

3.1.2 气液压力对喷射沉积效率的影响

基于单层试验结果，在基底上喷射沉积n层熔融金属液，调整喷射工艺参数，测算喷射效率。在固定面积基底上，沉积n层，单层沉积时间约为9s，致密区无明显分层。沉积一定厚度后，各区域纵截面呈凹字形分布，如图5所示，致密区厚度较小，两侧过渡区厚度较高，外侧疏松区无有效厚度。

分别测量过渡区、致密区纵截面厚度，计算平均沉积厚度，称重计算平均喷射质量，如表3所示。致密区平均沉积厚度1.5~3mm/层，雾化气压为致密区沉积厚度的主要影响因素，沉积厚度随液体压力变化呈增大趋势。平均喷射质量流量15~30g/层，约1.6~3.3g/s，液体压力为过渡区沉积厚度的主要影响因素。

3.2 模拟结果与分析

3.2.1 数值模型建立

图6为选用的非限制式外部混合喷嘴结构简化示意图，模拟选用三维物理模型，喷射计算域定义为圆柱体，其底面直径为500mm，高度为600mm，计算域网格划分采用多面体网格模型，在保证计算精度的同时减少计算量。计算域及网格划分如图7所示。

喷雾过程为典型的多相流，模型采用VOF模型 (volume of fluid

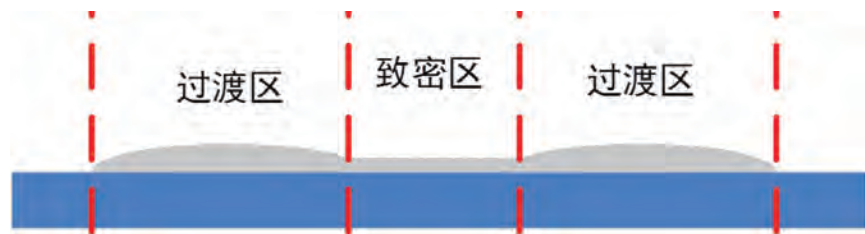


图5 各区域沉积厚度分布示意图

表3 不同工艺参数下沉积厚度试验结果

液体压力 (MPa)	气体压力 (MPa)	致密区单层平均厚度 (mm)	过渡区单层平均厚度 (mm)	单层平均质量 (g)
0.05	0.1	2.20	2.47	21.34
0.05	0.15	2.73	2.9	26.74
0.05	0.2	2.77	2.53	19.69
0.02	0.15	1.74	1.68	14.15
0.05	0.15	2.73	2.9	26.74
0.1	0.15	2.54	2.56	28.18

