

文章编号:1000-582X(2004)01-0101-06

喷射成形技术的发展概况及展望*

王文明¹, 潘复生¹, Lu Yun², 曾苏民³

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030; 2. Faculty of Engineering, Chiba University, Chiba Japan;

3. 西南铝业(集团)有限公司, 重庆 401326)

摘要:喷射成形工艺流程短、成本低、沉积效率高、制造系统灵活柔性,是一种极富有发展前景的近终形成形快速凝固技术。介绍了喷射成形技术的发展历程;叙述了喷射成形在铝合金、钢铁材料、镁合金、铜合金、高温合金、金属基复合材料的研究与应用情况;阐述了多层喷射成形技术和原位反应雾化喷射沉积成形技术,对喷射成形技术进行了评价和展望。

关键词:喷射成形;快速凝固;评价;展望

中图分类号:TB333

文献标识码:A

1 喷射成形技术产生的背景

现代工业中,金属材料作为结构材料的主体,用量大,应用范围广,在国民经济中发挥着极其重要的作用。随着科学技术的日新月异和现代航空、航天、汽车、电子工业的迅速发展以及各国军事装备的竞赛,迫切需要高性能金属材料的制备技术。传统制备技术难以满足客观形势的要求,而且材料的使用环境越来越苛刻。快速凝固技术是近几十年来冶金材料领域中凝固技术的一项重要技术进展,由于该技术具有很高的冷却速率($\geq 10^3 \sim 10^6$ K/s)和大过冷度下高的界面生长速率($\geq 1 \sim 100$ cm/s)的凝固特性,能使材料的微观组织均匀细化,消除成分宏观偏析,抑制微观偏析生成,形成亚稳结构,减少脆性相,从而表现出一系列特殊优异的使用性能。可以说它的出现和发展直接促进了新一代金属玻璃、微晶和纳米晶合金的形成^[1-10]。在世界各国研究者的不懈努力下,快速凝固方法层出不穷。迄今为止,已相继发展出几十种新方法。但是采用快速凝固技术制得的新材料,由于冷却速度高,大多呈颗粒状、纤维状或片状,尺寸小,即从宏观角度看,至少有一维尺寸趋于零,难于直接加工成产品,极大地限制了这类材料的应用,更不用谈作为结构件使用了。为了利用这些小尺寸材料,通常借助粉末冶金工艺使其成形,但是粉末冶金方法本身存在诸多缺点(例如

氧化严重、工序复杂、颗粒边界难以消除等)。正是存在以上问题,促使了新的材料制备技术的诞生。喷射成形(Spray forming)技术即是在这种技术背景下产生的。目前在众多文献中,喷射成形还没有统一的称谓,有的称喷射铸造(Spray Casting),也有称喷射沉积(Spray Deposition)的,它们实质上都是一种用快速凝固方法制备大块致密金属材料的高新技术,而且它们兼有半固态成形、近终型成形和快速凝固成形等特点,因此喷射成形理论提出之后,立刻赢得世界工业发达国家的注目,大学、科研院所和著名公司投入大量财力物力争相研究,目前已在铝合金、镁合金、铜合金、钛合金、高温合金、钢铁及复合材料制备方面得到了广泛的应用^[1-10]。文中介绍喷射成形技术的发展历程,叙述喷射成形技术的研究和发展现状,分析讨论喷射成形技术的最新进展并对喷射成形技术进行评价和展望。

2 喷射成形技术的发展历程

喷射成形是英国 Swansea 大学的 A. R. E. Singer 教授于 1968 年首先提出的。为了降低传统铸造-轧制工艺的消耗, Singer 等人发明了将熔融金属喷射沉积到旋转辊上并直接轧制成带材的一体化工艺,即喷射轧制工艺。此后 Singer 的学生 Brooks R G 等人继续发展了该技术,成立了 Osprey 金属公司,于 1974 年将喷射沉积原理应用于锻造毛坯的生产,发明了著名的

