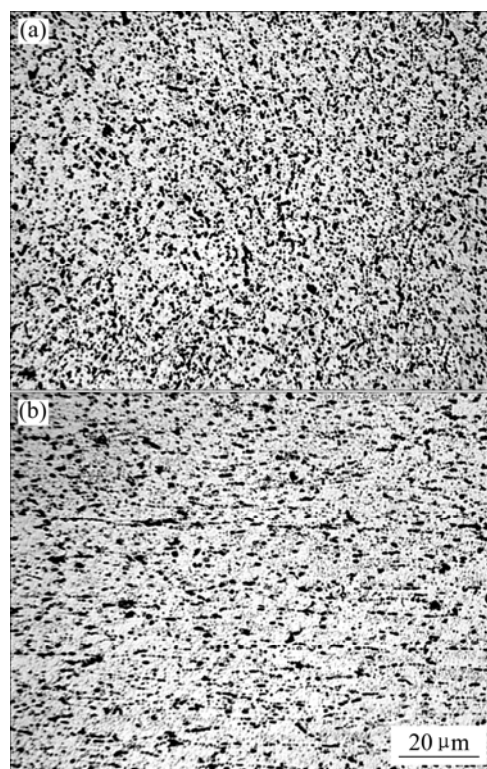


图 4 挤压态的显微组织

**Fig.4** Microstructures of extrusion phase: (a) Transverse; (b) Longitude

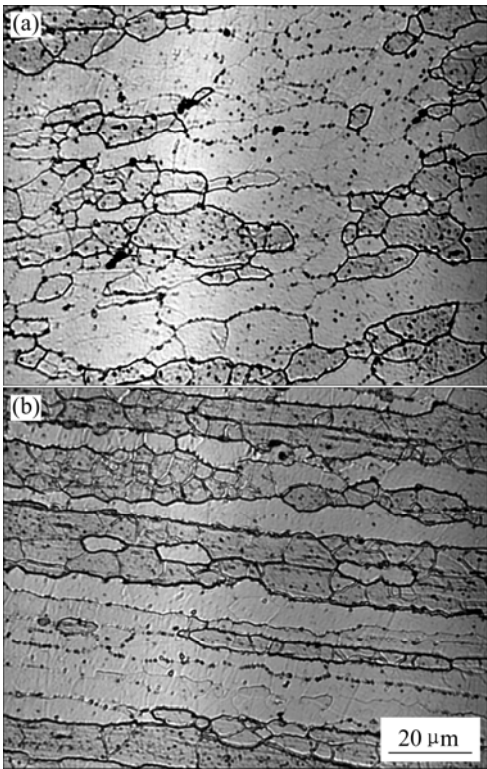


图 5 挤压后 T6 态的显微组织

**Fig.5** Microstructures of as-extruded samples after T6 treatment: (a) Transverse; (b) Longitude

产生了组织。

2.3 合金力学性能

各状态材料的力学性能列于表 1。L 表示平行于锭坯或挤压棒(管)轴向，T 表示垂直于锭坯或挤压棒(管)轴向。样品 9 从外径 127mm、内径 78mm 的挤压管上截取，再进行 T6 处理：先在 450℃ 温度下保温

