

钛合金热成形和超塑成形金属平台材料选型和制备

Material Selection and Fabrication of Metal Flat for Titanium Alloy Hot Forming and Superplastic Forming

钢铁研究总院高温材料研究所 骆合力 李尚平 曹 栩 张喜娥

[摘要] 介绍了钛合金热成形和超塑成形用金属平台的材料选型和制备工艺研究情况,研究认为,选择高温合金替代目前国外采用的耐热钢材料优势非常明显;钢铁研究总院自主开发的热成形金属平台制备工艺比国外相关技术更加先进,制备的 K403 高温合金热成形平台服役表现良好,具备了生产钛合金热成形和超塑成形金属平台的能力。

关键词: 热成形 超塑成形 金属平台 高温合金 制备工艺

[ABSTRACT] Material selection and fabrication of metal flat for titanium alloy hot forming and superplastic forming are introduced. Compared with heat resistant steels, superalloys are more suitable for fabricating the metal flat. The producing technology of the metal flat developed by Central Iron and Steel Research Institute (CISRI) has the advantage over the conventional technology. The homemade metal flat made of K403 superalloy works stably, which shows that CSRI has capability of producing the metal flat for titanium alloy hot forming and superplastic forming.

Keywords: Hot forming Superplastic forming Metal flat Superalloy Fabrication

钛合金密度小、比强度和比断裂韧性高、疲劳强度和抗裂纹扩展能力好、抗蚀性能优异,广泛应用于航空航天技术领域。就我国当前飞机钛合金的应用中,钣金类零件占有很大份额。热成形和超塑成形是制备钛合金钣金零件的先进制造技术,展示出了巨大的技术经济效益,正在逐步推广应用^[1-3]。

金属平台是热成形和超塑成形设备中的关键部件,该类平台在 700~1100℃ 的高温环境下服役,材料必须选择耐热钢或高温合金,由于平台中布置有 10 多个直径约 $\phi 26\text{mm}$ 、长度 1~2m 的加热用通孔,平台的制备难度很大,以前该类金属平台大多依赖进口,制备周期长、费用昂贵。从 2008 年开始,钢铁研究总院(CISRI)在分析国外平台选材和制备工艺的基础上,根据我国相关工艺水平,开发出了一种新型的热成形金属平台制备

工艺,材料选择比国外平台高温性能更好的高温合金 K403,采用特殊精密铸造成形工艺,加热孔和测温孔直接铸造成形,先后为北京航空制造工程研究所、沈飞集团制备了 3 套热成形金属平台,该平台已服役 2 年多,表现良好。热成形和超塑成形金属平台的高质量制备使得我国航空钣金装备技术得到了明显的提高。

本文介绍了我国热成形金属平台的自主研制情况,并与国外同类金属平台在材料选型和制备工艺方面进行了比较。

1 热成形和超塑成形金属平台材料选型

在平台材料选型时,要充分考虑其服役温度和受力情况。热成形金属平台表面工作温度约 800℃,加热孔周围区域工作温度约为 900℃;而超塑成形平台的表面工作温度接近 1000℃,加热孔周围区域工作温度接近 1100℃。平台服役时表面承受 15MPa 左右的载荷,平台受力模拟分析结果表明(见图 1),平台中 T 型槽位置会形成应力集中,在 15MPa 的服役载荷会导致 67.6MPa 的最大应力集中,而大部分区域的应力集中约 45MPa 左右。在受力情况相当的情况下,超塑成形平台的服役温度要比热成形平台高 200℃ 左右,对材料的要求更高。