* 收稿日期:2003-09-23

基金项目:重庆市院士基金项目资助

作者简介:王文明(1975-),男,安徽东至人,重庆大学博士研究生,主要从事新型金属基复合材料的研究工作。

Osprey 工艺,设计制造了多种 Osprey 成套设备,取得多项专利,使喷射沉积技术获得迅速发展。此后喷射成形技术经历了适用合金系统的实验研究(1975年~1984年)、工艺优化和雾化沉积机理的研究(1984年~1992年)、雾化技术规模的扩大与产业化(1992年~1998年)等自身发展和重大改进的历程^[1]。近年来,喷射成形技术已成为材料科学与工程界的研究和产业化发展的热点之一。自1990年开始每三年召开一次国际喷射成形会议,国内于1998年9月首次召开了喷射成形国内学术研讨会。

3 喷射成形技术的研究现状与应用概况

从喷射成形技术的发展历程来看,研究人员以不

表1 国外喷射成形技术设备及其产品状况

材料	公司名称	设备生产能力/ $t \cdot a^{-1}$	产 品
铝合金	德国 PEAK	3 500	Al-25Si-4Cu-1Mg 合金,做奔驰汽车发动机汽缸套
	日本住友轻金属	1 000	Al-Si 合金做马自达汽车循环发动机叶片
	英国 Osprey Metals	400	高强 Al-Zn, 高温 Al-Cu, 超轻 Al-Li, 金属基复合材料与 PEAK 配套
铜合金	瑞士 Swiss metal (Boillat)	两个公司的总能力 >2 000	取代 Cu-Be, Cu-Ni-Sn 作高技术通讯(电信)电子终端
	德国 Wieland		
特殊钢和超合金	丹麦 Danspray	2 000	D2 碳钢, M152 抗蠕变 12Cr 钢, T15 高速钢, D2 冷轧工具钢
	美国 GE 和 Allvac	500(单班)	燃气涡轮
金	美国 Sprayform Technologies	750(两班)	燃气涡轮机高温合金环件、密封件等
	瑞典 Sandvik Steel		不锈钢管、镍合金管、复合管(用于城市垃圾焚化炉)
轧辊材料	日本住友重工铸锻厂		高铬铸铁、高碳高速钢做轧辊或包复轧辊
	英国 Sheffield Forge-master Rolls		

同的视角对该技术本身特征、传统和新型材料开发及商品化发展作了大量的研究,内容主要涉及方法及设备(喷射锻造、喷射轧制、液态动压实、喷射喷丸、控制雾化沉积过程及其设备改进)、工艺技术(工艺参数研究、质量及成本控制技术)、材料研究(基本上渗透到金属材料研究的各个领域)、产业化发展(上述技术的工程衔接及工业化生产)等多个研究领域,现已取得了一些令人鼓舞的成就^[1-10]。以下着重介绍该技术在材料应用及产业化领域的进展情况。表1给出了国外喷射成形技术的设备和产品状况。

3.1 喷射成形材料研究与应用情况

3.1.1 铝合金

喷射沉积铝合金是研究报道最多的。目前采用喷射成形技术进行铝合金方面的研究工作主要集中在高强铝合金系(7000系,2000系),高比强、高比模量 Al-Li 合金系,耐热高强 Al-Fe 合金系及铝基复合材料等^[2,11-13,15]。喷射沉积从根本上消除了熔铸合金的宏观偏析及粗大的一次析出相;解决了粉末冶金颗粒边界上的难熔氧化物膜,得到各向同性材料。由于喷射成形的生产环节简单,其铝合金的生产成本和直接铸造相当,比粉末冶金成本要低,并且由于没有氧化污染,其疲劳寿命和断裂韧性比粉末冶金好得多。许多过去铸造的铝合金可用喷射成形来生产,且合金性能有所提高。