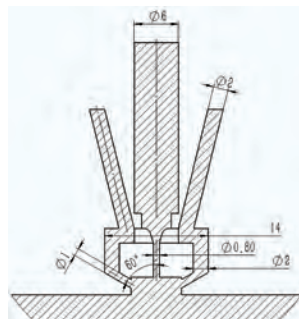


图6 喷嘴内部流道结构示意图

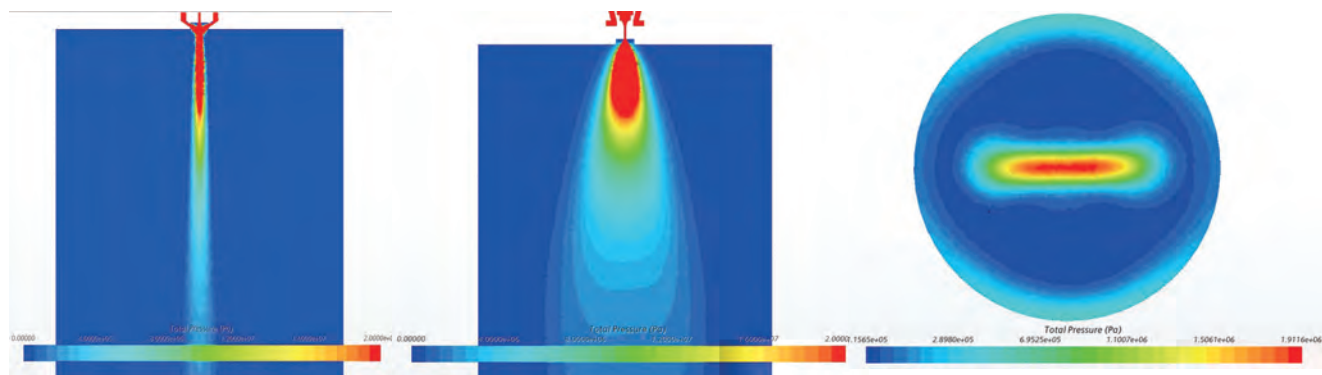


图7 计算域及网格划分示意图

model)，通过求解单独的动量方程组合追踪流体穿过的每一个区域内的体积分数来模拟流体问题。边界条件设定1个液体入口和4个空气入口，出口设定为压力出口。

3.2.2 不同气液压力下气流场分析

如图8所示为气体压力0.15MPa，液体压力0.05MPa时的喷嘴外部气流场压力分布云图。气液两相通过喷嘴进入计算域后，由于介质膨胀及两相



(a) Y-Z截面压力分布云图

(b) X-Z截面压力分布云图

(c) X-Y截面压力分布云图

图8 气流场各剖面压力分布

间相互作用,混合相在喷嘴出口外的流场有所扩展,如图8(a)所示。由于喷嘴结构特点,气体出口位于Y-Z界面,进行高压气体对喷,形成了沿X-Z截面的扇形气流场,如图8(b)所示。气流压力随高度衰减,扇形混合相气流场的压力在基板截面上形成不同区域分布,如图8(c)所示。中心压力最高处,沉积金属液体由于压力较大,沉积质量较为致密,形成致密区;外侧压力衰减较快,在基板上形成过渡区和疏松区。因此,不同区域的幅宽主要由气流场膨胀、扩散及压力随高度衰减效果共同影响,气体压力及沉积高度为调控沉积幅宽的重要因素。

由图9速度流线分布可知,喷口处的射流随气流发展开始膨胀和扩散,扇形气流场的速度分布相对均匀,整体流线分布合理,液滴之间几乎没有相对碰撞,因此雾化效果良好,在基板上沉积质量较高。外侧混合相在沉积在基板上时,与外界气体产生卷气,会有一定程度的反冲和回流,在疏松区及直写填充区域外部形成金属余粉。

图10为如图8所示为气体压力0.05MPa,液体压力0.05MPa时的喷嘴外部气流场压力分布云图。调控气液压力参数后,喷嘴外部气流场整体较为收束,由扇形变为近似圆锥形。喷嘴外气流场压力随高度变化衰减减慢,压力最高的内部区域整体宽度较气体压力0.15MPa,液体压力0.05MPa时变化不大,外侧弱压力区面积缩小明显,因此致密区宽度变化较小;但过渡区随气体压力减小有明显减小,与试验结果吻合良好。