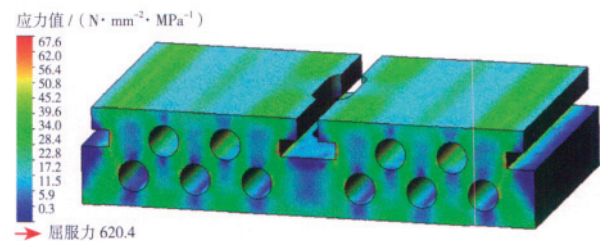


图1 金属平台受力模拟分析

Fig.1 Computational simulation of metal flat load-bearing

国外制备的金属平台均选用耐热钢系列材料,主要包括 HR6、STEELX.N37 和 Supertherm,其中前 2 种材料分别对应于我国的 4Cr25Ni20 和 4Cr25Ni35,我国从国外进口的某热成形金属平台就是由 STEELX.N37 耐热钢制备的。Supertherm 合金的高温机械性能相对来说最好,被国外相关专家推荐用于制备超塑成形金属平台用材。K403 合金是我国在 800℃ 左右服役的性能

最好的一种高温合金, MX246A 合金是由钢铁研究总院自主研发的一种新型 Ni3Al 基高温合金, 是我国目前在 1100℃ 高温环境下综合性能最好的高温材料之一。几种材料的化学成分列于表 1。

表 2 比较了几种材料的高温力学性能和抗氧化性能, 由于耐热钢的强化主要依赖于碳化物强化和固溶强化, 强化效果非常有限, 尽管 Supertherm 合金中加入了大量的 Co 和 W 元素, 且 Ni 含量也很高, 但相比 HR6 合金, 该合金的高温强度提高幅度并不大。而高温合金主要依靠 Ni3Al (γ') 强化相进行强化, 合金的高温强度远高于耐热钢, 由表 2 可知, K403 合金和 MX246A 合金的高温力学性能是 HR6 和 STEEL X.N 37 的 4 倍左右、是 Supertherm 合金的 3 倍左右。相比而言, MX246A 合金在 1000℃ 以上的高温力学性能和抗氧化性能均优于 K403 合金。

对于服役温度较低的热成形金属平台而言, 耐热钢材料基本能满足平台的要求, 但长期服役会因蠕变、氧化等问题而发生变形甚至断裂, 平台的服役寿命有限, 选择中温强度最好的 K403 合金最理想。对于服役温度在 1000℃ 以上的超塑成形金属平台而言, 耐热钢因高温强度较低而很难满足该要求, Supertherm 是耐热钢中性能最好的材料, 有希望满足超塑成形金属平台的要求, 但由于该材料中的 Co、W 含量很高, 其材料成本已接近于高温合金, 按当前原材料价格计算, Supertherm 和 K403 合金的配料成本分别为 150 元/kg 和 175 元/kg。而 K403 合金的高温力学性能是 Supertherm 的 3 倍左右, 用该材料制作平台也非常不合适。MX246A 合金是我国目前工作温度在 1000℃ 以上的综合性能最好的

一种材料, 相比 K3 合金, MX246A 合金更适合制备超塑成形金属平台。

2 热成形和超塑成形金属平台的制备工艺

金属平台结构设计如图 2 所示, 在平台长度方向布置有十几个 $\phi 26\text{mm}$ 左右用于安装加热棒的通孔和几个 $\phi 8\text{mm}$ 左右的测温盲孔, 中间设计为 T 型槽, 用于挂装模具。如北京航空制造工程研究所设计的 RX-400 平台由 10 块尺寸为 1500mm × 390mm × 80mm 的平台拼装而成, 单块平台上面布置了 10 个 $\phi 26\text{mm} \times 1500\text{mm}$ 加热通孔和 2 个 $\phi 8\text{mm} \times 750\text{mm}$ 的测温盲孔; 沈飞集团平台由 6 块尺寸为 1100mm × 460mm × 90mm 的平台拼装而成, 单块平台上面布置了 14 个 $\phi 26\text{mm}$ 的加热孔和 4 个测温孔。因此, 制备该类金属平台最大的工艺难点就是细直径长距离通孔和盲孔的制备。

对于该类金属平台, 国外采用如下工艺进行制备: 铸造或锻造出实心平台, 再机械加工出加热孔、测温孔和 T 形槽。由于高温合金的高温强度非常高、机械加工性能很差, 不能机加工出加热孔和测温孔, 因此, 该工艺

