

南京航空航天大学
论文集

(二〇一〇年) 第5册

航空宇航学院

(第5分册)

南京航空航天大学科技部编

二〇一一年五月

Z427/1033(2010)-E



NUAA2011039762

Z427
1033(2010)-E I

航空宇航学院

014~015



2011039762

5

航空宇航学院2010年学术论文清单 (014)

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	出版时间
1	范菊莉	讲师	014	冻干人血小板复水过程的优化研究	科学通报	2010. 55. 17	
2	方贤德 戴秋敏	教授 博士	014 014	Modeling of turbine mass flow rate performances using the taylor expansion	Applied Thermal Enginerring	2010. 3	
3	方贤德 戴秋敏 尹琰鑫 许玉	教授 博士 硕士 硕士	014 014 014 014	A compact and accurate empirical model for turbine mass flow characteristics	Energy	2010. 35	
4	方贤德 许玉 周展如	教授 硕士 硕士	014 014 014	New correlations of single-phase friction factor for turbulent pipe flow and evaluation of existing single-phase friction factor correlations	Nuclear Engineering and Design	2011	
5	汪明明 冯诗愚 刘卫华	硕士 副教授 教授	014 014 014	飞机燃油箱冲洗与洗涤惰化技术比较分析	南京航空航天大学学报	2010. 42. 05	2010. 10
6	冯诗愚 鹿世华 刘卫华 蒋军昌 刘苏彦	副教授 讲师 教授 高研 高研	014 014 014 外单位 外单位	洗涤效率对飞机燃油箱惰化过程的影响分析	航空动力学报	2010. 25. 11	2010. 11
7	张秋 蒋彦龙 余阳梓	硕士 教授 硕士	014 014 014	飞机座舱围护结构瞬态 温度分布的数值计算	南京航空航天大学学报	2010. 42. 04	2010. 08
8	王政 王瑜 徐雷 周年勇 蒋彦龙	硕士 硕士 硕士 硕士 教授	014 014 014 014 014	型轴向槽道热管传热性能的实验研究	世界科技研究与发展	2010. 32. 02	2010. 04
9	蔡宇宏 朱春玲 蒋彦龙	硕士 教授 教授	014 014 014	基于floemaster的制冷剂充注量对制冷系统性能影响的仿真研究	世界科技研究与发展	2010. 32. 01	2010. 02
10	蔡玉飞 蒋彦龙	博士 教授	014 014	大型客机座舱快速制冷/加温计算方法研究	世界科技研究与发展	2010. 32. 05	2010. 10
11	蔡宇宏 蒋彦龙	硕士 教授	014 014	民机客舱热载荷的数值计算	世界科技研究与发展	2010. 32. 06	2010. 12
12	李凤志	副教授	014	SCALED BOUNDARY FINITE-ELEMENT AND SUBSTRUCTURE ANALYSIS ON THE SEEPAGE PROBLEMS	Modern Physics Letters B	2010. 24. 13	
13	刘小芳 刘卫华	博士 教授	014 014	燃油洗涤引射器充氮性能实验	航空动力学报	2010. 25. 04	
14	刘小芳 刘卫华	博士 教授	014 014	机载膜空气分离装置分离特性	南京航空航天大学学报	2010. 42. 02	2010. 04
15	鹿世化 刘卫华	博士 教授	014 014	翅片管换热器内部空气流场的数值模拟与实验研究	化工学报	2010. 61. 06	
16	姚秋萍 宋保银 赵枚	博士 教授 硕士	014 014 014	动载对管内汽水两相流流阻、孔隙率和传热的影响	北京航空航天大学学报	2010. 36. 01	2010. 01
17	朱嫣 宋保银 孙中原	硕士 教授 硕士	014 014 014	微槽平板热管的流动分析	制冷与空调	2010. 24. 02	
18	姚秋萍 宋保银 赵枚	博士 教授 硕士	014 014 014	动载对管内沸腾两相流传热特性的影响	航空动力学报	2010. 25. 01	2010. 01
19	宋鹏杰 苏向辉	硕士 副教授	014 014	建筑材料热湿相关系数实验测量与分析	江苏建筑	2010. 00. 05	
20	陈玮玮 苏向辉	硕士 副教授	014 014	建筑墙体材料湿扩散率的测量	新型建筑材料	2010. 00. 08	
21	苏向辉	副教授	014	航空电子设备冷却用环路热管冷凝器热沉分析	航空动力学报	2010. 25. 09	

22	苏向辉	副教授	014	Steady-state thermal analysis of a plate heat sink using green's function solution	Modern Physics Letters B	2010. 24. 13	
23	许常悦 吴丹 孙建红	讲师 硕士 教授	014 014 014	可压缩湍流圆孔射流的大涡模拟	南京航空航天大学学报	2010. 42. 05	2010. 10
24	许常悦 陈立为 孙建红 陆夕云	讲师 博士 教授 教授	014 外校 014 外校	Large eddy simulation of the transonic flow past a circular cylinder	“第八届亚洲计算流体力学大会”论文集		2010. 01
25	余莉 程涵 刘雄	副教授 硕士 高工	014 014 外单位	气囊充气过程流固耦合数值模拟	南京航空航天大学学报	2010. 42. 04	2010. 08
26	史献林 余莉 袁文明 刘卫华	硕士 副教授 硕士 教授	014 014 014 014	降落伞拉直过程的三维仿真分析	航天返回与遥感	2010. 31. 01	2010. 02
27	程涵 余莉	硕士 副教授	014 014	**型无人机着陆缓冲气囊仿真	中航救生	2010. 00. 01	2010. 03

航空宇航学院2009年学术论文清单 (015)

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	出版时间
1	艾军 陈珏 张丽芳 刘芳	教授 硕士 副教授 硕士	015 015 015 015	钢筋混凝土梁抗弯刚度公式修正及研究	南京航空航天大学学报英文版	2010. 27. 04	
2	艾军 王艳晗 刘芳	教授 副教授 硕士	015 外单位 硕士	GFRP与混凝土在有缺陷粘结下的粘结性能试验研究	新技术新工艺	2010. 11	
3	陆耀清 艾军 钱江 杨杰 徐春林	硕士 教授 硕士 副教授 硕士	015 015 015 015 015	预应力CFRP布加固RC梁动力特性的试验研究	振动与冲击	2010. 29. 08	
4	李厚海 艾军 潘建伍	硕士 教授 讲师	015 015 015	基于摩擦和胶接激励的混合锚固技术的研究	新技术新工艺	2010. 12	
5	刘芳 艾军 李厚海 王小萌 蔡晨宁 陶鹏	硕士 教授 硕士 硕士 硕士 硕士	015 015 015 015 015 015	基于振动测试的钢筋混凝土桥梁使用性能快速评定	第四届结构工程新进展国际论坛论文集	2010	
6	王小萌 艾军 蔡晨宁 刘芳 李厚海 叶翔	硕士 教授 硕士 硕士 硕士 硕士	015 015 015 015 015 015	HFRP加固钢筋混凝土梁抗弯理论研究	第四届结构工程新进展国际论坛论文集	2010	
7	李厚海 艾军 张宇峰 张守军 潘建伍	硕士 教授 ??	015 015 外单位 外单位 015	基于摩擦和胶接机理的混合锚固技术的优化研究	第四届结构工程新进展国际论坛论文集	2010	
8	程晔 龚维明 张喜刚 戴国亮	副教授 教授 高工 副教授	015 外单位 外单位 外单位	超长直径钻孔灌注桩桩端后压浆试验研究	岩石力学与工程学报	2010. 29. 02	2010. 09
9	高培伟 耿飞 卢小琳	教授	015	Hydration and expansion properties of novel concrete expansive agent	Key Engineering Materials	2009	
10	郭春兴 高培伟	硕士 教授	015 015	掺硅灰和粉煤灰混凝土抗氯离子渗透	低温建筑技术	2010. 27. 04	
11	季天剑 高玉峰 陈荣生	副教授 教授 教授	015 外单位 外单位	轿车轮胎动力滑水分析	交通运输工程学报	2010. 10. 05	
12	季天剑 肖鹏 高玉峰	副教授 教授 教授	015 外单位 外单位	掺粉煤灰再生混凝土疲劳性能试验研究	河海大学学报	2010. 38. 03	
13	解建光 张雪 李贺	副教授 硕士 硕士	015 外单位 外单位	高速公路路面雨水径流有机污染物赋存状态研究	中国环境科学	2009. 1	
14	杨朝旭 解建光	硕士 副教授	015 015	碱渣、废混凝土改性淤泥质土作为路基填土的可行性研究	公路工程	2010. 35. 01	2010. 02
15	解建光 李贺 石俊青	副教授 硕士 硕士	015 外单位 外单位	路面雨水径流重金属赋存状态研究	东南大学学报	2010. 40. 05	2010. 09
16	刘树龙 解建光 阎建萍 潘金敢	硕士 副教授 ?? ?		光纤Bragg光栅监测沥青混凝土应变试验研究	china/former soviet union area workshop on pavement technologies 2010		2010. 10
17	李俊 吴瑾 高俊启		015 015 015	一种监测钢筋腐蚀的光纤光栅传感器的研究	光谱学与光谱分析	2010. 30. 01	2010. 01

