

德国面向智能制造的跨机构合作机制及对我国的启示 ——以“未来增材制造”计划为例

李志荣, 李 阳

(中国科学技术信息研究所, 北京 100038)

摘 要: 智能制造是制造业的未来, 为抢占先机, 德国通过实施数字化、智能化、网络化等战略, 积极推动智能制造。本文对德国弗劳恩霍夫协会面向智能制造的代表性项目“未来增材制造”计划进行了系统调研, 对该计划的概况、参与机构的合作机制、措施、最新成果等进行了深入研究。研究发现德国在跨机构合作以推动智能制造方面的主要经验包括: (1) 以应用为导向, 以充分发挥各参与机构的专业优势为宗旨; (2) 借助虚拟实验室实现跨机构协作和数字化制造; (3) 灵活的机构转换机制保证科研团队的稳定等, 实现产学研协同创新。

关键词: 德国; 智能制造; 弗劳恩霍夫协会; “未来增材制造”计划; 机构间协作机制

中图分类号: F204 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2021.11.005

面向智能制造, 为确保“德国制造”的全球领先地位, 德国将数字化、智能化、网络化的发展理念逐步融入制造业中, 围绕高科技、工业数字化转型等, 先后发布《高技术战略》(2006)、《新高技术战略——为德国而创新》(2014)、《高技术战略2025》(2018)以及“工业4.0”计划(2013)、《数字议程(2014—2017)》(2014)、《数字化战略2025》(2016)、《德国工业战略2030》(2019)等系列政策措施, 通过增加投资鼓励关键高新技术发展、推动数字化转型等, 保持其科技创新活力, 从而促进经济增长^[1-4]。

德国在金属增材制造(又称“3D打印”)领域的研究和应用走在世界前列^[5, 6], 其将增材制造视为实现“工业4.0”计划的“智能生产”和“智能工厂”的重要路径之一, 进行重点发展^[7-9]。2008年, 德国成立了直接制造研究中心(Direct Manufacturing

Research Center, DMRC), 主要业务是研究和推动增材制造技术在航空航天领域的应用。德国《数字化战略2025》重点支柱项目包括工业增材制造等; 德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会(Fraunhofer-Gesellschaft, 以下简称“弗劳恩霍夫协会”)、亥姆霍兹联合会(Helmholtz Association of German Research Centres)、Concept Laser公司、EOS公司等, 为德国增材制造创新做出了贡献。特别值得一提的是, 由于相互协作带来良好的经济效益, 德国科研机构与企业间逐渐形成了良好的产学研协作氛围和合作机制, 进而提升了德国的科研创新效率^[10-13]。所以德国政府特别提倡对增材制造的各种资源进行整合, 从发展增材制造所需的技术和工艺的各环节入手, 实施纵向科技攻关^[9]。

弗劳恩霍夫协会是欧洲最大的应用科研机构, 在产学研协同创新方面表现突出, 旗下多家研究

第一作者简介: 李志荣(1978—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为新材料和先进制造领域科技信息分析和科技创新评价研究。

项目来源: 国家科技图书文献中心“信息产业安全国际战略与政策情报研究”课题2: 面向国家重大项目的专题情报服务——增材制造与激光制造专项情报服务(2021XM59-1); 中国科学技术信息研究所重点工作项目“重点科技领域前沿跟踪与深度研究”(ZD2021-01)。

收稿日期: 2021-08-02

所在增材制造领域积累了丰富的经验。其官网2021年1月发布的资料显示,其2020年的研究经费达到28亿欧元(合人民币约217亿元),其中约24亿欧元(合人民币约186亿元)来自委托合同项目^[14]。

1 “未来增材制造”计划概况和参与机构

1.1 计划概况

2017年11月,弗劳恩霍夫协会启动“未来增

材制造”(FutureAM)计划,又称“下一代增材制造”(Next-Generation Additive Manufacturing)计划^[15]。该计划整合了弗劳恩霍夫协会旗下6家研究所的研究力量和资源,主要目标是将增材制造金属部件的生产速度提高至少10倍。“未来增材制造”计划将在制造工艺、材料开发、系统自动化和流程数字化四个方面开展研究(见图1),致力于实现:可扩展和稳健的增材制造工艺流程;扩大可加工和价格实惠的材料范围;工程技术系统化和自动化;