1) 高强铝合金

研究发现,高强铝合金(2000系,7000系)采用喷

射成形技术可以避免普遍铸造合金中粗大晶粒的出现,同时对冶金质量(Fe、Si含量)的要求大幅度放宽。Tsao 和 Lavernia 等人的研究结果^[2]表明,采用喷射成形技术可以显著地提高 2024 合金的力学性能。原因是由于弥散分布的细小析出相具有较高的强度,在材料变形过程中通过阻碍位错的运动而增加材料的变形抗力,从而提高材料强度。从沈军等人的研究结果^[2]可以看出,采用喷射成形技术制备的 2024 合金经 T4 热处理后,力学性能指标 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 和 δ 值分别可达 543 MPa、475 MPa 和 18.5%。E. J. Lavernia 等人对加入 1% Ni 和 0.8% Zr 的 7075 超高强度铝合金经喷射成形后,获得了优异的室温拉伸性能^[8]。电镜分析结果表明,热挤压后的喷射成形铝合金的晶粒大小仅为 2~7 μm ,晶内有大量的沉积硬化相。用喷射成形法制备的 Al-11.5Zn-2.5Mg-1Cu-0.2Zr 合金的 $\sigma_b = 705$ MPa, $\sigma_{0.2} = 688$ MPa, $\delta = 13\%$ 。上述这几种高强度铝合

金可以取代钛和钢,可用作航天部件等。目前高强铝合金以其优异的综合性能在商用飞机上的使用量已经达到其结构重量的80%以上。

2) 高比强、高比模量铝合金

Al-Li合金是一种高比强、高比模量合金。采用铸锭冶金方法制备铝锂合金时,锂的含量被严格限制在2.7 wt%以内。超过此值时,铸锭中会产生明显的宏观偏析,形成粗大的析出相。喷射成形可提高铝合金中Li的固溶度,减少宏观偏析,晶粒和第二相明显细化。在保证性能的前提下,可进一步提高合金的比强度。Lavernia等人的研究表明,2024+1%Li合金室

表2 工艺制度对Al-Li合金力学性能的影响

工艺	固溶	时效	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
喷射成形+热轧	500 °C × 1.5 h 水淬	190 °C × 24 h 空冷	516	460	12.2
粉末+挤压			535.6	472.8	6.4

3) 低膨胀、耐磨铝合金

Al-Si系中的高硅铝合金在保持较高强度的同时,具有良好的耐磨、耐热性能以及低的膨胀系数,是汽车工业常用的结构材料。铸造过共晶Al-Si合金的初生硅粒尺寸很大,可达100 μm,而喷射成形材料的硅粒可细化到3~5 μm,这样不仅易于机械加工,而且其耐磨性也很好,目前已大规模用于制造奔驰汽车汽缸套。一种商业化的Al-20Si-5Fe-2Ni合金的力学性能为: $\sigma_b \geq 360$ MPa, $\sigma_s \geq 240$ MPa, $\delta \geq 2\%$, $E = 98$ GPa, $\rho = 2.78$ g/cm³, CTE = 16×10^{-6} K⁻¹。

3.1.2 钢铁材料

目前喷射成形钢铁材料的研究主要集中于现有合金的成本降低和性能改善。

1) 高碳高速钢

喷射成形克服了钢铁材料中含碳量高时碳的粗化问题,使碳保持固溶态或细小弥散状态,保证了材料的良好力学性能。Eonsik Lee等人研究了喷射成形Fe-1.28% C-6.4% W-5.0% Mo-3.1% V-4.1% Cr-7.9% Co(wt%)高速钢的凝固组织和M₂C碳化物分解情况,指出其碳化物组织为不连续网状分布的片状M₂C和细小均匀分布的球形MC;在高温退火和热锻时碳化物分布更为均匀,导致弯曲强度的提高。张丽英等人研究了喷射成形工艺制备WC颗粒增强高速钢基复合材料,结果表明沉积态复合材料中固溶了较多的合金元素,复合材料的硬度明显提高。

2) 工具钢

工具钢通常存在着偏析和碳化物等结构不均匀问题。喷射成形制造工具钢,固溶偏析范围小,形成的碳

温下的 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 和 δ 分别可达513 MPa、363 MPa和16.4%,可见合金的韧性比普通铸造和烧结材料大幅度提高。White和Kojima等人分别研究了喷射成形8090合金和8091合金的显微组织和力学性能,同样发现合金的韧性得到明显改善。表2给出了中国科学院金属研究所用喷射成形制备的Al-2.24Li-1.48Cu-1.2Mg-0.26Zr合金与粉末冶金产品的性能对比^[2,24]。由此可见,喷射成形工艺大幅度地提高了合金的塑性,其伸长率高达12.2%。粉末冶金铝锂合金强度虽然高,但塑性偏低,只有6.4%。而实际上限制Al-Li合金应用的主要问题是初塑性偏低。

