

Invar 钢性能测试与分析

刘 凯¹, 黄钢华², 张博明¹

(1. 北京航空航天大学, 北京市 100191; 2. 上海飞机制造有限公司, 上海市 200436)

摘要: 由于 Invar 钢热膨胀系数与树脂基碳纤维复合材料相匹配, 使用 Invar 钢代替传统的模具材料 Q235 钢生产大型复合材料制件, 可以大大降低模具因素导致的复合材料固化变形。本文选择国产 4J36、法国 Invar36、日本 NAS36 三种牌号的 Invar 钢, 按照国家标准, 检测其一系列力学(硬度、拉伸性能、压缩性能、剪切强度)、热物理性能(热膨胀系数、比热容、热扩散系数、居里温度), 系统掌握 Invar 钢性能的相关资料, 为复合材料结构制造过程中模具设计提供指导和依据。

关键词: 复合材料; 模具; 殷钢; 性能测试

Test and Analysis of Invar Steel Performance

LIU Kai¹, HUANG Ganghua², ZHANG Boming¹

(1. Beihang University, Beijing, 100191, China; 2. Shanghai Aircraft Manufacture Co., Ltd., Shanghai, 200436, China)

Abstract: Using Invar steel to replace the traditional Q235 steel as mould material, fiber reinforced polymer's cure-induced deformation could be greatly reduced, because Invar steel's thermal expansion coefficient is so low that it matches the composite material well. This paper chose three types of Invar steel as the test objects, including 4J36, Invar 36, NAS36. According to the national standards, Invar steel's mechanical and thermal properties were acquired through a series of tests. The testing result will provide a guidance to mould design of composite material.

Keywords: composite, mould, Invar steel, performance testing

先进树脂基复合材料具有比强度高、可设计性强、便于大面积整体成形等优越的性能, 在飞机零件制造中得到了广泛应用^[1]。随着复合材料构件在飞机主承力结构上的应用(如 B787 的机翼和机身、A400M 的机翼采用复合材料)和飞机尺寸的变大(如 A380 的垂尾长度达到 14m), 复合材料构件尺寸随之越大, 对生产中使用的成型模具材料提出了更高的要求^[2]。

模具因素是产生复合材料固化残余应力和变形的最主要外部影响因素之一^[3]。在国内, 复合材料成型模具大多采用 Q235 钢、铝合金等材料, 这些材料的热膨胀系数与复合材料热膨胀系数相差很大, 这种差异可能致使复合材料零件在固化温度下成型后恢复到常温自然条件过程中产生不可控制的型面超差与尺寸精度超差^[4]。在国外, 已大量采用 Invar 钢制作复合材料成型模具。Invar 钢的热膨胀系数与复合材料相近, 采用 Invar 钢作为复合材料制件的成型模具可解决因模具材料与复合材料热膨胀系数差异所导致的型面超差与尺寸精度超差问题。

国内大飞机项目的研究发展, 势必带动殷钢模具在复合材料制件生产中得到应用。本文选择三种牌号的 Invar 钢, 包括国产 4J36、法国 Invar36、日本 NAS36, 参照国家标准及其他相关准则, 检测 Invar

作者简介: 刘凯, 硕士研究生, 主要从事先进复合材料成型工艺研究; E-mail: liukai96200@yeah.net.

钢的一系列力学（硬度、室温拉伸性能、压缩性能、剪切强度、高温拉伸性能）、热物理性能（热膨胀系数、比热容、热扩散系数、居里温度），掌握 Invar 钢性能的系统资料，为复合材料结构制造过程中模具设计提供指导和依据，帮助一线生产设计人员全面了解 Invar 钢的性能特点，为殷钢模具实际应用做准备工作。

1 实验内容

1.1 实验设备及原材料

供测试用的三种 Invar 钢牌号：NAS36、Invar36、4J36。

表 1 实验所用仪器

设备名称	设备型号	设备生产厂家
布氏硬度测试仪	HBE-3000	上海材料试验机厂
维氏显微硬度计	HXZ-1000	上海昊微光电科技有限公司
差示扫描量热仪	STA 449C	德国耐驰公司
热膨胀测试仪	DIL 402C	德国耐驰公司
热重分析仪	STA 449C	德国耐驰公司
激光热导仪	LFA427	德国耐驰公司
万用力学实验机	WDW-300	长春科新检测技术有限公司
应变片	BE 120-1.5AA	齐齐哈尔万达电器设备厂
电子天平	JJ200	上海越平科学仪器有限公司
游标卡尺	0-150mm 卡尺	上海申韩量具有限公司

