

GH4169 高温合金惯性摩擦焊接头温度场分布 及变化规律

Distribution and Variation Principle of Temperature Field in GH4169 Superalloy Inertia Friction Welding Joint

西北工业大学材料学院 卜文德 刘金合 徐伟锋
兵器工业第五十九研究所 徐晓菱 吴 玮

[摘要] 采用工控机实时检测系统,通过在焊接接头埋设热电偶的方法实时检测了 GH4169 高温合金惯性摩擦焊接过程中接头的温度变化历程,获得了接头轴向和径向的温度场分布,并结合摩擦机制分析了其变化规律。

关键词: GH4169 高温合金 惯性摩擦焊 温度场检测 温度场分布

[ABSTRACT] The temperature variation process in the GH4169 superalloy inertia friction welding joint is measured by means of embedding thermocouples in workpieces, using the temperature testing system based on an industry control computer. The temperature distribution in the axial direction and radial direction of weldments is obtained and the varying law of the temperature distribution is analyzed.

Keywords: GH4169 superalloy Inertia friction welding Temperature detection Temperature distribution

惯性摩擦焊接是一种高效、节能、优质的固态连接方法,与传统熔化焊相比,不会产生气孔、熔渣等缺陷,其接头性能与母材等强度;与连续驱动摩擦焊相比,惯性摩擦焊控制参数少、焊接性能再现性好,其热过程具有加热速度快、温度梯度大、热影响区窄的特点。惯性摩擦焊在异种材料和高强度材料焊接方面具有独特的优势,在航空、航天等领域具有广泛的应用前景,特别是在航空发动机制造方面具有无可替代的重要地位^[1-3]。

GH4169 被广泛地应用于航空、航天等工业领域,它是一种由 γ'' 和 γ' 沉淀强化的镍基高温合金^[4],其合金化程度高,焊接区域的组织和性能对焊接温度敏感。惯性摩擦焊是一个涉及高温、力学和冶金学的复杂过程,焊接温度场是其中非常重要的物理参量,对研究焊接热循环过程,摩

擦表面高温粘塑性金属的形成和流动规律,焊接接头的冶金过程及接头组织、性能等都有重要意义。因此开展 GH4169 合金惯性摩擦焊过程中温度场的研究,对提高焊接质量、优化焊接工艺有着重要意义。但是,由于惯性摩擦焊接过程时间短,温度变化快、变化幅度大,采用通常的温度记录仪无法实现焊接接头的温度检测。因而,国内关于惯性摩擦焊温度场的研究报道较少,文献[5]采用红外成像仪检测了 36CrNiMo 钢惯性摩擦焊接过程中工件表面的温度分布。红外成像仪的响应速度快,但是只能检测工件表面的温度。

本课题采用工控机实时测温系统,通过在焊接接头内部不同位置埋设热电偶的方法,对惯性摩擦焊接过程中接头的温度变化进行了实时检测,获得了接头摩擦界面近区温度变化规律、温度场径向分布和轴向分布及其变化规律,并结合摩擦机理分析了温度变化的原因。

1 试验条件与方法

试验采用中国兵器工业第五十九所的 CT25 特种摩擦焊机,该机可以完成惯性摩擦焊、连续驱动摩擦焊和惯性驱动径向相位摩擦焊。试验材料 GH4169 为热轧棒材,其化学成分见表 1,试件规格 $\phi 25\text{mm} \times 90\text{mm}$ 。

焊接过程中温度的检测采用自行开发的工控机实时检测系统,系统工作原理^[6]如图 1 所示,焊件上的温度信号由热电偶获取,并被转换成电压信号,通过采样、信号同步保持将连续的电压信号转变成离散的电压信号,然后经 A/D 转换,转换成数字信号存储在工控机上。本采集系统的特点是采集频率高(最高频率可达 5000Hz)、数据存储量大、可以实现多路同步采集。

