

表1 工艺字典及编码表

下料类	代码	机加工类	代码	铸造类	代码	环氧类	代码	橡胶塑料类	代码	锻压类	代码	焊接类	代码	热处理类	代码	整形类	代码
下料	XL	车	C	铸造	ZZ	嵌件处理	QJCL	混炼	HL	自由锻	DZ	装焊	HZ	固溶时效	GRSX	整形	ZX
锯	J	铣	XI	精密铸造	ZJ	后固化	HGH	压制	YZ	拉伸	LS	焊接	HJ	人工时效	RGSX	校正	XZ
剪料	JL	刨	B			辅料准备	PL	注射	ZS	成形	CHX	烧结	SJ	退火	TH	校平	XP

何、功能特征属性信息，聚类分析后得到零部件族；

Step2: 由企业工艺部门资深工艺师为零部件族中的典型零部件编制工艺；

Step3: 遍历现有单机版工艺卡填写工具“XKCAPP”系统中的已有工艺，抽取各工序名称、属性和频率，形成“工艺字典及编码”以及相应的各种类型的工艺属性表初稿；

Step4: 下发工艺初稿请设计、生产、检验等部门的资深人员进行评分，并集中会签，得到第一版的企业工艺字典、属性和编码表，如表1所示；

Step5: 用工艺字典修正和规范零件族的典型工艺，主要包括：规范工序名称和序列、工艺主材、辅消材料以及工艺设备、加工场地资源等信息；

Step6: 典型工艺模板提升到系统的资源库中作为企业知识保存，供所有工艺设计人员重用，根据企业制造资源和产品信息，由系统管理员进行

升版修改。

3.2 辅助工艺规划——工艺参数计算

工艺规划中工艺参数的确定是工艺辅助规划系统的难点，本系统采用定制开发的辅助计算工具与系数表相结合的方式。针对每种不同的工艺形式，有各自不同的系数表，并有相应的计算公式和条件输入界面。以铸造类零件毛重辅助计算为例，相应的计算输入参数、计算逻辑以及交互式图形输入界面如图3所示，使用技术人员根据工艺规划需要直接调用相关的计算工具，输入参数即可获得铸造类零件的毛重，提高了工艺人员的工作效率，同时在系统中固化的数据校验工具，可以防止计算过程中出现严重不合理数据。

所有的工艺参数辅助计算工具都以工艺字典中定义的“标准工序”名称为索引，使用者在选择工序名称的同时，系统调用相应的辅助工具，从而实现在工艺规划过程中，完成工艺参数

的计算，判断及计算逻辑如图4所示。

对于同一工序类型，由于设备等资源的不同，工艺参数随之发生改变，系统也做了考虑。为不同工艺参数的影响因素，定义了相应的系数表和计算方法，如：在下料类工序中，由于材料或厚度的不同，使用的下料方式也有不同，企业资源中提供的下料方式包括：等离子切割、气体切割、锯、剪等，通过系统的不同，系统查表计算出相应工序的参数。

4 应用实例

4.1 工程零件的工艺BOP编制

工程设计人员根据用户提出的需求，在PDM的协同环境中搭建产品的BOM结构，其中针对个性化需求采用工程白图形式表达设计意图，如图5所示，某个工程零件8.123.786，工艺人员在完成该图纸会签流程后，开始编制8.123.786GY的零件工艺。根据企业现有制造资源，工艺人员在系统中查找

- **输入基础参数 / 输出结果**
输入基础参数: $\phi_1, \phi_2, d_1, d_2, d_3, e_1, e_2, e_3, e_4$
输出结果: 材料毛重
- **计算逻辑**
近圆形材料重量 = $(V1 + V2 + V3 + V4) * \text{密度 (米重量)} * n + (V1 + V2 + V3 + V4) * \text{密度 (米重量)} * n + \dots + (V1 + V2 + V3 + V4) * \text{密度 (米重量)} * n$
单件净重 = 设计属性表内“重量”
 $V1 = \pi e_1 (\phi_{22} - \phi_{12}) / 4$
 $V2 = \pi e_2 (\phi_1 - e_2) (e_1 + d_2)$
 $V3 = \pi e_3 (\phi_2 + e_3) (e_1 + e_4 + d_1)$
 $V4 = \pi e_4 d_3 (\phi_2 - d_3)$
单件毛重 = 近方形材料重量 + 近圆形材料重量 + 单件净重

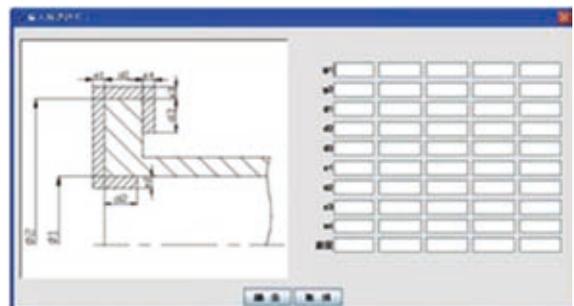


图3 铸造近圆加工面输入界面示意图

与8.123.786零件相似的子工艺确定各子工艺序列,直接调用子工艺模板中各工艺参数和设备,然后根据零件的差异,针对各工序修改工艺内容,调整工艺资源;对于需要辅助计算的参数可以直接调用系统提供的计算模块,输入零件的几何特征尺寸辅助计算。在整个工艺BOP参数和工序确认无误的情况下,可以自动生成工艺卡片,以便下发车间等部门。

4.2 系统应用效果

通过对工艺规划系统的分析以及对核心工艺问题的处理解决方法,在PDM系统的工艺结构编辑器(MSE)中搭建工艺数据结构及相关工艺参数,如图6所示。在实施过程中,以典型零件试点,后全面推广,总共建立了2万多个零件的基础工艺库,企业所有设

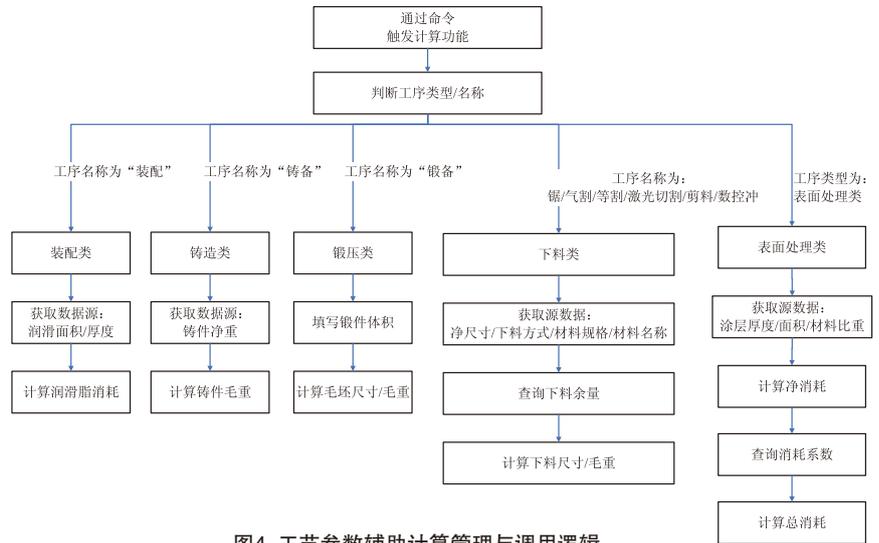
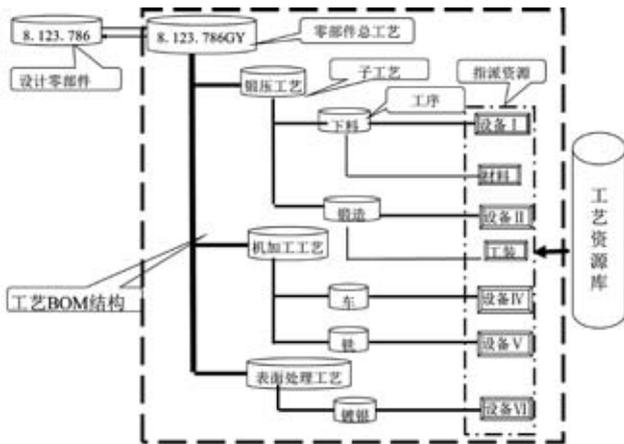


图4 工艺参数辅助计算管理与调用逻辑

备、参数和加工能力的资源库;所有产品的工艺规划均在系统中完成,并下传到生产ERP系统。由于工艺信息的支持,使过去需要3天才能完成的排产工作,仅需要3小时就能完成。

5 结束语

通过建立企业的工艺管理应用系统,在满足开关产品规模定制生产模式的前提下,为企业工艺规划和管理



机加工工艺卡		零件代号	零件代号	8BA.211.382	共 1 页	
		03111	零件名称	中心坐标	第 1 页	
材料	毛坯尺寸	件	零件重量	1	0.00kg	
	毛坯重量	14	零件重量	14	1.50kg	
工序	工序名称	工序内容	设备	工艺装备	引用文件号	操作工时
1	下料	下料				0.00
2	车	1. 以两端法兰面为基准,车端面,总长度 40, 精度等级 4-5.				0.00
3	车	2. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5, 精度等级 4-5.				0.00
4	车	3. 车外圆直径 φ16x22, R1.5, 精度等级 4-5.				0.00
5	车	4. 车 φ16, 40°, 精度等级 4-5.				0.00
6	车	5. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
7	车	6. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
8	车	7. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
9	车	8. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
10	车	9. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
11	车	10. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
12	车	11. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
13	车	12. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
14	车	13. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
15	车	14. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
16	车	15. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
17	车	16. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
18	车	17. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
19	车	18. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
20	车	19. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
21	车	20. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
22	车	21. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
23	车	22. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
24	车	23. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
25	车	24. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
26	车	25. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
27	车	26. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
28	车	27. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
29	车	28. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
30	车	29. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
31	车	30. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
32	车	31. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
33	车	32. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
34	车	33. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
35	车	34. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
36	车	35. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
37	车	36. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
38	车	37. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
39	车	38. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
40	车	39. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
41	车	40. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
42	车	41. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
43	车	42. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
44	车	43. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
45	车	44. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
46	车	45. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
47	车	46. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
48	车	47. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
49	车	48. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
50	车	49. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
51	车	50. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
52	车	51. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
53	车	52. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
54	车	53. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
55	车	54. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
56	车	55. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
57	车	56. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
58	车	57. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
59	车	58. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
60	车	59. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
61	车	60. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
62	车	61. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
63	车	62. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
64	车	63. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
65	车	64. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
66	车	65. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
67	车	66. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
68	车	67. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
69	车	68. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
70	车	69. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
71	车	70. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
72	车	71. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
73	车	72. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
74	车	73. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
75	车	74. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
76	车	75. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
77	车	76. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
78	车	77. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
79	车	78. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
80	车	79. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
81	车	80. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
82	车	81. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
83	车	82. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
84	车	83. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
85	车	84. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
86	车	85. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
87	车	86. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
88	车	87. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
89	车	88. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
90	车	89. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
91	车	90. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
92	车	91. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
93	车	92. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
94	车	93. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
95	车	94. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
96	车	95. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
97	车	96. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
98	车	97. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
99	车	98. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00
100	车	99. 车外圆直径 φ16, 车圆角 R1.5.				0.00