化物非常细小且均匀弥散或碳化物完全固溶于基体中,从而获得高的强度、硬度和耐磨性。Mchugh等人研究喷射成形H13工具钢时发现了H13钢中碳化物的沉淀和长大受到抑制,540 °C时效处理后硬度和强度提高,高温性能改善。

3) 不锈钢

喷射成形不锈钢具有良好的抗氧化性和耐磨性。MIT的U. Ibrahim等人研究了喷射沉积316 L不锈钢的组织性能,发现沉积材料的晶粒尺寸为10至40 μm,95%的组织为奥氏体。经轧制和退火后可获得极细的晶粒组织(0.1 μm)、极高的屈服强度(达1300 MPa)和强度极限(1600 MPa)。

4) 轴承钢

轴承钢要求具有高抗压强度、高耐磨性以及高弹性模量。Tinscher等发现喷射成形AISI52100轴承钢材料的组织更加均匀,无宏观偏析,经变形量 $\varphi \approx 3$ 的热轧后材料孔隙完全密合,晶粒尺寸由ASTM2~3级细化为ASTM8~10级,疲劳性能有所提高。章靖国等研究了喷射成形GCr15%轴承钢的组织,发现材料组织为细小的珠光体(层片间距约85 nm),油淬后得到细小的马氏体(宽约0.35 μm)。

3.1.3 其它合金材料

1) 镁合金

镁合金是一种质轻的结构材料,缺点是抗氧化和耐腐蚀性较差,难以加工成形。喷射成形工艺可提高镁合金的性能,对提高镁合金的塑性也很显著。例如:与常规工艺相比较,经雾化沉积的喷射成形Mg-4.81Zn-0.35Zr-1.29Y合金,其屈服强度提高了25%,抗拉

强度提高了12%,同时具有较高的伸长率($\delta = 18\%$)。

2) 铜合金

铜合金也可以用喷射技术成形,喷射成形速度可达30~60 kg/min。Swiss metal开发了4种铜合金取代了Cu-Be和粉末Cu-Ni-Sn,其中的PSZ黄铜(Cu₁₆Zn₂Si₁Pb)和B05青铜(Cu-13.5Sn-0.5Pb)不需要热处理,只要冷拔后即可达到所需的性能。B05具有高屈服强度(800 MPa)和低弹性模量(85 GPa),允许有较大的弹性变形(1%)^[2]。另外两种铜合金B14(Cu-13.5Sn)和C72900(Cu-15Ni-8Sn)均具有较高强度(110~140 MPa),可用于取代Cu-Be(C17300)合金。

表3 IN718合金在喷射沉积、铸造及锻造态的力学性能

工艺状态	20℃拉伸				649℃拉伸				649℃持久	
	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_t /MPa	δ /%	φ /%	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_t /MPa	δ /%	φ /%	σ /MPa	τ /h
铸造	918	1 090	11	586	100
锻造	1 125	1 366	21	...	966	1 104	20	...	725	100
喷射沉积	1 214	1 352	9	17	1 014	1 118	14	25	725	201

3.1.4 金属基复合材料

制备金属基复合材料采用喷射成形技术有其独特的优越性:能够充分发挥细小粒子的增强作用,任意调整强化粒子的体积分数,大大改善强化相与基体相之间的界面结合状态,从而获得性能更加优异的复合材料。White等人研究了用SiC_p和B₄C强化喷射沉积Al-Li-Cu-Mg-Zn8090系合金的组织 and 性能。结果显示,喷射沉积热压材料的弹性模量比铸锭合金高出25%。R. J. Perez等人利用喷射沉积技术成功地制取了6061Al/Gr金属基复合材料,提高了该材料在0.1~10 Hz范围内的阻力能,同时使材料获得较高的弹性模量。Lavernia和Gupta等人研究了喷射共沉积Al-Li-SiC_p/8090-SiC_p和Al-Ti-SiC_p等金属基复合材料的组织和性能。结果表明,喷射成形没有引起有害界面反应,材料界面结合良好。同时发现,晶粒组织细化,合金基体固溶度提高,宏观偏析消除,材料性能得到显著提高。