试验分别检测了焊件轴向和径向不同位置特征点

表1 GH4169高温合金的化学成分

w/%

Cr	Ni	Mo	Nb	Al	Ti	Fe
17.0~21.0	50.0~55.0	2.8~3.3	4.75~5.50	0.2~0.6	0.65~1.15	其余

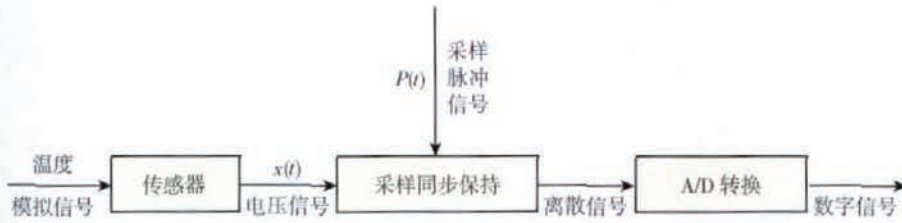


图1 工控机测温系统工作原理

Fig.1 Work principle of temperature measuring system of industry control computer

的温度,温度测量采用直径0.3mm的镍铬-镍硅K型热电偶,在非旋转焊件上用电火花打出直径 $\phi 1\text{mm}$ 工艺孔,将热电偶插入盲孔并用高温无机胶密封,使热电偶顶端与被测工件始终保持良好接触。每次试验焊件上安置4个测温点,图2为测温位置示意图,焊件1、2上各测温点的位置坐标见表2,焊接工艺参数见表3。

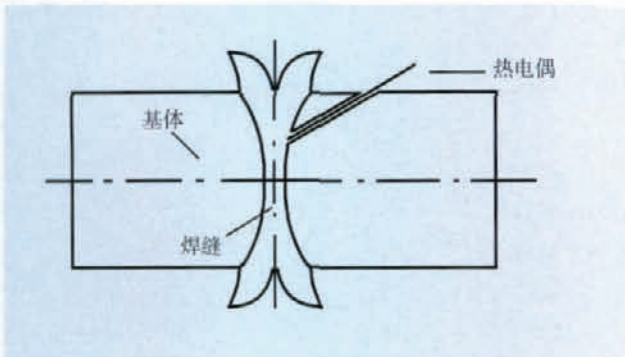


图2 测温位置示意图

Fig.2 Diagram of thermocouple location in joints

表2 测温点位置 mm

编号	测温点	A	B	C	D
焊件1	径向距离 r	6.2	6.2	6.2	6.2
	轴向距离 l	2	4.5	7	10
焊件2	径向距离 r	12.5	6.2	0	12.5
	轴向距离 l	7	7	7	10

* 径向距离指测温点与轴线的垂直距离,轴向距离指与初始端面的距离。

表3 焊接工艺参数

工艺参数	起始转速 ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2$)	轴向压力 /MPa
焊件1	4400	1.351	300
焊件2	4400	1.351	350

2 试验结果与讨论

2.1 界面近区温度变化规律与摩擦机理分析

图3为焊件1惯性摩擦焊过程中参数变化曲线,惯

性摩擦焊摩擦过程时间极短,仅用时11.2s。图4为焊件1上A测温点测得近界面的温度变化曲线,曲线中0~11.2s时间段为摩擦阶段,11.2s以后时间段为焊后保压阶段及降温阶段。从图4中可知,在摩擦阶段的温度变化速率发生了4次明显的改变,根据温度变化特点,可将摩擦阶段的温度曲线划分为4个阶段,分别用I、II、III、IV表示。这4个阶段的持续时间分别为2.4s、2.8s、3.9s和2.1s,其中阶段I、II、III温度不断升高,阶段IV温度呈下降趋势。根据摩擦特性和扭矩的变化特点,摩擦焊接过程可分为初始摩擦阶段、摩擦加热阶段和摩擦结束阶段3个阶段^[7];而由界面近区温度变化特点,摩擦加热阶段又可分为过渡阶段和准平衡阶段,亦即摩擦过程