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	出版时间
18	麻海燕 孙伟 张建业 燕坤	讲师 院士 硕士 硕士	015 外单位 015 015	大掺量矿物掺合料混凝土在氯盐、硫酸盐及其复合溶液中的抗冻性	南京航空航天大学学报	2010. 42. 06	2010. 12
19	麻海燕 曹文涛 白康 周鹏 韩丽娟	讲师 硕士 硕士 硕士 硕士	015 015 015 015 015	Influence of aircraft deicer on freeze-thaw durability of high performance concrete	Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2010. 27. 06	2010. 12
20	麻海燕 余红发 曹文涛 白康 周鹏 韩丽娟	讲师 教授 硕士 硕士 硕士 硕士	015 015 015 015 015 015	Freeze-Thaw Durability of Portland Cement Concrete Subjected to Aircraft Deicer	Advanced Materials Research	2010. 152-153	2010
21	季斌 方秦 麻海燕 余红发	博士 教授 讲师 教授	015 外单位 015 015	三维编织碳纤维增强渍浆混凝土准静态力学性能	东南大学学报	2009. 39. s2	2009. 11
22	宋海滨, 麻海燕, 方秦, 季斌, 程宇, 江人虎	讲师	15	三维编织碳纤维增强混凝土单轴受压本构方程	混凝土	2010年 卷 11期	#####
23	毛利军 李爱群	副教授 教授	015 外单位	近场条件下的高层基础隔震研究	第四届结构工程新进展国际论坛论文集		2010. 10
24	傅罗真 毛利军	硕士 副教授	015 015	基于OpenSEES的混凝土框架的Pushover分析	第四届结构工程新进展国际论坛论文集		2010. 10
25	王法武	讲师	015	TOTAL INCREMENTAL ITERATIVE FORCE RECOVERY METHOD AND THE APPLICATION IN PLASTIC HINGE ANALYSIS OF STEEL FRAMES	Advanced Steel Construction	2010. 06. 01	2010. 03
26	吴瑾 吴文操	教授 硕士	015 015	Study on wireless sensing for monitoring the corrosion of reinforcement in concrete structures	Measurement	2010. 43. 04	
27	吴瑾 丁东方 杨曦	教授 ? 硕士	015 外单位 015	再生混凝土梁正截面开裂弯矩理论分析与试验研究	建筑结构	2010. 40. 02	
28	吴瑾 丁东方 杨曦	教授 ? 硕士	015 外单位 015	再生骨料混凝土梁抗剪性能试验研究	河海大学学报	2010. 38. 01	
29	吴瑾 杨桂新	教授 博士	015 015	EARLY COMPRESSIVE STRENGTH OF RECYCLED CONCRETE	Advances in Concretes Structural Durability		2010. 11
30	吴瑾 杨桂新	教授 博士	015 015	Experimental research on crack width of recycled concrete beams	the Second International Conference on Waste Engineering and Management		2010. 10.
31	杨桂新 吴瑾	博士 教授	015 015	再生粗骨料钢筋混凝土梁短期刚度研究	土木工程学报	2010. 43. 02	2010. 02
32	刘静静 吴瑾	硕士 教授	015 015	Experimental study on flexural behavior of recycled concrete concrete beams after freezing-thawing cycles	the Second International Conference on Waste Engineering and Management		2010. 10
33	宋永吉 吴瑾	硕士 教授	015 015	Experimental research on the flexural properties of corroded reinforced concrete beams with recycled coarse aggregate	the Second International Conference on Waste Engineering and Management		2010. 10
34	张英杰 吴瑾	硕士 教授	015 015	Experimental research on the strength of recycled concrete at early ages	the Second International Conference on Waste Engineering and Management		2010. 10
35	朱磊 吴瑾	硕士 教授	015 015	the study on early drying shrinkage of recycled aggregate concrete	the Second International Conference on Waste Engineering and Management		2010. 10

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	出版时间
36	余红发 孙伟 李美丹	教授 院士 硕士	015 015 015	荷载对混凝土在腐蚀-冻融作用下强度的影响	哈尔滨工业大学学报	2010.42.02	2010.02
37	梁丽敏 余红发 吴庆令 潘浙锋	博士 教授 博士 硕士	015 015 015 015	多孔混凝土的吸波特性	建筑材料学报	2010.13.02	2010.04
38	李颖 余红发 董金美 乔红霞 王梅娟	硕士 教授 研究实习 员 博士 博士后 硕士	015 015 外单位 外单位 外单位	氯氧镁胶凝材料吸潮返卤泛霜的研究进展	硅酸盐通报	2010.29.04	
39	季斌 余红发 麻海燕 方秦 姜锡权 宋海滨	博士 教授 讲师 教授 教授 硕士	015 015 015 外单位 外单位 015	三维编织碳纤维增强混凝土的冲击压缩性能	硅酸盐学报	2010.38.04	2010.04
40	刘倩倩 余红发	硕士 教授	015 015	Durability and Performance Degradation Mechanism of Glass Fiber Reinforced Magnesium Oxychloride Cement	硅酸盐通报	2010.29.04	2010.08
41	梁丽敏 余红发 潘浙锋	博士 教授 硕士	015 015 015	基于真实细观结构的多孔混凝土三维重建	河海大学学报	2010.38.04	2010.07
42	李成栋 余红发	硕士 教授	015 015	氯氧镁水泥交流阻抗研究	混凝土	2010.00.09	
43	张云清 余红发 王甲春	博士 教授 博士后	015 015 015	钢筋混凝土构件的抗盐冻性能研究	硅酸盐通报	2010.29.02	2010.04
44	董金美 余红发 张立明	助教 教授 博士	外单位 015 015	水合法测定活性MgO含量的试验条件研究	盐湖研究	2010.18.01	
45	江大虎 张云清 余红发 胡蝶	硕士 博士 教授 硕士	015 015 015 015	粉煤灰对混凝土表面氯离子浓度的影响	华中科技大学学报	2010.27.04	2010.12
46	张云清 余红发 王甲春	博士 教授 博士后	015 015 015	气泡结构特征对混凝土抗冻性能的影响	华南理工大学学报	2010.38.11	2010.11
47	张云清 余红发 孙伟 张建业	博士 教授 院士 硕士	015 015 外单位 015	冻融循环作用下混凝土的硫酸盐应力腐蚀特性	土木建筑与环境工程	2010.32.06	2010.12
48	张云清 余红发 孙伟 刘俊龙 张建业	博士 教授 院士 访问学者 硕士	015 015 外单位 外单位 015	硫酸镁溶液对混凝土在应力作用下抗冻性的影响	交通运输工程学报	2010.10.06	2010.12
49	梁丽敏, 余红发, 吴庆令	教授	15	Influence of absorbent on electromagnetic wave absorbing property of porous concrete	Journal of Harbin Institute of Technology	2010年17卷5期	#####
50	梁丽敏 余红发 潘浙锋	博士 教授 硕士	015 015 015	Preparation process and properties of porous ecological concrete	武汉理工大学学报	2010.32.17	2010.09
51	李成栋 余红发	硕士 教授	15	A3钢在MgCl2溶液中腐蚀行为研究	盐湖研究	2010.18.03	
52	李成栋 余红发	硕士 教授	015 015	Influence of fly ash and silica fume on water-resistant property of magnesium oxychloride cement	Journal of wuhan university of technology-materials science	2010.25.04	
53	吴庆令 余红发 梁丽敏	博士 教授 博士	015 015 015	暴露时间和扩散深度对混凝土氯离子结合能力的影响	四川大学学报	2010.42.03	2010.05