4 结论

(1) 金属熔融雾化直写成形包括金属熔化—外轮廓直写—金属熔体雾

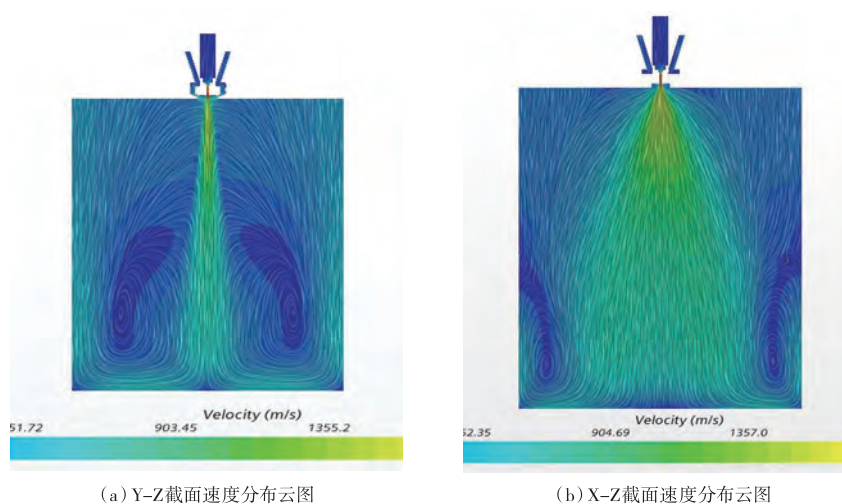


图9 纵截面速度分布

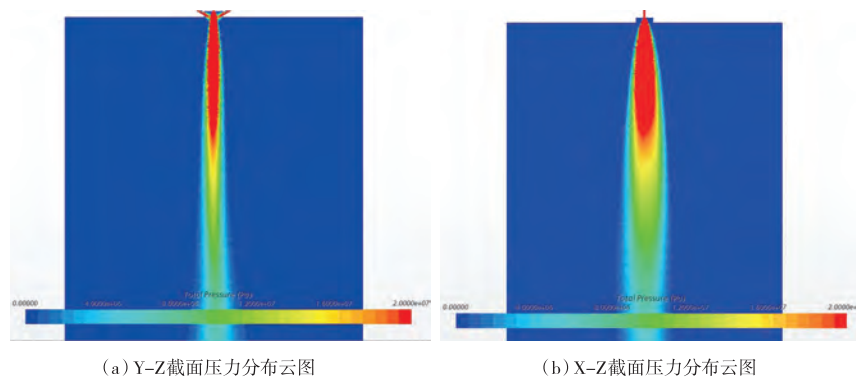


图10 减小气液压力比后纵截面压力分布

化—沉积填充—逐层成形五个工艺过程,其中工艺核心是金属液的雾化,雾化锥的形状、大小、分布将影响成形制件的精度、结合性能以及机械性能。

(2) 选用不同气体压力、液体压力的组合,固定喷射距离以及运动速度,在基板上进行了单层、多层喷射试验,得到不同区域分布、有效喷射面积与喷射工艺参数的对应关系,以及单层喷射填充厚度与工艺参数对应关系。依据单层填充轮廓大小、填充路径规划、填充目标厚度,进行合理的工艺参数范围选择,实现截面轮廓完整、准确填充。

(3) 建立非限制式外部混合喷嘴气液混合流场数值模型,研究得到喷

嘴外部压力及速度分布及随高度衰减的特点,为工艺调控及喷嘴结构优化提供理论依据。**7**

参考文献

- [1] 杨立宁,单忠德,戎文娟,刘丰,杨硕. 锌合金熔融沉积三维打印工艺[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018(52)7:1364-1369.
- [2] 单忠德,杨立宁,刘丰,戎文娟,刘倩. 金属材料喷射沉积 3D 打印工艺[J]. 中南大学学报(自然科学版)2016(47)11:3462-3467.
- [3] 刘宏伟,张龙,王建江,等. 喷射成形工艺与理论研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2007,30 (3) :63~67.
- [4] 黄培云,金展鹏,陈振华. 粉末冶金基础理论与新技术[M]. 长沙:中南工

业大学出版社, 1995.

- [5] 赵向锋. 基于拉瓦尔效应的气水两相喷雾数值模拟研究[D].北京: 华北科技学院, 2020.
- [6] 樊文军. 喷射成形沉积坯生长过程数

值模拟和组织预测[D].内蒙古: 内蒙古科技大学, 2007.

- [7] 尹建成. 约束喷射沉积过程中雾化气流场的模拟研究[J].材料工程. 2018,46(11):102-109.

