



## (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107557869 A

(43)申请公布日 2018.01.09

(21)申请号 201710696404.2

(22)申请日 2017.08.15

(71)申请人 中国航发北京航空材料研究院  
地址 100095 北京市海淀区北京81信箱

(72)发明人 杨亮 薛燕鹏 韩梅

(74)专利代理机构 中国航空专利中心 11008  
代理人 李建英

(51)Int.Cl.

*C30B 29/52*(2006.01)

*C30B 33/02*(2006.01)

*C30B 33/10*(2006.01)

*B24B 19/14*(2006.01)

*B24B 23/00*(2006.01)

权利要求书1页 说明书5页

### (54)发明名称

避免单晶高温合金涡轮叶片铂丝芯撑位置再结晶的方法

### (57)摘要

本发明属于航空发动机单晶高温合金涡轮叶片制备技术领域,涉及一种避免单晶高温合金涡轮叶片铂丝芯撑位置再结晶的方法。在叶片固溶处理前,对叶片芯撑位置采用了手持打磨机打磨+毡轮低应力抛光+化学腐蚀表面处理+阶梯式回复热处理的顺序方式。本发明提出采用化学腐蚀方法对毡轮抛光位置进行表面处理,即通过化学腐蚀显著降低打磨和抛光带来的塑性应变及残余应力。采用阶梯式热处理的方法,在叶片固溶热处理之前进行回复热处理,通过升温降温、再升温再降温的阶梯式加热方式,使叶片表面发生回复过程,有利于叶片表面残余应力的释放,从而进一步降低了叶片表面的残余应力,消除塑性应变层。避免了叶片表面在固溶热处理过程中发生再结晶。

1. 一种避免单晶高温合金涡轮叶片铂丝芯撑位置再结晶的方法,其特征在于:对叶片芯撑位置采用手持打磨机打磨+毡轮低应力抛光+化学腐蚀表面处理+阶梯式回复热处理的顺序方式,减小叶片芯撑位置的塑性应变层及残余应力;

所述采用手持打磨机打磨叶片上的铂丝芯撑,磨头使用砂磨头、粒度180目~320目,打磨机转速控制在10000r/min~30000r/min,磨头进给速度0.5mm/min~2mm/min;

所述采用毡轮低应力抛光处理中的毡轮砂粒为白刚玉砂,粒度80目~120目,抛光转速1000r/min~3000r/min,毡轮抛光至完全去除打磨划痕;

所述采用化学腐蚀方法对毡轮低应力抛光处理后的叶片进行表面处理,腐蚀液为过氧化氢和盐酸,腐蚀液体积配比为 $H_2O_2:HCl=1:8\sim 10$ ,腐蚀至抛光位置枝晶显露清晰,化学腐蚀反应结束;

所述采用阶梯式回复热处理的热处理制度为:(700℃~850℃)/(2h~4h)+(1200℃~1230℃)/(0.5h~1h)+(1250℃~1270℃)/(0.5h~1h)+(1200℃~1230℃)/(0.5h~1h)+(1280℃~1300℃)/(0.5h~1h)+(1250℃~1270℃)/(0.5h~1h)+(1280℃~1300℃)/(0.5h~1h),热处理炉真空压强小于 $5\times 10^{-2}Pa$ ,所有升温阶段的升温速率 $\leq 10^\circ C/min$ ,保温到时时,采用炉冷至200℃以后出炉。

2. 根据权利要求1所述的一种避免单晶高温合金涡轮叶片铂丝芯撑位置再结晶的方法,其特征在于:所述采用手持打磨机砂磨头粒度180目~240目,打磨机转速控制在10000r/min~20000r/min,磨头进给速度0.5mm/min。

3. 根据权利要求1所述的一种避免单晶高温合金涡轮叶片铂丝芯撑位置再结晶的方法,其特征在于:所述采用毡轮低应力抛光处理中的毡轮砂粒粒度为120目,抛光转速1000r/min~1500r/min。

4. 根据权利要求1所述的一种避免单晶高温合金涡轮叶片铂丝芯撑位置再结晶的方法,其特征在于:所述采用化学腐蚀方法对毡轮低应力抛光处理后的叶片进行表面处理,腐蚀液体积配比为 $H_2O_2:HCl=1:8$ 。

