



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107190222 A

(43)申请公布日 2017.09.22

(21)申请号 201710391575.4

(22)申请日 2017.05.27

(71)申请人 武汉理工大学

地址 430070 湖北省武汉市洪山区珞狮路
122号

(72)发明人 华林 宋燕利 余小华

(74)专利代理机构 湖北武汉永嘉专利代理有限
公司 42102

代理人 唐万荣 王淳景

(51) Int. Cl.

G22F 1/18(2006.01)

G22F 3/00(2006.01)

权利要求书1页 说明书4页 附图1页

(54)发明名称

一种钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合
调控方法

(57)摘要

本发明公开了一种钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,包括以下步骤:先对钛合金叶片进行喷丸处理,使其表面产生塑性变形,形成冷硬层和残余压应力;再在常温下对经喷丸处理后的钛合金叶片进行电磁场调控处理,处理时间为3~600s,所述电磁场由交变磁场和脉冲电场耦合而成,交变磁场的强度为500~30000A/m,交变磁场的频率为1~1000Hz,脉冲电场的最大峰值电流为5~20000A,脉冲电场的脉冲周期为0.01~1.0s。本发明在传统喷丸工艺的基础上,增加电磁场调控工艺,利用电磁场调控材料表层及近表层残余应力分布,延长零件使用寿命。

1. 一种钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,其特征在于,包括以下步骤:先对钛合金叶片进行喷丸处理,使其表面产生塑性变形,形成冷硬层和残余压应力;再在常温下对经喷丸处理后的钛合金叶片进行电磁场调控处理,处理时间为3~600s,所述电磁场由交变磁场和脉冲电场耦合而成,交变磁场的强度为500~30000A/m,交变磁场的频率为1~1000Hz,脉冲电场的最大峰值电流为5~20000A,脉冲电场的脉冲周期为0.01~1.0s。

2. 根据权利要求1所述的钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,其特征在于,在喷丸处理中,利用压缩空气将大量直径为 $\Phi 0.1\text{mm} \sim \Phi 1.2\text{mm}$ 的弹丸以高速向钛合金叶片表面垂直或以一定角度喷射,喷丸压力为0.1~2.0MPa、流量为 $1 \sim 30\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

3. 根据权利要求1所述的钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,其特征在于,所述交变磁场由电源输出的交变电流在含有铁芯的励磁线圈中产生。

4. 根据权利要求1所述的钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,其特征在于,所述脉冲电场由脉冲电源输出特定周期的高密度脉冲电流,并在被处理材料内部产生周期性电场。

5. 根据权利要求1所述的钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,其特征在于,所述钛合金叶片由精密锻造、精密铸造或数控加工工艺制作。

一种钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法

技术领域

[0001] 本发明属于钛合金叶片表面处理技术领域,具体涉及一种钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法。

背景技术

[0002] 钛合金叶片是航空发动机的关键构件,对航空发动机性能和寿命有着决定性影响。钛合金叶片在服役过程中承受高温、振动、气动、离心力等负荷,工作条件苛刻,其组织状态和残余应力分布要求十分严格。一旦叶片断裂失效将会导致航空发动机停车,进而导致飞机出现灾难性故障。

[0003] 钛合金叶片表面和近表面的残余应力分布,直接影响到叶片的工作性能和服役寿命。钛合金叶片制造中,传统工艺需要通过喷丸调控表面和近表面的残余应力分布。在喷丸工艺中,一方面可以有效地细化表面和近表面晶粒组织,同时产生残余压应力,这对叶片的性能和寿命是有利的;另一方面,喷丸又会导致表面损伤及微裂纹,以致损害叶片性能与寿命,严重时甚至导致叶片报废。所以发展钛合金叶片表面和近表面的残余应力调控新方法,克服叶片喷丸强化的缺点,成为叶片制造亟待解决的世界性难题。

[0004] 利用电磁场调控材料残余应力分布,延长零件使用寿命是一种新型的技术,具有处理效果好、时间短、无附加变形等优点。目前,关于残余应力的电磁场调控技术已有一些文献报道,但调控对象几乎全部针对钢铁等铁磁性材料,而关于针对非铁磁性材料特别是钛合金,采用电磁场调控的报道却尚未见到。

发明内容

[0005] 为消除喷丸工艺对钛合金叶片表面损伤的缺点,本发明提供一种钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,它针对新制钛合金叶片,在传统喷丸工艺的基础上,增加电磁场调控工艺,利用电磁场调控材料表层及近表层残余应力分布,延长零件使用寿命。

[0006] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:

[0007] 一种钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,包括以下步骤:先对钛合金叶片进行喷丸处理,使其表面产生塑性变形,形成冷硬层和残余压应力;再在常温下对经喷丸处理后的钛合金叶片进行电磁场调控处理,处理时间为3~600s,所述电磁场由交变磁场和脉冲电场耦合而成,交变磁场的强度为500~30000A/m,交变磁场的频率为1~1000Hz,脉冲电场的最大峰值电流为5~20000A,脉冲电场的脉冲周期为0.01~1.0s。

[0008] 按上述技术方案,在喷丸处理中,利用压缩空气将大量直径为 $\Phi 0.1\text{mm} \sim \Phi 1.2\text{mm}$ 的弹丸以高速向钛合金叶片表面垂直或以一定角度喷射,喷丸压力为0.1~2.0MPa、流量为 $1 \sim 30\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

[0009] 按上述技术方案,所述交变磁场由电源输出的交变电流在含有铁芯的励磁线圈中产生。

[0010] 按上述技术方案,所述脉冲电场由脉冲电源输出特定周期的高密度脉冲电流,并

在被处理材料内部产生周期性电场。

[0011] 按上述技术方案,所述钛合金叶片由精密锻造、精密铸造或数控加工工艺制作。

[0012] 本发明,具有以下有益效果:本发明先对钛合金叶片进行喷丸处理,经喷丸处理后的钛合金叶片表面金属晶体发生塑性变形,位错、空位等晶体缺陷增加,造成晶格畸变,改变了原有晶格原子的排列状态,内部材料能量分布不均匀,导致表层和近表层产生残余压应力状态;然后再对喷丸处理后的钛合金叶片进行电磁场调控处理,一旦施加外能量场,晶界、亚晶界等高能量区域在外能量场能量的叠加作用下,将会超过微区相变的临界能量,进而发生相变析出二次相粒子,使基体相(α 相)的形态发生改变,并起到强烈钉扎位错和亚结构的作用,阻碍位错的运动及晶界、亚晶界迁移,导致压应力整体升高。

[0013] 本发明中,由于经过喷丸处理的钛合金叶片内部能量分布并不均匀,局部发生第二相粒子析出和 α 相畸形的概率也不相同,于是通过施加外部电磁场,使得钛合金叶片内部能量较高且内应力也较高的微区发生相变,在一定程度上释放部分较高的内应力,进而使残余压应力均匀性得到提升。本发明可以显著增加钛合金叶片近表层及表面压应力,并且使钛合金叶片表面残余压应力分布更加均匀,消除喷丸工艺对钛合金叶片表面造成的微损伤和缺陷,可以大幅提升钛合金叶片疲劳强度,延长钛合金叶片的疲劳寿命。

附图说明

[0014] 下面将结合附图及实施例对本发明作进一步说明,附图中:

[0015] 图1a是本发明实施例中钛合金叶片叶盆(局部)的示意图。

[0016] 图1b是本发明实施例中钛合金叶片叶背(局部)的示意图。

[0017] 图2是本发明实施例中钛合金叶片表面残余应力测试结果的示意图。

[0018] 图3是本发明实施例中钛合金叶片沿层深分布的残余应力测试结果的示意图。

具体实施方式

[0019] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0020] 在本发明的较佳实施例中,一种钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,包括以下步骤:先对钛合金叶片进行喷丸处理,使其表面产生塑性变形,形成冷硬层和残余压应力;再在常温下对经喷丸处理后的钛合金叶片进行电磁场调控处理,处理时间为3~600s,电磁场由交变磁场和脉冲电场耦合而成,交变磁场的强度为500~30000A/m,交变磁场的频率为1~1000Hz,脉冲电场的最大峰值电流为5~20000A,脉冲电场的脉冲周期为0.01~1.0s。

[0021] 在本发明的优选实施例中,在喷丸处理中,利用压缩空气将大量直径为 $\Phi 0.1\text{mm}$ ~ $\Phi 1.2\text{mm}$ 的弹丸以高速向钛合金叶片表面垂直或以一定角度喷射,喷丸压力为0.1~2.0MPa、流量为1~30 $\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

[0022] 在本发明的优选实施例中,交变磁场由电源输出的交变电流在含有铁芯的励磁线圈中产生。

[0023] 在本发明的优选实施例中,脉冲电场由脉冲电源输出特定周期的高密度脉冲电

流,并在被处理材料内部产生周期性电场。

[0024] 在本发明的优选实施例中,钛合金叶片由精密锻造、精密铸造或数控加工工艺制作。

[0025] 以下列举本发明的三个实施例。

[0026] 实施例1

[0027] 一种钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,包括以下步骤:

[0028] S1、采用精密锻造、数控加工等工艺制成钛合金叶片;

[0029] S2、对新制钛合金叶片表面进行喷丸处理:喷丸工艺参数为:与叶片表面呈垂直角度喷射弹丸,弹丸直径为 $\Phi 0.1\text{mm}\sim\Phi 0.5\text{mm}$,喷丸压力为 $0.1\sim 0.3\text{MPa}$,流量为 $1\sim 8\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$;