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	出版时间
54	吴庆令 余红发	博士 教授	015 015	Service Life Prediction Method of Concretes Based on Mass Loss Rate: Establishment and Narration of Mathematics Model	Proceedings of the Tenth International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP2010)		
55	余红发 孙伟 李美丹	教授 院士	015 外单位	玻璃纤维增强氯氧镁水泥 (GRMC) 的耐久性研究新进展 (特邀报告)	中国菱镁产业高端论坛		
56	余红发	教授	015	高性能玻镁外墙挂板的耐久性与使用寿命评价 (特邀报告)	2010年中国菱镁行业年会		
57	燕 坤 余红发 麻海燕 黄东升 杨礼明	博士 教授 讲师 教授 博士生	015 015 015 外单位 015	氯盐与弯曲荷载对碳化混凝土的抗冻性的影响	武汉理工大学学报	2010. 32. 06	
58	李成栋 余红发	硕士 教授	015 015	Study on Recycle of Sawdust Sorel's cement concrete waste	Advanced Materials Research	2010.113-114	
59	黄小娟 赵新铭	硕士 教授	015 015	沉管灌注桩竖向承载力可靠度分析	浙江工业大学学报	2010. 38. 05	2010. 10



冻干人血小板复水过程的优化研究

范莉莉^{①②}, 许先国^③, 张绍志^{②*}, 徐梦洁^②, 朱发明^③, 陈光明^②

① 南京航空航天大学人机与环境工程系, 南京 210016;

② 浙江大学制冷与低温研究所, 杭州 310027;

③ 浙江省血液中心, 卫生部血液安全研究重点实验室, 杭州 310006

* 联系人, E-mail: enezsz@zju.edu.cn

2009-10-31 收稿, 2010-02-08 接受

国家自然科学基金(50606032)、高等学校博士学科点专项科研基金(20070335145)和南京航空航天大学科研启动基金(1001-909382)资助项目

摘要 血小板临床应用供不应求, 迫切需要一种长期稳定的保存方法. 冷冻干燥为血小板的长期稳定保存提供了一种理想方法. 其中, 复水过程是冻干血小板活性恢复的一个重要环节. 研究了1和2 mL冻干血小板样品的复水过程, 包括在37℃水蒸气中预复水不同的时间(15, 30, 60, 90, 120和150 min)以及不同浓度的复水溶液(25%, 50%, 75%和100%的血浆)对细胞恢复率、MPV(血小板平均体积)和PDW(血小板分布宽度)的影响. 同时, 对预复水过程中冻干血小板样品的质量变化进行了研究. 实验得到最佳复水条件为: (1) 对1和2 mL冻干样品, 最佳预复水时间分别为15和90 min; (2) 75%血浆溶液可作为最佳复水溶液. 在此条件下复水后的冻干血小板形态恢复正常, 超微结构保持完整, 对凝血酶(1 U/mL)的聚集率达到新鲜血小板的82.8%. 该研究结果对人血小板冷冻干燥保存的研究具有重要意义.

关键词

冷冻干燥
人血小板
预复水
复水溶液
形态
聚集功能

人血小板在临床治疗, 如加快伤口愈合等方面发挥着非常重要的作用^[1-3]. 通常, 血库中的血小板采用22℃振荡方法保存, 其最长保存期限仅为5天. 低温保存可以实现血小板的长期保存, 但是需要在输注前对血小板进行洗涤以去除低温保护剂所带来的毒性, 不仅十分麻烦而且会对细胞带来损伤^[4]. 同时低温保存需要低温冰箱或液氮罐等大型冷却设备, 不适合血小板的大量储运. 由于血小板的供应和需求总是周期性地波动, 因此, 须要建立一种便捷而稳定的血小板保存方法. 冷冻干燥保存方法已经在某些血液产品、疫苗等领域中广泛应用^[5-8]. 如果人血小板可以成功实现冷冻干燥, 那么它相对于传统的保存方法有许多优点^[9]: (1) 冻干血小板可以在室温下长期保存而不需要任何冷却设备; (2) 冻干血小板可以在需要时迅速复水使用, 在紧急情况下具有极大优势; (3) 冻干血小板质量轻, 便于运输. 1995年, Read等人^[10]对多聚甲醛固定后的血小板进行了冷冻

干燥, 但是其恢复率非常低. 随着低温生物领域研究的深入发展, 人血小板的冻干保存终于取得了突破性进展. 2001年, Wolkers等^[11]使用海藻糖作为保护剂对血小板进行冷冻干燥, 其恢复率达到了85%. 随后他们提出了一种冻干大容量血小板的方法^[12, 13]. 2007年, 本文作者所在的研究小组研究了血小板的冷冻干燥过程, 针对冻干保护剂、冷却速率和细胞浓度等方面进行了优化^[14]. 哺乳动物细胞的冷冻干燥过程中仍存在许多值得研究的课题, 例如其中的复水过程. Wolkers等^[11]发现预复水可以有效改善冻干复水后血小板的形态, 但是在此方向上他们并未做深入的研究和讨论. 韩颖等^[15]试验了在不同温度下不同复水溶液对冻干红细胞恢复情况的影响, 发现复水溶液的胶体渗透压相对于晶体渗透压对于复水红血球的恢复率影响更大. Shu等^[16]研究了复水溶液温度(0℃, 10℃, 25℃, 37℃和42℃)对冻干红细胞恢复率的影响, 在37℃下得到了最高的细胞恢复率.

英文版见: Fan J L, Xu X G, Zhang S Z, et al. Optimization study on the rehydration process of lyophilized human platelets. Chinese Sci Bull. 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-3164-x

Fan 等^[17]研究了 1 mL 冻干血小板的复水过程,得到了以下结果: (1) 预复水步骤能有效帮助血小板的恢复; (2) 两个预复水温度 35℃ 和 37℃ 并不存在显著差别; (3) 作为复水溶液, 50% 血浆溶液比 PBS 溶液具有更好的效果。

本文进一步研究了冻干血小板的复水过程, 以复水后血小板的细胞恢复率、MPV(血小板平均体积)和 PDW(血小板分布宽度)作为检测细胞活性的指标, 优化了预复水时间和复水溶液的浓度(血浆), 并同时考虑了样品的体积和厚度的影响, 检测了预复水过程中样品含水量随时间的变化情况。此外, 研究了优化条件下复水后的冻干血小板的形态及聚集功能。

1 材料和方法

(i) 血小板准备。血小板的准备方法与 Fan 等人^[17]相同。通过孵化方式将海藻糖载入血小板细胞内, 然后将细胞重悬于冻干保护液中。冻干保护液中含有 528.6 mM (1 M=1 mol·L⁻¹) 海藻糖和 1% (w/v) 牛血清白蛋白(BSA)。采用 CELL-DYN1700 血球计数仪(Abbott, 美国)进行细胞计数、MPV 和 PDW 的测量。冻干缓冲液血小板浓度约为 1×10⁹ 个/mL。