作者信息

王永威, 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 工程师, 北京市海淀区学清路18号212室, 100083, 010-82755510, 010-82755510 (传真), wangyongweicumt@126.com

(上接第24页)

具库功能较一些国外公司同类产品更为多样化和人性化。

瓦尔特则推出了全球首个用于加快刀具选择和订购流程的数字设计助手“Walter Innotime”, 瓦尔特研发部门的工程师正在使用该数字助手开展工作。网页版将已有的瓦尔特系统与瓦尔特员工的 Engineering Kompetenz (优势技术能力) 相连接。WalterInnotime借助客户上传到瓦尔特网站上的三维工件模型分析出切削加工方式, 并向处理请求的工程师(在之后的版本中将自行面对客户) 推荐来自瓦尔特产品组合的合适的切削加工刀具(含切削参数和加工成本)。这种在工件层面上的数字搜索方式是目前市场上独一无二的。

在钨马、帕莱克和哈量的KELCH展区, 我们都看到了始于1988年的老牌刀具数据管理软件TDM。据介绍, TDM的新进展是全新的TDM Global Line。TDM作为中央刀具数据库, 使刀具数据在其他系统中保持一致, 为刀具使用提供便利性和统一性。TDM软件完全独立、不依赖于任何刀具制造商, 借助TDMGlobal Line基础模块, 可以高效地建立刀具数据库, 从而为数字刀具数据管理中的所有其他流程奠定坚实的基础。使用者实际附加值源于良好的刀具数据, 也得益于中央数据库, 该刀具数据可作为数字孪生数据提供给参与生产流程的所有区域。他们可以在世界任何地方访问中央刀具数据库, 这样做可以积累宝

贵的专业知识并将其提供给每个用户使用, 同时使整个生产流程实现最大透明度。此外, 中央数据库可以防止重复存储数据, 这将意味着冗余数据将不复存在, 也不会再出现。TDM介绍说, 他们的重点是为刀具数据的整个生命周期提供解决方案和服务。TDM通过提供广泛的接口, 有助于优化金属切削刀具的规划使用和提高工厂生产效率。作为刀具的中央数据平台, TDM全面支持工厂的各个环节数据连通。通过TDM的不同模块, 从刀具采购、库存管理、工艺数据管理、车间刀具管理, 到最终报废、报表统计等, 实现全过程的刀具状态管理。确保刀具数据准确、透明, 并使得流程合理、高效。T

(上接第41页)

G.With. Kinetic Studies of a UV-curable Powder Coating Using Photo-DSC, Real-time FTIR and Rheology[J].Journal of Coatings Technology and Research. 2007(4).

- [17] S.Zeren,S.Huguenard.UV-curable Powder Coatings:Formulation of Thick White Finish for MDF[J]. Surface Coatings International Part B:Coatings Transactions. 2004(2).

- [18] Wenfang Shi, Jianhua Liu, etal. Synthesis and Characterization of Semi-crystalline Hyperbranched Poly(Ester-amide) Grafted with Long Alkali Chains Used for UV Curable Powder Coatings[C]. Progress in Organic Coatings. 2005.

- [19] Biller Kevin, Macfadden Ben. Radiation Curing of Powder Coatings on Heat Sensitive Substrates:Chemical

Compositions and Processes for Obtaining Coated Workpieces[J]. US 5935661. 1998.

- [20] Fink D. Radiation Curable Powder Coating Systems[C]. Europe. Coat. 1995.