[0030] S3、将喷丸后的钛合金叶片在常温下置于特制的电磁场发生装置中,利用电磁场对钛合金叶片进行处理,电磁场调控处理时间为 $3\sim 10\text{s}$,电磁场主要由交变磁场和脉冲电场耦合而成,磁场主要处理工艺参数为磁场强度 $500\sim 5000\text{A/m}$ 、频率 $1\sim 20\text{Hz}$,电场主要处理工艺参数为最大峰值电流 $5\sim 500\text{A}$ 、脉冲周期为 $0.01\sim 0.08\text{s}$ 。

[0031] 采用X射线衍射法对钛合金叶片进行表面残余应力测试,测试点布置方式如图1a、图1b所示,其中叶盆上布置3个测试点(图中标记1、2、3),叶背上布置5个测试点(图中标记1、2、3、4、5)。对于所有测试点均分别测试沿试样长度与宽度方向的残余应力应力分量。除此之外,对于叶背测试点2采用电解抛光剥层,测试残余应力沿层深方向的分布规律。

[0032] 本发明分三组进行测试,第1组为新制钛合金叶片,即喷丸前的钛合金叶片,第1组为经喷丸处理后的钛合金叶片,第3组为经喷丸和电磁场复合处理后的钛合金叶片。残余应力测试结果如图2、图3所示,可以看出,与新制钛合金叶片的残余应力相比,经过喷丸工艺处理后,钛合金叶片表面残余压应力增大约 $41\%\sim 73\%$,但残余压应力分布均匀性明显变差,均方差最大 63MPa ;叶片残余压应力自表面沿层深方向先缓慢降低,在层深 $20\mu\text{m}$ 后迅速降低;与喷丸后残余压应力分布相比,经喷丸-电磁场复合调控工艺处理后钛合金叶片残余压应力均有一定程度的提升,最大提升幅度为 7.7% ,同时消除了喷丸工艺造成的应力分布不均匀结果,与喷丸工艺处理后的残余压应力相比,叶片沿层深方向上近表层形成了较强的残余压应力场,其中层深 $35\sim 65\mu\text{m}$ 的区间残余压应力最大提升了1.5倍。

[0033] 利用叶片疲劳强度试验台架,测试了在喷丸后和喷丸-电磁场复合调控处理后的叶片疲劳通过应力,测试结果如表1所示。与喷丸后钛合金叶片疲劳强度相比,利用喷丸-电磁场复合工艺调控残余应力后钛合金叶片疲劳强度提升约 $33\%\sim 36\%$ 。

[0034] 表1喷丸-电磁场复合调控工艺对叶片疲劳失效强度的影响

[0035]

钛合金叶片状态	最小失效强度 (MPa)	最大失效强度 (MPa)
喷丸工艺调控后	450	550
喷丸-电磁场复合调控后	600	750

[0036] 实施例2

[0037] 一种钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,包括以下步骤:

[0038] S1、采用精密锻造、数控加工等工艺制成钛合金叶片;

[0039] S2、对新制钛合金叶片表面进行喷丸处理:喷丸工艺参数为:与叶片表面呈 $80\sim$

85°角度喷射弹丸,弹丸直径为 $\Phi 0.4\text{mm}\sim\Phi 0.8\text{mm}$,喷丸压力为 $0.8\sim 1.2\text{MPa}$,流量为 $5\sim 15\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$;

[0040] S3、将喷丸后的钛合金叶片在常温下置于特制的电磁场发生装置中,利用电磁场对叶片进行调控处理,电磁场调控处理时间为 $100\sim 160\text{s}$,电磁场主要由交变磁场和脉冲电场耦合而成,磁场主要处理工艺参数为磁场强度 $10000\sim 15000\text{A/m}$ 、频率 $40\sim 50\text{Hz}$,电场主要处理工艺参数为最大峰值电流 $8000\sim 120000\text{A}$ 、脉冲周期为 $0.45\sim 0.75\text{s}$ 。

[0041] 采用X射线衍射法对叶片进行表面残余应力测试,测试点布置方式及测试方法与实施例1相同。与新制叶片表面残余应力相比,经喷丸-电磁场复合调控工艺处理后叶片残余压应力提升了 $17\%\sim 60\%$,残余应力均方差值减少了 24MPa ,即消除了喷丸工艺造成的应力分布不均匀结果;同时叶片沿层深方向上近表层形成了较强的残余压应力场,其中层深 $15\sim 35\mu\text{m}$ 区域残余压应力较喷丸后提升了 76% 。利用叶片疲劳强度试验台架,测试了在喷丸后和喷丸-电磁场复合调控处理后的叶片疲劳通过应力。与喷丸后叶片疲劳强度相比,利用喷丸-电磁场复合工艺调控残余应力后叶片疲劳强度提升约 $9\%\sim 11\%$ 。