图5 工艺BOP编制和自动生成的工艺卡片



图6 结构工艺BOP和资源库查询界面

发动机冷、热试工艺的差异性分析

王毅明

一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂 无锡 214026

摘要: 本文通过对目前发动机制造领域中所采用的冷试工艺与热试工艺的使用状况进行分析,从测试方案、发动机测试状态、测试台结构、生产过程控制等角度详细阐述冷、热试工艺之间的差异和关联。通过分析可以看出,冷、热试工艺在发动机测试方案及合格判定准则上所走的是不同的技术路线,而冷试工艺就工艺先进性、缺陷敏感度、节能环保性等方面都优于热试工艺。但是,冷试工艺也存在一定的局限性,无法完全脱离热试工艺而单独存在。“冷试工艺为主,辅以比例热试”作为发动机总成试车工艺将是今后的发动机制造领域总成在线检测的发展趋势。

关键字: 热试工艺;冷试工艺;测试方案

Research about The Difference Between Engine Cold Test and Hot Test Technology

Yiming WANG

FAW JieFang Automotive CO. LTD , Wuxi Diesel Engine Works , Wuxi

Abstract: Though the analysis of the technology we take in the field of engine manufacture so far , especially about the engine cold test and hot test , this article mainly describe the test method , engine's test state , bench structure , process control and relationship between those two kinds of engine test from the different aspects. The result of analysis shows the significant difference about test method and the way of quality judgement between cold test and hot test . Compared with hot test, the cold test is more advanced in technology , more sensitive to the defect and more energy-saving . But the cold test itself has corresponding limitation , it cannot exist separately without the support of hot test . So , as to the technology of online engine test , “cold test with the assistance of hot test” must be the trend of development .

Keywords: Hot Test; Cold Test; Test Method

1 引言

随着社会的进步和发展,汽车工业正逐步深入到国民经济的各个领域,对社会经济建设和科学技术发展起着重要的推动作用,汽车工业作为工业科学技术发展水平的标志,以其持续创新的科学先进、节能环保的产品及制造工艺正引领着工业科技发展。发动机制造业是汽车工业中最复

杂的制造元素,其不断提高和突破的产品质量、制造技术更具有代表性。

在发动机制造领域,采用先进的在线测试技术,改善发动机的制造和装配质量,提高产品的综合性能,对各发动机和汽车生产企业来说有着重要的意义。长久以来,国内外发动机制造企业为了验证其发动机制造和装配质量,广泛采用热试工艺作为对发动机

整个零部件制造、装配过程末端的总成测试项目,这主要是热试工艺自身具备的工艺特点所决定的。热试工艺的测试状态接近于发动机实际使用的状态,其所测量的参数和发动机的工作状态能够直观反映发动机的各项指标和工作情况,为判定发动机的各项性能及工作情况是否正常提供量化依据。所以热试工艺应用至今,一直作为

发动机制造过程中的主导检测工艺，长期占据着不能替代的位置。但是热试工艺虽然具备直观反映发动机工作特性的优点，但是其不足之处也是显而易见的，如工艺数据对于缺陷的发现和发现能力较低，生产过程需要消耗大量的资源（包括场地、人员、水、燃油等），过程时间较长制约生产力的提升，对环境造成较大的污染。随着产量的提高，这种矛盾将更加突显，逐步成为制约发动机企业生产力发展的瓶颈。

随着发动机产品制造技术向着节能和环保的方向发展越来越多的发动机制造企业意识到采用发动机热试工艺的所消耗的资源较高，且对环境造成了一定的污染，正逐步研究和发展新型工艺来代替热试工艺，冷试工艺应运而生。冷试工艺主要通过采用各种先进的测试手段对发动机总成进行不点火测试，来验证发动机的制造和装配质量。相比热试工艺，冷试工艺采用的测试技术更为先进，测试数据更加精确，试车节拍大幅减少，对于发动机缺陷的发现和判定功能更加突出。由于冷试工艺无需消耗大量的资源，因此极大的节省校车成本，减少尾气排放对环境造成的污染。

本文即对目前发动机制造领域中所采用的冷试工艺与热试工艺的使用状况进行分析，从测试方案、发动机测试状态、测试台结构、生产过程控制等角度详细阐述冷、热试工艺之间的差异和关联，并通过典型故障案例来说明。在分析冷试工艺在工艺先进性、缺陷敏感度、节能环保性等方面具备优越性的同时，也阐明冷试工艺不足之处。只有做到冷、热试相互结合，共同发挥各自的长处，才能更有效

的保证发动机装配质量，提高整体水平。

2 发动机冷、热试工艺概述

发动机热试工艺，即发动机点火做功运行于各设定工况，通过检测发动机的动力性、经济性指标，监控发动机运行过程的各项关键参数，来验证发动机运行状态是否合格，主要的检测内容包括：

- 动力性指标：转速、扭矩、功率等；
- 经济性指标：小时燃油耗、比油耗等；
- 过程关键参数：机油温度及压力、中冷前后温度及压力、出水温度、排气温度、稳态及自由加速烟度、三漏检查等。

热试工艺目前在国内发动机制造领域被普遍采用。发动机在运行时主要动力来自发动机本身，因此其测试工况更接近于实际工况，所检测的指标和参数能够直接反映发动机的性能及状态。热试工艺的测试理念就是通过直接测试发动机的各项性能指标来判定发动机是否合格。

发动机冷试工艺，即通过变频伺服驱动电机带动发动机在不点火燃烧的状态下运转，按既定的冷试测试方案，对发动机进行各项机械部件和电控部件的测试，获取相应的测试曲线，通过选取曲线中关键信息与规范限值比较，来检验发动机的零部件质量和装配质量是否合格。其主要的检测内容包括：

- 发动机机械部件检测：燃油及机油路泄漏测试、倒拖及运行扭矩测试、正时测试、时域和频域NVH测试、高低速机油压力和过程机油压力

测试、进排气压力测试、气缸压缩压力测试等。

- 发动机电控部件检测：线束导通性测试、各传感器信号测试、各执行器功能测试、电控燃油系统功能测试、喷油器功能测试等。

冷试工艺所关注的是发动机的零部件质量和装配质量，所检测的参数反映的是发动机各部件系统的运行状态，无法直接反映发动机的性能。冷试工艺的理论基础在于，当发动机在完成定型试验并实施批产后，影响发动机性能指标的因素主要为关键零部件差异及装调差异，如果关键零部件和装调差异能够控制在合理范围内，则发动机性能就能够保证在合格范围。通过进行大量的基础研究试验，针对发动机的各运动部件、电器部件制定相应检测方法，确定参数合理范围，以此作为判定对批产发动机的合格判定依据，就是冷试工艺的测试理念。

3 发动机冷、热试工艺的差异和关联分析

发动机冷、热试工艺的测试理念存在明显的差异，这种差异具体体现在工艺测试方案、发动机测试状态、测试台结构、生产过程控制等方面。

3.1 冷、热试工艺测试方案的差异

热试工艺测试方案根据发动机的各项关键性能指标进行制定，制定过程有发动机特性数据作为参考。发动机在定型试验结束后，其自身所具备的各项性能指标即已确定，包括外特性、万有特性等，如图1所示：

热试工艺测试方案即从以上特性中提取关键工况，确定关键工况所需检测的参数作为热试工艺的测试

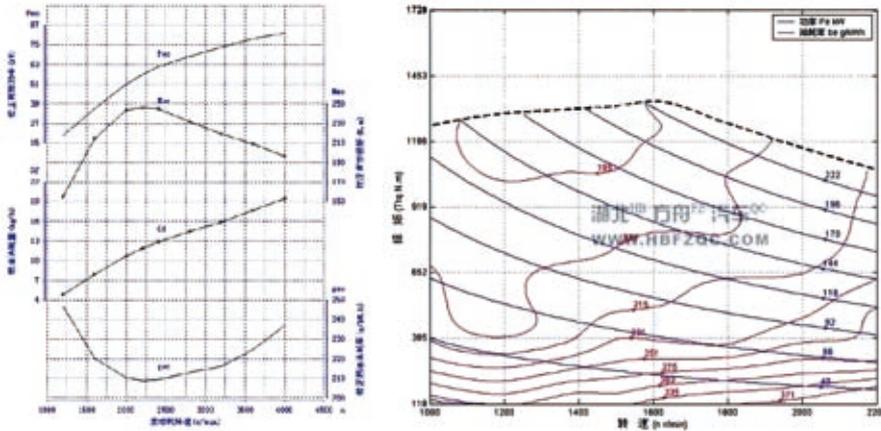


图1 典型的发动机外特性及万有特性曲线

依据，以此考核发动机性能和运行状况。热试工艺的工况选择一般为发动机外特性上的关键点，包括发动机标定工况、最大扭矩工况、最低油耗工况、高低怠速工况，其它附加工况等。分别测试该几个关键工况的转速、扭矩、油耗、烟度、排温等数据来校验发动机。全部考核指标共有30~50项。在测试过程中，由于发动机的机油温度、循环水温、发动机部件配合状态、发动机热平衡状态对考核指标的影响很大，因此为了使发动机在考核过程中处于一个平衡状态，在进行考核之前，需要辅以一定时间的热车及磨合，所以整个热试工艺过程时间一般需要30~50分钟。

热试工艺测试方案除了关注发动

机本身性能外，还需要对发动机的相关附件进行测试，考核其功能是否正常，主要包括：

- 发动机起动试验，主要考核起动机器的起动扭矩、起动机齿轮与飞轮齿圈之间的啮合情况、发动机各摩擦副的配合情况等；
- 发动机自由加速烟度，主要考核燃油泵总成的跟随性；
- 发动机机油压力及温度，主要用于考核发动机冷却系统功能、机油调压阀功能、机油路是否存在缺陷等；
- 发动机出水温度，主要用于考核冷却系统功能及节温器的功能等。

热试工艺所测试的指标体现的是发动机各系统部件协同运行过程的综

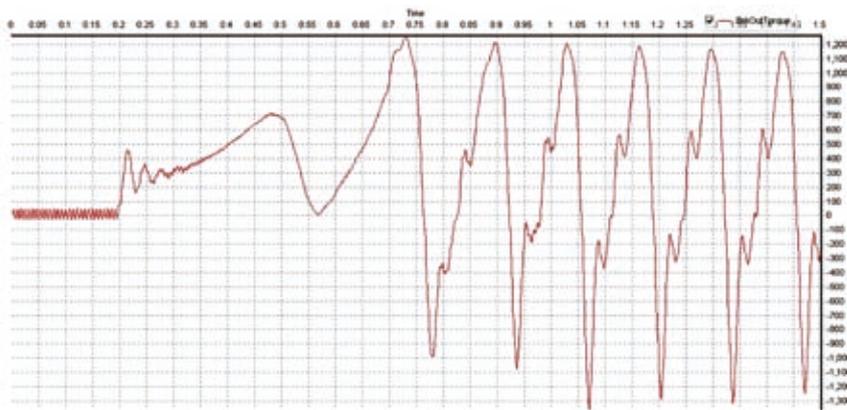


图2 典型的起动扭矩测试曲线

合状态。如果其中某个系统部件非正常运行，则根据指标较难有针对性地发现和排查，需要检验人员具备一定的发动机故障排除经验，方能胜任此项工作。而且，有些缺陷特征明显，较容易发现，而有些潜在缺陷由于运行干扰或对指标的影响不强烈，被掩盖和忽略而造成误判，导致故障发动机流往市场造成潜在质量隐患。