作者信息

马朋涛, 西安西电开关电气有限公司, 主任工艺员, 高级工程师, 西安市大庆路509号, 710077, 13509181624、mapt0921@163.com。

一种环氧树脂快速固化工艺的研究

马朋涛, 曹伟产, 白晓萍, 张骁萌

西安西电开关电气有限公司, 陕西·西安, 710077

摘要: 快速固化工艺是环氧浇注绝缘的件一种成型工艺, 该工艺与传统的固化工艺相比, 绝缘件的固化成型时间缩短67%以上, 有效提高了模具利用率和生产效率。本文针对快速固化工艺生产制造的绝缘制品进行了一系列物理试验、电气试验以及水压破坏试验。经测试结果表明快速固化工艺生产效率高, 有效减少绝缘件制造周期, 同时满足GIS设计压力要求。绝缘制品的机械强度稍差, 生产的绝缘制品种类可用于500kV及以下电压等级GIS产品。本文旨在对快速固化工艺浇注的样条及制品进行一系列试验方法, 确保制品可靠性。

关键词: 快速固化; 机械性能; 电气性能

1 引言

SF₆气体绝缘金属封闭开关设备(Gas Insulated Switchgear, 简称GIS)是将变电站里除变压器外的各电气一次设备优化组合成为一个整体, 封装在接地的金属壳体内, 充以一定气压的灭弧性能优良和绝缘性能优良的SF₆气体, 以实现高压导体对外壳以及断口间可靠绝缘^[1], 具有占地空间小、绝缘性能好、检修周期长等优点, 以GIS来取代传统的敞开式变电站, 成为我国电力工业的主要发展方向^[2-4]。绝缘件在GIS中起着电气绝缘、机械固定和隔离气室的作用, 长期处于承受高气压、高电压的工作状态, 是确保高压开关设备良好绝缘性能并可靠运行的重要元件之一^[5-8]。掌握绝缘子设计和制造的核心技术具有十分重大的意义^[9-10]。

环氧树脂绝缘材料是分子结构稳定的聚合物, 在真空条件下通过固化剂反应生成为交联的无气隙的体型结

构, 具有优良的物理机械、电绝缘性能和耐腐蚀性能, 并且固化时不产生挥发物, 固化收缩率低, 线膨胀系数小, 在电气领域得到了广泛应用^[11-14]。环氧树脂的分子结构稳定, 是通过固化剂来完成固化反应的, 环氧树脂固化产物的性能在很大程度上取决于固化剂的种类, 常用的固化剂有胺类、酸酐类及树脂类固化剂等。电气绝缘领域用环氧树脂体系广泛采用酸酐作为环氧树脂的固化剂, 酸酐固化剂挥发性低、毒性小, 对皮肤刺激小; 固化反应缓慢, 适用期长; 其固化物收缩小, 耐热性能优良, 机械强度高, 电气性能优异^[15]。

2 验证方案

高压开关用环氧树脂浇注绝缘制品要求零件的外观优良、尺寸稳定、机械、电气和热性能均满足产品要求^[16-20], 因此需在零件外观和性能检测等方面进行验证来判定快速固化工艺的稳定性。

验证计划为以目前成熟的环氧浇注工艺配方(A配方和B配方)作为对比参考对象, 与快速固化工艺一起同时制作机械性能和电性能标准试样和绝缘盆子。具体试验方案如图1所示, 将检测结果进行分析比对, 计算其平均值, 判定快速固化配方的工艺稳定可行性。

2.1 验证所用原材料

本文采用环氧树脂为牌号为Hanstman CT5531, 固化剂为Hanstman HY5533, 填料采用Al₂O₃。A配方为进口配方, B配方为国产配方, 快速固化工艺配方与B配方主要成分相同, 其成分比例及浇注工艺略有不同。

2.2 标准试样

分别对A配方、B配方以及快速固化工艺试验样品进行电气以及机械性能试验, 具体试验项目见表1, 三种配方各制作6批样品, 每批至少取5个试样。对每种配方的七种性能检测结果, 各30个试验数据, 计算平均值和

