

粒与铣削刀具的表层发生剧烈的摩擦作用而产生大量的切削热,由于进给速度很高,型砂颗粒中的热量不能及时沿着冻结砂坯或铣削刀具传出,导致切削部位的温度显著升高。另外随着主轴进给速度的提高以及切削深度的增加,单位时间内铣削刀具接触的冰晶黏结桥目数也增多,消耗的动能增大,产生的热量也增多,导致冷冻砂型局部温度显著上升。

当冷冻砂型切削深度增加时,单位时间内切削的冷冻砂型砂屑量增大,刀具局部产生的切削热和切削温度也随之上升。然而,从正交表的极差分析结果可看出,冷冻砂型局部的切削温度随切削深度的增大而增大的幅度较进给速度和主轴转速的幅度小,这是因为随着切削深度增加,每道次产生的型砂颗粒数量显著增加,总体型砂颗粒的热容量也增加,因此切削区域的温度上升较进给速度上升的幅度小。在冷冻砂型的长时间切削加工过程中,随着切削过程热量累积,冷冻砂型的抗拉强度逐渐降低,显著影响其尺寸精度,当冷冻砂型的抗拉强度低于0.8MPa时,其切削精度逐渐变差。因此,在切削加工过程中,当主轴转速为4000r/min、进给速度为100mm/s、切削深度为4mm、切削宽度为12.8mm时,冷冻砂型局域瞬态温度较低,对冷冻砂型的强度影响较小,其切削尺寸精度较高。

### 3.3 冷冻砂型低温制备热场统计学分析

根据冷冻砂型切削区域的瞬态热场分析优化的切削数据,即在主轴转速5000r/min、进给速度100mm/s、切削深度4mm、切削宽度12.8mm条件下,对冷冻砂型进行较长时间切削加工过程温度场采集。所采用的冷冻砂

表2 L(3<sup>4</sup>) 试验结果正交分析表

		进给速度 (mm/s)	主轴转速 (r/min)	切削深度 (mm)	切削宽度 (mm)	切削温度 (°C)
试验号	1	A1	B1	C1	D1	-16
	2	A1	B2	C2	D2	-15.2
	3	A1	B3	C3	D3	-15.9
	4	A2	B1	C2	D3	-14.7
	5	A2	B2	C3	D1	-13.9
	6	A2	B3	C1	D2	-12.1
	7	A3	B1	C3	D2	-14.5
	8	A3	B2	C1	D3	-9.4
	9	A3	B3	C2	D1	-7.6
K <sub>1</sub>		-47.1	-45.2	-37.5	-37.5	
K <sub>2</sub>		-40.7	-38.5	-37.5	-41.8	
K <sub>3</sub>		-31.5	-35.6	-44.3	-40	
R <sub>1</sub>		-15.7	-15.1	-12.5	-12.5	
R <sub>2</sub>		-13.6	-12.8	-12.5	-13.9	
R <sub>3</sub>		-10.5	-11.9	-14.8	-13.3	
R		5.2	3.2	2.3	1.4	
优化方案A1B1C3D2, 影响显著性因素A>B>C>D						

型的尺寸为350mm×350mm×200mm的立方块,并且是在-35°C的低温环境下冻结而成(-20°C无法满足长时制备)。在冷冻砂型的芯部选定测试点A,对冷冻砂型切削过程中的A处区域瞬态温度进行采集,图5所示为测试点A的位置。冷冻砂型切削过程温度采集的时间间隔为0.5s,最后对约10000个数据的温度采集值进行分析,结果如图6所示。

在统计学中,在5000s的较长切削加工时间内,一般利用数据的置信区间对这个样本的总体参数进行区

间估计,置信区间表示的是被估计参数的真实值在一定概率下落在所测量结果附近的程度。对位置A处的温度采集值进行统计学分析,发现温度采集值平均值的95%的置信区间为[-29.1380, -29.0113],表明有95%的概率,最终测试的温度值将落入最低-29.1380°C、最高-29.0113°C的区间内。因此,冷冻砂坯的预冻结温度为-35°C时,基于瞬态热场分析优化的切削参数加工的冷冻砂型局域温度可保持在-29.1°C左右,此时可以保证冷冻砂型具备足够的表面硬度和强度,