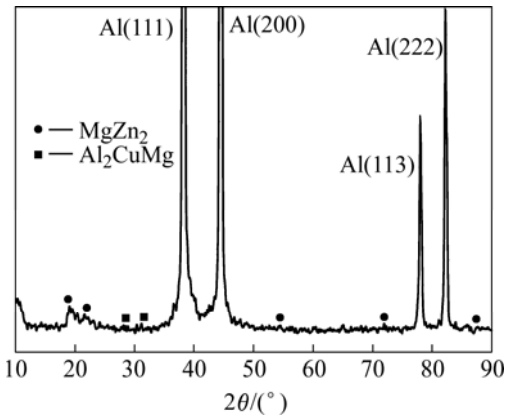


图 6 挤压后 T6 态试样的 XRD 谱

**Fig.6** XRD pattern of as-extruded samples after T6 treatment

2 h，然后上升到 480℃，保温 2 h，水中淬火，然后在 120℃ 时效 24 h。由表 1 可以看到，喷射成型材料  $\sigma_b$  达 222~252 MPa，经过 T6 热处理后， $\sigma_b$  达到 500~543 MPa，横向比纵向要高出几十 MPa， $\delta$  都在 1% 左右。喷射成型材料经过挤压后，纵向的  $\delta$  都在 10% 以上。很明显，经过挤压+T6 处理的样品的纵向  $\sigma_b$  和  $\sigma_s$  比横向  $\sigma_b$  和  $\sigma_s$  分别高出约 60~100 MPa 和 80~130 MPa，纵向的伸长率都远高于横向的。挤压比为 6 的样品的纵向  $\sigma_b$  和  $\sigma_s$  分别比挤压比为 5 的样品的高出约 40 MPa 和 60 MPa。横向的拉伸性能受挤压比的影响不大。样品 9 为挤压管， $\sigma_b$  高达 745 MPa， $\sigma_s$  为 702 MPa， $\delta$  达 12.8%。

2.4 室温拉伸断口形貌观察

图 7 所示为 7055 铝合金挤压后 T6 态室温拉伸断口的 SEM 像。可以看出，拉伸断口为典型的韧性断裂，韧窝均匀。

表 1 不同状态的力学性能

Table 1 Mechanical properties of different conditions						
Sample No.	Condition	Sampling	Extrusion ratio	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta$ /%
1	Spray-forming	L		222	210	<1.0
2	Spray-forming	T		252	223	<1.0
3	Spray-forming +T6	L		500		<1.0
4	Spray-forming +T6	T		543		1.5
5	Extrusion+T6	L	5.0	691	636	13.0
6	Extrusion+T6	T	5.0	630	552	6.0
7	Extrusion+T6	L	6.0	734	691	11.0
8	Extrusion+T6	T	6.0	633	560	7.0
9	Extrusion +T6	L	6.1	745	702	12.8

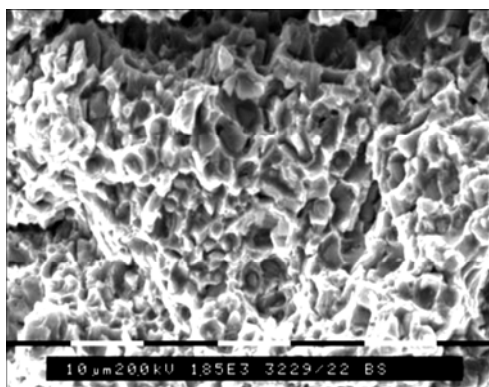


图 7 挤压后 T6 态试样室温拉伸断口 SEM 像

Fig.7 SEM image of tensile fracture of as-extruded sample after T6 treatment

### 3 讨论与分析

本研究采用全自动控制往复喷射成形工艺制备了大规格锭坯, 其宏观形貌上下均匀, 表面细致(图 1), 车圆废料比较少。喷射沉积坯显微组织为等轴晶, 宏观均匀(见图 2), 经测量, 致密度达 98.2%, 而国际上工业产品的致密度约为 97% 左右, 这显示了本研究所采用的喷射成形工艺适于制备高致密度的工业规格铝合金锭坯。经过 T6 热处理后, 喷射成形坯的  $\sigma_b$  最高达 543 MPa, 这在国内相关文献中还未见报道。经过热挤压后, 等轴晶被破碎, 组织进一步细化均匀化, 材料基本上达到全致密(见图 4)。由于晶粒的细化, 晶界增多, 第二相形核的几率增加, 这有利于后续的热处理。

喷射成形态组织的冶金结合质量低于变形后的, 存在微量的空隙和冷粉, 因此, 力学性能无论是强度还是伸长率, 都比变形后相对要低(见表 1 中样品 1 和 2)。喷射成形态组织经过 T6 热处理后,  $\sigma_b$  达到 500~543 MPa, 明显高于铸态铝合金的强度, 表明本研究喷射成形的快速凝固组织有效地克服了传统铸造工艺中形成的粗大组织, 同时大幅度减少了喷射成形工艺中易于产生的孔隙和冷粉等缺陷, 保证了较高的拉伸性能。喷射成形坯是沿纵向连续逐层生长而成的, 孔隙和冷粉等组织缺陷易在层界面处形成, 因此纵向组织结合力就会相对地低于横向的, 进而纵向的  $\sigma_b$  低于横向的。经过挤压后, 原始层结构被打乱, 组织进一步细化和均匀化, 基本消除了喷射成形态可能存在的少量缺陷, 材料性能得到了显著提高。由表 1 中样品 5、7 和 9 的性能数据可知, 在一定限度内, 挤压比