(ii) 冷冻。将处理好的血小板冻干缓冲液分装在玻璃小瓶(直径 25 mm)中, 每瓶样品体积为 1 或 2 mL。样品在 -60℃ 低温冰箱内冷冻 2 h, 其冷冻速率约为 10℃/min。

(iii) 冻干。冷冻后的样品被置于实验型冻干机(Labconco, 美国)中进行冷冻干燥。干燥程序如下: (1) 冷冻干燥箱预冷至 -40℃, 冷却速率为 1.5℃/min, 同时冷阱预冷至 -80℃; (2) 冻干腔搁板加载样品后开始抽真空; (3) 对 1 mL 样品, 一次干燥持续 16 h; 对于 2 mL 样品, 一次干燥 35 h; (4) 搁板温度以 0.2℃/min 升温至 22℃ 并维持该温度不变, 对 1 mL 样品, 二次干燥持续约 16 h; 对于 2 mL 样品, 二次干燥持续 20 h。

干燥过程中冻干箱内真空度保持在 1 Pa 左右。冷冻干燥完成后样品自动加塞密封, 并在室温下保存。

(iv) 复水。一部分冻干血小板样品在 37℃ 充满饱和空气(相当于水蒸气的分压为 6.3 kPa)的密闭容器中分别预复水 15, 30, 60, 90, 120 和 150 min。预复水后, 样品在室温下复水, 复水溶液为 50% 血浆溶液, 随后轻轻摇晃小瓶直到样品完全溶解于复水溶液中。另外, 对一部分 1 mL 冻干样品在 22℃ 进行直

接复水, 复水溶液采用浓度分别为 25%、50%、75% 和 100% 的 4 种血浆溶液。

(v) 血液学分析。血小板的数值恢复率用 CELL-DYN1700 血球计数仪(Abbott, 美国)对冻干前及复水后血小板溶液进行计数, 同时测定复水后的血小板平均体积(MPV)以及分布宽度(PDW)。

血小板数值恢复率=冻干复水后血小板溶液计数×100%/冻干前血小板溶液计数。

(vi) 含水量测量。样品含水量通过电子分析天平(Mettler AE200, 0.0001 g, 瑞士)和热重分析仪(TA Instruments Q600, 美国)测定得到。预复水后的冻干血小板含水量(C_w , 水 g/g 湿重)按以下公式计算:

$$C_w = [(W_d - W_e) \times C_d + (W_p - W_d)] \times 100\% / (W_p - W_e),$$

其中, W_e 为空瓶质量; W_d 为预复水前冻干样品及样品瓶总质量; W_p 为预复水后样品及样品瓶总质量; C_d 为预复水前冻干血小板样品含水量。

(vii) 扫描电子显微镜/透射电子显微镜(SEM/TEM)观察。使用扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)对复水后的血小板进行观察。扫描电子显微镜样品准备如下: (1) 冻干复水后的血小板在 4℃ 下以 2.5% 的戊二醛固定; (2) 用 0.1 mol/L 的 PBS 溶液对样品漂洗两次; (3) 用 1% 的锇酸固定; (4) 用逐级增加浓度的酒精(50%, 70%, 80%, 90% 浓度逐级处理 15 min, 100% 浓度处理两次, 每次 15 min)对样品进行脱水; (5) 用 100% 的丙酮处理 15 min, 100% 的醋酸异戊酯处理 15 min 进行脱水; (6) 使用 E-1020 离子喷枪(Hitachi, 日本)对样品表面喷金; (7) 准备好的样品在 Stereoscan-260 型扫描电子显微镜(Cambridge Instrument, 英国)下观察, 使用电压为 20 kV。

透射电子显微镜样品处理如下: 步骤(1)~(3)与扫描电子显微镜的样品处理步骤相同; (4) 重复步骤(2); (5) 用 2% 醋酸铀溶液染色 30 min; (6) 用逐级增加浓度的酒精(50%, 70%, 90% 浓度处理 15 min, 100% 浓度处理 20 min)对样品进行脱水; (7) 100% 丙酮脱水两次, 每次 20 min; (8) 样品包埋并聚合 37℃, 24 h; 45℃, 24 h; 60℃, 48 h; (9) 超薄切片; (10) 超薄切片用 2% 醋酸铀溶液染色 20 min, 柠檬酸铅染色 15 min; (11) 在 Tecnai-10 型透射电子显微镜(Philips, 荷兰)下观察血小板超微结构。

(viii) 聚集实验。测试了冻干复水后血小板的聚集功能并与新鲜血小板进行了比较。样品载入预先放入搅拌磁珠的聚集试管中, 于 37℃ 下静置。然后

向聚集管中加入终浓度为1 U/mL的凝血酶刺激,血小板的聚集曲线通过聚集仪(Chrono-Log, 美国)记录。

(ix) 统计分析. 实验数据采用ANOVA单因素方差分析进行统计分析,以 $P \leq 0.05$ 为统计学显著性差异标准。

2 实验结果

2.1 血液学分析结果

表1表示1和2 mL样品在不同预复水时间下的细胞恢复率。对于1 mL冻干血小板样品,随着预复水时间从15 min增加到120 min,血小板恢复率从89%降低到77%。其中15与60 min实验组结果存在显著性差异。对于2 mL样品,当预复水时间为90 min时,血小板数值恢复率最大,且90和60 min实验组的数据存在显著性差异。

图1(a)和(b)分别表示血小板的MPV和PDW值随预复水时间的变化关系。对于1 mL冻干血小板样品,预复水15 min后的冻干血小板复水后MPV最小,且PDW也最小,与新鲜血小板的MPV(11.81 ± 0.90 fL)和PDW(17.02 ± 1.10 %)^[18]最接近。统计分析表明,预复水15 min实验组血小板MPV和PDW值与其他实验组间存在显著性差异。因此,可以认为15 min或15 min以下的预复水时间可能是1 mL冻干人血小板样品的最佳预复水时间。对于2 mL样品,当预复水时间为60或90 min时,复水后血小板MPV值最佳,而最佳的血小板PDW值出现在预复水时间为90 min。因此,可以认为90 min是2 mL冻干样品的最佳预复水时间。

图2表示1 mL冻干复水后血小板与新鲜血小板

的PDW分布图。由图所示,几种不同方式复水后的冻干血小板PDW曲线比较之下,预复水15 min后复水的冻干血小板,其体积分布宽度PDW图(图2(c))最接近新鲜血小板PDW图(图2(a))。

表2表示不同浓度血浆溶液复水对冻干血小板数值恢复率的影响。可以看出,75%的血浆溶液作为复水溶液,其冻干血小板的数值恢复率最高,且与50%的血浆溶液实验组相比,具有显著性差异。

图3为冻干复水后血小板的PDW图。由图可知,

表1 50%血浆溶液复水后的冻干血小板数值恢复率($n=4$)

预复水时间/min	血小板数值恢复率(%)	
	1 mL	2 mL
0	80 ± 7.4	68 ± 5.2
15	$89 \pm 9.4^{a)}$	70 ± 4.7
30	86 ± 8.4	72 ± 3.3
60	$79 \pm 6.9^{a)}$	$68 \pm 4.6^{b)}$
90	78 ± 7.0	$85 \pm 7.5^{b),c)}$
120	77 ± 5.3	$80 \pm 3.4^{c)}$

a) $P=0.03 < 0.05$, b) $P=0.01 < 0.05$, c) $P=0.29 > 0.05$

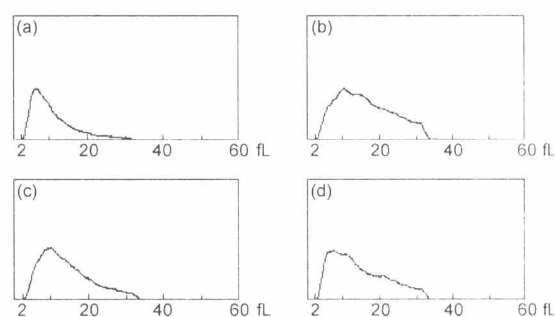


图2 不同方式复水后的冻干血小板PDW曲线(1 mL)