冷试工艺测试方案的制定相较热试工艺复杂，冷试工艺测试方案侧重于发动机关键零部件质量和装调质量方面的内容。由于测试方案制定无数据参考，因此前期需要通过大量的基础研究试验，来研究发动机各系统的结构和工作特性，选取最能反映各系统正常运行特征的测试方案。通过大批量样本数的积累分析，不断优化测试方案及选择测试曲线中关键特征，最终制定适应于企业实际生产过程的测试方案。

冷试工艺所涉及的考核指标一般有300~500个之多，而且在冷试环境下，消除了燃油燃爆产生的强烈冲击影响，数据采集系统可设置非常高的敏感度，指标的可信度更加的准确。通过各指标之间的交叉分析，可以准确的发现缺陷和导致缺陷的原因。同时，发动机测试转速和负载都较低，意味着试验过程对缺陷发动机造成损伤的可能性降到最低。冷试过程受测试环境影响因素较少，测试发动机处于常温状态，无须额外的热车及磨合时间，因此测试时间较短，整个冷试过程时间一般需要3~4分钟。

以下为部分常用的冷试测试方案的介绍：

- 起动扭矩测试

电机倒拖发动机运转起始瞬间，

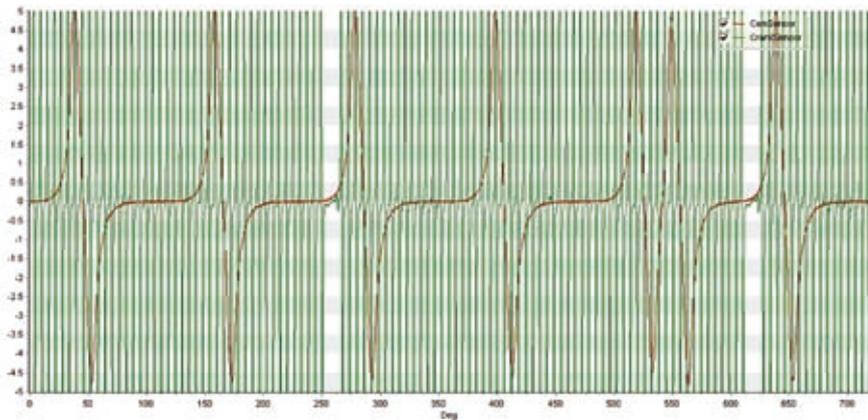


图3 典型的正时信号测试曲线

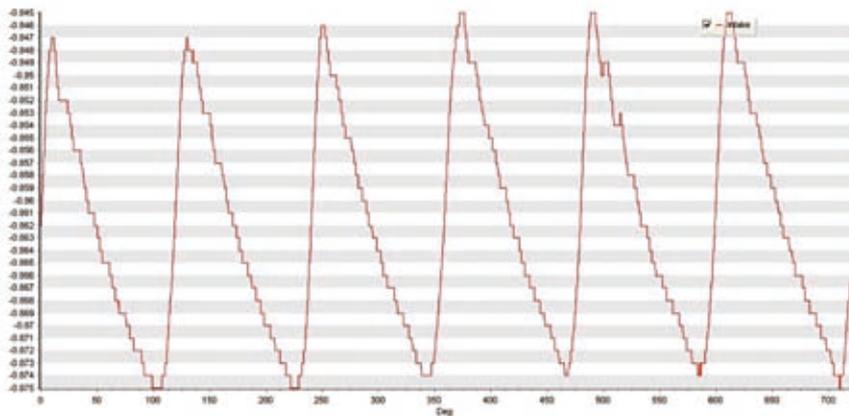


图4 典型的进气压力测试曲线

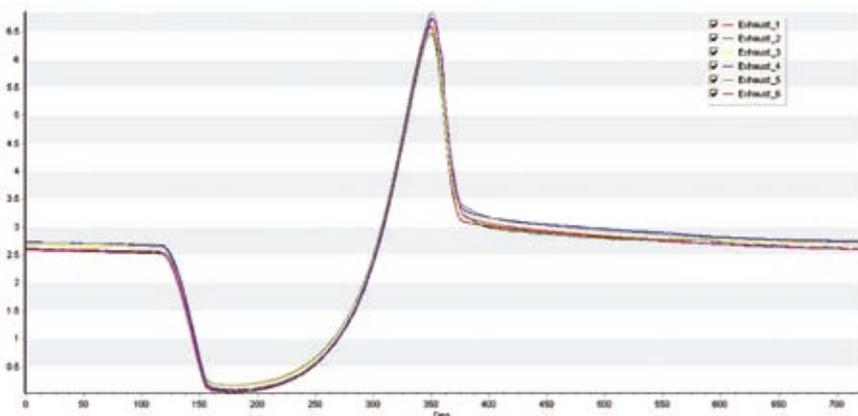


图5 典型的排气压力测试曲线

测试基于时间的瞬时扭矩曲线，来检查发动机各主要运动副是否存在卡滞的情况，如果存在卡滞现象，则其瞬时扭矩最大值会偏离标准限值。通过该偏离，可以判断发动机运动部件存在的装配缺陷，发动机必须停机并进

行检查，以避免由于继续运转而造成缺陷扩大，甚至损坏发动机。

● 正时信号测试

正时信号作为发动机的运行基准将直接影响到发动机的运行状态是否正常，必须保证信号正常和正时准确。

该测试必须安排在发动机测试开始阶段，以后的各项冷试都是需要该正时信号作为基准。正时信号测试包括曲轴脉冲信号和凸轮轴信号测试、两信号之间的对应关系测试，以此判断曲轴总成与凸轮轴总成装配是否准确。

● 高低速机油压力、过程机油压力测试

发动机冷试前必须对油底壳和主油道加机油，机油温度控制在一个稳定的常温状态(机油温度对于机油压力测试的影响较大)。冷试中低速机油压力测试一般在机油调压阀未打开的低转速下进行，可以检测主要摩擦副的瞬间泻油状态，机油泵的供给能力、机油道泄漏状况等；过程机油压力测试在发动机从低转速渐变至高转速过程中检测机油压力的变化曲线，来检验机油调压阀的功能；高速机油压力测试在高转速下进行，用于综合评判机油压力是否正常。

● 进气压力测试

在进行该测试时，需对发动机的进气口进行封堵，检测进气口封堵内侧压力在发动机低转速运行时基于曲轴转角的变化曲线。从曲线中可以较容易获得各缸进气门密封、进气门相对正时、气门重叠角、发动机的各缸吸气能力等信息，以此作为判定发动机燃烧室内部装调质量是否合格的依据。

● 排气压力测试

在进行该测试时，需对发动机的排气口进行封堵，检测排气口封堵内侧压力在发动机低转速运行时基于曲轴转角的变化曲线。从曲线中可以较容易获得排气门密封、排气门相对正时、发动机的各缸压缩压力等信息，以此作为判定发动机燃烧室内部装调质

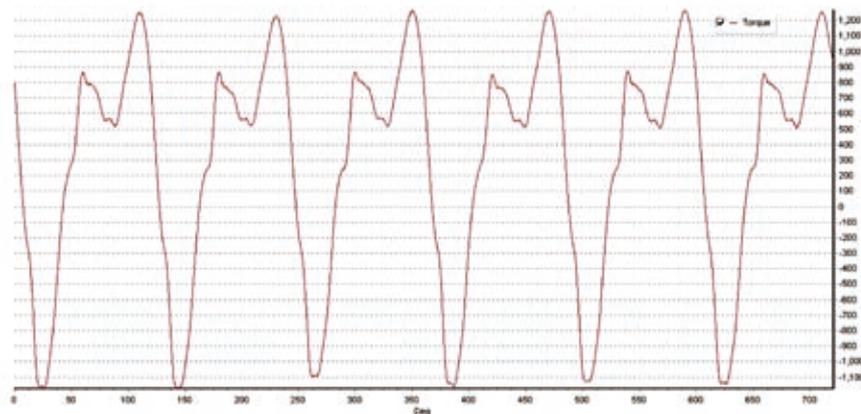


图6 典型的运行扭矩测试曲线

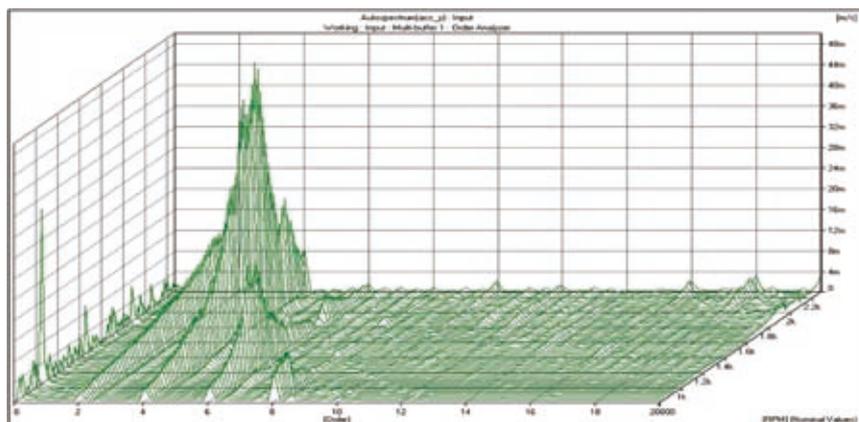


图7 典型的振动阶次分析曲线

量是否合格的依据。

● 运行扭矩测试

冷试中的运行扭矩在一个稳定的低转速状态下运行。由于转速低，曲轴倒拖扭矩的周期性变化十分明显，因此更能够清晰的获得基于曲轴转角的倒拖扭矩变化情况，来判断各缸，主要部件的运行过程扭矩是否存在异常。

● 振动噪声测试 (NVH测试)

冷试的NVH (Noise & Vibration & Harshness) 测试与传统的发动机的NVH测试的状态不同。传统的发动机NVH测试主要测试发动机在正常工作状态下的振动情况，此时由于发动机点火燃烧，会产生信号干扰，掩盖部分的缺陷信号。而冷试的NVH测试

主要针对机械部件的运行状态，此时发动机没有点火燃烧，所以不会存在因点火爆震而引起的振动干扰，对于机械部件存在的缺陷检测信号更加清晰，容易判别。

NVH振动测试在冷试工艺来说，是非常重要的缺陷发现和判定手段，对于发动机装配的质量控制起到极其重要的作用。扭矩、压力和其它普通测试仅能进行某些缺陷的发现和判定，而NVH测试在确定最为合适的测点后，几乎可以体现发动机所有的部件运行状态，对于缺陷的敏感度较高。NVH常用的方法如时域分析、频域分析等。NVH的测试对于测点的选择非常重要，必须进行大量的振动试验，以寻找确定对于某些缺陷的敏感

度较高的测点。

● 各传感器及执行器的测试

主要对发动机的电控部件进行测试，内容包括线束的导通性、各传感器的信号（进气温度压力、水温、机油温度压力等）、各执行器的功能（油泵流量控制阀、发动机制动机构、EGR阀等）。

