



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114231876 A

(43) 申请公布日 2022.03.25

(21) 申请号 202111586147.X

(22) 申请日 2021.12.20

(71) 申请人 吉林大学

地址 130000 吉林省长春市南关区人民大街5988号, 吉林大学-南岭校区

(72) 发明人 宋雨来 李伟光 王海洋

(74) 专利代理机构 长春市吉利专利事务所(普通合伙) 22206

代理人 李晓莉

(51) Int. Cl.

G23C 2/12 (2006.01)

G23C 2/06 (2006.01)

G22C 1/03 (2006.01)

G22C 1/06 (2006.01)

B22D 19/16 (2006.01)

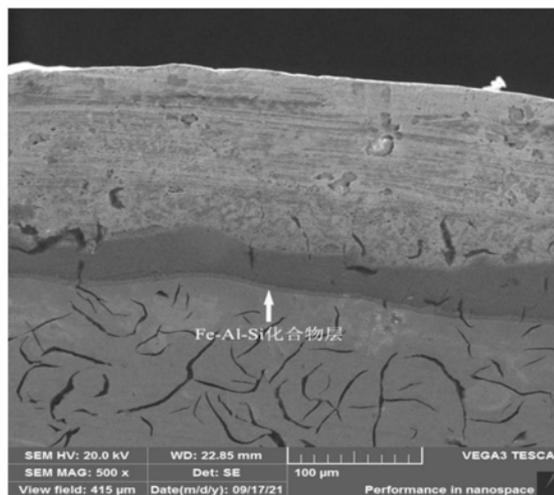
权利要求书1页 说明书8页 附图3页

## (54) 发明名称

一种二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体及其铸造方法

## (57) 摘要

本发明提供了一种二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体及其铸造方法。采用亚共晶铝硅合金和纯锌作为热浸镀材料,通过二次热浸镀复合铸造方法实现铸铁缸套铝合金缸体的高强度结合,本铸造方法简化了铸铁缸套前处理过程,通过缸套旋转工艺和浸镀时间和温度及一次浸镀材料成分的协同作用,改变了缸套表面冶金热力学和动力学条件,有效的控制了Fe-Al-Si金属间化合物脆硬层厚度,避免了铸件热处理时沿脆硬层产生的开裂,实现了缸体和缸套的高强度结合。同时消除了传统铝合金镀层表面氧化,二次浸镀后的缸套无需在完成热浸镀后立即进行浇铸,即使长时间放置,也能在无预热情况下较好地完成浇铸,显著降低了生产难度。



1. 一种二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体,其特征在于:它是由如下方法步骤制备的:

(1) 按照质量比10:1-50:1,将亚共晶铝硅合金和Al-50Si铝硅中间合金装入坩埚电阻炉中,熔化升温至690-850℃,再加入占亚共晶铝硅合金重量0.3-0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ ,搅拌5-8min,进行精炼熔体,精炼完成后加入Al-5Ti-B、Al-10Sr和Al-10Sm稀土中间合金,分别占亚共晶铝硅合金重量的0.1-0.2wt.%、0.1-0.2wt.%和0.1-1wt.%,再经搅拌5-30min后保温,获得一次热浸镀材料A;

(2) 将纯锌加热至460℃,待锌熔化后保温,获得二次热浸镀材料B;

(3) 将灰铸铁缸套完全浸入步骤(1)获得的热浸镀材料A中,并使缸套以10-20转/分的转速旋转1-20分钟后,再以0.5-10m/min的速度从A中匀速提出,完成一次热浸镀,获得一次浸镀缸套C;

(4) 将步骤(3)获得的一次热浸镀缸套C迅速完全浸没步骤(2)获得的二次热浸镀材料B中,静止保持1-20s后,再以1.0-15m/min的速度匀速从B中提出,获得二次热浸镀缸套D,所述的缸套D可在室温条件下放置0-48h;

(5) 将亚共晶铝硅合金加热至720-760℃,然后加入占亚共晶铝硅合金重量0.3-0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ ,搅拌5-8min,精炼熔体,精炼完成后加入Al-5Ti-B和Al-10Sr中间合金,分别占亚共晶铝硅合金重量的0.1-0.2wt.%和0.1-0.2wt.%,对合金熔体进行细化变质处理并保温1-20min,完成缸体合金材料熔炼,获得缸体材料E;

(6) 在室温条件下,将步骤(4)获得的二次热浸镀缸套D固定在铸型内,将步骤(5)获得的缸体材料E浇入铸型,完成复合铸造成型,获得铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F;

(7) 将步骤(6)获得的铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F在450-600℃下进行固溶处理6-15h后,空冷至室温,再在170-250℃下时效处理1-10h后,空冷至室温,获得二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体。

2. 根据权利要求1所述的一种二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体,其特征在于:所述的亚共晶铝硅合金为ZL101,ZL104,A356或A360中的任意组合。

3. 根据权利要求1所述的一种二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体,其特征在于:步骤(4)所述的缸套D可在室温条件下放置1-24小时。

4. 根据权利要求1所述的一种二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体,其特征在于:步骤(4)所述的静止保持为3-8s。

5. 根据权利要求1所述的一种二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体,其特征在于:步骤(6)所述的铸造成型为压铸、低压铸造或重力铸造中的任意一种。

## 一种二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体及其铸造方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于金属材料加工领域,具体涉及一种二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体及其铸造方法。

### 背景技术

[0002] 近年来,人们逐渐意识到环境保护的重要性,毫无疑问,汽车轻量化可以一定程度上减少能源的损耗以及温室气体的排放。发动机作为汽车中最重的部件之一,其轻量化研究对汽车的性能提升,实现低排放低能耗有重大的意义。