## 避免单晶高温合金涡轮叶片铂丝芯撑位置再结晶的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于航空发动机单晶高温合金涡轮叶片制备技术领域,涉及一种避免单晶高温合金涡轮叶片铂丝芯撑位置再结晶的方法。

### 背景技术

[0002] 先进航空发动机的发展目标是提高发动机推重比、增压比和涡轮前温度,降低油耗。由于发动机涡轮前温度的提高,发动机涡轮热端部件的平均轴向应力增大,作为发动机涡轮关键部件的涡轮叶片必须采用先进的高比强度、耐更高温度的材料和新的结构设计及制造技术来实现。针对先进航空发动机的使用要求,国内外均采用单晶高温合金和复合冷却结构的叶片,即单晶高温合金空心涡轮叶片,以满足先进航空发动机对涡轮关键部件提出的越来越高的要求。

[0003] 在单晶高温合金空心涡轮叶片定向凝固过程中,极易于出现偏芯、露芯、断芯等问题,为此在叶片蜡模上添加铂丝芯撑对型芯进行定位加固。由于叶片壁厚相对较薄,使得蜡模壁厚本身对铂丝的固定作用较弱,蜡模上铂丝的稳定性的较差,易发生脱落或歪斜。为提高铂丝的稳定性的,在铂丝周围采用蜡滴加固的方式,相应地叶片铸件表面会存在凸点。由于凸点的存在,叶片定向凝固冷却过程中凸点阻碍收缩,在凝固冷却后凸点位置产生了较大的残余应力。若未对铂丝芯撑位置进行适当处理,在随后的固溶热处理过程中,叶片铂丝芯撑位置的残余应力会以再结晶组织形式释放,导致叶身表面铂丝芯撑位置发生再结晶。

[0004] 由于单晶高温合金不含或少含晶界强化元素,再结晶与合金基体形成的晶界区域成为单晶高温合金涡轮叶片的薄弱环节,再结晶晶界会导致叶片在使用过程中出现沿晶裂纹,对叶片的力学性能和使用寿命产生非常不利的影响。为了消除铂丝芯撑位置的残余应力,目前常采用机械打磨的方式。若机械打磨控制不当,会在叶片表面产生塑性应变层,也会产生更大的残余应变,反而加重了叶片表面的再结晶。因此,急需解决单晶高温合金涡轮叶片铂丝芯撑位置的再结晶问题,采用既能有效消除铂丝芯撑位置残余应力,又不会引起更大的塑性应变层及残余应力的方法,且要求下一步处理只能减少而不能增加上一步引起的塑性应变层及残余应力,进而避免铂丝芯撑位置在固溶热处理过程中发生再结晶。

### 发明内容

[0005] 本发明针对带有铂丝芯撑的铸态单晶叶片在固溶热处理过程中易发生再结晶的问题,提供一种避免铂丝芯撑位置再结晶的方法,该方法均在固溶热处理之前完成。

[0006] 为了实现上述目标,本发明的技术解决方案是:对叶片芯撑位置采用手持打磨机打磨+毡轮低应力抛光+化学腐蚀表面处理+阶梯式回复热处理的顺序方式,减小叶片芯撑位置的塑性应变层及残余应力;

[0007] 所述采用手持打磨机打磨叶片上的铂丝芯撑,磨头使用砂磨头、粒度180目~320目,打磨机转速控制在10000r/min~30000r/min,磨头进给速度0.5mm/min~2mm/min;

[0008] 所述采用毡轮低应力抛光处理中的毡轮砂粒为白刚玉砂,粒度80目~120目,抛光

转速1000r/min~3000r/min,毡轮抛光至完全去除打磨划痕;

[0009] 所述采用化学腐蚀方法对毡轮低应力抛光处理后的叶片进行表面处理,腐蚀液为过氧化氢和盐酸,腐蚀液体积配比为 $H_2O_2:HCl=1:8\sim 10$ ,腐蚀至抛光位置枝晶显露清晰,化学腐蚀反应结束;