(a) 新鲜血小板; (b) 直接复水; (c) 预复水15 min; (d) 预复水90 min

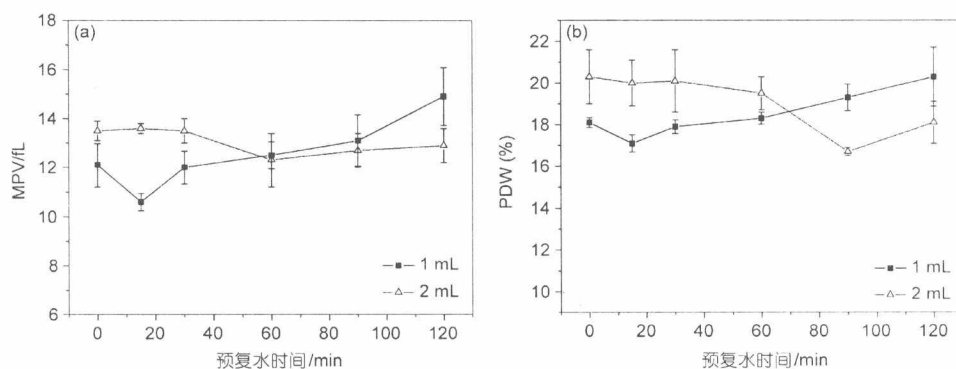


图1 冻干复水后血小板MPV和PDW随预复水时间的变化情况($n=4$)

(a) MPV; (b) PDW

表2 不同浓度血浆溶液复水后的冻干血小板数值恢复率($n=3$)

复水溶液	血小板数值恢复率(%)
25%血浆	68 ± 2.5
50%血浆	$79 \pm 3.4^{a)}$
75%血浆	$89 \pm 3.6^{a),b)}$
100%血浆	$83 \pm 2.6^{b)}$

a) $P=0.03<0.05$, b) $P=0.09>0.05$

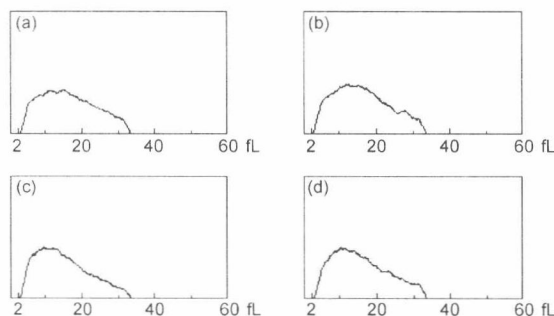


图3 不同浓度血浆溶液复水后的冻干血小板 PDW 曲线 (1 mL)

(a) 25%; (b) 50%; (c) 75%; (d) 100%

相比之下, 75%血浆溶液复水后的血小板 PDW 图最接近新鲜血小板的 PDW 图(图 2(a)).

2.2 含水量变化

冻干血小板样品的含水量 C_d 约为 2.5%. 图 4 表示了冻干血小板样品含水量随预复水时间的变化情况. 从图中可以看出, 冻干血小板的含水量随预复水时间的增加而增加, 1 mL 冻干血小板样品的相对增重约为 2 mL 样品的两倍. 对于 1 mL 样品, 预复水 15 min 后的平均含水量为 $(5.3 \pm 0.29)\%$; 对于 2 mL 样品, 预复水 90 min 后其平均含水量为 $(6.1 \pm 0.24)\%$.

2.3 扫描电子显微镜/透射电子显微镜观察结果

为检测最佳复水条件下复水的冻干血小板形态结构的完整性, 1 mL 冻干样品保存 30 天后, 预复水 15 min 或者直接复水, 再用 75% 的血浆溶液复水, 对复水后的血小板进行扫描电子显微镜/透射电子显微镜的观察, 并与新鲜血小板进行比较.

图 5(a)和(b)分别为扫描电子显微镜下观察的预复水 15 min 和直接复水的血小板图片. 图 5(a)中血小板的细胞形态分布较为均匀, 图 5(b)中甚至存在一些

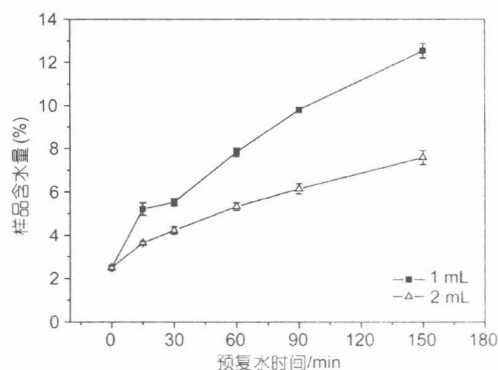


图4 样品含水量随预复水时间的变化情况($n=4$)

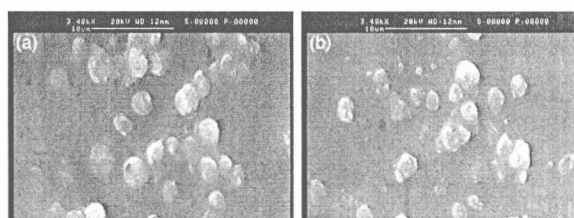


图5 血小板扫描电子显微镜图

(a) 优化条件下复水的冻干血小板(3480 $\times$); (b) 直接复水的冻干血小板(3480 $\times$)

细胞碎片.

图 6(a)~(c)为透射电子显微镜下观察的新鲜血小板和冻干复水后的血小板. 图 6(c)为优化条件下复水的血小板, 图 6(b)为直接复水的冻干血小板, 图 6(a)为新鲜血小板. 由图可见, 优化条件下复水的冻干血小板的超微结构完整, 其形态与新鲜血小板也更为接近.

2.4 聚集试验结果

采用聚集仪研究了新鲜血小板和冻干复水后的血小板经凝血酶刺激后的聚集反应, 聚集曲线如图 7(a)~(c)所示. 15 min 预复水后再复水的 1 mL 冻干血小板在终浓度为 1 U/mL 的凝血酶刺激下, 最大聚集率达到新鲜血小板最大聚集率的 82.8%, 而直接复水的冻干血小板在终浓度 1 U/mL 的凝血酶刺激下, 其最大聚集率为新鲜血小板的 77.4%. 由图可见, 在终浓度 1 U/mL 的凝血酶刺激下, 优化条件下复水的血小板样品不仅最大聚集率比直接复水的血小板样品高, 其聚集速率也比直接复水的血小板样品大, 但与新鲜血小板的聚集速率相比, 仍存在一定差距.

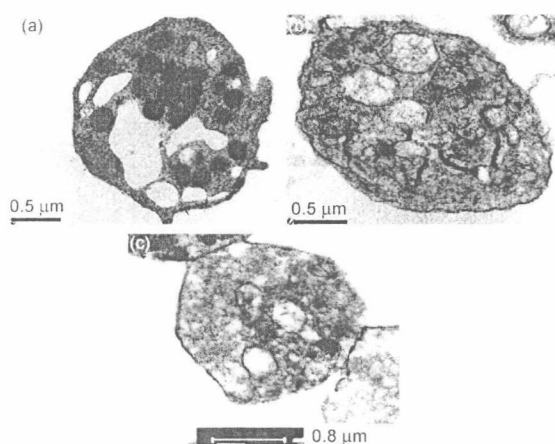


图6 血小板透射电子显微镜图

(a) 新鲜血小板(30000 $\times$); (b) 直接复水的冻干血小板(30000 $\times$);
(c) 优化条件下复水的冻干血小板(20000 $\times$)