分散性，验证快速固化配方工艺的稳定性是否可达到目前的成熟工艺。

选取电性能，拉伸模具各一套、弯曲（冲击）模具两套，模具应为型腔完好的模具。不同配方的生产时间应间隔三天以上。生产的试样需切口清理，对表面有损伤的试样报废重作。

2.3 典型绝缘件常态下和热试验后性能检测

对典型绝缘件进行常态下以及热试验后性能测试，常态下试验包括外观、密度、玻璃化温度、工频耐压、局部放电量检测和机械强度检测。热试验包括冷热循环和冷热冲击试验，冷热循环条件见表2，依次按照a-d步骤进行循环，共循环10次。

将样品在90℃与10℃之间进行循环，共循环3次，冷热冲击试验条件见表3。两种热试验后的绝缘件用着色法检查，无裂纹则认为样品合格，并在试验程序结束后，绝缘子满足设计性能。

通过上述试验后，继续进行一下试验，具体例行试验项目见表4。各项试验数值根据绝缘件种类设计图纸保持一致。

3 验证结果

3.1 标准试样试验

3.1.1 机械性能试验

机械试验项目包括弯曲、拉伸和冲击机械强度，每种配方进行五组试验最终取平均值，三种配方冲击强度试验数据见表5，冲击强度对比图见图2。当冲击强度大于12kJ/m²时，可以认为冲击强度满足使用需求，从实验数据可以看出冲击试验数据全合格。三种配方对比，A配方平均冲击强度为16.29kJ/m²，是三个样品中最大值，快速固化配方冲

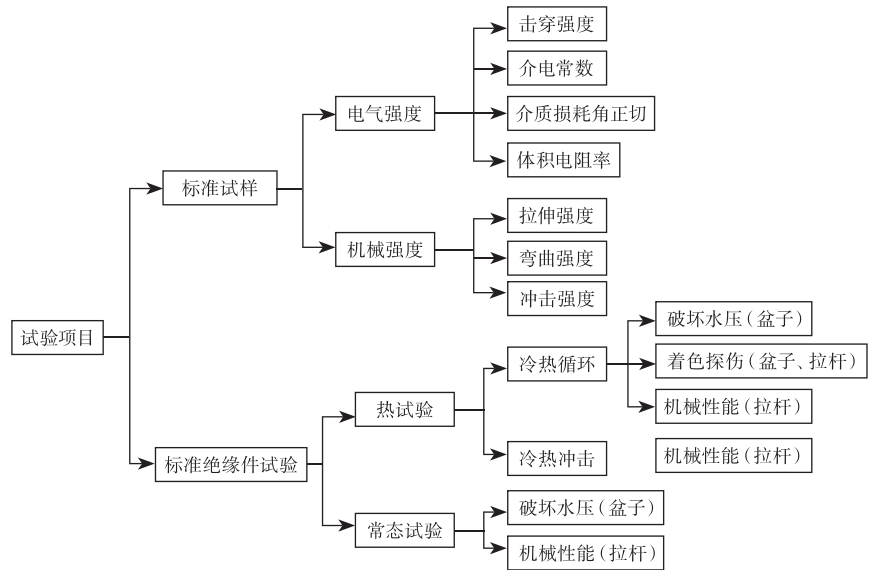


图1 试验方案

表1 试验项目

配方种类	试验项目	
快速固化/A配方/B配方	电气强度	标准试样的击穿强度 标准试样的介电常数 标准试样的介质损耗角正切 标准试样的体积电阻率
	机械强度	标准试样的拉伸强度 标准试样的弯曲强度 标准试样的冲击强度

表2 冷热循环条件

循环数	热循环	升、降温速度
10	a) 最低周围空气温度(-40℃) 4h b) 室温(20℃) 2h c) 极限温度(90℃) 4h d) 室温(20℃) 2h	降温速度约2℃/min 升温速度约3℃/min

表3 冷热冲击试验条件

循环数	水槽的温度条件
3	突变 90℃×1h ↔ 10℃×1h

表4 绝缘件工频耐压、局放试验

名称	附加试验	
绝缘盆子/绝缘拉杆	工频耐压、局放	破坏水压 拉伸 弯曲 扭曲