冷试测试同样有它的局限性。由于冷试台条件及生产节拍的限制，冷试工艺中有部分零部件如发动机冷却系统、起动系统、部分未装配零部件（排气管、增压器等）无法参与测试，这些系统部件需要通过其它手段检验，包括配备零部件检测方法、按比例热试抽测等措施来保证质量。

通过以上两者测试方案的比较可以看出，冷试工艺虽然前期测试方案的制定非常复杂，需要做大量的研究工作，但其测试所获取的信息细致程度和精确度较热试高，对于缺陷的发现和判定有着极高的指导性。而且冷试可以大幅缩短测试时间、资源消耗、环境污染，这些作用是热试所无法比拟的。虽然冷试工艺存在部分零部件无法检测，但是可以通过增加相应的检验手段来弥补这一不足。

3.2 冷、热试工艺发动机的测试状态差异

冷试工艺为了能够更加细致和精确的检测发动机内部运行状况，测试过程会和某些发动机外围部件干涉，必须拆除这些部件才能进行，这就降低了发动机总成测试的完整性，只能通过评估测试项和发动机状态之间的重要程度进行取舍，冷试发动机测试状态也是由此确定。目前常用的冷试发动机测试状态可分为总成状态和半总成状态：

● 总成状态：发动机总成较为完整，测试较为全面。但由于测试条件限制，无法详细获取重要数据，尤其是发动机各缸燃烧室内部的装配信息，而各缸燃烧室内部装配质量会直接影响发动机的性能。

● 半总成状态：发动机根据测试要求半总成装配，主要是排气歧管和增压器不安装，如此可保留各缸排气口安装面，通过各缸排气口处测试，可以精确的获取各缸燃烧室内部的装配状态信息。由于排气歧管和增压器未装配，所以只能通过其它手段保证零部件质量和装配质量。

热试工艺为发动机总成测试，要求发动机所有部件系统完全装配后进行测试，相较冷试工艺，热试工艺能够对发动机的所有系统的进行考核，在总成测试完整性方面具备优势。

3.3 冷、热试工艺测试台结构的差异

热试工艺主要测试发动机的动力性指标和经济性指标，并且在测试过程中需要保证发动机能够处于一个较为稳定的测试环境，这就需要针对以上内容配备相应的设备，包括测试设备和辅助设备：

● 测试设备主要包括：

测控系统，主要为测功器、油门执行器、测控系统柜等，测功器用于

提供发动机负载，油门执行器用于控制发动机油门开度，通过测控系统控制两者在按设定模式下调整发动机的运行工况，检测发动机转速，扭矩。

油耗仪：用于发动机燃油消耗指标测量。

数据采集系统：根据热试监控参数要求配备各种压力温度传感器及信号调理模块用于参数测量。

烟度计：用于稳态烟度及自由加速烟度测量。

● 辅助设备主要包括：

冷却液恒温装置：控制发动机循环水温处于一个稳定的范围（ $90^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）。

中冷恒温装置：控制增压气体处于稳定的温度范围（ $45^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）。

燃油恒温装置：控制燃油温度处于稳定的温度范围（ $38^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ）。

发动机进排气系统：控制发动机进气状态、排气背压处于稳定的范围。

台架通风系统：控制发动机运行环境处于较为稳定的范围。

快装系统：发动机台架内的快速对接及夹紧。

热试台架设备对外界的依赖较高，除了供给电、压缩空气外，还需供给冷却用循环水、燃油，配备专用的排

气烟道等，整个公用设施供给系统较为庞大，包括：

循环冷却水系统：由循环水泵、冷却水塔、冷却水池、循环水管路及电气控制系统组成，用于发动机各恒温装置的循环水供给。

燃油供给系统：由燃油罐、燃油泵、燃油供给及回收管路等组成，用于发动机热试所需的燃油供给。

排气烟道：由主烟道、排烟风机、废气处理装置等组成，用于发动机废气处理及排放。

冷试台的结构根据发动机测试方案进行设计。由于冷试要求的节拍较快，因此对冷试台的自动化程度要求高，且冷试工艺要求与装配工艺之间紧密结合，冷试台通常串联布置在装配线适当位置，设计构造需适应装配线及物流组织的要求。冷试台主要由驱动机构，台前快速对接和执行机构，测控系统等三部分组成。

● 驱动机构：主要用于发动机冷试过程的倒拖驱动。主要部件即倒拖电机，配备转速以及扭矩传感器。由于众多参数的显示是基于转角的，因此转速传感器的分辨率和测试精度有较高的要求。

● 快速对接、执行机构：主要用于发动机在冷试台内部的快速定位、

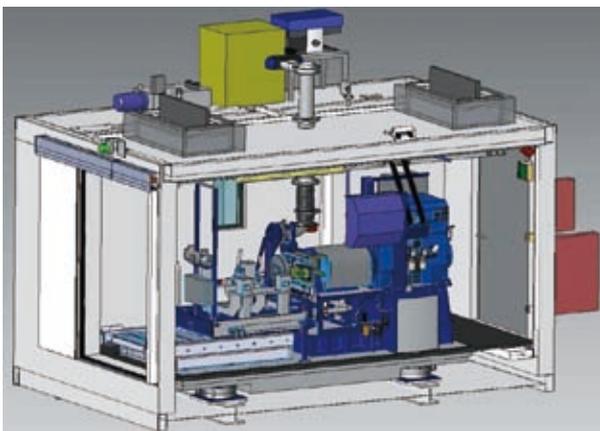


图8 典型的热试台架结构

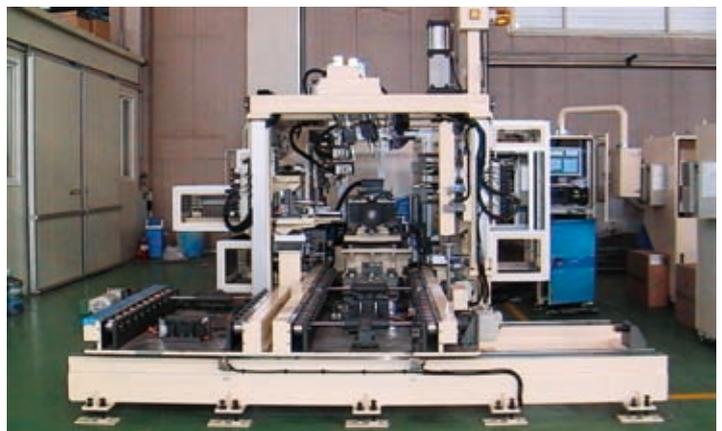


图9 典型的冷试台架结构

对接,冷试过程各封堵件的自动执行。根据各机构的动作执行要求,需要依靠气动以及液压驱动元器件和快速对接机构,对于这些机构的可靠性和密封性的要求较高。

- **测控系统:**冷试台最重要的部分,包括测控仪、传感器、测试分析软件等。在测试过程中,测控仪根据在线测试规范自动控制发动机在不同的速度和条件下进行测试,各个传感器收集发动机运转过程中的实时模拟信号,数据以波形的形式记录、分析、存储和使用。冷试计算机将收集的数据同预设的极限值进行比较,来判定发动机是否合格。

通过比较可以看出,冷试台相比热试台具有结构紧凑、占地小、自动化程度高、对于外界的依赖低等优势。

因此,从测试台架的前期设备投入和使用成本来看,冷试台具有明显的优势。

3.4 冷、热试工艺生产过程控制的差异

冷试工艺相较热试工艺,更加注重生产过程分析。热试工艺测得的数据直观反映了发动机的性能状态,只需要保证发动机的动力性指标和经济性指标在限值范围内,以及相关附件测试合格即可说明发动机处于正常范围,生产过程的数据分析较为简单。而冷试工艺测得的数据是针对零部件和装调质量而言的,无法直接反映发动机的性能,必须重点关注生产过程中的数据变化趋势,掌握零部件质量和装调质量不同时段内的差异,及时对测试参数及限值进行修正。变化趋势通过持续对冷试数据进行过程分析获

得。通过分析变化原因,及时掌握生产信息,发现差异情况,提出差异分析报告,督促生产线作出相应的整改。随着生产过程控制的深入应用,冷试工艺从另一个角度促进了零部件质量和装调质量的提升,虽然其中的分析工作较为繁重,但是对于提升发动机整机质量的帮助无疑是巨大的。

3.5 冷、热试工艺的关联

虽然冷、热试工艺存在以上差异,但是其最终目的是一致的,都是为了去检验发动机总成的零部件和装调缺陷,只是采取的技术路线不同。冷试中测得的某个故障现象,热试中则应该有相应的表现。因此冷、热试工艺之间存在一定的关联度,下表汇总了冷热试工艺相关参数的关联分析:

由上表可以看出,热试工艺中主

表1 冷、热试工艺相关参数的关联度分析

序号	热试测试内容	热试故障现象	主要影响因素	冷试对应测试内容
1	各工况功率、扭矩、转速、燃油耗、排温、烟度等	扭矩不足、排温高、燃油耗高、怠速不稳、最高转速未满足要求、自由加速烟度高等	配缸间隙 发动机正时 配气正时 共轨系统 喷油器 燃油泵供给能力 增压器	缸内压缩压力测试、倒拖扭矩测试 曲轴传感器与凸轮轴传感器信号测试 进排气压力测试 轨压测试 喷油器功能测试 燃油泵功能测试 需靠零部件保证
2	各工况机油温度及压力监控	机油压力异常及机油温度偏高	机油泵功能 机油调压阀功能 油道泄漏 摩擦副配合间隙异常 冷却系统问题	高低速油压测试 变速过程油压测试 高低速油压测试 低速油压测试 需靠零部件保证
3	出水温度	出水温度偏高	节温器 冷却系统问题	需靠零部件保证 需靠零部件保证
4	发动机异常敲击的人为判断	存在异常敲击和噪声	各零部件质量和装配质量	振动和噪声的时域及频域测试
5	三漏问题	漏水、漏油、漏气	水道泄漏 主油道泄漏 机内泄漏 气道泄漏 燃油道泄漏	水道泄漏测试 高低速机油油压力测试 机内泄漏测试 气道泄漏测试 高低压燃油路泄漏测试
6	起动性能测试	起动异常	起动机 发动机摩擦副	需靠零部件保证 起动扭矩及运行扭矩测试

要测试项冷试工艺都有相应项与之对应。针对热试时某测试项，冷试将其进行拆分，通过各种测试手段分别测量，如冷试拆分项都检测合格，同样也可认为热试测试测试项也应在合格范围内。冷试测试项（如NVH测试、进排气压力测试）的测试准确度较热试高，更容易获取更精确地信息，对于故障的敏感性和指导性得到大幅提高。

但是，由于冷试工艺的条件所限，有些热试的测评项冷试无法进行，如冷却系统、起动系统、增压器等，这就需要采取其它措施来辅助保证未测试零部件质量和装配质量，如提高零部件的检验水平、辅以一定比例的热试（根据生产质量统计情况确定比例）。