越大, 纵向力学性能就越高, 这可能是由于挤压比越大, 组织的方向性就越强, 组织越细致, 第二相析出就更加弥散的原因。挤压后纵向显微组织有明显的组织现象(见图 4(b)和图 5(b)), 垂直挤压方向的组织结合力低于平行挤压方向的, 因此, 纵向的力学性能明显高于横向的(见表 1 中样品 5 和 6、7 和 8)。样品 9 的  $\sigma_b$  比样品 5 和 7 高出约 10 MPa, 这可能是由于挤压管的挤压比更大, 也可能是由于挤压管厚度小, 比挤压棒的淬火效果更好。

本研究制备的喷射成形 7055 铝合金的强度比美国采用传统工艺制造的合金高出 15%, 这与析出相的弥散程度和晶粒度指标改善密切相关。为了获得最大强化效果, 时效组织应该以 G.P 区和过渡相为主, 但是过渡相一般在缺陷和晶界处择优形成, 即非均匀形核<sup>[17-18]</sup>。本研究中喷射成形铝合金由等轴晶组成, 晶粒细小, 没有宏观偏析(见图 2), 经过挤压后, 晶粒进一步细化和均匀化(见图 4), 显著消除了喷射成形态组织可能存在的微量缺陷。与铸造铝合金相比, 喷射成形铝合金的晶粒更加细小均匀, 晶界数量相对更多, 因而过渡相  $\eta'(\text{MgZn}_2)$  在晶界上非均匀形核的几率更大, 从而使得析出相更加弥散。根据弥散强化 Orowan 机制<sup>[19]</sup>, 析出相弥散程度越高, 合金强度就越高。因此, 喷射成形铝合金的力学性能比传统工艺制造的铝合金的要高得多。另外, 根据 Hall-Petch 公式<sup>[20]</sup>, 晶粒直径越小, 强度就越高, 这也是喷射成形铝合金力学性能优越的原因。

### 4 结论

1) 采用全自动控制往复喷射成形技术制备了  $d$  260 mm $\times$ 1 600 mm 的 7055 铝合金喷射成形坯。喷射成形坯晶粒为等轴状, 粒度均匀, 主要在 20~30  $\mu\text{m}$  之间, 组织无明显宏观偏析, 致密度达到 98.2%, 不低于国际先进工业产品的致密度。

2) 7055 铝合金喷射成形态材料经过 T6 热处理后,  $\sigma_b$  为 500~543 MPa, 显示出全自动控制往复喷射成形铝合金锭坯的缺陷少, 冶金结合质量优越。

3) 由于喷射成形锭坯是逐层生长的, 沿纵向易于富集孔隙和冷粉等组织缺陷, 因此, 喷射成形锭坯的纵向强度略低于横向强度。

4) 经过挤压变形和 T6 热处理后, 该喷射成形 7055 铝合金大规格产品的  $\sigma_b$  最高达 745 MPa,  $\delta$  达 12.8%, 超过对应规格的美国军标。