[0010] 所述采用阶梯式回复热处理的热处理制度为:(700℃~850℃)/(2h~4h)+(1200℃~1230℃)/(0.5h~1h)+(1250℃~1270℃)/(0.5h~1h)+(1200℃~1230℃)/(0.5h~1h)+(1280℃~1300℃)/(0.5h~1h)+(1250℃~1270℃)/(0.5h~1h)+(1280℃~1300℃)/(0.5h~1h),热处理炉真空压强小于 $5\times 10^{-2}Pa$ ,所有升温阶段的升温速率 $\leq 10^\circ C/min$ ,保温到时后,采用炉冷至200℃以后出炉。

[0011] 所述采用手持打磨机砂磨头粒度180目~240目,打磨机转速控制在10000r/min~20000r/min,磨头进给速度0.5mm/min。

[0012] 所述采用毡轮低应力抛光处理中的毡轮砂粒粒度为120目,抛光转速1000r/min~1500r/min。

[0013] 所述采用化学腐蚀方法对毡轮低应力抛光处理后的叶片进行表面处理,腐蚀液体积配比为 $H_2O_2:HCl=1:8$ 。

[0014] 本发明具有的优点和有益效果:

[0015] 本发明采用带砂磨头的手持打磨机打磨芯撑,并控制磨头粒度、转速与打磨进给速度,消除芯撑位置的残余应力。针对打磨引起的塑性应变层及残余应力进行毡轮低应力抛光处理,可去除手持打磨机对叶片表面的损伤,有利于减小打磨芯撑位置的塑性应变层,降低残余应力。本发明提出采用化学腐蚀方法对毡轮抛光位置进行表面处理,即通过化学腐蚀显著降低打磨和抛光带来的塑性应变及残余应力。本发明采用阶梯式热处理的方法,在叶片固溶热处理之前进行回复热处理,通过升温降温、再升温再降温的阶梯式加热方式,使叶片表面发生回复过程,有利于叶片表面残余应力的释放,从而进一步降低了叶片表面的残余应力,消除塑性应变层。通过毡轮低应力抛光、化学腐蚀表面处理、阶梯式回复热处理,将打磨引起的叶片表面塑性应变层及残余应力逐步消除,进而避免了叶片表面在固溶热处理过程中发生再结晶。

## 具体实施方式

[0016] 本发明采用了以下技术实施方案:

[0017] 本发明的流程为手持打磨机打磨→毡轮低应力抛光→化学腐蚀表面处理→阶梯式回复热处理。

[0018] 采用带砂磨头的手持打磨机打磨铸态单晶叶片表面的铂丝芯撑,将铂丝芯撑及凸点位置完全打磨掉,消除芯撑位置的残余应力。然后,针对打磨引起的打磨损伤、塑性应变层及残余应力,采用毡轮低应力抛光处理的方法,仅对打磨位置进行抛光,去除打磨损伤。与打磨相比,抛光引起的塑性应变层及残余应力更小。之后,采用化学腐蚀表面处理的方法,该方法会进一步消除打磨和抛光引起的塑性应变层及残余应力,又不会引起新的应力应变。最后,对叶片进行阶梯式回复热处理,完全消除叶片表面的塑性应变层及残余应力,避免在固溶热处理过程中芯撑位置发生再结晶。其中:

[0019] 1、手持打磨机打磨

[0020] 使用带砂磨头的手持打磨机去除铂丝芯撑及芯撑凸点,磨头粒度180目~320目,控制打磨机转速为10000r/min~30000r/min,打磨过程中磨头进给速度为0.5mm/min~2mm/min,打磨应完全去除铂丝芯撑及芯撑凸点与叶片表面的交界位置,避免打磨损伤叶片其他位置。虽然打磨去除了芯撑位置的凝固残余应力,但也会引起打磨损伤,带来塑性应变层及残余应力,需要后面的方法去除。