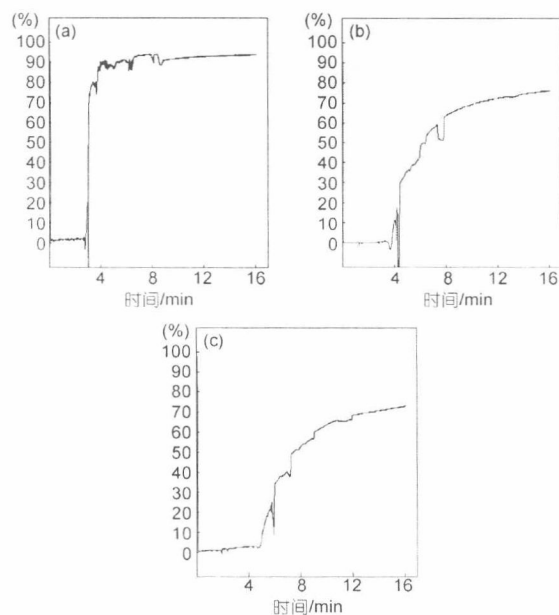


图7 血小板聚集曲线(1 U/mL 凝血酶诱导)

(a) 新鲜血小板(对照组); (b) 优化条件下复水后的冻干血小板;
(c) 直接复水的冻干血小板

3 讨论

复水已在冻干微生物的复水过程中使用^[19], Wolkers 等人^[11]把预复水方法引入人血小板的冷冻干燥中, 并且取得了极大的成功. 他们认为预复水改变了细胞膜的状态, 从而防止了在接下来的复水过程

中细胞膜的溶解和细胞质成分的流失, 但他们并没有对预复水过程进行深入研究讨论, 仅仅针对某一特定的条件提出了预复水的方法.

本文作者对 1 mL 冻干血小板样品的预复水过程进行了深入研究^[17], 发现两个预复水温度 35℃ 和 37℃ 对复水后的血小板恢复不存在显著差别, 在 15、30、60、90 和 120 min 的不同预复水时间的实验中, 预复水 15 min 后复水的水小板其恢复情况最佳. 本文中所有的预复水实验都在 37℃ 下完成. 实验发现, 当把冻干血小板样品的体积增加到 2 mL, 最优的预复水时间也从 15 min 增加到 90 min. 这个增量可以由水蒸气的扩散阻力随着样品厚度的增加而增加来解释. 对于 1 和 2 mL 样品, 都存在一个最佳的预复水时间, 可以进一步假设存在一个含水量范围, 预复水后的冻干血小板含水量在此范围内其存活率最高. 如果含水量低于该范围, 细胞膜吸收的水蒸气可能不足以避免复水过程中的细胞膜相变. 如果含水量高于该范围, 就会存在自由水从而产生高浓度溶液(HCS), 而高浓度溶液会对细胞造成损伤^[20]. 由此前和现在的实验结果显示, 最佳的预复水达到的含水量范围约为 4.8%^[17]~6.1%. 但是应该注意到, 该含水量是指整个样品中的含水量的平均值, 而实际上样品中的含水量分布并不均匀. 研究其含水量的分布可以更准确地确定其最佳含水量的范围, 这需要对冻干血小板进行热力学和动力学性质的更深入分析研究. 我们可以合理地推断, 样品的厚度越厚, 预复水过程就越难保证样品各个部分有适当的含水量, 因此细胞恢复率也就越低.

复水溶液的重要性已在许多研究中提到. 对于人血小板, 复水溶液中含有血浆是有益的. Wolkers 等人^[12]以 PBS: 血浆: 水(1:2:1)和血浆: 水(3:1)作为复水溶液, Fan 等人^[17]以 50% 血浆溶液作为复水溶液. 不同浓度的血浆由于其对冻干血小板的渗透压不同, 其复水作用效果不同. 本文通过专门设计的实验研究了 4 种不同浓度(25%、50%、75% 和 100%)的血浆溶液作为复水溶液的影响. 由实验得到的细胞恢复率和 PDW 数据显示, 75% 浓度的血浆溶液为最佳的复水溶液. 这个结果比作者之前的研究结果更进一步.

对复水过程优化后, 冻干复水血小板的恢复率得到了提高. 在本实验小组的 Zhou 等人^[14]的研究结果中, 其复水后血小板的最大聚集率(被终浓度为 1 U/mL 的凝血酶刺激后)经过 5 min 后为 52%. 本实验中聚集

率(被终浓度为 1 U/mL 的凝血酶刺激后)经过 4 min 后为达到 63%,且最大聚集率达到新鲜血小板最大聚集率的 82.2%。Walkers 等^[12]的实验中复水血小板的最大聚集率在 3 min 后达到 83.3%。在今后需要对聚集速率的提高进行更多的研究。

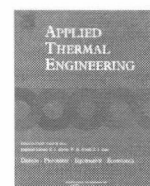
4 结论

针对冻干人血小板的复水条件包括预复水时间

和复水溶液进行了优化研究。对于 4 种浓度的血浆溶液,75%浓度的血浆溶液效果最好。对于在 37℃ 温度下的 6 个预复水时间,1 mL 样品最佳预复水时间为 15 min,而 2 mL 样品最佳预复水时间为 90 min。假设为得到最佳的冻干血小板复水后的恢复情况,预复水结束时冻干血小板的含水量必须控制在某一最佳范围内。而理解这一物理过程需要更进一步的研究以提供更准确的信息。

参考文献

- Kim S G, Chung C H, Kim Y K, et al. Use of particulate dentin-plaster of Paris combination with/without platelet-rich plasma in the treatment of bone defects around implants. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2002, 17: 86—94
- Marx R E, Carlson E R, Eichstaedt R M, et al. Platelet-rich plasma: Growth factor enhancement for bone grafts. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 1998, 85: 638—646
- Bhanot S, Alex J C. Current applications of platelet gels in facial plastic surgery. *Facial Plastic Surg*, 2002, 18: 27—33
- Bock M, Schleuning M, Heim M U, et al. Cryopreservation of human platelets with dimethyl-sulfoxide: Changes in biochemistry and cell function. *Transfusion*, 1995, 35: 921—924
- Bakaltcheva I, O'Sullivan A M, Hmel P, et al. Freeze-dried whole plasma: Evaluating sucrose, trehalose, sorbitol, mannitol and glycine as stabilizers. *Thrombosis Res*, 2007, 120: 105—116
- Zhou X L, He H, Liu B L, et al. Effects of glycerol pretreatment on recovery and antioxidant enzyme activities of lyophilized red blood cells. *Cryo Lett*, 2008, 29: 285—292
- Shuja F, Shults C, Duggan M, et al. Development and testing of freeze-dried plasma for the treatment of trauma-associated coagulopathy. *J Trauma*, 2008, 65: 975—985
- Fleming J A, Hoekstra E J, Moniaga V, et al. Reuse prevention syringes for reconstitution of lyophilized vaccines: Operational study and UNICEF plans for expanding introduction. *Int J Occup Environ Health*, 2009, 15: 9—13
- 周俊, 刘景汉. 血小板冻干保存的研究进展. *中国实验输血杂志*, 2004, 12: 542—545
- Read M S, Reddick R L, Bode A P, et al. Preservation of hemostatic and structural properties of rehydrated lyophilized platelets: Potential for long-term storage of dried platelets for transfusion. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1995, 92: 397—401
- Wolkers W F, Walker N J, Tablin F, et al. Human platelets loaded with trehalose survive freeze-drying. *Cryobiology*, 2001, 42: 79—87
- Wolkers W F, Walker N J, Tamari Y, et al. Towards a clinical application of freeze-dried human platelets. *Cell Preserv Technol*, 2003, 1: 175—188
- Tang M K, Wolkers W F, Crowe J H, et al. Freeze-dried rehydrated human blood platelets regulate intracellular pH. *Transfusion*, 2006, 46: 1029—1037
- Zhou X L, Zhu H, Zhang S Z, et al. Freeze-drying of human platelets: Influence of saccharide, freezing rate and cell concentration. *Cryo Lett*, 2007, 28: 187—96
- 韩颖, 权国波, 刘秀珍, 等. 再水化液因素对冰冻干燥保存后红细胞回收率的影响. *中国输血杂志*, 2004, 17: 10—12
- Shu Z Q, Liu Z, Chen W W, et al. The rehydration injury study of freeze-dried red blood cells during rehydration. In: *International Congress of Refrigeration*, Beijing, 2007
- Fan J L, Xu X G, Zhang S Z, et al. Experimental study on rehydration conditions of freeze-dried platelets. *J Zhejiang Univ-Sci A*, 2009, 10: 697—703
- 陈晖. 血液病患者血小板 MPV、PCT、PDW 的检测意义. *实用全科医学*, 2006, 4: 479
- Wolkers W F, Tablin F, Crowe J H, et al. From anhydrobiosis to freeze-drying of eukaryotic cells. *Comp Biochem Physiol A*, 2002, 131: 535—543
- Acker J P, Fowler A, Lauman B, et al. Survival of desiccated mammalian cells: Beneficial effects of isotonic media. *Cell Preserv Technol*, 2002, 1: 129—140