3.2 喷射成形工艺的改进与最新进展

3.2.1 多层喷射沉积技术

喷射成形技术制成的材料具有晶粒细小、组织均匀及抑制偏析等特点。与普通铸造、压力加工及粉末冶金比较,该技术具有成形设备简单、加工工序少、金属利用率高等优点。但是传统喷射沉积技术存在一定的局限性,即沉积物的冷凝速度受到一定限制,喷射沉积坯尺寸精度不高。1990年我国陈振华教授和黄培

3) 高温合金

目前众多牌号的高温合金,如IN718、Rene 95、AF115、AF2-10A、Rene 80、IN100、IN901、IN625、MERL76、Nimonic115、MAR-M002等均已经经过喷射沉积实验,组织分析和性能测试表明,材料呈细等轴晶组织,具有较高的抗拉强度和屈服强度。由于含氧量低,喷射沉积使高温合金在800~1 000℃的拉伸塑性较之PM工艺有大幅度改善。N. C. Field比较了IN718合金在喷射沉积、铸造及锻造态的力学性能(见表3),指出喷射沉积不仅有利于合金拉伸性能的改善,而且使持久性能也大幅度提高^[2]。

云院士创立了多层喷射沉积技术^[6,14,17-19]。它与传统喷射沉积技术的区别在于:沉积坯为多次合成构成,因此其冷凝速度高于传统喷射沉积坯的;沉积坯为金属喷嘴多次往返移动喷射沉积而成,因此管坯尺寸可以做得很厚且冷却速度不受影响,而且板坯的宽度和长度都可以很大;沉积坯的尺寸精度高;制备的复合材料均匀性非常好。

利用多层喷射沉积技术已经制备出了耐磨铝合金材料、耐热铝合金材料、颗粒增强型铝基复合材料,高强铝合金材料、自蔓延铝基复合材料以及双金属材料等。此处只简要介绍颗粒增强型铝基复合材料和自蔓延铝基复合材料^[6,17,19]。

1) 颗粒增强型铝基复合材料

喷射沉积技术是使流态化增强颗粒进入基底金属雾化锥,与液滴均匀混合,一起沉积在基底上并迅速得到凝固。研究得比较多的是6066/SiC_p和6013/SiC_p复合材料,由于多层喷射沉积技术的“多层”的特性,金属雾化液滴是一层一层地沉积在基底上,因此增强颗粒分布得更加均匀且与基底结合得更好,界面不发生严重的反应。

2) 自蔓延铝基复合材料

利用多层喷射沉积技术制备Al/Fe₂O₃、Al/CuO的自蔓延铝基复合材料,它能大幅度提高增强颗粒的利用率,不存在颗粒损失的问题,增强颗粒Al₂O₃是在反应过程中生成的,颗粒表面无污染,颗粒与基底界面

结合良好,生成的颗粒细小,均匀并且反应很充分。

最近陈振华教授等^[6]又提出了坩埚移动式喷射共沉积制取铝基 SiC 颗粒增强复合材料的装置和方法,并与传统的喷射共沉积装置进行了比较。在 SiC 颗粒增强相加入方法中,新工艺采用了双环缝复合雾化器和螺杆送料负压引流输送装置,解决了大尺寸、高 SiC 体积百分比复合材料坯制备技术问题。通过上述装置已经制备出 $\Phi 800 \times 1\ 000\ \text{mm}$, SiC 含量为 20 wt%, 重达 1t 的铝基复合材料。经后续积压、锻造加工,制备出了性能优异的 6 000 Al/SiC_p, FV0812Al/SiC_p, 7075Al/SiC_p 的大尺寸复合材料。论文^[6]讨论了喷射共沉积过程中金属液体对 SiC 颗粒的捕获机理,喷射共沉积过程中的传热与凝固特征,分析了 SiC 颗粒的加入对金属液滴凝固的影响。