摩擦阶段的温度曲线划分为4个阶段,分别用I、II、III、IV表示。这4个阶段的持续时间分别为2.4s、2.8s、3.9s和2.1s,其中阶段I、II、III温度不断升高,阶段IV温度呈下降趋势。根据摩擦特性和扭矩的变化特点,摩擦焊接过程可分为初始摩擦阶段、摩擦加热阶段和摩擦结束阶段3个阶段^[7];而由界面近区温度变化特点,摩擦加热阶段又可分为过渡阶段和准平衡阶段,亦即摩擦过程

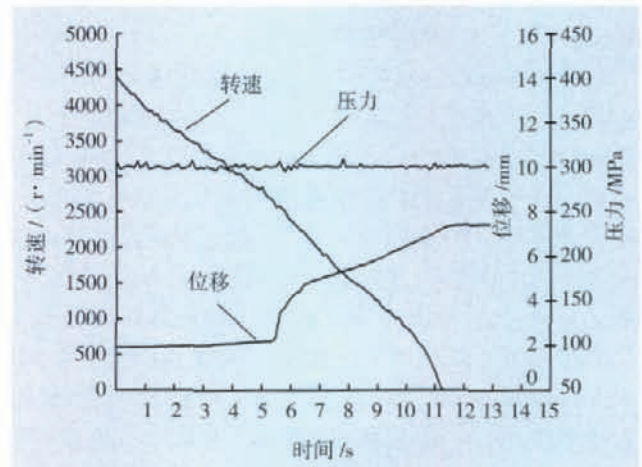


图3 焊接过程参数变化曲线

Fig.3 Curves of parameters during friction welding

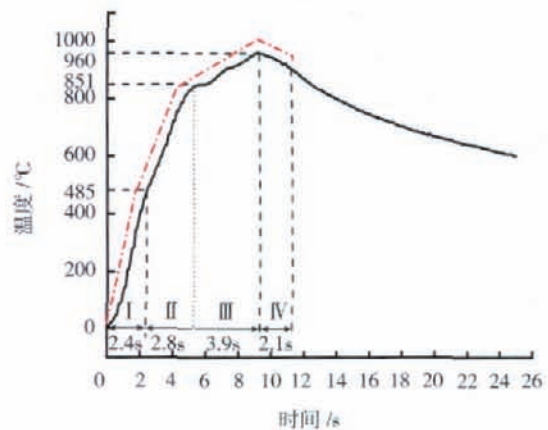


图4 焊接过程界面近区的温度曲线

Fig.4 Temperature variation adjacent to the friction surface during friction welding

可以分为4个阶段。将摩擦过程中的阶段和温度曲线的阶段相对照,温度曲线中阶段I即为初始摩擦阶段,阶段II即为摩擦过渡阶段,阶段III即为准平衡阶段,阶段IV即为摩擦结束阶段,各个阶段温度变化速率的不同与界面的摩擦机制及转速有关。

在摩擦焊接过程中,摩擦界面的摩擦机制与接头接触金属的物理状态密切相关。根据摩擦学理论^[8],摩擦可分为外摩擦和内摩擦,外摩擦是指2个相对运动的物体表面的摩擦,在滑动面上发生速度突变;内摩擦是指流体以及粘塑性金属各部分之间相对运动而发生的摩擦,相邻质点具有一定的速度梯度,而运动速度是连续变化的。固体中的内摩擦是整体分子强迫运动的直接结果,这种运动引起材料内部剪切并导致内部发热。外摩擦和内摩擦的共同点是,一个物体或一部分物质将自身的运动传递给与它相接触的另一物体或另一部分物质,并力图使2者的运动速度趋于一致,在摩擦的过程中机械运动转化为分子运动,其实质是发生能量转换,将机械能转化为热能。