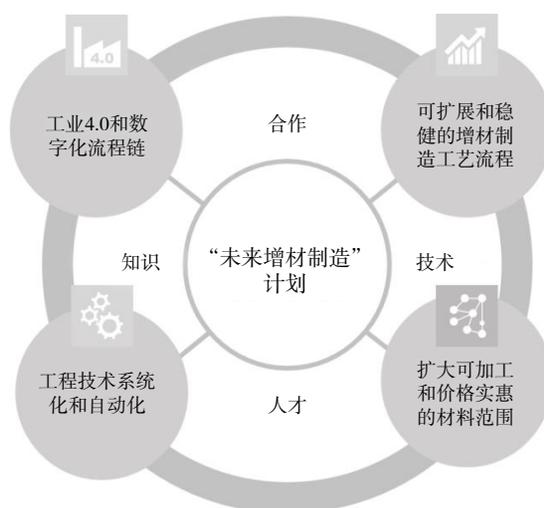


图1 “未来增材制造”计划的四个研究方向和框架体系

工业4.0和数字化流程链。

该计划期望通过6家研究所在知识、技术和人员方面的协作和创新,实现:(1)高度利用和整合分散在各研究所的增材制造资源,建立一个全面合作平台;(2)以生产定制化金属部件为目标,创建与增材制造生产过程的可扩展性、生产效率和质量相关的技术先决条件,以确保德国在金属增材制造领域的全球领先优势。

1.2 参与机构概况

参与“未来增材制造”计划的6家研究所(见表1)分别是^[16]:

(1)德国亚琛(Aachen)的激光技术研究所(Fraunhofer Institute for Laser Technology, ILT)。该所在激光加工技术方面有30多年的历史,在增材制造方面拥有多项世界领先的技术。

(2)德国德累斯顿(Dresden)的材料与光束技术研究所(Fraunhofer Institute for Material and

Beam Technology, IWS)。该研究所专注于激光的表面处理和功能制造技术的开发和应用。

(3)德国不莱梅(Bremen)的制造技术与先进材料研究所(Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials, IFAM)。其是欧洲最重要的材料表面处理、粘合、成型技术以及功能材料开发研究机构之一。

(4)德国开姆尼茨(CheMNitz)的机床与成型技术研究所(Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology, IWU)。该研究所是德国领先的生产工程研究和开发领域的创新研究机构。

(5)德国汉堡(Hamburg)的增材制造技术研究所(Fraunhofer Research Institution for Additive Manufacturing Technologies, IAPT)。该所在开发完整的数字化流程链方面业内闻名。

(6)德国达姆施塔特(Darmstadt)的计算机图形研究所(Fraunhofer Institute for Computer

表 1 参与“未来增材制造”计划的 6 家研究所

序号	机构名称	所在城市	专业优势
1	激光技术研究所	亚琛	激光加工技术
2	材料与光束技术研究所	德累斯顿	激光的表面处理和功能制造技术
3	制造技术与先进材料研究所	不莱梅	材料表面处理、粘合、成型、功能材料开发
4	机床与成型技术研究所	开姆尼茨	生产工程研究和开发
5	增材制造技术研究所	汉堡	数字化流程链开发
6	计算机图形研究所	达姆施塔特	视觉计算应用

Graphics Research, IGD)。该研究所是世界领先的视觉计算应用研究机构,在几何建模方面经验丰富;开发了一款名字叫“墨鱼”(Cuttlefish)的多材料 3D 打印机驱动程序,支持数据流式传输,可实现复杂的大型 3D 模型的快速打印。

“未来增材制造”计划的研究开发活动围绕两个方面:从订单到产品制造的全流程角度,全面考虑增材制造在数字和实体方面创造的附加值;为研发飞跃性技术,推动增材制造进入下一代技术。

2 “未来增材制造”计划的合作机制和措施

为保证研究目标的达成,参与“未来增材制造”计划的 6 家研究所,根据各自在增材制造领域的研究积累和技术专长,通过分工和合作,实现协同创新,主要措施如下。

2.1 充分发挥各研究所的专业优势,推动跨领域合作

“未来增材制造”计划以发挥 6 家研究所的专业优势为宗旨,对四个研究方向进行任务分工,研发工作模式为“一所主导,多所协同”,具体如下:

(1) 激光技术研究所负责“未来增材制造”计划的总体协调,确保实现可扩展和稳健的增材制造工艺流程;

(2) 材料与光束技术研究所和制造技术与先进材料研究所合作,共同研发如何通过添加第二种高强度材料制造金属材料增强结构;

(3) 机床与成型技术研究所负责组件后处理技术的系统工程和自动化实现;