3.2.2 原位反应雾化喷射沉积成形技术

近年来,原位反应雾化喷射沉积成形技术得到了迅速的发展。但迄今为止,由于相关的基础性研究工作滞后,致使原位反应雾化喷射沉积成形技术的实际应用受到限制。其中的主要问题可概括为:1)对原位反应雾化喷射沉积成形过程的机理缺乏系统深入的研究,难以获得增强相均匀分布和显微组织一致的沉积坯件。2)增强相无一例外是在雾化室中通过气-液和液-固反应原位生成。这类原位反应生成增强相的技术未能很好解决颗粒在基体中均匀分布的问题,而且增强相的利用率仍然较低^[7,21-22]。

为了有效解决喷射沉积成形金属基复合材料制备过程中增强颗粒分布不均和颗粒利用率较低的问题,杨滨等^[7]创新性地提出将增强相的生成置于熔化室合金熔体中完成(而不是现行通常在雾化室中进行),然后再进行后续的雾化喷射沉积成形步骤,成功地开发出了一种熔铸-原位反应喷射沉积成形颗粒增强金属基复合材料制备新技术,该技术的突出优点是:颗粒在熔体内部原位反应生成,不存在颗粒损失问题,材料制备成本降低;颗粒在基体中分布均匀;可沿用现行喷射沉积成形制备金属材料的各项工艺参数,设备无需做任何改动。杨滨等已成功制备出 TiC/Al-20Si-5Fe 复合材料。

4 喷射成形技术的评价与展望

如上所述,喷射成形技术所具有的优越性正是其近年来得到迅速发展的直接动力和根本原因。但是总体来说,这种技术仍处于工业化生产的初期。为了加速这一工艺技术的发展步伐,近期应着重研究和解决的问题主要有^[1-10,25-30]:

1) 雾化沉积机理的研究和理论模型的建立与完善

喷射成形过程是一在短暂时间内发生并完成的复杂的统计过程,基本上可以分成金属释放、雾化、喷射、沉积、沉积体凝固等 5 个阶段。由于受复杂的多体、多参数共同作用控制,并涉及流体力学、传热学、凝固理论、数值模拟、检测与控制等多学科领域。因此发展并掌握喷射成形技术,必须系统深入地研究喷射沉积过程各个阶段的基础理论以及各种工艺参数的优化、检测与控制,合金的凝固组织与性能,雾化器结构以及沉积系统的传动与控制。喷射成形已有的理论模型还不能精确地控制喷射沉积过程,因此大力加强对这一技术的科学基础和模型化研究,预测和掌握各种工艺参数对喷射沉积凝固过程的影响规律,为工艺过程的优化控制提供可靠的理论依据就显得尤为重要。

2) 金属释放、雾化、喷射、沉积、沉积体凝固过程的自动控制

现代材料加工制备工艺已逐步实现自动化控制与智能化管理。传统的以操作经验为主的工艺技术已经不能适应既要实现大批量生产又要满足个性化需求的复杂市场环境,甚至不能保证喷射成形过程的重复稳定再现。因此,需要把先进的现代控制技术与有效的管理方式融入到喷射成形过程的自动控制与智能化管理当中,实现喷射成形智能化,最优化。目前,美国 MTS 公司为美国海军研制的智能型模糊逻辑控制模式,是一种全新的智能型先进的喷射成形过程控制技术,它由先进的传感器、计算机、控制执行机构和现行的软件系统组成。基于神经网络的人工智能分析,可较为有效地解决喷射成形工艺过程的多变量输入、多变量输出的非线性控制问题,有利于各种复杂形状零件的直接成形。

3) 雾化喷嘴和高自由度沉积器的设计和改进

雾化喷嘴系统始终是喷嘴成形装置改进的核心。最新研究表明,德国 Peak 公司采用新型喷嘴结构——“扫描型双喷嘴”系统沉积出 $\Phi 300 \times 1\ 400\ \text{mm}$ 铝合金锭条,消除了疏松,达到了完全致密,其直径偏差 1~2 mm,喷射收得率 95%,沉积坯在挤压前无需做任何表面精加工。同样,研制和采用高自由度的沉积器是未来沉积器发展的一个重要方向。最近,美国海军海战中心(NSWC)研制出用于大尺寸厚壁高温合金管坯的 5 个自由度沉积器和沉积不同复杂非轴对称零件的 7 个自由度沉积器。通过雾化装置的设计和改进,使其更适用于生产各种形状的预成形坯,进一步扩大雾化沉积技术在制造复合材料、双性能材料、涂层和其它表面处