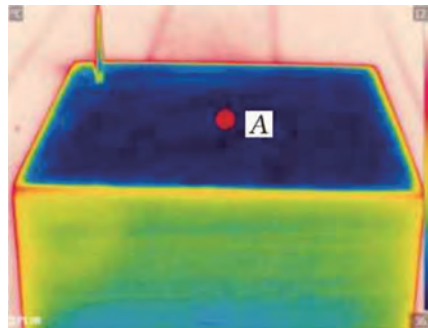


图5 冷冻砂型切削过程温度测试位置

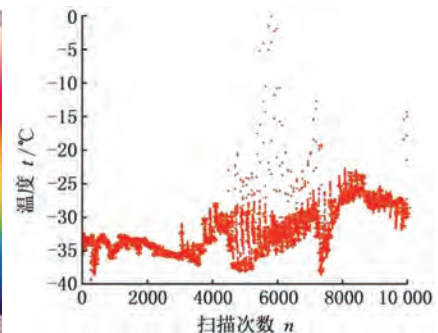


图6 A点瞬态温度试验值

刀具切削过程累积的热量不会对冷冻砂型的整体切削精度产生影响,可以实现冷冻砂型长时间稳定的高精高效制造。同时,当冷冻砂型的含水量为4%、冷冻温度低于 $-20^{\circ}\text{C}$ 时,冷冻砂型抗拉强度高于 $1.1\text{ MPa}$ ,表面硬度高于 $70\text{g/mm}^2$ ,透气性高于68,冷冻砂型满足铸造用砂型性能需求,采用优化的切削加工工艺参数制备冷冻砂型(芯)并进行组装,浇注获得尺寸精度可达CT8级的铸件,可实现高、中、低温合金的快速绿色制造<sup>[4]</sup>。

#### 4 结论

为实现冷冻砂型无模成形的高精高效制造,采用冷冻砂型尺寸精度控制和局域瞬态热场分析对冷冻砂型的加工成形参数进行联合约束。冷冻砂型切削区域热场分析的正交试验结果表明,进给速度的变化对冷冻砂型切削过程局部瞬态热场的影响显著,其次是主轴转速、切削深度和切削宽度。在切削刀具进给速度为 $100\text{mm/s}$ 、主轴转速 $4000\text{r/min}$ 、切削深度 $4\text{ mm}$ 、切削宽度 $12.8\text{mm}$ 条件下,通过数字化无模成形技术制备出的冷冻砂型尺寸精度较高。采用优化参数对预冷温度为 $-35^{\circ}\text{C}$ 的冻结砂坯进行 $5000\text{s}$ 的长时切削加工,温度采集值的统计分析结果表明,其平均值的95%的置信区间为 $[-29.1380, -29.0113]$ ,冷冻砂型具备较高的强度和表面硬度,可实现冷冻砂型的高精高效低温制备过程。**7**

#### 参考文献

- [1] 单忠德,朱福先.应用PCD刀具铣削砂型刀具的磨损机理和预测模型[J].机械工程学报,2018,54(17):124-132.
- [2] GUO Zhi, SHAN Zhongde, LIU Feng, et al. Experimental Investigation on the Performance and Mesostructure of Multi-material Composite 3D-printed Sand Mold[J]. Rapid Prototyping Journal, 2019,26(2):309-318.
- [3] SHAN Zhongde, GUO Zhi, DU Dong, et al. Digital High-efficiency Print Forming Method and Device for Multi-material Casting Molds[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2020, 15(1):328-337.
- [4] SHAN Zhongde, YANG Haoqin, LIU Feng, et al. Performance of Digital Patternless Freeze-casting Sand Mould [J]. China Foundry,2020, 17(4) :308-313.
- [5] 颜永年,单忠德.快速成形与铸造技术[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [6] 张娇娇,刘瑞玲,魏胜军.绿色铸造黏结剂的研究与应用现状[J].铸造设备与工艺,2014(1):54-58.
- [7] SHAN Zhongde, QIN Shaoyan, LIU Qian, et al.Key Manufacturing Technology & Equipment for Energy Saving and Emissions Reduction in Mechanical Equipment Industry[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing,2012, 13(7):1095-1100.
- [8] 单忠德.无模铸造[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [9] 宋祥宇.复杂砂型高速切削加工基础研究[D].北京:机械科学研究总院,2014.
- [10] 杨浩秦.数字化无模冷冻铸造成形机理研究[D].北京:机械科学研究总院,2020.
- [11] SHAN Zhongde, GUO Zhi, DU Dong, et al. Coating Process of Multi-material Composite Sand Mold 3D Printing[J]. China Foundry, 2017, 14(6):498-505.
- [12] 谢大进.精密砂型数控铣削刀具切削力及磨损行为研究[D].南昌:南昌航空大学,2018.
- [13] 饶江华.精密砂型数控铣削加工工艺研究[D].南昌:南昌航空大学,2016.