(4) 增材制造技术研究所负责工业 4.0 和数字化过程链建设,计算机图形研究所将一同参与该

部分的建设工作。

这 6 家研究所及其科学家通过紧密合作,实现对整个流程链中所有工艺步骤的整合,包括设计或重新设计金属部件、用选择性激光熔化工艺生产金属部件、用激光金属沉积技术制造支撑结构、自动移除支撑结构、对金属部件进行后处理等。

2.2 通过虚拟实验室实现网络化协作和数字化制造

与全球增材制造领域的其他联盟或研究计划相比,“未来增材制造”计划的显著特点是更加注重实用,致力于新材料开发、创新设计方案、实现完全数字化的流程链,以及将生产速度提升 10 倍。

为了实现上述目标,分布在德国 6 个城市的 6 家研究所通过一个虚拟实验室(Virtual Lab)系统进行合作。该虚拟实验室通过封闭的数字化地图对所有参与机构的专业技能和拥有的设备进行画像,以数字孪生的方式为每个实体(设备或产品)描述和分配一个虚拟身份,组成了信息化实体系统的虚拟部分。在此基础上,所有的物理实体产品都可以通过建模和仿真进行优化,这对于实现错误诊断、预测分析、产品和过程优化等目标,从而保证产品质量是非常重要的。

以汽车转向节的制造过程演示为例(见图 2),展示 6 家研究所是如何通过虚拟实验室进行沟通与合作的。

第一步,对组件进行设计或重新设计,例如为减轻重量在汽车转向节部件中引入点阵或空心结构。这部分工作由负责“工业 4.0 和数字化过程链”建设工作的增材制造技术研究所完成。

第二步,通过激光粉末床熔化(Laser Powder Bed Fusion, LPBF)工艺制造汽车转向节部件,将

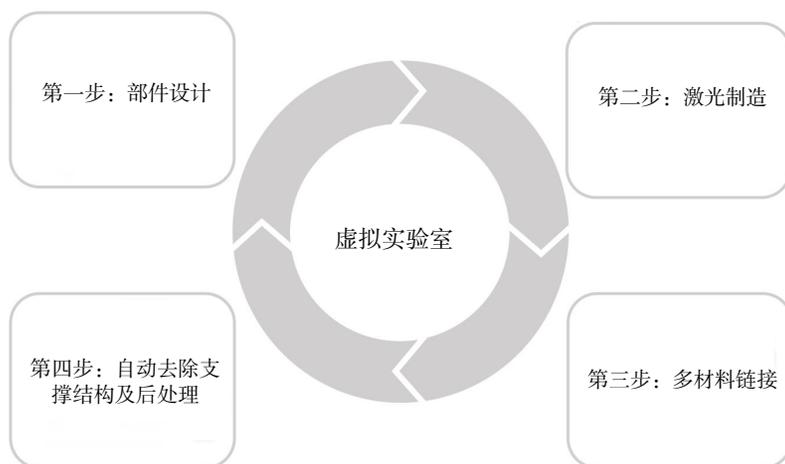


图2 通过虚拟实验室实现汽车转向节部件的协作制造过程演示

采用由激光技术研究所开发的“可扩展和稳健的增材制造工艺流程”。

第三步，将制造的部件通过材料与光束技术研究所开发的激光材料沉积工艺与第二种高强度材料进行链接而制成增强结构部件。

第四步，通过机床与成型技术研究所开发的“工程技术系统化和自动化”系统，自动去除汽车转向节部件的支撑结构并进行后处理，实现自动化制造。

从汽车转向节制造过程的演示可以看出，“未来增材制造”计划通过将新技术和新工艺融入研究开发活动中，并通过虚拟实验室协同合作，期望以最佳方式实现应用目标。

未来，虚拟实验室将能实现：

(1) 为新产品开发提供数据支撑，大大减少新产品资格认证的时间；

(2) 将产品生产需求自动分配给机器的能力会越来越强，包括调整生产过程中的相关工艺参数以及自主考虑产品要求（如质量）和生产目标（如交付时间），制造过程将更加智能；