惯性摩擦焊过程是一个由外摩擦向内摩擦转变的过程。在摩擦初始阶段(0 ~ 2.4s),2工件接触的瞬间,表面粗糙峰相互接触,在轴向压力的作用下,粗糙峰相互嵌入产生很大的剪切力,摩擦扭矩从0迅速上升,主轴转速逐渐下降(如图3所示)。此时摩擦界面上具有非常高的加热速率,升温速率为202℃/s,界面近区温度随之急剧升高(如图4所示)。由于摩擦界面温度的升高和粗糙峰在摩擦作用下平滑,实际接触面积增加,使相互接触的金属产生粘着,摩擦界面的摩擦特性表现为大量粘着点的剪切,界面间的摩擦为外摩擦。随着摩擦焊接过程进行,摩擦界面及附近区域温度继续升高,在摩擦界面上逐渐形成一层高温塑性金属,摩擦扭矩达到前峰值并开始下降。此时焊接过程由摩擦初始阶段进入过渡阶段(2.4 ~ 5.2s),摩擦特性由微凸体的粘着、剪切转变为高温塑性金属的剪切,摩擦开始逐渐由外摩擦向内摩擦转变。由于高温塑性金属的流动性增强,摩擦扭矩逐渐减小,产热功率下降,温度升高速率降低,此阶段近界面的升温速率降为131℃/s。在过渡阶段摩擦表面覆盖的高温塑性金属厚度不均匀,厚度大的区域称为“深塑区”,其余部分称为“浅塑区”。随着温度升高深塑区面积的增大,摩擦扭矩从前峰值逐渐降低到一个相对稳定值,焊接过程从过渡阶段进入准稳定阶段。在准稳定阶段(5.2 ~ 9.1s),摩擦特性主要表现为深塑区金属的剪切,摩擦进入内摩擦阶段;温度升高速率明显变缓,仅为28℃/s,并逐步达到最高温度值960℃。在此阶段,摩擦产生的热量与通过热传递及飞边扩展散失的热量达到一个动态准平衡的状态;界面处的高温塑性金属不

断被挤出使飞边扩展,次界面成为新的界面,该过程中热量沿径向和轴向传导,界面高温塑性金属的厚度逐渐均匀化。在经历了准稳定阶段后,摩擦滑动速度显著降低,热输入减小,接头温度开始降低,焊接进入摩擦结束阶段(9.1~11.2s)。接头温度的降低使摩擦面近区金属塑性流动减弱,导致后峰值扭矩的产生,从而使得摩擦转速迅速降为0,摩擦过程结束。此后焊接进入保压冷却阶段,接头在空气中冷却,温度逐渐降低。

2.2 径向温度场分布

图5为焊件2上的特征点测得的距初始摩擦端面7mm的径向截面上不同位置温度随时间的变化曲线,图6为此径向截面上不同时刻的温度梯度分布情况。

由图5和图6可看出,焊件径向截面上,周边温度一直高于内部温度,周边(即A测温点)温度上升速率最快,峰值温度最高,其峰值为737℃。轴心位置(即C测温点)温度开始上升的时间最迟,升温速率最慢,峰值

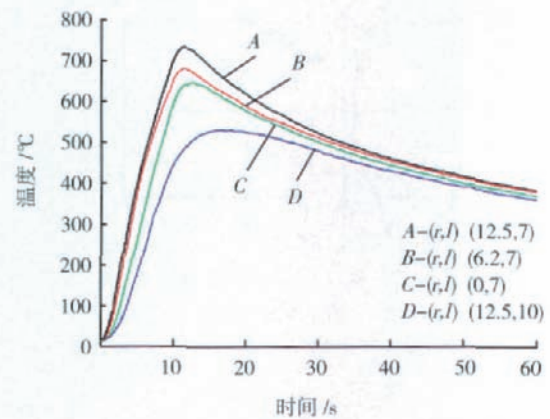


图5 径向截面上不同位置的温度随时间的变化曲线
Fig.5 Curves of temperature variation in radial direction at different locations

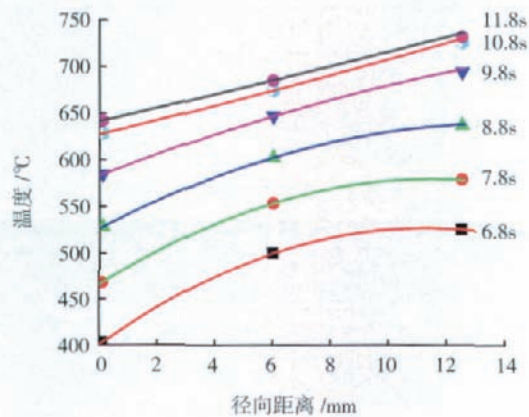


图6 径向截面上不同时刻的温度梯度分布
Fig.6 Distribution of temperature gradients in radial direction at different time