1.2 实验方法

1.2.1 力学性能测试

表 2 力学性能测试方法

实验名称	测试项目	主要参数	参考标准
硬度测试	布氏硬度	布氏压头直径 5mm, 力-压头直径平方比率 10;	GB/T 231.1-2009
	维氏硬度	维氏压头压力 1.98N	GB/T 230.1-2004
室温拉伸	0.2%非比例伸长强度	板状试样厚 3mm, 宽 15mm, 平行长度 45mm; 横梁速度 1.2mm/min	GB/T 228-2002; GB/T 2315-2008
	抗拉强度		
	弹性模量		
	泊松比		
	断后伸长率		
室温压缩	抗压强度	柱状试样直径 10mm, 高 25mm; 横梁速度 0.15mm/min	GB/T7314-2005
室温剪切	剪切强度	横梁速度 4mm/min	HB 6736-93
高温拉伸	0.2 非比例伸长强度	圆柱状试样直径 10mm, 标距 50mm; 横梁速度前 50s 内 0.8mm/min, 50s 后 3mm/min	GB/T 4338-2006; GB/T22315-2008
	抗拉强度		
	弹性模量		
	断后伸长率		

1.2.2 热物理性能测试

表 3 热物理性能测试方法

测量项目	测量方法	测试参数	参考标准
热膨胀系数	使用热膨胀测试仪测量	升温速度 2℃/min	GB/T 4339
比热容	使用 DSC, 比较法测量	升温速度 10℃/min	ASTM E 1269
热扩散系数	闪光法	室温、120℃、180℃	GB/T 22588—2008
居里点	热失重法	升温速度 10℃/min	-

居里温度测试采用热失重法。在热重分析仪 (Tg) 中外加一个磁场, 当温度达到试样居里温度时, 材料失去铁磁性, 引起热重天平示数的变化。通过这种方法测试试样居里温度。

2 结果与讨论

2.1 力学性能测试结果

表 4 力学性能测试结果

基本性能	日本 NAS36	法国 Invar36	国产 4J36
布氏硬度	123	121	124
小应力维氏硬度	137.3	137.2	140.2
0.2%非比例伸长强度/MPa	230	239	241
抗拉强度/MPa	420	420	440
杨氏模量/GPa	110	125	123
泊松比	0.24	0.22	0.27
断后伸长率/%	42.4	39	40
抗压强度/MPa	287	282	288
剪切强度/MPa	329	324	348
180℃抗拉强度/MPa	354	342	372
180℃杨氏模量/GPa	119	135	132
180℃0.2%非比例伸长强度/MPa	124	107	127
180℃断后伸长率/%	43.2	48.1	45.5

三种牌号 Invar 钢的力学性能测试结果如表 4 所示。每种材料测试 5 个样品, 结果取平均值。

三种牌号 Invar 钢硬度都较低, 无论布氏硬度还是维氏硬度, 国产 4J36 的测量值都高于另外两种牌号。布氏硬度的优点在于数据稳定性好, 受测试条件的影响较小, 小应力维氏硬度则更加灵敏准确。不同种类硬度值可以通过计算转化, 但维氏硬度的测量值与用布氏硬度经计算公式换算后得到的维氏硬度不完全吻合, 二者差异的原因在于小应力维氏硬度更偏重于表面硬度属性。两种硬度测试得到的压痕照片如图 1、图 2 所示。