(3) 通过适当的评估和监控工具为现场人员提供支持，整个制造过程将完全数字化，人类的角色将从当前的集中指令型向决策和监控型转变。

2.3 吸纳企业参与关键技术开发

实现数字化是“未来增材制造”计划所有研究开发活动的主线，也是计划成功的关键。为了弥补弗劳恩霍夫协会在数字化流程开发方面的资源不

足，“未来增材制造”计划吸纳了位于德国汉堡的LZN公司。LZN公司原是德国汉堡工业大学的下属公司，以开发完整的数字化流程链而闻名。为更方便参与“未来增材制造”计划，LZN公司更名为增材制造技术研究所，成为弗劳恩霍夫协会的一员，负责工业4.0和数字化流程链的开发。这种以灵活的方式吸纳具有专业优势的企业成为项目关键技术开发成员的机制值得借鉴。

3 “未来增材制造”计划研究进展

在实施过程中，“未来增材制造”计划的研究人员不断探索增材制造技术与人工智能、机器学习等新兴技术的结合，在增材制造新工艺开发、多金属材料一体化制造、模块化材料开发、系统自动化和流程数字化方面取得阶段性进展^[13]。

3.1 开发增材制造新工艺，实现加工速度和质量双提升

3.1.1 新激光粉末床熔化技术使制造速度提高10倍

2020年7月，激光技术研究所宣布开发出可扩展的激光粉末床熔化（LPBF）技术加工方案，新加工方案原型机集成了5个激光扫描系统，实现了扫描振镜和线性轴系统的同步运动，在加工速度方面比现有激光粉末床熔化设备提高10倍，可制造的金属部件尺寸最大可达1 000 mm × 800 mm × 500 mm。而且新激光粉末床熔化加工方案配置的软件，可控制粉末材料熔化时的能量输入，能为每

个熔体轨迹分别设置工艺参数, 提高部件质量和制造速度。

3.1.2 超高速激光材料沉积技术修复或制造三维复杂结构部件

激光技术研究所从 2010 年左右就开始了超高速激光材料沉积 (Extreme High-Speed Laser Material Deposition, EHLD) 技术的开发, 初衷是借助激光技术在旋转对称部件表面沉积、涂覆金属涂层, 达到保护金属部件的目的。超高速激光材料沉积采用激光将金属粉末加热熔融成液态金属, 沉积在工件表面形成金属涂层, 且不需要加热基板, 可用于修复或制造金属部件。对于长度为 1 200 mm, 直径为 200 mm 的圆辊, 表面涂层厚度范围为 50 至 300 μm 时, 超高速激光材料沉积的加工速度为 20 至 200 m/min。

超高速激光材料沉积工艺过程经济环保, 具有替代当前金属腐蚀和磨损保护方法 (如硬镀铬和热喷涂) 的潜力, 获得弗劳恩霍夫协会年度奖。目前, 激光技术研究所正在德国亚琛建造开发一个基于超高速激光材料沉积技术的原型设备, 设备喷嘴可以以重力加速度的 5 倍喷射金属粉末, 有望实现 3D 复杂结构部件的高速制造。

3.2 扩大增材制造金属材料范围

对于金属增材制造来说, 商业化的金属材料仍然比较少, 开发更多可用材料是一大挑战, 也是“未来增材制造”的目标之一。

3.2.1 人工智能和机器学习助力新材料开发和制造质量提升

材料与光束技术研究所金属材料开发和激光加工技术方面具有丰富经验, 借助先进的人工智能和机器学习技术, 材料与光束技术研究所图像处理和数据管理课题组的科研人员, 通过传感器高频采集了大量激光加工过程的详细数据并进行深度分析, 可提升对激光加工过程材料变化和激光加工工艺参数的理解, 由此创造更多、更神奇的材料。

3.2.2 激光焊接直接制造无缺陷镍基高温合金 MAR-M247 部件

MAR-M247 镍基高温合金是一种定向凝固高温合金材料, 具有优良的可铸造性、抗蠕变和抗热腐蚀性能, 被广泛用于制造工作温度在 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 左右的航空发动机和重型燃气轮机热端部件 (如动叶片

和静叶片), 但是由于该合金熔融—凝固过程速度过快会导致开裂, 无法通过焊接工艺制造金属部件, 限制了其在更多领域的应用^[17]。材料与光束技术研究所的科研人员借助其开发的熔融—凝固进程感应系统, 采用激光沉积焊接工艺, 成功加工出无缺陷的镍基合金 MAR-M247 部件, 这对于实现航空发动机和重型燃气轮机相关高温合金部件的快速制造具有重大意义。