温度最低,仅为 646℃,比外缘位置峰值温度低 91℃,但与外缘位置在同一时刻达到温度峰值。1/2 半径处(即 B 测温点)的温度一直介于外缘和轴心的温度之间,在 8.8s 之前 1/2 半径处的温度与外缘的温度差值较小,仅为 20℃左右,这阶段温差小是由于外缘位置的辐射和对流导致了大量热损失的缘故;随着焊接过程的继续,摩擦面上的高温塑性金属由内部向边缘流动,导致部分热量由内向外转移,1/2 半径处的温度与外缘的温差开始逐渐增大。由图 5 和图 6 分析可知,焊件径向截面上的温度始终不均匀,温度值随着距轴心距离的增大而升高,但两者不是简单的线性关系;周边与轴心的温差随着摩擦时间的增加而逐渐减小,当它们达到温度峰值时差值最小,为 91℃。径向温度分布不均是由摩擦面上从周边到轴心摩擦线速度逐渐减小造成的,周边与轴心温差逐步减小是由于焊接过程中摩擦产热中心由外缘逐渐向中心移动的缘故。

2.3 轴向温度场分布

图 7 为焊件 1 上的特征点测得的其轴线方向上距初始摩擦面不同距离处的温度随时间的变化曲线(具体位置详见表 2)。图 8 为焊件上不同时刻的轴向温度梯度分布情况。从图 7 和图 8 中可知,在焊件的轴向离初始摩擦面最近的位置加热速度最快、峰值温度最高、达到峰值的时间最短。随着距初始摩擦面的距离逐渐增大,温度峰值依次减小,出现峰值的时间依次延后,升温速率依次降低。具体而言,焊件上 A 点温度在经历了不同的加热阶段后在 9.1s 达到其峰值温度 960℃,而此时 B 点温度仍在继续升高,在 2s 后才到达峰值温度 727℃,比 A 点的峰值温度低 233℃。C 点的峰值时间比 B 点滞后 2s,在 15.2s 时达到峰值温度 602℃,比 B 点的峰值温度低 125℃。D 点的峰值时间比 C 点延后 5s,在 20.2s 时到达峰值温度为 487℃,比 8C 点的峰值温度