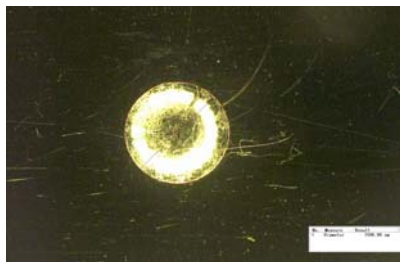


图 1 布氏硬度压痕照片

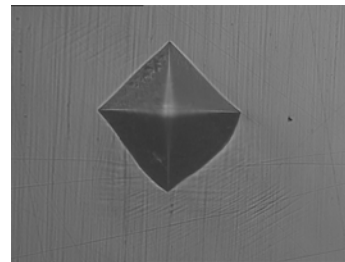


图 2 维氏硬度压痕照片

室温拉伸的应力应变曲线如图 3 所示,从图中可以看到, Invar 钢拉伸过程中没有出现明显的屈服平台,本文使用 0.2%非比例伸长强度代替屈服强度表征材料这方面的属性。从测试结果来看,室温下,作为一种模具材料,抗拉强度、弹性模量较低,断后伸长率很高,达到 40%,显示 Invar 钢是一种塑性优良的材料。国产 4J36 的力学性能较其他两种材料略高,抗拉强度明显高于另外两种材料,0.2%非比例伸长强度和弹性模量在三中材料中也属于较高的。180℃下拉伸时, Invar 钢力学性能发生了明显的变化,抗拉强度下降 50 至 70MPa 不等,0.2%非比例伸长强度减少一半以上,断后伸长率有所增加,总体上的表现可以总结为强度变低,塑性增加。180℃下材料的杨氏模量反而比室温下高,推测原因是试样尺寸和应变测试方式差异导致的结果,弹性模量受测试条件影响较大。室温拉伸为板状试样,使用应变片测量应变,高温拉伸为圆柱状试样,使用引伸计测量变形。

由于 Invar 钢塑性优良,进行压缩实验时,试样不会发生断裂,曲线如图 4 所示。曲线形状前半段与室温拉伸曲线类似,先是线弹性阶段,此后试样发生大量塑性变形,实验进行到最后阶段时,试样没有发生断裂,而是被压成腰鼓状,反映在力-位移曲线上就是曲线没有下降,而是继续上升并且斜率越来越大。由于材料用作模具时,一般在弹性范围内使用,本文采用 0.2%非比例压缩强度作为名义抗压强度,表征表 4 中的抗压强度。

此外,本文还进行了 Invar 钢板材的剪切强度的测试,试样如图 6 所示。试样通过销空夹具与力学实验机相连,在两端的孔处试样受到拉伸作用力,试样中间部位两槽间的部分受到剪切作用力发生破坏,计算得到剪切强度。

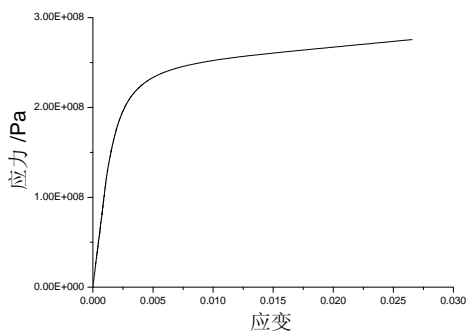


图 3 室温拉伸应力应变曲线

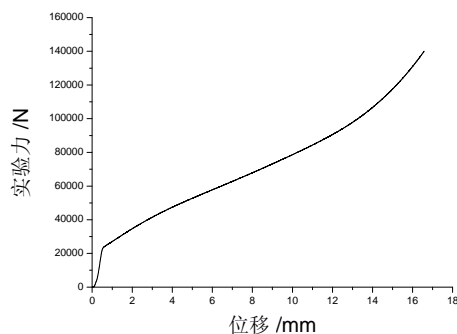


图 4 室温压缩力-位移曲线



图 5 室温压缩试样

图 6 剪切强度测试试样

2.2 热物理性能测试结果

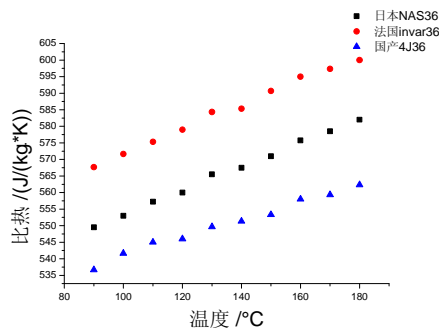


图7 比热容测试结果

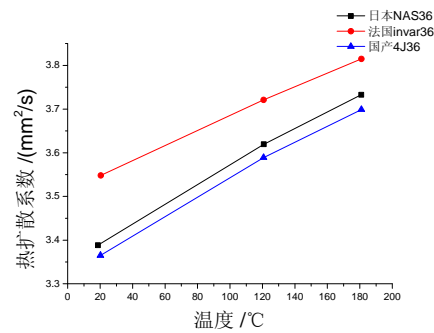


图8 热膨胀系数测试结果

热物理性能每种材料测试 3 个试样。

Invar 钢的比热容随温度上升而增大，基本成线性的关系，相同温度下，三种 Invar 钢的比热容相比较，由大到小顺序为：日本 NAS36、法国 Invar36、国产 4J36，三种材料比热容略有差异。图 7 所示为各组试样测量值平均后得到结果。由于 DSC 设备从室温开始加热之后，建立热平衡需要时间，所以在起始的一段温度范围内，测得的比热容值不可用。