[0042] 实施例3

[0043] 一种钛合金叶片残余应力喷丸-电磁场复合调控方法,包括以下步骤:

[0044] S1、采用精密锻造、数控加工等工艺制成钛合金叶片;

[0045] S2、喷丸工艺中,采用弹丸对钛合金材料表面进行:喷丸工艺参数为:与叶片表面呈 $60\sim 75^\circ$ 角度喷射弹丸,弹丸直径为 $\Phi 0.8\text{mm}\sim \Phi 1.2\text{mm}$,喷丸压力为 $1.8\sim 2.0\text{MPa}$,流量为 $25\sim 30\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$;

[0046] S3、将喷丸后的钛合金叶片在常温下置于特制的电磁场发生装置中,利用电磁场对叶片进行处理,处理时间为 $500\sim 600\text{s}$,磁场主要处理工艺参数为磁场强度 $25000\sim 30000\text{A/m}$ 、频率 $800\sim 1000\text{Hz}$,电场主要处理工艺参数为最大峰值电流 $18000\sim 20000\text{A}$ 、脉冲周期为 $0.8\sim 1.0\text{s}$ 。

[0047] 采用X射线衍射法对叶片进行表面残余应力测试,测试点布置方式及测试方法与实施例1相同。与新制叶片表面残余应力相比,经喷丸-电磁场复合调控工艺处理后叶片残余压应力提升了 $17\%\sim 60\%$,残余应力均方差值减少 24MPa ,即消除了喷丸工艺造成的应力分布不均匀结果;同时叶片沿层深方向上近表层形成了较强的残余压应力场,其中层深 $15\sim 35\mu\text{m}$ 区域残余压应力较喷丸后提升了 90% 。利用叶片疲劳强度试验台架,测试了在喷丸后和喷丸-电磁场复合调控处理后的叶片疲劳通过应力。与喷丸后叶片疲劳强度相比,利用喷丸-电磁场复合工艺调控残余应力后叶片疲劳强度提升约 $43\%\sim 45\%$ 。

[0048] 应当理解的是,对本领域普通技术人员来说,可以根据上述说明加以改进或变换,而所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

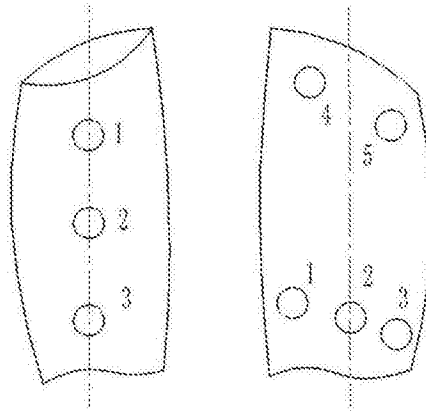


图 1a

图 1b

图 1

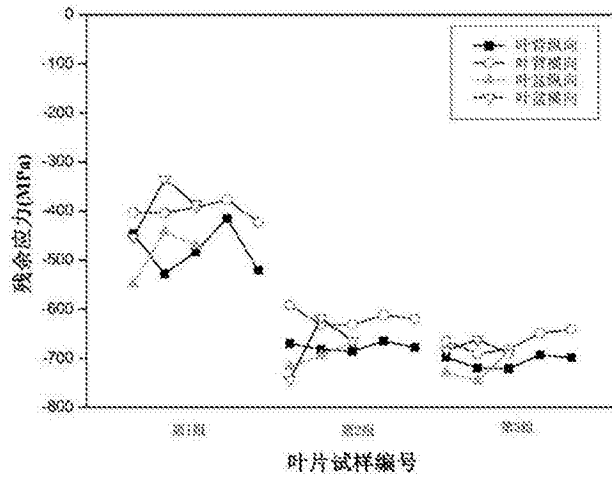


图 2

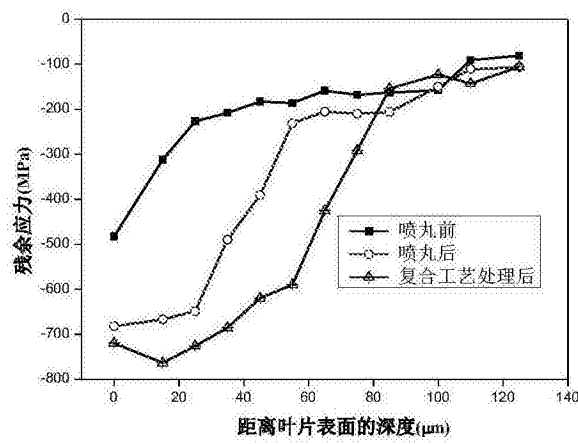


图 3