以下通过几个的冷热试缺陷关联度分析案例，来说明冷、热试之间对于

缺陷现象的表现特征：

● 轨压传感器信号缺陷

某发动机热试故障现象为外特性各工况扭矩低、小时油耗低、排温低、中冷前后压力低、其余指标正常。根据以上热试数据可以基本判断为燃油系统存在缺陷，但无法准确发现缺陷原因。通常采用排除法对该机燃油系统各部件逐一更换热试，较为麻烦。冷试故障表现为共轨压力测试异常（见图9），从图中可以发现该轨压曲线明显区别于正常范围，因此可以直接判别为由于轨压信号失真，输出信号值比实际值高，对应于热试为实际的燃油共轨压力较ECU设定值小，燃油喷射量小，从而导致扭矩下降，排温低、小时油耗低的现象。

● 排气门间隙调整缺陷

某发动机热试故障现象为外特性各工况扭矩低、比油耗高、排温高。根据以上热试数据但无法准确发现故障原因。冷试故障表现为第1缸对应的排气压力曲线及进气压力曲线失真（见图10），对该曲线进行关键信息分析发现第1缸排气门开启角度提前15度，排气门提前开启，滞后关闭。对应于热试为第1缸做功冲程提前结束，进气冲程排气回流，从而导致扭矩低、比油耗高、排温高。拆检发现该缸排气门间隙较小。

● 凸轮轴齿轮定位孔加工缺陷案例

某发动机热试故障现象为外特性各工况扭矩低、比油耗高、排温高。根据以上热试数据但无法准确发现故障原因。冷试故障表现为全缸进排气门开启角度均提前10度（见图11），可判断凸轮轴装配问题，拆检发现凸轮轴齿轮部装过程中发生偏离导致整个配气机构相位偏差。

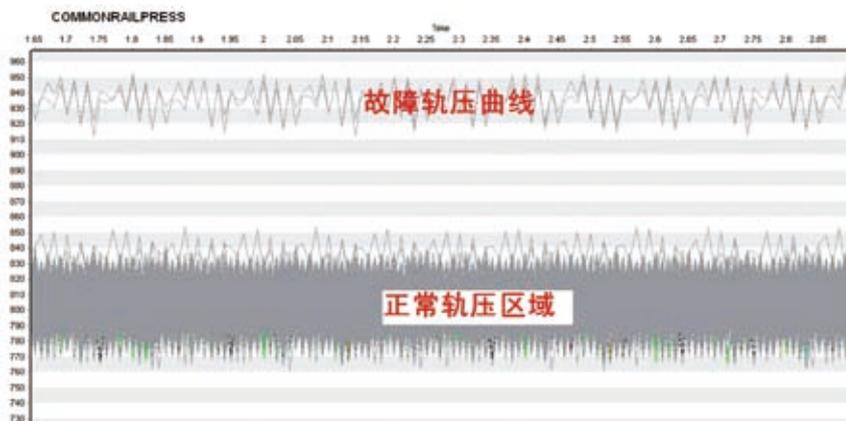


图10 共轨压力测试异常曲线

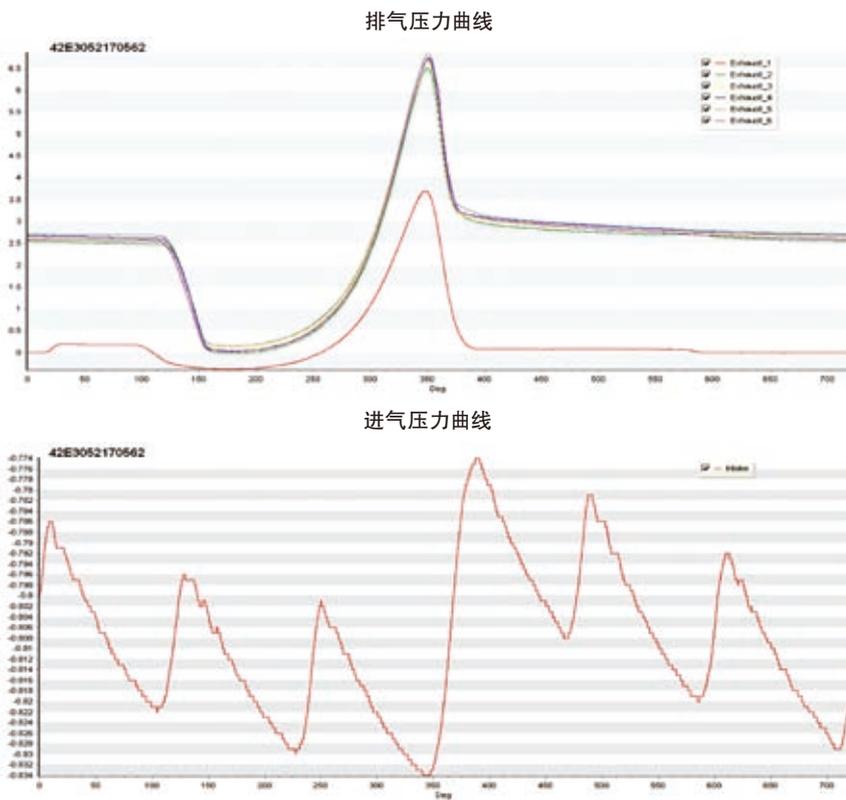


图11 进排气压力测试异常曲线

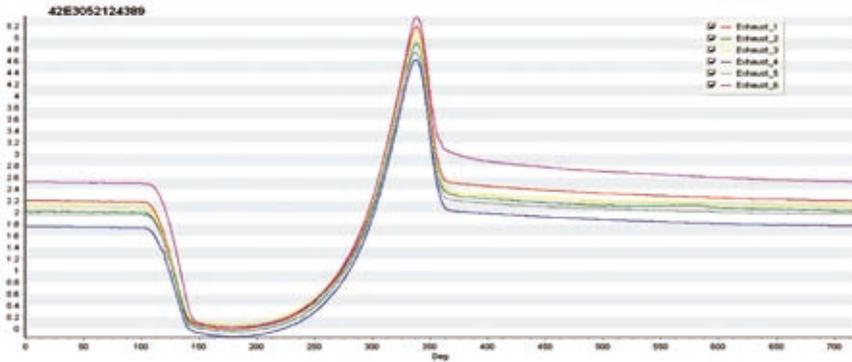


图12 排气压力测试异常曲线

4 结束语

综合以上冷、热试工艺的对比分析,可以得出结论,冷试工艺相比热试工艺,在科技先进性、缺陷敏感度、节

能环保性等方面具有明显的优势,冷试工艺存在的局限性则需要通过热试工艺去弥补。“冷试工艺为主,辅以比例热试”作为发动机总成试车工艺将

(上接22页)

带来的改善如下:1)通过工艺字典、模板工艺的使用促使工艺、工序的规范化、标准化为批量制造提供基础;2)利用工艺经验辅助计算下料尺寸、毛重等关键工艺参数消除人为影响同时确保数据的准确性,一致性;3)通过结构化工艺BOP,使技术人员从“填表工艺”转变为对工艺参数研究与创新工作;4)发挥工艺信息平台的桥梁作用,实现信息从销售、设计到制造的贯通与共享。**7**

参考文献:

- [1] Au Stacey, Wright P K. Comparative study of rapid prototyping technology[J]. ASME-Design Engineering Division,1993,66(11):73-82.
- [2] Zhao gang, Jiang Pingyu, Research on Process Optimized-decision-making of e-Manufacturing for Mass Customization, China Mechanical Engineering, 2007.5 V18(9):1056~1059 [赵刚,江平宇,面向大规模定制的e-制造工艺优化决策

方法研究,中国机械工程,2007.5, V18(9):1056~1059]

- [3] WANG Ai-min, XIAO Tian-yuan, FAN Li-ya, FAN Wen-hui Research on clustering planning of machine cell for product family, Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004 V10(10):1257~1262 [王爱民,肖田元,范莉娅,范文慧 面向产品族的制造单元聚类规划研究,计算机集成制造系统,2004, V10(10):1257~1262]
- [4] HUANG Hai-liang, WANG Li-ya, LU Bing-heng A Web-Based Rapid Product Development Technique Selector for Mass Customization, Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004.6 V38(6): 914~918 [黄海量,王丽亚,卢秉恒,大规模定制环境下的产品快速开发工艺选择系统,上海交通大学学报,2004.6, V38(6): 914~918]
- [5] Ma ziqin Research on contemporary Technology and Process Management and key techniques, Dalian Jiao tong University Doctor dissertation 2008.5 4~10 [马自勤

成为今后发动机制造技术发展的必然趋势。发动机冷试工艺作为国内外汽车柴油机生产检测的一种新的技术将成为我们今后生产中需要去深入研究的基础性工艺研究课题。**7**

作者信息

王毅明,工艺规划工程师,一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂,地址:江苏省无锡市永乐东路99号,邮编(P.C):214026,电话(Tel):0510 85014990 8631 (13585083428),传真(Fax):0510 85012902, E-mail:wym@wxdew.com

现代工艺管理及若干关键技术研究 [M].大连交通大学工学博士学位论文,2008.5 4~10]

- [6] XIA Guo-ping, XIAO Yi-yong MODEL FOR PRODUCT DESIGN OF MASS CUSTOMIZATION, Chinese Journal of Aeronautics, 2002.9, V23(5):491~494 [夏国平,肖依永 面向大规模定制的产品设计的一种模型,航空学报,2002.9, V23(5): 491~494]
- [7] LAN Lin-chun, DAN Bin, FENG Tao, ZHANG Xu-mei A Methodology of Classification of Product Family for Mass Customization, Journal of Chong qing Universit, 2004.7, V27(7):97~101 [兰林春,但斌,冯韬,张旭梅 一种面向大规模定制的产品族分类方法,重庆大学学报,2004.7, V27(7):97~101]

第一作者:赵奔,西安大庆路509号,710077,西安西电开关电气有限公司,机械制造行业,西安西电操动机构公司技术副经理/工程师,18792578069, zhao_ben@hotmail.com

复合材料大型件数字化快速制造应用研究

秦绍衍 单忠德 卢泽宇 张志权

机械科学研究总院先进制造技术研究中心 北京 100083

摘要: 本文提出一种基于数字化导向模板复合材料柔性导向三维织造技术,该技术通过直接数控织造出方形与三角形等大型异形件。同时,本文选取方形大型件,尺寸达到300mm,从设计到织造时间仅1天,且通过设计与优化符合性能要求,显著缩短制造周期,降低制造成本。

关键词: 复合材料; 大型件; 快速制造

Application Research on Digital Rapid Manufacturing for Large-Scale Composite Parts

Shaoyan QIN, Zhongde SHAN, Zeyu LU, Zhiqian ZHANG

Advanced Manufacture Technology Center China Academy of Machinery Science & Technology, Beijing, 100083

Abstract: In this paper, a flexible oriented 3D weaving forming technology based on digital guiding template was proposed, which could weave the large-scale composite parts such as square and triangle and other special-shaped parts by direct numerical control. Meanwhile, a large-scale square part was chosen, which manufacturing time was only 1day including design and weaving. The part size has reached 300 mm and it has met the requirements of the performance after designing and optimizing. This technology has shortened the manufacturing cycle and decreased the manufacturing cost.