Modeling of turbine mass flow rate performances using the Taylor expansion

Xiande Fang*, Qiumin Dai

Institute of Air Conditioning and Refrigeration, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 29 Yudao Street, Nanjing 210016, PR China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 November 2009

Accepted 13 April 2010

Available online 27 April 2010

Keywords:

Regression model

Turbine

Mass flow rate

Performance map

Polytropic process

Curve fitting

ABSTRACT

The turbine is a key component of many equipment and systems, such as air cycle refrigeration and gas-turbine engines. Existing turbine mass flow rate models need to be improved to increase the prediction accuracy and extrapolation performance for control and diagnosis-oriented simulation. This work proposes a novel methodology for building a regression model, which makes use of the Taylor series to expand functions to deal with variables with small variation and develops a single partly empirical model to present a component performance map. With the methodology, a general regression model of mass flow rates of inward radial turbines is built. Measured data of a turbocharger turbine and a simple air cycle machine turbine are used for the regression analysis to validate the methodology and model. Model predictions agree with measured data very well, proving that the proposed methodology and the model are highly reliable. Comparison of the proposed model with the best existing model searched shows that the present model reduces the mean absolute percentage error by more than 50%, and has much better extrapolation performance as well.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Air cycle refrigeration is a dominated refrigeration approach in aircraft environmental control systems (ECS), and the air cycle machine (ACM) is the main part of the air cycle refrigeration. In the ECS with the air cycle refrigeration, the compressed hot air expands through the ACM turbine, becoming cold air for cabin air conditioning and equipment cooling. When air expands through the ACM turbine, its heat energy is converted into the turbine shaft work. The turbine shaft work can be used to drive a compressor and/or fan to benefit the refrigeration cycle efficiency. If it is used to assist in the compression with a turbine-driven compressor, the turbine-compressor arrangement is called the bootstrap ACM. If it is used to drive a coaxial fan, the turbine-fan device is referred to as the simple ACM [1,2]. The turbine is also a key element of gas-turbine engines.

The mathematical model of turbine mass flow rate is the vital part of total models of equipment and systems using it. There are three dominant approaches for developing a mathematical model of turbine mass flow rates: Theoretical, empirical and partly empirical. The theoretical modeling is based on physical laws of mass, energy and momentum conservation. The high complexity of this modeling approach and its computational requirement makes

it unsuitable for real-time dynamic simulation, especially control- and diagnosis-oriented simulation, where time efficiency is essential. Moreover, compact and computing efficient models are also preferred in design, analysis and performance simulation. Either empirical modeling or partly empirical modeling can yield simple and fast computing models. However, for the turbine mass flow rate the suitable model form of these kinds needs further investigation to increase prediction accuracies and extrapolation performances.

Plotting performance maps and generating look-up tables are the earliest approaches to process experimental data of turbines and compressors, which are now still in use [2,3]. Performance maps and look-up tables are helpful for design and performance analysis. For inclusion into system simulation models, however, maps are inapplicable and look-up tables are not well suited. Standard table interpolation routines are not continuously differentiable, extrapolation is unreliable and the table representation is not compact. Therefore, mathematical models from experimental data are desired.

One of the easiest methods to obtain empirical models from experimental data is curve-by-curve fitting, which is still used nowadays [3–5]. Tsujikawa [3] employed this method to generate mathematical models for the digital control of aircraft air cycle ECS. Kong et al. [4,5] assumed that turbine performance characteristics were the third-degree equations with the related function of the engine rotational speed versus the pressure ratio and the mass flow function. Turbine performance maps were generated by

* Corresponding author. Tel./fax: +86 25 8489 6381.
E-mail address: xd_fang@yahoo.com (X. Fang).

Nomenclature

a, a_i	constant ($i = 0, 1, 2, \dots$)
A_{eff}	effective flow area, m^2
c_p	constant pressure specific heat, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
D_1	blade wheel diameter, mm, m
G	turbine mass flow rate, kg s^{-1}
h	enthalpy, J kg^{-1}
k	isentropic exponent
n	blade rotational speed, r s^{-1} , RPM
n_t	rotational speed parameter
p	pressure, Pa
R	gas constant, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
R^2	coefficient of determination
R_c^2	corrected coefficient of determination
s^2	residual mean square
T	temperature, K
u	blade peripheral velocity, m s^{-1}
v	air velocity, m s^{-1}
w	turbine shaft work, J kg^{-1}

 x_0 turbine velocity ratio*Greek symbols*

α	flow coefficient
α_1	blade fluid entry angle, deg
β_1	blade relative fluid entry angle, deg
γ	polytropic exponent
Δ	augment
π_t	turbine expansion ratio
ρ	density, kg m^{-3}
ρ_t	degree of reaction
ϕ	nozzle velocity coefficient
ϕ	mass flow parameter, $\text{m s} \sqrt{K}$

Subscripts

0	turbine inlet
1	nozzle outlet, blade inlet
2	blade outlet
s	isentropic

integrating the turbine characteristic equations taken at each engine rotational speed.

Since the turbine mass flow rate is a function of the turbine expansion ratio and rotational speed parameter, a turbine mass flow rate map has a group of curves corresponding to each rotational speed parameter. Disadvantages of the curve-by-curve fitting are obvious. First, there are as many curve fit equations as curves on the map. Secondly, most of turbine operation conditions fall between curves, where there is no correspondent equation available. In this case, curve fit models of the two adjacent curves are used to calculate two adjacent values, thus needing interpolation which usually adds uncertainties. Besides, extrapolation of curve-by-curve fitting models is impossible when the mass flow rate is beyond the curve map range.

There are some attempts on using a single or a couple of partly empirical [6–10] or empirical [11,12] equations to represent a turbine flow performance map. Their primary purpose is to develop mean value models for control- or diagnosis-oriented simulations, where accuracies are compromised for tradeoff of computing time efficiency. The following section will review the two categories of models.

Moraal and Kolmanovsky [10] used a neural network with all inputs (speed parameter and pressure ratio) and one hidden layer with three neurons. They found that in order to get sensible extrapolation results for low turbine speeds, the neural network needed to be supplied with additional, artificial mapping points forcing the network to provide much lower turbine flows at these low speeds. Neural networks are becoming increasingly popular for curve fitting of compressor characteristic maps [13–16]. However, their usage in turbine performances is relatively rare.

The purpose of the present work is as the following:

- (1) Reviewing existing empirical and partly empirical models representing a turbine flow performance map, excluding curve-by-curve ones.
- (2) Proposing a novel methodology for building regression models of turbine characteristics in order to use a single equation to present a component performance map. The methodology develops a partly empirical regression model through rigorous analysis of related theoretical models and uses the Taylor series to expand functions to deal with variables with small variation (polytropic exponents for instance)

- (3) Developing a general regression model of the mass flow rate of inward radial turbines using the methodology.