3.2.3 多金属材料的一体化制造

理论上, 增材制造可以实现多种材料的一体化制造, 而无需后续的连接处理, 但多金属材料一体化增材制造仍然面临材料融合过程无法控制、产品可靠性检验和验证方法缺乏等挑战。材料与光束技术研究所的研究团队在熔融—凝固进程感应系统的帮助下, 控制不同材料在组件中的位置, 成功地制造了一种从镍基合金 718 (Inconel 718) 到钴基合金 72 (Merl 72) 的渐变材料, 可最大限度地发挥各成分材料的功能。

多金属材料一体化制造的成功打开了新功能和应用的大门, 这意味着不仅可以实现部件的不同功能, 还可以根据后续的应用需求, 将不同的材料精确放置在制造部件中最适合的位置, 这是传统设计无法实现的, 使制造高性能部件成为可能, 例如制造更轻和耐高温的涡轮叶片。

3.2.4 材料改性和“模块化材料系统”开发概念

大多数激光粉末床熔化工需要球形金属粉末, 导致成本居高不下, 制造技术与先进材料研究所正在测试各种改性方法以提高金属粉末的流动性, 以提高竞争力。制造技术与先进材料研究所的研究团队正在开发一种“模块化材料系统” (Modular Material System), 这个系统将包括母合金、金属粉末, 也包括预合金钢; 为了使制造的金属部件具有某些特性, 也可以向预合金钢中添加其他金属粉末。

3.3 工程技术系统化和自动化开发

3.3.1 自动化后处理系统

当前, 金属增材制造零件的结构复杂, 需要繁琐的手动后处理过程, 其成本占总处理成本的 70%, 亟需提高后处理过程的自动化水平。机床与成型技术研究所负责工程技术系统化和自动化开发, 期望在激光增材制造过程中使用自动化集成组

件,减少手工操作,以避免过程中断,从而提高制造部件的可重复性。

同时,基于“可根据制造过程要求而进行自我配置的灵活机器概念”而设计的自动制造单元,包括搬运、粉末移除、支撑结构去除、机械返工和光学组件测量等部件,将用于演示和验证增材制造零部件自动后处理的可行性。

3.3.2 3D 打印过程原位在线监测软件提高鲁棒性

为了提高制造过程的鲁棒性,激光技术研究所的科研人员正在研究监视金属 3D 打印的新方法。激光技术研究所在其增材制造系统中集成了多种传感和监测设备用于原位在线监测,例如,结构传感器会检测到诸如支撑结构去除时间等关键事件;超声波传感器分析空气传声,以确定组件质量;利用脉冲激光引发部件的结构噪声,并将结果传输给激光测振仪,有助于发现微孔位置,以便立即进行干预。原位在线监测应该做到用后续加工程序对制造中的金属部件的局部问题进行修改。

3.3.3 材料性能检测和质量保障

为了确保连续供应生产系统的金属粉末质量一致,制造技术与先进材料研究所的研究团队计划开发一个在线质量保证系统,未来该系统将被整合进制造工艺系统。目前,制造技术与先进材料研究所已经开发了一个材料测试平台,可对各种材料进行质量检测,并通过模拟粉末运输行为及控制其运动保证了金属粉末质量的一致性。

4 经验总结

为实现“增材制造”的智能制造,弗劳恩霍夫协会响应德国政府号召,通过“未来增材制造”计划整合了旗下各研究所的增材制造资源,为确保德国在金属增材制造领域的全球领先优势做出努力和贡献,其运行机制和经验值得借鉴。

(1) 以应用为导向的跨机构合作机制。

在完成富有挑战性的项目时,弗劳恩霍夫协会旗下的各研究所通过临时组建合作团队的方式进行机构间合作,协同推进、达成项目目标。“未来增材制造”计划的实施过程和机制即是非常典型的例子,以实现“将增材制造金属部件的生产速度提高至少 10 倍”为目标,充分发挥分布在德国 6 个城市的 6 家研究所的各自专业优势,促进机构间合作,

保障了项目目标的实现。

(2) 借助数字化的虚拟实验室实现机构间协作和数字化制造。

“未来增材制造”计划以实现从订单到产品制造的全流程数字化为目标,研发飞跃性技术,推动增材制造进入下一代技术。为实现目标,分布在德国 6 个城市的 6 家研究所通过一个虚拟实验室系统共同参与数字化制造过程,合作制造实体产品的展示样件。

(3) 灵活的转换机制保障了研究机构和科研团队的稳定,为科技创新提供基础保障。

为更方便参与“未来增材制造”计划,LZN 公司通过更名为增材制造技术研究所的方式,成为弗劳恩霍夫协会的一员。这种根据特定研究项目需求,非常灵活地将企业整体改制为研究机构的做法,不仅实现了资源的高效利用,同时保证了研究机构和科研团队的稳定,是一种非常值得借鉴的科技创新机构合作机制,也是推动德国工业创新的根本性力量之一。■