Keywords: Composite; Large-Scale Parts; Rapid Manufacturing

1 前言

复合材料在综合了基体材料与增强材料优点的基础上,不仅具有质量轻、强度高、模量高、疲劳强度高、耐腐蚀等优点,同时还具有可设计性和工艺性好等特点,因此被广泛地应用于航空航天、汽车、风能、轨道交通、建筑、国防军工等领域。在高精尖端行业,复合材料更是提高性能的关键手段之一,据统计,在波音787飞机上,复合材料已占飞机总质量的50%以上,同时,复合材料也是飞机和舰艇隐形的基本要素之一^[1]。

复合材料制备工艺主要分为二维成形技术与三维成形技术,复合材料二维成形技术通常由若干层单层织物铺设而成,具有工艺简单技术成熟等优点。但由于织物层间缺乏有效的增强,严重限制了复合材料的性能,尤其是在动载荷作用下,层间剥离是这种结构复合材料的主要失效形式之一^[2]。

目前,复合材料三维织造成形技术包括三维机织、三维编织、三维缝合以及柔性导向三维织造等^[3]。三维织造技术相比于传统的二维成形技术有效地解决了织物的层间增强问题,然而仍存在不足之处:(1)加工形状复

杂的制件存在困难,织造工序较为复杂,加大了编织路径自动规划及设备自动控制的难度;(2)对加工大型制件,特别是在厚度方向尺寸上有一定的限制;(3)成本较高,设备体积庞大,织造周期长。就现有复合材料三维织造技术上存在的问题,寻求技术方法及工艺上的改革创新和突破成为国内外专家学者的研究热点^{[4][5]}。本文提出一种基于数字化导向模板复合材料柔性导向三维织造技术,该技术通过直接数控织造出形状复杂的大型件,同时设备体积较小,织造周期短。

2 复合材料柔性导向三维织造方法

针对航空航天、国防军工、汽车等行业零部件高性能、轻量化的要求，结合复合材料织造成形过程中存在的工序复杂、设备自动化程度低、大尺寸复杂构件无法成形等问题，机械科学研究总院提出一种新的复合材料三维织造成形方法，即数字化柔性导向三维织造成形方法。

数字化柔性导向三维织造成形方法不同于传统的基于织机编织方法，其特征在于基于数字化导向柱模板进行三维织造成形，其成形原理如图1所示。对织造的零件三维CAD模型进行分层，根据层片截面轮廓信息进行导向模板设计，设计并生成织造路径；排布导向模板并根据路径进行织造得到预制件；对预制件进行压紧；最后对预制件进行树脂浸渍得到复合材料。

3 典型件设计与织造

本文选择方形典型件进行设计与织造，尺寸为300×300×80mm。其主要应用于室温条件下承受纵向载荷，因此在性能上需要保证纤维体积含量为50%的基础上，纵向弹性模量尽可能高，同时织造时间尽可能短。

复合材料柔性导向三维织造设

计步骤如图2所示，主要包括材料选择、方案选择与参数设计，首先进行材料选择，根据复合材料使用环境与应用领域选择导向柱材料，纤维材料以及基体材料；然后进行方案选择，根据复合材料形状、承力条件选择模板排布方式、导向柱形状与织造路径方案；最后进行参数设计，根据复合材料性能优化与工艺要求设计导向柱直径，导向柱间距和高度系数。

3.1 材料选择

复合材料柔性导向三维织造材料选择取决于使用环境与应用领域选择，主要有三方面，导向柱材料，纤维材料以及基体材料。由于该典型件主要承受纵向载荷且使用环境无高温与腐蚀，因此导向柱选择纵向强度较高的复合材料实心导向柱如图3所示，导向柱成型工艺为拉挤成形工艺。纤维材料选择力学性能较好的碳纤维PAN基碳纤维T300系列，密度1.7g/cm³，基体材料如图4所示，选择双酚A型环氧树脂，聚酰胺固化剂，加适量稀释剂，固化后弹性模量2.1Gpa。

3.2 方案选择

复合材料柔性导向三维织造方案选择取决于复合材料形状、承力条件，主要有三方面，导向柱排布，导向柱截面形状，以及路径方案。根据典型件CAD模型如图5所示，选择导向模板



图3 实心复合材料导向柱



图4 环氧树脂基体

方形排布，导向柱截面为圆形，由于其主要用于承受纵向载荷，需要保证纤维体积含量为60%的基础上，纵向弹性模量尽可能高，同时织造时间尽可能短，因此织造路径选择体积含量最高，织造时间最短且纵向弹性模量最大的方形平行路径，如图6所示。

3.3 参数设计

复合材料柔性导向三维织造参数设计取决于性能优化与工艺要求，其

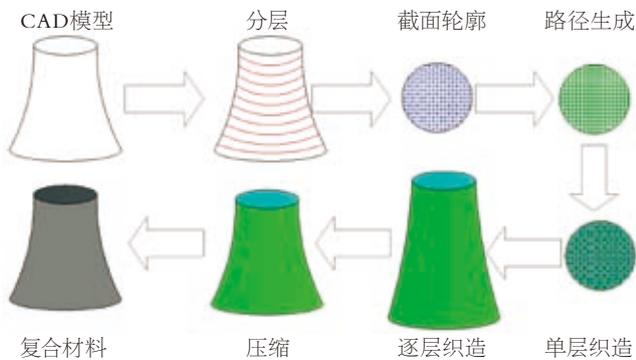


图1 基于数字化导向模板的三维织造方法基本流程图

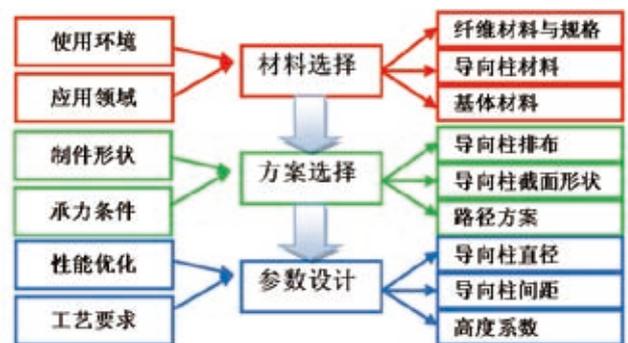


图2 典型件设计步骤

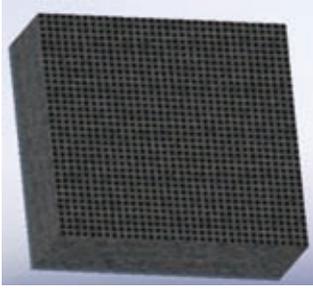


图5 典型件CAD模型

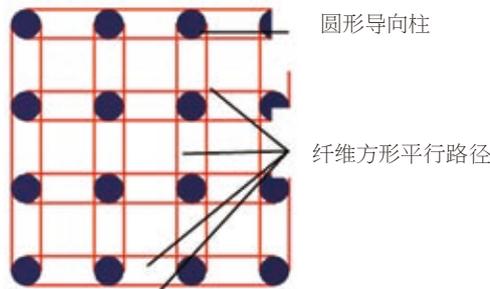


图6 典型件织造方案示意图

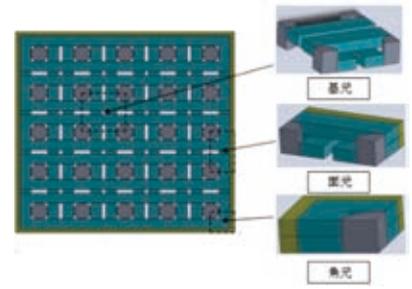


图7 胞体三维示意图

主要优化性能为纤维体积含量和纵向弹性模量。参数设计有三方面，导向柱间距D，导向柱直径d，以及高度系数C即在纤维高度方向上压缩比例。

复合材料柔性导向三维织造复合材料性能预测几何模型的建立是根据

路径的规则性与对称性，如图7所示，对于方形排布选取三种单元胞体来描述整体几何特征，分别为基元I，面元S和角元C。

(1) 纤维体积含量性能优化

由于柔性导向三维织造复合材料中纤维是由织造纤维与导向柱中的纤维共同组成，因此纤维体积率 V_f 是织造纤维与导向柱中的纤维体积之和与复合材料总体积的比值，即：

$$V_f = \frac{\text{纤维束内纤维体积} + \text{导向柱内纤维体积}}{\text{总体积}} \quad (1)$$

$$V_f = \frac{\varphi \times (V_I + V_S + V_C) + \varphi' \times (V'_I + V'_S + V'_C)}{V} \quad (2)$$

- 其中：
 φ ：纤维束捻集率，0.91；
 φ' ：导向柱捻集率，0.8；
 V_I ：基元内纤维束总体积；
 V_S ：面元内纤维束总体积；
 V_C ：角元内纤维束总体积；
 V'_I ：基元内导向柱总体积；
 V'_S ：面元内导向柱总体积；

- V_C' ：角元内导向柱总体积；
 V ：循环胞体总体积。

由纤维体积含量预测公式可知随着导向柱间距的增大，纤维体积含量先减小再增大，随着导向柱直径的增大，纤维体积含量先减小再增大，在参数设计过程中避免在低谷范围内。同时纤维体积含量随高度系数减小而

增大，因此在工艺允许范围内，减小高度系数可以有效提高纤维体积率。

(2) 纵向弹性模量性能优化

由于柔性导向三维织造复合材料是由织造纤维与导向柱以及基体共同组成，根据刚度平均原理，纵向弹性模量预测公式如下所示：

$$E_z = \frac{\text{基体纵向弹性模量} \times \text{基体体积} + \text{纤维束纵向弹性模量} \times \text{纤维束体积} + \text{导向柱纵向弹性模量} \times \text{导向柱体积}}{\text{总体积}} \quad (3)$$

$$E_z = \frac{E_z'' \times \varphi \times (V_I + V_S + V_C) + E_z' \times (V'_I + V'_S + V'_C) + E_z'' \times [V - \varphi \times (V_I + V_S + V_C) - (V'_I + V'_S + V'_C)]}{V} \quad (4)$$

- 其中：
 E_z' ：导向柱纵向弹性模量，120Gpa；
 E_z'' ：基体纵向弹性模量，2.1Gpa；
 E_z''' ：纤维束纵向弹性模量，

- 10Gpa；
 φ ：纤维束捻集率，0.91；
 V_I ：基元内纤维束总体积；
 V_S ：面元内纤维束总体积；
 V_C ：角元内纤维束总体积；
 V'_I ：基元内导向柱总体积；

- V'_S ：面元内导向柱总体积；
 V_C' ：角元内导向柱总体积；
 V ：循环胞体总体积。

由预测公式可知纵向弹性模量随导向柱间距增大而减小，纵向弹性模量随导向柱直径增大而增大，因此在

工艺允许范围内,减小导向柱间距,增大导向柱直径可以有效提高纵向弹性模量。

通过对性能优化计算与分析,典型件参数设计为导向柱间距 $D=9\text{mm}$,导向柱直径 $d=6\text{mm}$,高度系数 $C=1.28$,其理论纤维体积含量 52.41% ,理论纵向弹性模量 59.66Gpa 。

3.4 典型件织造

根据CAD模型,对织造的零件三维CAD模型进行分层,根据轮廓信息进行导向模板设计,排布导向模板,如图8所示,对每层进行织造路径设计,由控制系统自动生成路径;并根据路径由运动系统进行预制件织造得到预制件,最后对预制件进行压紧,得到预制件。