#### 基金项目

国家杰出青年科学基金 (51525503)

#### 作者信息

杨浩秦,男,1990年生,博士。研究方向为先进成形技术与装备。E-mail:yang-haoqin@nuaa.edu.cn。单忠德(通信作者),男,1970年生,研究员、博士研究生导师,中国工程院院士。研究方向为数字化机械装备与先进成形技术。E-mail:shanzd@nuaa.edu.cn。

## 我会承办复合材料技术与装备发展 国际工程科技战略高端论坛

6月24日至25日，中国工程院国际工程科技战略高端论坛——复合材料技术与装备发展国际高端论坛暨智能成形制造技术与装备国际会议在南京成功召开。

本次论坛由中国工程院主办，中国工程院机械与运载工程学部、南京创新周组委会、南京航空航天大学、中国机械制造工艺协会、中共南京市秦淮区委、秦淮区人民政府联合承办，机械结构力学及控制国家重点实验室、先进成形技术与装备国家重点实验室、先进复合材料技术与装备创新联盟协办。中国工程院副院长钟志华院士视频参会，中国工程院一局副局长、一级巡视员梁晓捷，江苏省教育厅一级巡视员洪流，江苏省科技厅副厅长赵建国，江苏省工业和信息化厅副厅长黄萍，南京市人民政府副市长邢正军，我校校长单忠德院士，副校长宋迎东、姜斌，中国工程院机械与运载学部办公室、江苏省国防科工办、南京市科技局等单位有关负责同志参加大会。

来自海内外的26名两院院士、300余名知名专家学者和企业代表参加论坛。开幕式由中国工程院院士、中国商用飞机有限责任公司C919大型客机总设计师吴光辉主持。

洪流受江苏省人民政府马欣副省长委托宣读了致辞。马欣对论坛的召开表示热烈祝贺，他介绍了“强富美高”新江苏建设取得的阶段性成果，



指出“江苏省最大的资源是创新资源，最大的优势是实体经济优势，最大的潜力是创新链与产业链的高效融合”。他强调，担负起习近平总书记赋予江苏的“争当表率、争做示范、走在前列”重大使命，必须坚定不移实施创新驱动发展战略，加快实现高水平科技自立自强。他希望与会院士和专家能够以本次高端论坛为契机，携手促进产学研有力链接，大力支持新发展阶段江苏的建设和发展，并对南京航空航天大学科研创新发展、学科专业建设和人才培养工作提出了殷切期望。



钟志华通过视频连线代表主办方与会各位院士专家表示欢迎，向承办单位和协办单位表示感谢。他指出，习近平总书记在两院院士大会和中国科协第十次全国代表大会上发表的重要讲话，吹响了实现高水平科技自立自强的号角。此次论坛的主旨就是要响应总书记号召，探讨新一代复合材料技术与装备、智能成形制造技术与装备的发展对策，贯彻落实科教兴国战略、人才强国战略和创新驱动发展战略，积极服务国家重大需求，强化国家战略科技力量。他希望与会院士和科技工作者瞄准“四个面向”，勇担强国使命，切实按照总书记提出的“四个表率”的要求，积极助力国家科技高水平自立自强。



邢正军代表南京市委、市政府对参会院士、领导和嘉宾表示热烈欢迎，指出此次论坛是南京创新周期的一



次科技盛会。他介绍了南京在践行新发展理念、加强创新能力、推动高质量发展等方面实施的一系列重要举措，表达了对院士专家参与南京创建创新名城和全球创新城市建设的热切期盼。



单忠德代表承办方向各位参会的领导、院士专家表示欢迎。他表示，举办此次论坛既是贯彻落实习近平总书记在两院院士大会重要讲话精神的生动实践，也是加快建设科技强国，实现高水平科技自立自强的重要举措。他介绍了南航在复合材料技术与装备领域形成的鲜明研究特色，并表示南航将坚持把发展科技第一生产力、培养人才第一资源、增强创新第一动力更好结合起来，以国际创新港为牵引，探索产学研深度融合新机制新模式，努力为南京创新名城建设和江苏担当“争做表率、争做示范、走在前列”新使命，为教育强国、科技强国、制造强国、网络强国建设作出新的更大贡献。