#### [0021] 2、毡轮低应力抛光

[0022] 因毡轮低应力抛光引起的应力应变小于打磨,为了去除打磨引起的打磨损伤、塑性应变层及残余应力,对打磨位置进行低应力抛光处理。毡轮砂粒为白刚玉砂,粒度80目~120目,抛光转速控制在1000r/min~3000r/min,抛光过程中不断调整叶片与毡轮的角度和相对位置,仅抛光铂丝芯撑打磨划痕,避免叶片其他位置被抛光。当毡轮抛光已完全去除打磨划痕时,抛光处理结束。

#### [0023] 3、化学腐蚀表面处理

[0024] 化学腐蚀液选择过氧化氢和盐酸,腐蚀液体积配比为 $H_2O_2:HCl=1:8\sim 10$ 。将毡轮抛光处理后的叶片摆放在腐蚀槽内,摆放时要避免互相重叠、磕碰及划伤,再将盐酸沿槽壁缓慢倒入腐蚀槽内,按腐蚀液体积配比均匀倒入过氧化氢。当腐蚀液反应产生大量气泡后,取出一件叶片观察表面腐蚀程度。当抛光位置枝晶显露清晰时,腐蚀反应结束。若一次腐蚀后枝晶显露不清晰,可进行二次腐蚀,二次腐蚀时间可适当延长。单晶叶片化学腐蚀表面处理次数不超过两次。

#### [0025] 4、阶梯式回复热处理

[0026] 叶片在真空热处理炉中进行阶梯式回复热处理。室温入炉,热处理炉真空压强小于 $5\times 10^{-2}Pa$ ,热处理制度为:(700℃~850℃)/(2h~4h)+(1200℃~1230℃)/(0.5h~1h)+(1250℃~1270℃)/(0.5h~1h)+(1200℃~1230℃)/(0.5h~1h)+(1280℃~1300℃)/(0.5h~1h)+(1250℃~1270℃)/(0.5h~1h)+(1280℃~1300℃)/(0.5h~1h),所有升温阶段的升温速率 $\leq 10^\circ C/min$ ,保温到时时,采用炉冷至200℃以后出炉。

[0027] 通过以上实施方式,有效消除了单晶高温合金涡轮叶片铂丝芯撑位置的塑性应变层及残余应变,避免了叶片芯撑位置在固溶热处理过程中发生再结晶,且叶片表面无明显打磨凹坑和划痕,使叶片满足验收技术条件对再结晶的要求,提高了叶片再结晶合格率。

#### [0028] 实施例1

[0029] 对具有铂丝芯撑的铸态单晶叶片,使用带砂磨头的手持打磨机打磨铂丝芯撑及芯撑凸点,磨头粒度240目,打磨机转速为20000r/min,当磨头接触到铂丝芯撑后,控制磨头的进给速度为0.5mm/min,将铂丝芯撑、芯撑凸点及凸点与叶片表面的交界去除,打磨过程中磨头不触碰叶片其他位置。

[0030] 采用毡轮抛光处理打磨引起的损伤、划痕、塑性应变层及残余应力。为了降低毡轮抛光的应力,毡轮砂粒使用白刚玉砂,粒度120目,抛光转速为1000r/min。为了减少抛光处理的范围,仅针对打磨损伤进行抛光,抛光过程中不断调整叶片与毡轮的角度和相对位置,避免叶片其他位置被抛光。当打磨划痕被全部抛光去除时,抛光处理结束。

[0031] 化学腐蚀液使用过氧化氢和盐酸,腐蚀液体积配比控制为 $H_2O_2:HCl=1:8$ 。将毡轮抛光处理后的叶片摆放在腐蚀槽内,再将盐酸沿槽壁缓慢倒入腐蚀槽内,按腐蚀液体积配比均匀倒入过氧化氢。当抛光位置枝晶显露清晰时,腐蚀反应结束。从腐蚀液中取出叶片,

中和清洗干净。

[0032] 在真空热处理炉中对化学腐蚀后的叶片进行阶梯式回复热处理。室温入炉,热处理炉真空压强小于 $5 \times 10^{-2}$ Pa,热处理制度为 $800^{\circ}\text{C}/3\text{h}+1220^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}+1260^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}+1220^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}+1290^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}+1260^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}+1290^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}$ ,所有升温阶段的升温速率 $\leq 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,保温到时时,采用炉冷至 $200^{\circ}\text{C}$ 以后出炉。