参考文献:

- [1] 阳晓伟, 闭明雄. 德国制造业科技创新体系及其对中国的启示 [J]. 技术经济与管理研究, 2019 (5): 32-36.
- [2] 中德商务通. 德国的数字经济发展战略与监管 [EB/OL]. (2020-05-31) [2021-01-20]. https://www.sohu.com/a/398870625_120054473.
- [3] 李楚天, 马颖蕾. 工业与高科技的交响乐: 德国高科技产业的发展密码 [J]. 张江科技评论, 2021 (2): 52-55.
- [4] 顾立平, 张潇月. 德国科学组织联盟的数字转型战略分析 [J]. 图书馆杂志, 2020, 39 (1): 102-111.
- [5] 万勇, 黄健. 国外增材制造发展政策与研究进展概述 [J]. 新材料产业, 2016 (6): 2-6.
- [6] 周宸宇, 罗岚, 刘勇, 等. 金属增材制造技术的研究现状 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (6): 9-14.
- [7] 黄卫东. 材料 3D 打印技术的研究进展 [J]. 新型工业化, 2016, 6 (3): 53-70.
- [8] 3D 印梦园. 欧洲各国金属增材制造产业发展现状 [EB/OL]. (2016-12-27) [2021-01-20]. https://www.sohu.com/a/122697876_482215.
- [9] 李陶. 工业 4.0 背景下德国应对 3D 打印技术的法政策学分析——兼论我国对 3D 打印技术的法政策路径选

- 择 [J]. 科技与法律, 2015 (2): 322-339.
- [10] 企业智能制造. 一文带你读懂德国科研机构 Fraunhofer, 揭秘德国制造创新的秘密 [EB/OL]. (2019-03-11) [2021-01-10]. https://www.sohu.com/a/300381598_728387.
- [11] 周小梅, 黄淑宏. 发达国家研发活动公私合作模式及经验借鉴——以英国和德国为例 [J]. 全球科技经济瞭望, 2020, 35 (10): 8-14.
- [12] 史世伟. 德国国家创新体系与德国制造业的竞争优势 [J]. 德国研究, 2009, 24 (1): 4-8.
- [13] 张勇. 德国制造业发展模式研究及对我国的启示 [J]. 管理观察, 2017 (26): 98-102.
- [14] Fraunhofer-Gesellschaft. About fraunhofer [EB/OL]. (2021-01-01) [2021-02-21]. <https://www.fraunhofer.de/en/about-fraunhofer/profile-structure.html>.
- [15] Fraunhofer Institute for Laser Technology. FutureAM – next generation additive manufacturing [EB/OL]. (2017-11-30) [2021-01-21]. https://www.futuream.fraunhofer.de/en/news_and_media/press-release-futuream-2017-11-30.html.
- [16] Fraunhofer Institute for Laser Technology. Partners of the Fraunhofer project FutureAM [EB/OL]. (2017-11-30) [2021-03-25]. <https://www.futuream.fraunhofer.de/en/partners.html>.
- [17] 盖其东, 汤鑫, 曹腊梅, 等. 合金双性能铸造整体叶盘热处理制度研究 [J]. 热加工工艺, 2006, 35 (16): 39-41.

German's Inter-agency Collaboration Mechanism and Experiences for Intelligent Manufacturing: An Case of the FutureAM Project

LI Zhi-rong, Li Yang

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

Abstract: Intelligent manufacturing is the future of manufacturing industry. In order to seize the opportunities, Germany has promoted intelligent manufacturing actively by implementing strategies such as digitalization, intelligence and networking. So this paper studies a typical project for intelligent manufacturing of German's Fraunhofer Association, which is called the FutureAM Project, including the overview of the project, the cooperation mechanisms of the participating institutions, measures, the latest progress, and so on. The main experiences of it includes: (1) application-oriented, and with the purpose of giving full play to the professional advantages of the participating institutions; (2) realizing inter-agency collaboration and digital manufacturing with the help of "Virtual Lab"; (3) flexible institutional transformation mechanism ensures the stability of research team, which promotes the collaborative innovation of the industry-university-research.

Keywords: Germany; intelligent manufacturing; Fraunhofer; "FutureAM" Project; inter-agency collaboration mechanism