预制件如图9所示,尺寸 $308\times 308\times 80\text{mm}$,导向柱间距 $D=9\text{mm}$,导向柱直径 $d=6\text{mm}$,高度系数 $C=1.28$,共织造46个循环,纤维重量 3.20KG ,导向柱重量 4.45KG ,纤维体积含量 52.37% 与理论值完全吻合,从设计到成形仅用一天时间。

5 总结

本文提出一种基于数字化导向模板复合材料柔性导向三维织造技术,该技术可以通过直接数控织造出方形与三角形等大型异形件。同时,本文选择方形典型件,设计边

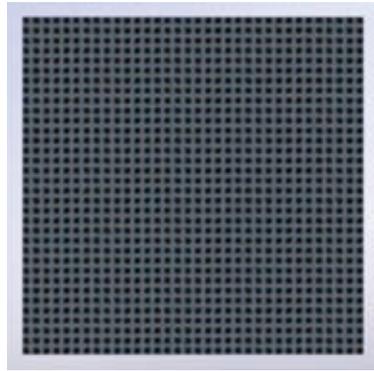


图8 典型件导向模板排布

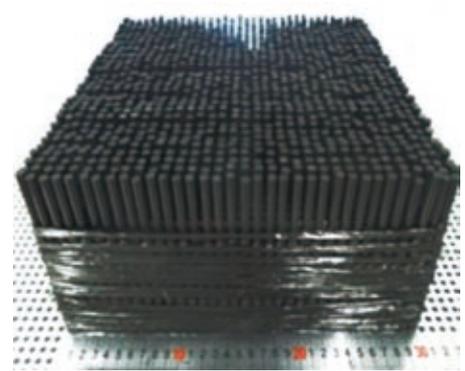


图9 典型件

长为 300mm ,高 80mm ,且主要应用于室温条件下承受纵向载荷,通过合理的设计与优化所织造的预制件尺寸 $308\times 308\times 80\text{mm}$,纤维体积含量达到 52.37% ,理论纵向弹性模量 59.66Gpa ,从设计到织造仅用1天。进一步证明本方法所织造成形的预制件符合性能要求,同时显著缩短织造周期,降低制造成本。**T**

6 致谢

本文受国家自然科学基金重点项目(课题编号:51035003)、科技部科研院所专项项目(项目编号:2011EG119107)支持。

参考文献

- [1] 韩楠林. 新型低成本三维复合材料引发世界多个产业新变革[J]. 新材料产业,2010(11),27-31.
- [2] 易洪雷,丁辛. 三维纺织预型件的生产

技术[J]. 纤维复合材料,1999(3),31-33.

- [3] Shan Zhongde, Liu Feng, Qiao Juanjuan, Qin Shaoyan. 3D Weaving Forming Technology and Equipment For Composites, Proceeding of the International Conference on Advanced Technology of Design and Manufacture 2011, Changzhou, IET PRESS. 2011, 87-90.
- [4] 陈利. 三维纺织技术在航空航天领域的应用[J]. 航空制造技术, 2008(4), 45-47.
- [5] 戎琦. 三维机织复合材料的织造技术[J]. 纤维复合材料, 2007(1),31-33.

作者信息

秦绍衍,机械科学研究总院先进制造技术研究中心硕士研究生,北京市海淀区学清路18号,100083,电话13426234000,010-82415113,电子邮箱qinsy@camtc.com.cn.

Ti-55531钛合金棒材两种热处理工艺之间的比较

黄立军

中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司 德阳 618000

摘要: 以Ti-55531钛合金棒材(规格 $\phi 350\text{mm}$)为研究对象,分析了固溶时效和 β 退火热处理工艺对材料组织和性能的影响。具体地,利用金相显微镜、万能材料试验机等设备,测定了材料的 β 相变点,比较了两种热处理状态下材料的微观组织结构、室温拉伸、冲击性能以及平面断裂韧性。结果表明,固溶时效可以作为Ti-55531合金的单一强化热处理工艺,其强度可达1431MPa,塑形和韧性较差; β 退火的Ti-55531合金具有较好的强韧性匹配,断裂韧性和冲击功可分别达到100MPa.m0.5、34J。

关键词: Ti-55531钛合金;热处理;组织;性能

Comparison Between Two Types of Heat Treatment Process of Ti-55531 Alloy Bars

Lijun HUANG

Wanhang Die Forging Co.,Ltd, China Erzhong, Deyang, 618000

Abstract: The influence of solution-aging and beta annealing process of Ti-55531 alloy bars ($\phi 350$) on the microstructure and properties of the material was studied. Specifically, by use of optical microscope, universal testing machines and other equipment, beta phase transition point of the material was determined, meanwhile, under these two types' heat treatment process, microstructure, room temperature tensile, impact properties and fracture toughness of the material was compared. The results show that solution-aging process can be used as a single strengthening heat treatment process of Ti-55531 alloy, strength can reach 1431MPa, but ductility and toughness are not so good; beta annealed Ti-55531 alloy has good strength and toughness, fracture toughness and impact properties can reach 100MPa.m0.5, 34J, respectively.

Keywords: Ti-55531 Titanium Alloy; Heat Treatment; Microstructure; Mechanical Property

1 引言

钛合金具有比强度高,耐腐蚀等优点,在航空航天领域得到了广泛的应用。经过近几十年的发展,已衍生出了多个系列、不同种类和用途的钛合金。目前,随着航空航天业的迅速发展,对钛合金提出了更高的要求——高强度高韧,传统的高强度高韧钛合金主要有美国研制的近 β 型钛合金Ti-1023

和俄罗斯研制的BT22等^[1,2],因其自身存在的一些劣势(如:冶炼工艺复杂、易存在成分偏析、生产成本过高等),有逐渐被新型高强高韧钛合金取代的趋势。新型高强高韧钛合金有美国研制的Timetal556和俄罗斯与法国空客联合开发的VST55531合金^[3,4],VST55531以其较好的强韧性,现已应用在A380空客飞机的机翼和发动机

挂架之间连接装置的制造^[5,6]。

鉴于目前国内对于Ti-55531合金在工厂中的应用研究报道较少,本文主要从工厂现场的实际条件出发,研究了两种不同的热处理工艺对于Ti-55531合金棒材不同位置处组织和性能的影响,旨在为以后Ti-55531合金在国内的工业化应用提供一个研究基础。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

Ti-55531名义成分为Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr。本次试验材料为西部超导提供的 $\phi 350\text{mm}$ 规格Ti-55531合金棒材,该棒材经过三次真空自耗电弧炉熔炼并经快锻机开坯、墩拔、终锻后得到^[7],该棒材不同部位的化学成分见表1。

2.2 试验工艺

$\phi 350$ Ti-55531合金棒材经超声波探伤后进行热处理工艺试验。热处理工艺试验采用 β 退火和固溶时效,

具体如下:

(1) 试块A: 固溶时效 ($820^{\circ}\text{C}\times 2\text{h}$, AC+ $580^{\circ}\text{C}\times 8\text{h}$, AC);

(2) 试块B: β 退火 ($880^{\circ}\text{C}\times 2\text{h}$ 炉冷至 $580^{\circ}\text{C}\times 8\text{h}$, AC)。

2.3 组织和性能检测

采用 $\phi 6\text{mm}$ 的拉伸试样,在 INSTRON 8802 MTS CMT5305型材料拉伸试验机上进行拉伸性能试验。冲击试验和断裂韧性试验分别在JBN-500冲击试验机和 INSTRON 8803材料试验机上进行。用DMI5000M Leica光学显微镜观察显微组织。

3 实验结果与分析

3.1 β 相变点检测

选定试块A的D/4位置处切取试块8个,进行 β 转变点测试,得出最终 β 转变点的温度: 840°C ,符合高玉社、李少强等^[7]用金相法测定的该合金(a+ β)/ β 转变点温度 (845 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ 范围。

3.2 两种热处理工艺下的显微组织

图1(A)、(B)分别为Ti-55531合金棒材不同位置处经固溶时效和 β 退火处理后得到的光学金相组织。从图中可以看出,试块A各位置处由 α 和 β

表1 Ti-55531合金棒材化学成分

Tab.1 Chemical composition of Ti-55531 alloy bar(% mass fraction)

测试部位	化学成分								
	Al	Mo	V	Cr	Zr	Fe	O	N	H
心部	5.67	4.89	4.90	2.89	1.07	0.39	0.11	0.0096	0.0019
D/8处	5.68	4.90	4.94	2.88	1.06	0.38	0.10	0.0098	0.0010
D/4处	5.80	4.88	4.90	2.89	1.07	0.38	0.10	0.0098	0.0010
3D/8处	5.81	4.92	4.91	2.87	1.06	0.38	0.10	0.011	0.0010
边部	5.86	4.93	4.91	2.87	1.06	0.38	0.11	0.0083	0.0010

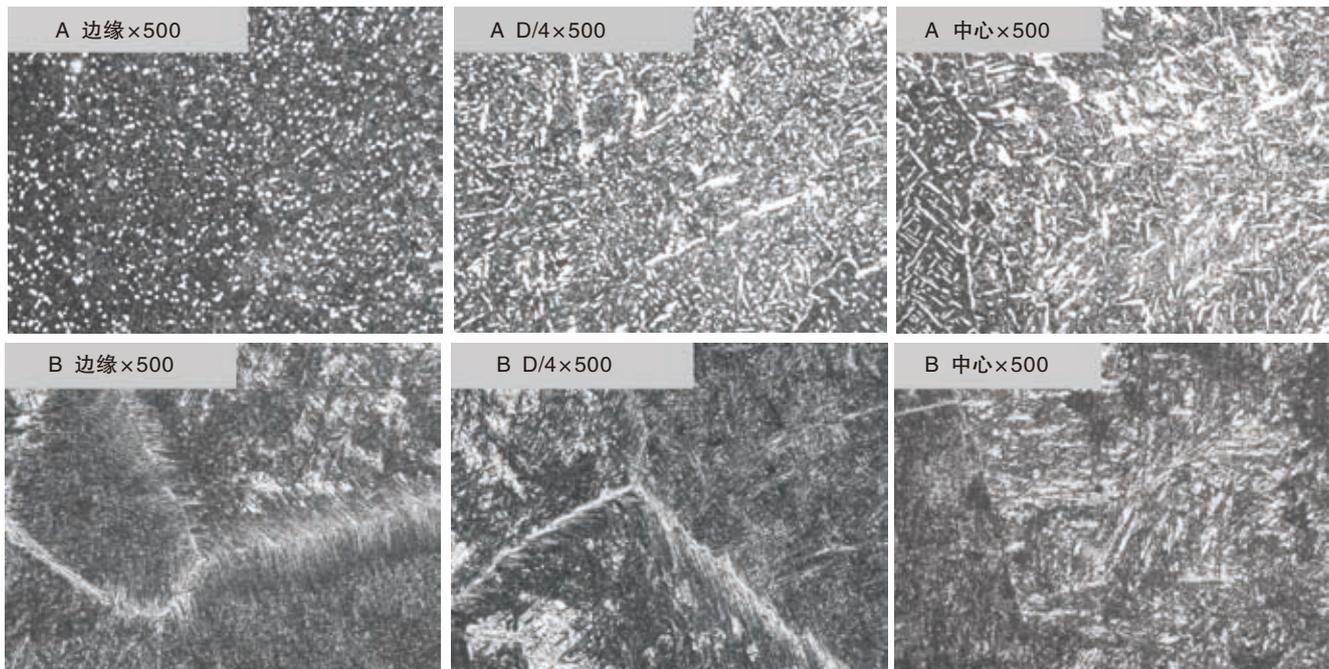


图1 Ti55531合金固溶强化(A)和 β 退火(B)的金相显微组织($\times 500$)