## REFERENCES

- [1] Grant P S. Spray forming[J]. Progress in Materials Science, 1995, 39(4/5): 497–545.
- [2] Jenabali Jahromi S A. Creep behavior of spray-cast 7XXX aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2002, 23(2): 169–172.
- [3] 米国发, 田世藩, 曾松岩, 李庆春. 雾化喷射沉积技术的发展概况及展望[J]. 材料科学与工程, 1996, 14(4): 8–13.  
MI Guo-fa, TIAN Shi-fan, ZENG Song-yan, LI Qing-chun. The status and prospect of the metal spray atomization and deposition technique[J]. Materials Science and Engineering, 1996, 14(4): 8–13.
- [4] 张济山, 陈国良. 雾化喷射沉积成形材料制备技术的新进展[J]. 北京科技大学学报, 1997, 19(1): 15–21.  
ZHANG Ji-shan, CHEN Guo-liang. Recent progress in spray forming technique for materials processing[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1997, 19(1): 15–21.
- [5] 范洪波, 沈 军, 崔成松, 曹福洋, 李庆春. 喷射成形快速凝固技术在铝合金中的应用[J]. 粉末冶金技术, 1998, 16(2): 137–142.  
FAN Hong-bo, SHEN Jun, CHUI Cheng-song, CAO Fu-yan, LI Qing-chun. The research and use status of spray-forming rapidly solidifying technique in aluminum alloys[J]. Powder Metallurgy Technology, 1998, 16(2): 137–142.
- [6] 张永安, 熊柏青, 刘 江, 张少明, 石力开, 刘 勇, 王 峰. 喷射成型过程中雾化粒滴的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(S1): 78–83.  
ZHANG Yong-an, XIONG Bai-qing, LIU Jiang, ZHANG Shao-ming, SHI Li-kai, LIU Yong, WANG Feng. Computer simulation of droplets in flight stage during spray forming process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(S1): 78–83.
- [7] 张永安, 熊柏青, 刘红伟, 朱宝宏, 石力开, 张济山, 夏芋栗. CuCr25 触头材料的喷射成形制备及组织分析[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1067–1070.  
ZHANG Yong-an, XIONG Bai-qing, LIU Hong-wei, ZHU Bao-hong, SHI Li-kai, ZHANG Ji-shan, XIA Xu-li. Spray forming process and microstructure of CuCr25 contactor material[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(5): 1067–1070.
- [8] YU Fu-xiao, CUI Jian-zhong, Ranganathan S, Dwarakadasa E S. Fundamental differences between spray forming and other semisolid processes[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 304/306: 621–626.
- [9] 彭超群, 黄伯云. 喷射沉积技术[J]. 有色金属, 2002, 54(1): 12–26.  
PENG Chao-qun, HUANG Bai-yun. Spray deposition technology[J]. Nonferrous Metals, 2002, 54(1): 12–26.
- [10] 张永安, 朱宝宏, 刘红伟, 张智慧, 熊柏青, 石力开. Zn 含量对喷射成形 7×××系高强铝合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(7): 1013–1018.  
ZHANG Yong-an, ZHU Bao-hong, LIU Hong-wei, ZHANG Zhi-hui, XIONG Bai-qing, SHI Li-kai. Influence of Zn content on microstructure and properties of spray-formed 7××× series aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(7): 1013–1018.
- [11] Dumont D, Deschamps A, Brechet Y. On the relationship between microstructure, strength and toughness in AA7050 aluminum alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2003, 356(1/2): 326–336.
- [12] WANG Feng, XIONG Bai-qing, ZHANG Yong-an, ZHANG Zhi-hui, WANG Zhi-xing, ZHU Bao-hong, LIU Hong-wei. Microstructure and mechanical properties of spray-deposited Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials and Design, 2007, 28(4): 1154–1158.
- [13] 张 豪. 多层喷射沉积过程及其材料的研究[D]. 长沙: 中南工业大学, 1998.  
ZHANG Hao. Study on Multi-Layer spray deposition process and materials[D]. Changsha: Central South University of Technology, 1998.
- [14] 张 豪. 控制往复喷射成形装置. 中国专利 03230878. 7[P]. 2004-05.  
ZHANG Hao. Setup of controlled reciprocating spray forming. CN 03230878.7[P]. 2004-05.
- [15] 张 豪, 张 荻, 张 捷, 宋 立. 控制往复喷射成形工艺. 中国专利 03117066.8[P]. 2004-02.  
ZHANG Hao, ZHANG Di, ZHANG Jie, SONG Li. Process of controlled reciprocating spray forming. CN 03117066.8[P]. 2004-02.
- [16] 马万太, 王晓勇, 张 豪, 张 捷. 往复式喷射沉积管坯制备中喷射高度的闭环控制[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(2): 254–259.  
MA Wan-tai, WANG Xiao-yong, ZHANG Hao, ZHANG Jie. Closed loop control of spray height in tubular preparation with reciprocating spray deposition process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(2): 254–259.
- [17] 张宝昌. 有色金属及其热处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1993: 8–75.  
ZHANG Bao-chang. Nonferrous metal and heat treatment[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1993: 8–75.
- [18] Zheng L J, Chen C Q, Bai P C, Zhou T T, Liu P Y, Dong B Z. Small-angle X-ray scattering study of precipitates in AlZnMgCu-1.0%Li alloy[J]. Materials Letters, 2003, 58(1/2): 25–28.
- [19] 张俊善. 材料强度学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 66–67.  
ZHANG Jun-shan. Strength of materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004: 66–67.
- [20] 王晓敏. 工程材料学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 12–13.  
WANG Xiao-min. Engineering material science[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002: 12–13.

(编辑 陈爱华)