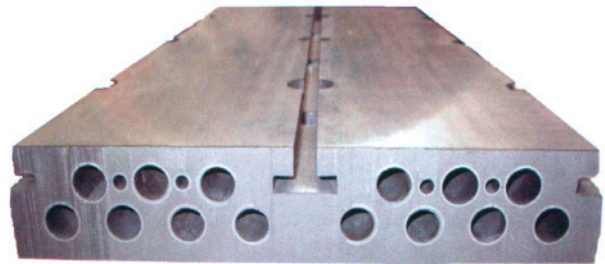


图2 钢铁研究总院制备的K403合金热成形平台实物

Fig.2 Hot forming flat made of K403 alloy produced by CISRI

表1 几种材料的化学成分质量分数

材料	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe
HR6	0.4	25	20	—	—	—	—	—	余
STEELX.N37	0.3	25	37	—	—	—	—	—	余
Supertherm	0.4	26	35	15	5	—	—	—	余
K403	0.15	11	66	5.2	5.2	4.2	5.6	2.6	—
MX246A	0.1	8	76	0.5Hf	2	4	8	1	—

表2 几种材料的高温力学性能和抗氧化性能

性能	K3	MX246A	HR6	STEEL X.N 37	Supertherm
$R_{m, 800^\circ\text{C}}/\text{MPa}$	880	880	280	290	—
$R_{m, 1000^\circ\text{C}}/\text{MPa}$	480	540	100	102	—
982℃/10000h持久强度/MPa	60	—	9.5	11	21
1030℃/1000h持久强度/MPa	75	—	14	17	—
1100℃氧化速率/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	0.1	0.05	0.6	0.58	0.70

不能制备高温合金平台。为此, 国外只能选择机械性能相对较差而加工性能相对较好的耐热钢作为平台材料。但由该工艺制备的耐热钢平台存在 2 个问题: (1) 孔、槽的机械加工难度非常大, 平台费用昂贵, 加工周期长。而且, 国内目前尚不具备加工 $\phi 26\text{mm} \times 1500\text{mm}$ 耐热钢通孔的机械加工水平, 该制备工艺在国内难以实现。(2) 受制于机加工性能, 该工艺只能选择耐热钢材料制备平台, 而耐热钢的高温力学性能不足, 很容易发生蠕变变形, 影响平台的平面度, 平台的服役寿命有限。

为此, 钢铁研究总院自主开发了一种新型的金属平台制备工艺, 采用特殊的精密铸造工艺, 将加热孔、测温孔和 T 形

槽直接铸造出来,后续机加工只进行平台表面磨加工即可,一方面大大降低了机加工费用和制备周期,另一方面还拓宽了金属平台的材料选型,可以选用任意的金属材料进行平台制备。为了提高金属平台的服役寿命,钢铁研究总院选用性能更好的高温合金 K403 进行了热成形平台的制备,先后为北京航空制造工程研究所、沈飞集团制备了 3 套热成形金属平台,其中 RX-400 平台(见图 3)已连续服役 2.5 年左右,表现良好,平台未发生蠕变变形,其他 2 套平台也在正常服役当中。实践表明,由钢铁研究总院开发的该工艺是一种经济、快捷、比国外相关技术更加先进的热成形金属平台制备工艺。由于超塑成形金属平台在结构上与热成形平台类似,只是服役温度更高,而该制备工艺对平台所用材料无任何限制,因此,选择 MX246A 合金或 K403 合金作为平台用材,采用该新型的平台制备工艺完全可实现高质量超塑成形金属平台的制备。

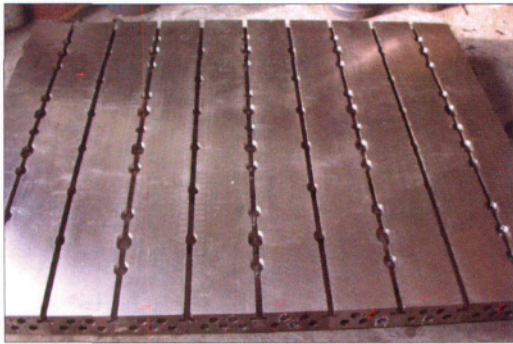


图3 钢铁研究总院研制的K403合金RX-400平台
Fig.3 RX-400 hot forming flats made of K403 alloy produced by CISRI