Fig.1 Microstructure of Ti-55531 alloy with solid solution strengthening (A) and β annealing (B)

表2 固溶时效(A)的拉伸和冲击性能

Tab.2 Tensile and impact properties of Ti-55531 alloy with solid solution strengthening (A)

名称	测试部位	取向	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ_4 (%)	ψ (%)	AKU ₂ (J)
试块A	中心	纵向	1214	1279	9.2	27	19 / 19 / 19
			1222	1289	10	25	
			1345	1384	12	22	
			1285	1331	10.5	25	
			1351	1391	11	30	
			1215	1280	13	30	
	D/4处	纵向	1254	1315	12	24	12 / 14 / 11
			1260	1315	8.3	20	
			1266	1324	9.2	22	
			1291	1355	11	22	
			1378	1431	7.5	19	
			1338	1393	7.5	16	
边缘	纵向	1254	1315	12	24	12 / 14 / 11	
		1260	1315	8.3	20		
		1266	1324	9.2	22		
		1291	1355	11	22		
		1378	1431	7.5	19		
		1338	1393	7.5	16		
中心	横向	1254	1315	12	24	12 / 14 / 11	
		1260	1315	8.3	20		
		1266	1324	9.2	22		
		1291	1355	11	22		
		1378	1431	7.5	19		
		1338	1393	7.5	16		
D/4处	横向	1254	1315	12	24	12 / 14 / 11	
		1260	1315	8.3	20		
		1266	1324	9.2	22		
		1291	1355	11	22		
		1378	1431	7.5	19		
		1338	1393	7.5	16		
边缘	横向	1254	1315	12	24	12 / 14 / 11	
		1260	1315	8.3	20		
		1266	1324	9.2	22		
		1291	1355	11	22		
		1378	1431	7.5	19		
		1338	1393	7.5	16		

表3 β 退火(B)拉伸和冲击性能

Tab.3 Tensile and impact properties of Ti-55531 alloy with β annealing (B)

名称	测试部位	方向	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ_4 (%)	ψ (%)	AKU ₂ (J)
试块B	中心	纵向	1057	1172	13	21	31 / 34 / 29
			1065	1175	11	18	
			996	1115	15	25	
			1003	1126	14	21	
			1030	1153	12	21	
			1040	1154	13	22	
	D/4处	纵向	1047	1183	12.5	22	32 / 31 / 32
			1059	1163	14	22	
			1051	1153	15.5	21	
			1034	1139	13	22	
			1044	1152	14	22	
			1035	1146	17	24	
边缘	纵向	1047	1183	12.5	22	32 / 31 / 32	
		1059	1163	14	22		
		1051	1153	15.5	21		
		1034	1139	13	22		
		1044	1152	14	22		
		1035	1146	17	24		
中心	横向	1047	1183	12.5	22	32 / 31 / 32	
		1059	1163	14	22		
		1051	1153	15.5	21		
		1034	1139	13	22		
		1044	1152	14	22		
		1035	1146	17	24		
D/4处	横向	1047	1183	12.5	22	32 / 31 / 32	
		1059	1163	14	22		
		1051	1153	15.5	21		
		1034	1139	13	22		
		1044	1152	14	22		
		1035	1146	17	24		
边缘	横向	1047	1183	12.5	22	32 / 31 / 32	
		1059	1163	14	22		
		1051	1153	15.5	21		
		1034	1139	13	22		
		1044	1152	14	22		
		1035	1146	17	24		

两相组织构成,从边缘到D/4处再到中心处,初生 α 相数量逐渐增多,形态也由边缘处均匀细小的颗粒状变化为D/4处的均匀细小的颗粒状外加少量的细条状再到中心处较粗的细条状;试块B各位置处统一表现为粗大的 β 晶粒组织,晶界和晶粒内析出细片层状的次生 α 相,由于 β 退火采用了炉冷, β 晶界上次生 α 相较宽, β 相呈现针状、网篮分布,同时,不同位置晶界向晶内析出针状 α 数量略有差异。

3.3 两种热处理工艺下的室温拉伸和冲击性能

冲击性能

表2、表3为Ti-55531合金棒材分别经固溶时效和 β 退火处理后的室温拉伸性能和冲击性能。由表中检测数据不难分析出,不论是固溶时效还是 β 退火处理,试块各个位置和方向上总体性能均匀性比较好。

具体地,由表2可以看出,固溶时效处理的试块A,屈服强度波动范围1214~1378MPa,抗拉强度1279~1431MPa,延伸率7.5~13%,截面收缩率16~27%,冲击功12~28J,中心

位置的性能相比其他位置稍差,同时横向的冲击性能比纵向也要差一些。

由表3可以看出, β 退火处理的试块B,屈服强度波动范围996~1059MPa,抗拉强度1115~1183MPa,延伸率11~17%,截面收缩率18~25%,冲击功27~34J。

通过对比表2和表3,不难发现,与固溶时效处理的试块A相比, β 退火处理的试块B强度低,而延伸率和冲击功都要高,同时各个位置和方向的性能差异更小。

3.4 两种热处理工艺下的断裂韧性

表4为Ti-55531合金棒材分别经固溶时效和 β 退火处理后的KIC结

果。可以看出,与固溶时效处理的试块A相比, β 退火处理的试块B断裂韧度值要高。

表4 固溶时效(A)和 β 退火处理(B)的KIC值

Tab.4 KIC of Ti-55531 alloy with solid solution strengthening (A) and β annealing (B)

名称	测试部位	试样类型	取向	KIC(MPa.m ^{0.5})
试块A	D/8~D/4处	CT	C-R	47.041
				42.430
				44.116
试块B	D/8~D/4处	CT	C-R	93.209
				102.805
				105.415

3.5 分析与讨论

固溶时效处理后,材料组织主要表现为较高含量的等轴状初生 α 相加少量 β 转以及一定量的次生 α 相,此种组织结构的弥散强化效果明显^[5,6],使得试块强度大大提高(本次试验最高达1431MPa)的同时还具有一定的塑性和韧性。另外,从试块具体位置上来说,试块中心位置处的性能相对要差一些,这是因为中心位置与其他位置相比,组织主要表现为粗条状的初生 α 相,且数量较多,导致 β 转以及次生 α 相数量更少,使得其强化效果较弱。

β 退火处理后,组织表现为粗大的 β 晶粒加晶界片层状和针状 α 相再加晶粒内部网篮状的 α 相以及其间分布的 β 转组织。与固溶时效相比,这种组织由于没有弥散强化的效果,故强度不如前者,但是由于有晶界 α 相以及晶内片层状 α 和 β 转的存在,而且 α 片层取向各异,这使得裂纹扩展时须需经常改变方向,使得整个断裂过程所需吸收的能量大大增大,从而提高了材料的断裂韧性和冲击功。同时,由于晶粒内部的 α 片层表现为编织的网篮状,有文献表明,这种结构具有良好的强度、塑形和韧性的匹配

^[7]。另外,与固溶时效相比,从试块具体位置上来说, β 退火处理所得到的组织均一性要好,各位置间性能的波动也较小。

通过以上试验结果的对比,可以看出,在工厂实际现场条件下所得到的结果与实验室^[7]得到的类似,固溶时效处理得到的强度较高、塑形和韧性较差,各位置处性能波动相对较大, β 退火处理得到的强度适中、塑形和韧性较好,各位置处性能波动较小。因此,可以根据两种热处理工艺不同的特点以及产品实际现场的使用情况,而采取固溶时效或者 β 退火来达到相应的效果。

4 结论

(1) 固溶时效可以作为Ti-55531合金的单一强化热处理工艺,其强度可以达到1431MPa,而此时的延伸率和截面收缩率分别只有7.5%和19%;

(2) β 退火可以作为Ti-55531合金的综合强化手段,具有较好的强韧性匹配,如D/4~D/8处,强度平均为1135MPa,延伸率15%,截面收缩率25%,冲击功34J,断裂韧性100MPa.m^{0.5};

(3) 与固溶时效相比, β 退火所

得到的组织均匀性较好,各位置处性能波动较小。**7**

参考文献

- [1] 韩栋,张鹏省,毛小南,等.两种典型热处理工艺对TC18钛合金组织性能的影响[J].钛工业进展,2009,26(6): 19.
- [2] Jones N G,Dashwood R J,Dye D,et al,Thermomechanical Processing of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr [J]. Materials Science and Engineering, 2008(490)A: 369.
- [3] 魏寿庸,祝瀑,王伟琪.Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe钛合金简介[J].钛工业进展,1998(4): 8
- [4] Arrazola P J, Garay A, Iriarte I M. Machinability of Titanium Alloys(Ti6Al4V and Ti5553)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009 (209): 2223. (in Chinese)
- [5] 付艳艳,宋月清,等.用正交实验法优化VST55531钛合金的热处理工艺[J].金属热处理,2008,33(7): 66.
- [6] 付艳艳,宋月清,等.热处理对VST55531钛合金的组织 and 拉伸性能的影响[J].稀有金属,2008,32(4): 399.
- [7] 高玉社,李少强,等.热处理工艺对Ti-55531钛合金组织及性能的影响[J].西安工业大学学报,2011,31(4): 365.

作者简介

黄立军,中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司,热处理工程师,四川省德阳市珠江西路460号
 邮编: 618000,手机: 15196374808
 传真: 0838-2306487
 E-mail: huanglijun@china-erzhong.com.



郑州机械研究所

特种焊接材料研究及堆焊、修复工程

—— 耐磨堆焊专家

郑州机械研究所特种焊接材料研究室主要以耐磨堆焊焊条、药芯焊丝、不锈钢系列焊条焊丝等特种焊接材料、焊接工艺技术为研究方向，从事耐磨堆焊材料生产、辊压机挤压辊制造以及承接各类受磨损部件的预保护堆焊、修复堆焊工程。产品已被广泛应用于建材、矿山、水泥工业、钢铁冶金、汽车、石化、电力能源、食品和橡胶行业。

主要产品及服务：

- 辊压机挤压辊专用焊条及药芯焊丝
- 立磨磨辊专用焊条及药芯焊丝
- 水轮机转轮焊接用不锈钢焊条及焊丝
- 超（超）临界火电机组T/P91钢用焊丝
- 钢厂各种钢轧辊、布料溜槽、单齿辊破碎机、高炉料钟等耐磨堆焊焊条及药芯焊丝
- 堆焊技术服务



郑州机械研究所 产业市场部

电话：0371-67710939

地址：郑州市嵩山南路81号

传真：0371-67710939

邮编：450052

邮箱：cyscb@zrime.com.cn