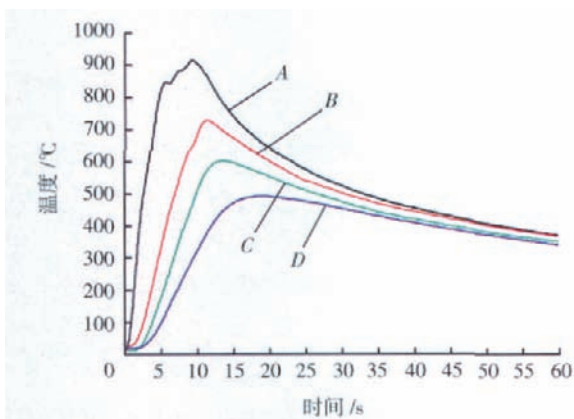


图7 轴向不同位置的温度随时间的变化曲线

Fig.7 Curves of temperature variation in axial direction at different locations

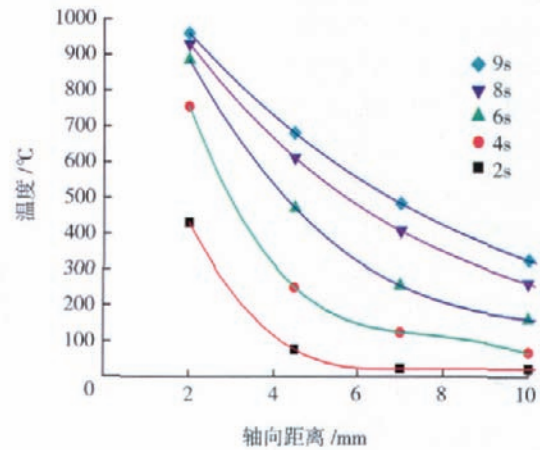


图8 不同时刻的轴向温度梯度分布

Fig.8 Distribution of temperature gradients in axial direction at different time

低 115℃。由此说明,在焊件轴向上距初始摩擦界面越远,温度越低,温度梯度越小,峰值滞后时间越长。这是由于焊接热量在轴向传导过程中逐渐衰减所致。

2.4 接头显微硬度分布

高温合金焊接接头硬度的变化可以反映出焊缝的温度变化。将焊件 1 沿轴截面剖开,测量接头显微硬度。图 9 为焊件 1 接头显微硬度曲线,图中 a 曲线为焊件中心轴上的硬度, b 曲线表示与中心轴相距 6.2mm 且与之平行的位置的硬度变化, c 曲线为表示中心轴相距 12mm 且与之平行的位置的硬度变化。由图显示,焊合区的显微硬度急剧下降,焊缝中心的硬度最低,焊接接头发生了明显的软化现象,从母材 HB471 ~ 445 降到 HB250 左右。接头发生软化是由焊接过程中接头主要强化相的溶解造成的,焊接过程中接头经历了剧烈变化的热过程,最高温度超过了相的溶解温度 950℃,

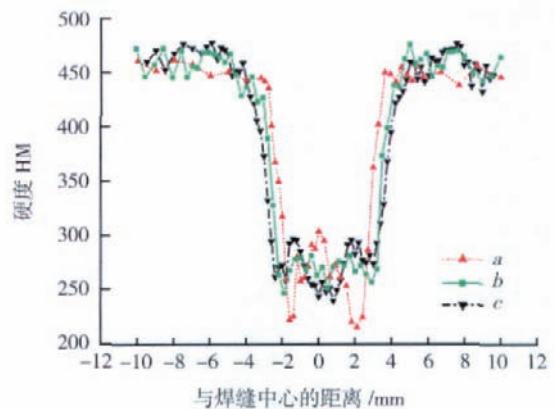


图9 接头显微硬度曲线

Fig.9 Microhardness curves across the weld joint

从而使得接头强化相溶解,硬度降低。随着测量位置不同,出现硬度降低的拐点的位置也不同, a 、 b 、 c 三条硬度曲线上出现硬度拐点的位置离焊缝中心距离分别为 3.5mm、4.1mm 和 4.6mm。由此可知越靠近焊件的外缘,硬度拐点的位置到焊缝中心的距离越远,即相发生溶解的宽度越大,也就是说,越靠近焊件的外缘,焊接温度越高。显微硬度的变化规律也充分说明了摩擦界面上的温度从中心到外缘递增的变化规律,进而验证了径向截面上温度测量结果的准确性

3 结论

(1) 通过在焊接接头埋设热电偶,采用工控机实时检测系统测定了 GH4169 高温合金惯性摩擦焊接过程中接头的温度变化,获得了界面近区(距初始摩擦端面 2mm)温度变化规律和接头轴向和径向的温度分布规律。

(2) 在惯性摩擦焊接过程中,摩擦阶段界面近区的温度变化发生了 4 次明显的改变,根据温度变化特点摩擦过程分为初始摩擦阶段、过渡阶段、准平衡阶段和摩擦结束阶段 4 个阶段。各个阶段温度变化速率的不同与界面的摩擦机制及转速有关。

(3) 在焊件径向上,温度始终不均匀,温度随着到轴心距离的增大而升高,但两者不是简单的线性关系;周边与轴心的温度差随着摩擦时间的增加而减小,当达到温度峰值时差值最小。