3 结论

(1) 综合考虑钛合金热成形和超塑成形用金属平台的服役温度和受力情况,选择铸造高温合金或 Ni3Al 金属间化合物材料替代目前常用的耐热钢材料具有非常明显的优势,可保证平台长寿命稳定服役;

(2) 我国自主开发的新型特殊精密铸造工艺可将金属平台中的加热孔、测温孔和 T 形槽直接铸造出来,大大降低了平台的机加工难度和制备周期,且拓宽了金属平台的材料选型,是一种经济、快捷、比国外相关技术更加先进的热成形金属平台制备工艺;

(3) 钢铁研究总院制备的 K403 高温合金热成形平台服役表现良好,具备了生产钛合金热成形和超塑成形金属平台的能力。

参考文献

[1] 侯红亮,余肖放,曾元松. 国内航空钣金备技术现状与发展.

航空制造技术,2009(1):34-39.

[2] 陈先有,崔晶. 航空钛合金零件热成形及应用分析. 航空科学技术,2007(5):38-40.

[3] 郭和平,曾元松,韩秀全. 飞机钛合金整体结构的超塑成形/焊接组合工艺技术. 焊接,2008(11):41-45. (责编 小城)

(上接第 62 页)

响因素,因此在进行扩散连接时,必须寻求最佳连接温度和连接时间,使得材料的性能损失最小,这是工艺优化的关键。

对成形后的叠形波纹管进行密封性检测,将波纹管两端氩弧焊接成死结构,上下端面用工装固定避免打压时波纹管被拉长,然后打内压进行检测,叠形波纹管承受 1.5MPa 内压,保压 0.5h 未发生泄漏,波纹管的密封性满足使用要求。

对波纹管刚度测试,测试 $\pm 10\text{mm}$ 变形量,波纹管刚度为 120N/mm 和理论计算值接近。

对波纹管的疲劳强度进行测试,在 $\pm 10\text{mm}$ 变形条件下,振动频率 60 次/min,在 100 次循环周期内,叠形波纹管无任何损伤痕迹。

4 结论

采用扩散连接技术在 $(925 \pm 5)^\circ\text{C}$ 范围,刚性加载 90min 能够实现 TA15 钛合金叠形波纹管制备,其扩散焊接接头良好,能够有效密封,但母材晶粒长大明显,性能损失较大,后续需要进一步优化扩散连接时间。

对成形样件进行刚度测试,其实测刚度值和理论计算值接近,表明用有限元模拟计算能够有效分析波纹管刚度值。采用扩散焊接技术制备的波纹管在有限的疲劳周期内能够满足使用要求。

经过 $(925 \pm 5)^\circ\text{C}$ 高温扩散焊接后基体晶粒发生动态回复和再结晶,晶粒尺寸发生明显粗化,强度值降低幅度在 8% 左右,延伸率下降 50% 左右。由于钛合金经过高温后强度降低,进行结构设计时必须考虑适当提高安全系数。

参考文献

[1] 邹家生. 材料连接原理与工艺. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.

[2] Yao W, Wu A P, Zou G S, et al. Formation process of the bonding joint in Ti/Al diffusion bonding. Mater Sci Eng A, 2008: 480-456.

[3] Lee H S, Yoon J H, Yi Y M. Fabrication of titanium parts by massive diffusion bonding. J Mater Proc Techn, 2008: 201-280.

[4] Hefi L D. Innovations in the superplasticforming and diffusion bonded process. J Mater Eng Perform, 2008, 17:178.

[5] 李永生. 波形膨胀节实用技术. 北京:化学工业出版社, 2000. 32-33. (责编 晓立)