- (4) To perform regression analysis of the proposed model using experimental data of a turbocharger turbine and a performance map of a simple ACM turbine and to compare the finalized regression model with existing ones to prove the reliability and correctness of the proposed methodology and regression model.

2. Review of empirical and partly empirical models of turbine mass flow rates

Extensive literature search for empirical and partly empirical models of turbine mass flow rates has been conducted. For empirical models, only polynomial expressions are found. This section summarizes searched results and compares existing models.

2.1. Partly empirical models

Partly empirical models are similar to the mass flow rate equation of steady flow through an adiabatic nozzle, with the effective flow area fitted using experimental data.

Canova et al. [6,7] use the following model to develop control-oriented submodels for the simulation of automotive diesel engines:

$$\phi = \begin{cases} A_{\text{eff}} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)} \left(\pi_t^{\frac{2}{\gamma}} - \pi_t^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} & \text{for } \frac{1}{\pi_t} \geq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ A_{\text{eff}} \sqrt{\frac{k(\gamma-1)}{R(k-1)} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

where ϕ is the mass flow parameter, π_t is the turbine expansion ratio, A_{eff} is the effective turbine area, R is the gas constant, k is the isentropic exponent, and γ is the polytropic exponent.

$$\phi = \frac{G \sqrt{T_0}}{p_0} \quad (2)$$

$$\pi_t = \frac{p_0}{p_2} \quad (3)$$

In above two equations, G is the turbine mass flow rate, p is the fluid pressure, T is the fluid temperature in K, and subscripts 0 and 2 are as shown in Fig. 1, which illustrates flow processes in an inward radial or axial turbine with neglecting the pressure recovery through the turbine outlet.

For fixed geometry turbines, Canova et al [6,7] assume that A_{eff} and γ are constants determined with least-square fitting procedures based on experimental data. They point out that the parameter γ should be considered a function of the corrected rotational speed. However, in many practical cases, this dependence can be neglected without compromising the model accuracy [7]. Noticeable uncertainties exist for this approach because it neglects the influence of the rotational speed parameter on the mass flow parameter.

A variation of Equation (1) is Jensen's model as the following:

$$\phi = \begin{cases} A_{\text{eff}} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)} \left(\pi_t^{\frac{k-1}{k}} - \pi_t^{\frac{k-1}{k}} \right)} & \text{for } \frac{1}{\pi_t} \geq p'_{\text{crit}} \\ A_{\text{eff}} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)} \left(p'_{\text{crit}}^{\frac{2}{k}} - p'_{\text{crit}}^{\frac{k+1}{k}} \right)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

where p'_{crit} is the critical pressure ratio [8–10]. For air isentropic flow through an orifice, $p'_{\text{crit}} = 0.528$.

Jensen et al. [9,10] model the effective area A_{eff} as a function of the turbine expansion ratio π_t and the speed parameter n_t . For a fixed geometry turbocharger, the proposed expression can be transformed as

$$A_{\text{eff}} = a_0 + a_1 \pi_t + a_2 n_t + a_3 \pi_t n_t \quad (5)$$

where a_i ($i = 0, 1, 2, 3$) are constants. Note that in the following part of the paper, a_i ($i = 0, 1, 2, \dots$) is always the notation of constants.

$$n_t = \frac{n}{\sqrt{T_0}} \quad (6)$$

where n is the turbine rotational speed.

The above two models are partly empirical not only because of the way to get the effective turbine flow area, but also because of the approximation using the turbine expansion ratio. The turbine behaves as a series of two passages (stationary nozzles and rotor blades), which each individually experience high pressure ratios than the total across the turbine, so that the critical pressure ratio is significantly lower than the expected value of approximately 0.528. Moraal and Kolmanovsky [10] comment that by including the pressure ratio as a parameter in the effective area fit, Jensen's model can still represent an increasing mass flow parameter at pressure ratios beyond the critical pressure ratio.

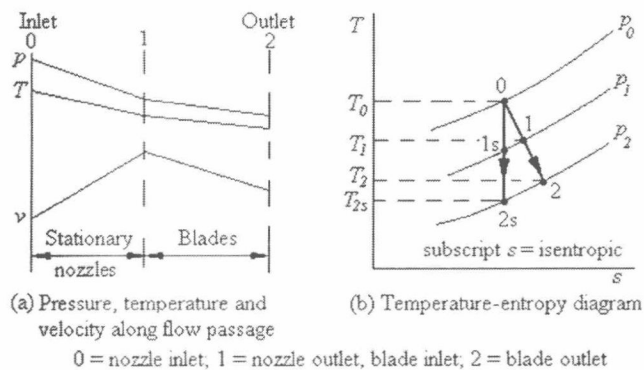


Fig. 1. Process diagram of a turbine.

2.2. Polynomial models

Sieros et al. [11] introduce that a quadratic polynomial can be used to approximate the pressure ratio-mass flow characteristic. The typical quadratic polynomial form may be

$$\phi = a_0 + a_1 \pi_t + a_3 n_t + a_4 n_t \pi_t + a_2 \pi_t^2 + a_5 n_t^2 \quad (7)$$

Orkisz and Stawarz [12] propose a relation which is essentially the form of:

$$\pi_t = a_0 + a_1 \phi n_t + a_2 (\phi n_t)^2 + a_3 \phi n_t Z_T + a_4 Z_T + a_5 Z_T^2 \quad (8a)$$

$$Z_T = \left(\frac{\pi_t}{\phi n_t} \right)_{\text{zt}} \left(\frac{\phi n_t}{\pi_t} \right) - 1 \quad (8b)$$

where the subscript zt refers to values at the choked condition.

2.3. Comparison of the above models

Experimental data of the turbocharger turbine [10] and the mass flow performance map of the simple ACM turbine are used to compare the above four models. The coefficients in the models are determined through regression. Among given data, the maximum π_t of the turbocharger turbine is 3.2, and that of the simple ACM turbine is 4.0.

Standard criteria used to compare a pool of models in terms of their prediction abilities are the residual mean square s^2 , the coefficient of determination R^2 and the corrected coefficient of determination R_c^2 [17]. The R^2 is not recommended as a sole criterion for comparing different models because it is not conceptually prediction oriented (i.e., prediction performance based). The s^2 plays an extremely important role in hypothesis testing in multiple regressions. It can also provide important information in an exercise from which one hopes to select the best model for prediction. A common practice is to choose the candidate model with the smallest value of s^2 . The R_c^2 is identical to rank order in terms of s^2 . In the application of the present work, the s^2 is expressed as

$$s^2 = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^N [\phi(i)_{\text{exp}} - \phi(i)_{\text{pred}}]^2 \quad (9)$$

where m is the number of parameters estimated ($m = 4$ in Jensen's model for instance), N is the number of total cases, and $\phi(i)_{\text{exp}}$ and $\phi(i)_{\text{pred}}$ are, respectively, the experimental and predicted values of $\phi(i)$. A case, or data case, is a group of all data measured at a turbine operational state. The relationship between R_c^2 and R^2 is

$$R_c^2 = 1 - \frac{(N-1)(1-R^2)}{N-m} = 1 - \frac{(N-1)s^2}{SS_{\text{Total}}} \quad (10)$$

where SS_{Total} is the total sum of squares.

The corrected coefficient of determination R_c^2 is chosen as the criterion for comparing the above models since it is identical to rank order in terms of s^2 and partly reflects R^2 . Besides, the mean absolute percentage error (MAPE) is also used as an indicator:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\phi(i)_{\text{exp}} - \phi(i)_{\text{pred}}}{\phi(i)_{\text{exp}}} \right| \quad (11)$$

When using the MAPE, the case where $\phi_{\text{exp}} = 0$ is excluded. Comparison results are list in Table 1.

It can be seen from Table 1 that among the four models, Jensen's method and the typical second-degree polynomial (the second-degree polynomial in π_t and n_t) have the best predictions, and