(4) 在焊件轴向上,距初始摩擦面距离越近,加热速度越快,峰值温度越高,温度梯度越大;距摩擦界面越远,出现峰值的时间越迟,且迟后时间越长。

(5) 焊接接头发生了明显的软化现象,焊缝中心的硬度最低,越靠近焊件的外缘,硬度拐点的位置离焊缝中心越远,说明相发生溶解的宽度越大,即焊接温度越高。显微硬度的变化规律充分说明了摩擦界面上的温度从轴心到外缘递增的变化规律,进而验证了温度测量结果的准确性。

参考文献

[1] 李志远,钱乙余,张九海. 先进连接技术. 北京:机械工业出版社,2000.
 [2] 梁海,张峥. 惯性摩擦焊在航空发动机上的应用. 材料工程, 1992(2):48-51.
 [3] 桂方亮,张全忠,张立文,等. GH4169 合金大型环形件惯性摩擦焊数值模拟. 航空制造技术, 2006(10):78-81.
 [4] 李付国,聂蕾,李庆华,等. GH4169 合金惯性摩擦焊接过程组织计算与预测. 焊接学报, 2002, 23(2):30-33.
 [5] 傅莉,王忠平,刘小文,等. 惯性摩擦焊接区表面温度分布的红外热成像检测. 焊接学报, 1999(S1):44-49.
 [6] 卜文德,刘金合,唐建宇. 焊接温度场的工控机同步采样系统研究. 焊接技术, 2009, 38(3):43-46.

[7] Wang L, Preuss M, WITHERS P J. Energy-Input-Based Finite-Element Process Modeling of Inertia Welding. Metallurgical and Materials Transactions, 2005 (36B): 513-523.

[8] 温诗铸. 摩擦学原理. 北京:清华大学出版社,1989.

(责编 小颖)

(上接第 83 页)

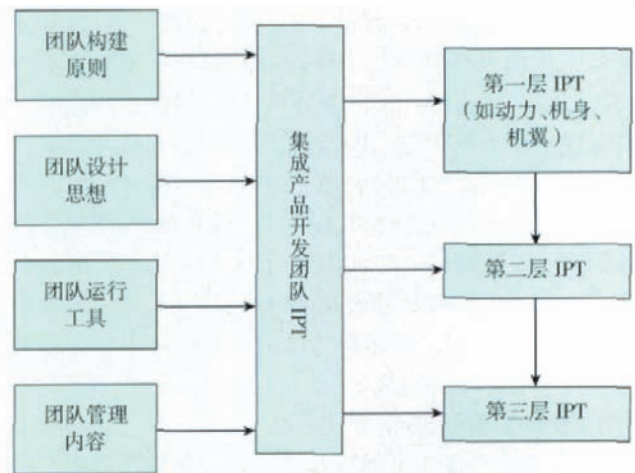


图3 飞机产品研制IPT系统模型

Fig.3 IPT system model for aircraft product development

目管理模式在总结传统项目管理理论与方法优点的基础上,制定了《并行工程管理规范》、《IPT 工作规则》等指导性文件,形成了一种有效的生产管理模式,建立起了并行工程设计模式、计算机集成环境、项目管理标准和方法,使得该公司以崭新的并行设计思想和设计模式积极与国际航空业实现接轨。通过某飞机部件项目的实施,该公司 100% 工装采用计算机设计,数字化传递应用减少了样板和提高了工作效率,具备了数字化工装设计、制造及工艺准备的能力,整个部件研制周期缩短 3 个月,节约了大量经费。

参考文献

[1] 熊光楞. 并行工程的理论与实践. 北京:清华大学出版社, 2001:31-39.
 [2] 吴澄. 现代集成制造系统导论. 北京:清华大学出版社, 2002:136-169.
 [3] 张明. 基于并行工程的汽车产品开发. 重型汽车, 2003 (3): 32-35.
 [4] 韩向东. 并行工程项目管理方法研究. 技术经济, 2001(10): 51-53.
 [5] 李小书. 航空转包生产研制管理研究 [D], 西安:西北工业大学, 2001.
 [6] 汤军社,秦现生. 基于并行工程的新产品开发过程模式研究. 工业工程, 1999 (2):40-43.
 [7] 白思俊. 现代项目管理. 北京:机械工业出版社, 2002:67-72.

(责编 岩石)