[0033] 经阶梯式回复热处理的单晶叶片进行合金相应的标准固溶热处理,对固溶热处理后的叶片进行显晶腐蚀和再结晶检验,结果表明叶片铂丝芯撑位置无再结晶晶粒,即避免了芯撑位置发生再结晶,且因打磨和抛光控制合理,芯撑位置无明显凹坑和划痕,使叶片满足验收技术条件的要求。

[0034] 实施例2

[0035] 采用砂磨头的手持打磨机打磨单晶叶片表面上的铂丝芯撑及芯撑凸点,磨头粒度180目,打磨机转速为 $10000\text{r}/\text{min}$ ,磨头进给速度为 $1\text{mm}/\text{min}$ ,将铂丝芯撑、芯撑凸点及凸点与叶片表面的交界去除。

[0036] 采用毡轮抛光处理打磨引起的损伤、划痕、塑性应变层及残余应力。毡轮砂粒使用白刚玉砂,粒度120目,抛光转速为 $1500\text{r}/\text{min}$ 。抛光过程中仅抛光打磨损伤处,避免叶片其他位置被抛光。

[0037] 化学腐蚀腐蚀液体积配比控制为 $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}=1:10$ 。一次腐蚀后枝晶显露不清晰,进行二次腐蚀,并延长二次腐蚀时间。当抛光位置枝晶显露清晰时,二次腐蚀反应结束,从腐蚀液中取出叶片,中和清洗干净。

[0038] 叶片在真空热处理炉中进行阶梯式回复热处理。室温入炉,热处理炉真空压强小于 $5 \times 10^{-2}$ Pa,热处理制度为 $700^{\circ}\text{C}/4\text{h}+1200^{\circ}\text{C}/1\text{h}+1250^{\circ}\text{C}/1\text{h}+1200^{\circ}\text{C}/1\text{h}+1280^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}+1250^{\circ}\text{C}/1\text{h}+1280^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}$ ,所有升温阶段的升温速率 $\leq 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,保温到时时,采用炉冷至 $200^{\circ}\text{C}$ 以后出炉。

[0039] 通过上述试验后,将单晶叶片进行合金相应的标准固溶热处理,然后再进行显晶腐蚀和再结晶检验,发现铂丝芯撑位置无再结晶晶粒,也无明显凹坑和划痕,表明上述试验可成功抑制铂丝芯撑位置的再结晶。

[0040] 实施例3

[0041] 使用带砂磨头的手持打磨机打磨单晶叶片表面上的铂丝芯撑位置,磨头粒度320目,打磨机转速为 $30000\text{r}/\text{min}$ ,磨头进给速度为 $0.5\text{mm}/\text{min}$ ,将铂丝芯撑、芯撑凸点及凸点与叶片表面的交界打磨去除。

[0042] 采用毡轮低应力抛光处理打磨后的铂丝芯撑位置。毡轮砂粒使用白刚玉砂,粒度120目,抛光转速为 $1500\text{r}/\text{min}$ ,毡轮抛光将打磨划痕完全去除则抛光结束。

[0043] 化学腐蚀腐蚀液体积配比控制为 $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}=1:8$ 。一次腐蚀枝晶显露清晰,腐蚀反应结束,从腐蚀液中取出叶片,中和清洗干净。

[0044] 在真空热处理炉中进行阶梯式回复热处理。化学腐蚀表面处理后的叶片室温入炉,热处理炉真空压强小于 $5 \times 10^{-2}$ Pa,热处理制度为 $820^{\circ}\text{C}/2\text{h}+1230^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}+1270^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}+1230^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}+1290^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}+1270^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}+1290^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}$ ,所有升温阶段的升温速率 $\leq 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,保温到时时,采用炉冷至 $200^{\circ}\text{C}$ 以后出炉。

[0045] 对经过上述处理后的单晶叶片进行合金相应的标准固溶热处理,然后再进行显晶

腐蚀和再结晶检验,检验结果表明铂丝芯撑位置无再结晶晶粒,也无明显凹坑和划痕,表明上述处理方法抑制铂丝芯撑位置再结晶效果良好。