本文测试了 20℃、120℃、180℃ 三个温度下，Invar 钢热膨胀系数，测试结果取平均值，如图 8 所示。在这三个温度点，温度越高热膨胀系数越大，三种牌号的 Invar 钢种法国 Invar36 热膨胀系数比另外两种材料高。

热膨胀系数是 Invar 钢材料的关键属性，是其适合作复合材料模具材料的关键因素。从测试得到的热膨胀曲线上我们可以看到，三种 Invar 钢材料的热膨胀状态大致分为两个阶段，在大约 200 摄氏度以前(这个温度点基本与材料的居里温度相对应)，材料的热膨胀非常小，甚至出现“负”的变化，大约 200 摄氏度以后，Invar 钢的热膨胀呈线性增加。因瓦合金在居里点以下形成反常热膨胀，这种现象被称为因瓦效应。从室温至 200℃，日本 NAS36、法国 Invar36、国产 4J36 平均线膨胀系数分别为 1.96×10^{-6} 、 2.21×10^{-6} 、 2.15×10^{-6} ，约为 Q235 钢热膨胀系数 (12×10^{-6})^[4] 的 1/6，与碳纤维/环氧树脂基复合材料热膨胀系数 (3.6×10^{-6}) 非常匹配。使用 Invar 钢制作复合材料成型模具，势必大大降低由于复合材料与模具热膨胀系数不匹配带来的残余应力和固化变形。

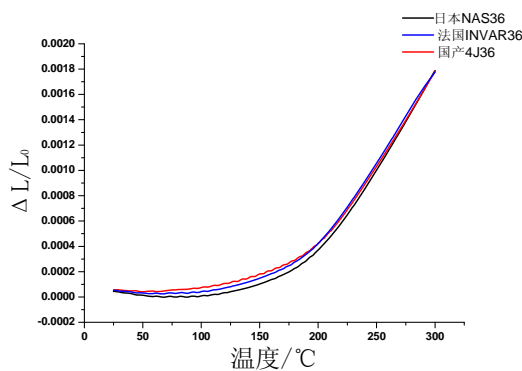


图9 热膨胀系数测试结果

三种 Invar 钢居里点温度基本一致。Invar 钢居里点温度高于一般复合材料工艺固化温度(180℃)，这保证了在复合材料生产工艺过程中 Invar 钢模具一直处于低热膨胀系数的状态。

表 5 居里点测试结果/°C

材料	1	2	3	平均
法 国 Invar36	201.4	207.9	208.1	205.8
日 本 NAS36	209.6	205.6	208.7	208.0
国 产 4J36	207.7	206.1	206.5	206.8

3 结论

本文以国产 4J36、法国 Invar36、日本 NAS36 为研究对象，测试了三种牌号 Invar 钢的一系列力学、热物理性能，通过分析比较，得到结论如下：

(1) Invar 钢作为一种低碳钢，力学性能并不突出。硬度、强度、模量比较低，断后伸长较大，材料有良好的塑性。热物理性能方面，Invar 钢突出特点是热膨胀系数极小，从室温至 200°C 的平均热膨胀系数只有 Q235 钢的 1/6 左右。

(2) 三种牌号的 Invar 钢相比较，国产 4J36 力学性能较两种国外牌号略高，硬度、强度相对大一点。热物理性能方面三种牌号的 Invar 钢也有些许的差异。

参考文献

- [1] 沈军, 谢怀勤. 航空用复合材料的研究与应用进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006, (5): 48-54.
- [2] 杨博, 李宏, 曹正华. 殷钢在复合材料成形模具中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010, (6): 62-63.
- [3] 岳广全, 张博明, 杜善义, 戴福洪. 模具对热固性树脂基复合材料固化变形的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010, (5): 62-65.
- [4] 黄钢华, 张冬梅, 晏冬秀, 杨霓虹, 刘卫平. Invar 钢模具制造工艺研究[J]. 航空工程进展, 2011, 2(4): 485-488.

(责任编辑 叶金蕊, 李煦)