理方面的应用,进一步促进喷射成形向“净成形”技术的发展。

4) 沉积材料显微组织和物理性能与力学性能的深入研究。

设计和开发出性能更加优异的新型合金与复合材料是喷射成形技术师始终不渝的目标。借助现代材料试验测试仪器,研究沉积材料的微观组织新貌,测试其物理和力学性能,寻找组织与性能的内在联系,适时调整材料的化学组成与制备工艺,最终制备出性能符合于目标的新材料。

5 结论

采用喷射成形技术能够制备出高致密度、低含氧量、具有快速凝固显微组织特征的高性能合金与金属基复合材料。喷射成形工艺流程短、成本低、沉积效率高、制造系统灵活柔性,是一种极富有发展前景的近净成形快速凝固技术。随着喷射成形技术产业化演进,关键技术环节重点突破,喷射成形技术的应用将更加广泛与深入,不久的将来将成为高性能材料的重要生产方式。

参考文献:

- [1] 王建强. 喷射成形技术的研究发展及展望[J]. 世界科技研究与发展, 2001, 22(1): 62-65.
- [2] 张永昌. 金属喷射成形的进展[J]. 粉末冶金工业, 2001, 11(6): 17-22.
- [3] 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.
- [4] 孙剑飞, 沈军, 贾均, 等. 喷射成形——一种先进的金属热成形技术[J]. 材料开发与应用, 1999, 14(2): 42-45.
- [5] 米国发, 田世藩, 曾松岩, 等. 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.
- [6] 陈振华, 陈鼎, 康智涛, 等. 坩埚移动式喷射共沉积制取铝基复合材料的技术[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2002, 29(6): 22-30.
- [7] 杨滨, 王锋, 黄赞军, 等. 喷射沉积成形颗粒增强金属基复合材料制备技术的发展[J]. 材料导报, 2001, 15(3): 4-6.
- [8] LAVERNIA E J, GRANT N J. Spray Deposition of Metals: A Review[J]. Materials Science & Engineering, 1988, 98: 381-388.
- [9] ALAN LEATHAM. Spray Forming Technology[J]. Advanced material & processes, 1996, (8): 31-36.
- [10] ALAN LEATHAM, MILLANDS. Spray forming alloys: products and markets[J]. JOM, 1999, (3): 45-52.
- [11] GUPTA M, IBRAHIM I A, MOHAMED F, et al. Wetting and Interfacial reactions in Al-Li-SiC Metal Matrix Composites Processed by Spray Atomization and Deposition[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26: 66-73.
- [12] SANO H, TOKIZANE N, OHKUBO Y, et al. Spray Formed Aluminum alloy Components for Automotive Applications[J]. ASTM, 1994, 5: 363-369.
- [13] HARIPRASAD S, SASTRY S M L, TERINA K L. Microstructure and Mechanical Properties of Dispersion - Strengthened High - Temperature Al - 8.5Fe - 1.2V - 1.7Si Alloys Produced by Atomized Melt Deposition Process [J]. Metallurgy Transaction, 1993, 24A: 865-873.
- [14] 米国发, 曾松岩, 李庆春, 等. 喷射共沉积技术在颗粒增强金属基复合材料中的应用[J]. 航空材料学报, 1994, 14(2): 55-62.
- [15] 苏俊, 崔成松, 曹福洋, 等. 喷射成形技术在钢铁材料中的应用[J]. 铸造, 2002, 51(7): 399-402.
- [16] 范洪波, 沈军, 崔成松, 等. 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.
- [17] 傅定发, 陈振华. 多层喷射沉积工艺的研究现状[J]. 材料开发与应用, 2001, 16(2): 26-29.
- [18] 张淑英, 张二林. 喷射共沉积金属基复合材料的发展现状[J]. 宇航材料工艺, 1996, 4: 1-7.
- [19] 康智涛. 多层喷射共沉积制备大尺寸 SiC 颗粒增强铝基复合材料的工艺、设备及过程原理研究[D]. 长沙: 中南大学非平衡材料研究所, 2001.
- [20] WILLIS T C. Spray Deposition Process for Metal Matrix Composite Manufacture [J]. Metals & Materials, 1998, (4): 485-492.
- [21] RAY S. Review Synthesis of Cast Metal Matrix Particulate Composites [J]. Journal of Materials Science, 1993, (28): 5397-5413.
- [22] KOCTAK M J, PREMKUMAR M K. Emerging Technologies for the In-situ Production of MMCs [J]. JOM, 1993, 45(1): 44-49.
- [23] JOHN WOOD. Spray Forming Poised to Enter Mainstream [J]. Powder Metallurgy, 1997, (40): 23-28.
- [24] PALMER I G, CHELLMAN D J, WHITE J. Evaluation of a spray deposited low density Al-Li alloy [J]. ASTM, 1994, (6): 385-394.
- [25] LAWLEY A, DOHERTY R D, BROOK R G. Spray forming commercial products: process design and optimization the minerals [J]. Metals & Materials Society, 1998, (1): 699-708.
- [26] SPIEGELHAUER C. Properties of spray formed tool & high-speed steels [J]. The Minerals, Metals & Materials Society, 1998, (1): 653-662.
- [27] LEE E S, PARK W J. Development of high performance high speed steels by spray casting [J]. The Minerals, Metals & Materials Society, 1998, (1): 661-669.
- [28] NICHOLAS J, GRANT N J. Recent trends and development with rapidly solidified materials [J]. Metallurgy Transaction, 1992, 23A(4): 1085-1088.
- [29] DOHERTY R, CAI C, KOHLER L K K. Modeling and microstructure development in spray forming [J]. The International Journal of Powder Metallurgy, 1997, 33(3): 50-58.
- [30] MATHUR P, ANNAVARAPU S, APCLIAN D. Process control, modeling and application of spray casting [J]. JOM, 1989, 41(10): 23-29.