本次大会特别邀请了谭建荣院士作了“智能制造与智能机器人：关键技术与发展趋势”的专题报告、段宝岩院士作了“高性能电子装备机电耦合技术及应用”的专题报告、侯晓院

士作了“碳纤维复合材料在空间的应用与展望”的专题报告、王玉忠院士作了“热固性树脂基复合材料的升级回收循环”的专题报告，闫楚良院士作了“复合材料在航空航天领域中的应用



大会特邀报告分别由黄庆学院士、朱美芳院士和谭建荣院士主持。

围绕此次论坛主题，大会设立了四个分论坛，46位专家就复合材料设计与智能复合材料、复合材料制造工艺与数字化智能化装备、复合材料加工装配连接与检测评价技术、复合材料绿色回收与循环利用技术、数字化智能化成形制造技术与装备等议题开展学术报告和交流研讨，其中有13位来自美国、英国、德国、法国、韩国、新加坡等国家的海外高水平专家学者通过视频连线进行了报告交流，充分展示了对于新一代复合材料技术与装

备、智能成形制造技术与装备发展的创新研究成果。

及展望”的专题报告，李贺军院士作了“高性能抗氧化碳/碳复合材料强化策略”的专题报告，魏毅寅院士作了“空天飞行器与复合材料”的专题报告。

备、智能成形制造技术与装备发展的创新研究成果。

大会期间，还举行了中国工程院复合材料技术与装备发展战略咨询研讨会，分设了院士咨询研讨组，航空航天行业咨询研讨组，轨道交通、汽车、能源等行业咨询研讨组三个组别进行。与会院士、专家以及企业代表就复合材料技术与装备发展的现状与挑战、关键科学与技术问题、未来发展趋势与策略等进行了深入的交流研讨，积极为面向2035的复合材料构件精确制造发展战略出谋划策。

(下转第09页)

## 2021年第十五届机械工业节能减排工艺技术研讨会在山东威海隆重召开

2021年8月28—30日，2021年第十五届机械工业节能减排工艺技术研讨会在山东威海成功举办。此次大会由中国机械制造工艺协会、南京航空航天大学主办，威海市文登区人民政府、天润工业技术股份有限公司、山东天润先进材料研究院承办，机械科学研究总院青岛分院有限公司、先进成形技术与装备国家重点实验室、广西玉柴机器股份有限公司、江苏理工学院等单位协办。

会上，中国工程院院士、中国机械制造工艺协会理事长、南京航空航天大学校长单忠德、天润联合集团总经理孙海涛、威海市委组织部副部长徐力分别致辞。中国工程院院士、中国机械工程学会理事长李培根、中国工程院院士、南京航空航天大学校长单忠德、河北工业大学校长韩旭、华侨大学校长徐西鹏、中国船舶集团有限公司副总经理杜刚、江苏省国防科工办副主任卢载贵专家作特邀报告。会议吸引了100余位机电行业人员参会，共同围绕“绿色制造与智能制造”交流研讨，研判制造工艺技术以及机电行业的发展趋势。



单忠德理事长代表协会和南京航空航天大学向莅临会议的领导专家表示热烈欢迎，向大家长期以来对协会和南航事业发展的关心支持表示诚挚感谢。他指出，召开此次会议是以实际行动深入学习贯彻习近平总书记“七一”重要讲话精神，高质量推动落实科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发展战略。中国机械制造工艺协会长期致力于我国机械制造工艺的创新与发展，为我国制造强国建设作出了重要贡献，在打好产业基础高级化、产业链现代化攻坚战中的作用愈益凸显。他表示，面向未来，一是要坚定创新自信，促进开放共赢，聚焦国家重大工程

和国民经济发展需求，促进产学研深度融合，协同攻克更多行业关键共性技术；二是要提升创新能力，夯实产业基础，围绕产业基础高级化和产业链现代化，推动数字技术、智能制造赋能制造业高质量绿色发展，积极探索制造新领域、新方法、新模式；三是培养高端人才，搭建创新平台，促进会员单位相互交流、密切联络，联合构筑大团队、共建大平台、承担大项目，形成创新发展联合体和共同体。他号召，让我们更加紧密团结在以习近平总书记为核心的党中央周围，坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新



(下转第10页)