(下转第 111 页)

The Research and Simulation of the Fuzzy—PID Control System for Ball Mill Pulverizing of Power Plant

LI Gang , WANG Guang-jun

(College of Power Engineering, Chongqing University , Chongqing 400030, China)

Abstract: This paper focuses on the main problems in the operation control for ball mill pulverizing system, proposes the dynamic mathematical model for the steel ball mill pulverizing system, simulates and analyzes the dynamic character of the system. A Fuzzy - PID controller with on - line self - tuning parameters based on fuzzy control technology is proposed. The simulation results show that the Fuzzy - PID control system can improve the controlling effect and the ability of suppressing disturbances.

Key words: ball mill pulverizing system; fuzzy logic; intelligent control; simulation

(编辑 陈移峰)

(上接第 106 页)

Advance in Spray Forming Technology and Its Prospect

WANG Wen-ming¹, PAN Fu-sheng¹, LU Yun², ZENG Su-min³

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Faculty of Engineering, Chiba University, Chiba, Japan;

3. Southwest Aluminum Industry (Group) Company, Ltd., Chongqing 401326, China)

Abstract: Spray Forming technology gets involved with new materials preparation techniques in multiple domains such as powder metallurgy, fluent metal atomization, rapid cooling and non - equilibrium solidification. High performance alloy and metal matrix composite with high density, low oxygen content and microstructure featuring rapid solidification can be fabricated by spray forming. Spray forming, which is of short process flow, low cost, high deposition efficiency, flexible manufacture system, becomes a kind of near shape forming and rapid solidification technology with great prospect. Therefore the developing process history of spray forming technology is introduced and the current research and development status of spray forming technology in the fields of aluminum alloy, steel material, magnesium alloy, copper alloy and high temperature alloy and metal matrix composite is described. Multi - layer spray forming and in - situ reaction atomization spray forming are also discussed. In addition, evaluation and prospect for the technology are presented.

Key words: spray forming; rapid solidification; evaluation; prospect

(编辑 陈移峰)