[0003] 发动机缸体材料正从灰铸铁逐步向铝合金等轻质合金方向发展,目前市面上存在的汽油发动机大致可分为三类:铸铁发动机、铝合金内嵌铸铁缸套式发动机、高硅铝合金发动机。其中,铝合金内嵌铸铁缸套式发动机既利用了铸铁材料的高硬度和高耐磨性,又充分利用了铝合金材料的高比强度,高导热性,能够兼顾发动机的高性能和轻量化。

[0004] 目前,铝合金内嵌铸铁缸套式发动机的缸体缸套总成技术主要分为机械压入装配技术和复合铸造技术两大类。机械压入装配技术是依靠外部施加压应力将缸套通过过盈配合压入缸体内来达到紧密贴合。但机械压入式并不能使缸体缸套之间达到冶金结合,缸体缸套之间存在缝隙,两者界面处甚至存在氧化物,油污等,极大地影响了缸体和缸套间的结合强度和导热性,限制了发动机的性能提升。

[0005] 固液复合铸造技术使缸体和缸套界面冶金结合成为可能,较大幅度的提高了界面强度和导热性,越来越多的被国内外汽车制造商采用。为优化界面结构,强化结合强度,抑制界面缺陷,热喷涂,激光熔覆,电镀,热浸镀等表面改性技术被广泛采用,其中,热浸镀技术由于设备要求低,工艺简单,成本低,效果良好成为重要的表面改性方法。

[0006] 目前较为常用的热浸镀材料为:纯锌、锌铝合金、铝硅合金、纯铝。当选用纯锌作为热浸镀材料时,需要脱脂、酸洗和助镀处理等复杂的前处理工序,且界面结合强度不高;选择锌铝合金作为热浸镀液时,在浸镀过程中,Zn原子扩散与铸铁基表面的Fe-Al化合物层生成Fe-Al-Zn三元固溶体,Zn原子通过Fe-Al-Zn三元固溶体向铸铁基体晶界扩散,便在晶界处生成Zn-Fe金属间化合物;浸镀时间延长,Zn-Fe化合物生成量越来越多而体积膨胀变大,Fe-Al化合物层被胀裂出现裂纹,导致界面不完整,严重影响其力学性能。现有技术以锌和锌铝合金作为热浸镀材料,界面结合强度均小于35MPa。选择铝硅合金作为热浸镀液时,铸铁缸套表面会生成Fe-Al-Si脆性金属间化合物,该化合物生长速度和形态较难控制,在铸造和热处理过程中极易产生裂纹,严重影响界面结合强度。在浸镀结束后需快速将完成浸镀的缸套置于模具内进行浇铸,否则镀层会迅速生成一层致密氧化铝薄膜,在后续铸造过程中严重阻碍镀层材料和缸体材料间的冶金传热和传质过程,破坏界面的冶金结合,大幅降低界面结合强度。实际生产过程中,缸套入型,缸套固定,铸型合型,浇铸都需要一定时间,而致密氧化铝薄膜生成速度极快,因此无法通过加快生产节拍避免这种致密氧化铝薄膜的形成和破坏作用,导致界面结合质量严重下降,产品合格率很低,大大限制了该方法的实用性。此外,当选用纯铝作为热浸镀材料时,与铝硅合金相比,随热浸镀温度以及热浸镀

时间的增加,缸套表面铝铁金属间化合物层生长更快,脆性层更厚,并且热浸镀层中也会生成大量的脆性、针状铝铁金属化合物,不但影响力学性能,且易产生开裂。

[0007] 综上,目前铸铁缸套/铝合金缸体热浸镀复合铸造技术存在一些不足:热浸镀处理过程中金属间化合物脆性层厚度不易控制;热浸镀层表面会形成致密氧化,严重阻碍界面冶金结合过程,因此将降低界面结合强度,此外为减少氧化层厚度,对生产节拍控制提出较高要求,降低了技术实用性;铸件在浇铸成型和热处理过程中,金属间化合物层受到较大应力从而产生开裂,将导致界面结合强度不高。针对上述不足,如何研发出高结合强度,无裂纹,可热处理的内嵌铸铁缸套铝合金缸体及其铸造方法是目前亟需解决的技术难题。

## 发明内容

[0008] 为了解决上述技术难题,本发明提供了一种二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体,它是由如下方法步骤制备的:

[0009] (1) 按照质量比10:1-50:1,将亚共晶铝硅合金和Al-50Si铝硅中间合金装入坩埚电阻炉中,熔化升温至690-850℃,再加入占亚共晶铝硅合金重量0.3-0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ ,搅拌5-8min,进行精炼熔体,精炼完成后加入Al-5Ti-B、Al-10Sr和Al-10Sm稀土中间合金,分别占亚共晶铝硅合金重量的0.1-0.2wt.%、0.1-0.2wt.%和0.1-1wt.%,再经搅拌5-30min后保温,获得一次热浸镀材料A;

[0010] (2) 将纯锌加热至460℃,待锌熔化后保温,获得二次热浸镀材料B;

[0011] (3) 将灰铸铁缸套完全浸入步骤(1)获得的热浸镀材料A中,并使缸套以10-20转/分的转速旋转1-20分钟后,再以0.5-10m/min的速度从A中匀速提出,完成一次热浸镀,获得一次浸镀缸套C;

[0012] (4) 将步骤(3)获得的一次热浸镀缸套C迅速完全浸没步骤(2)获得的二次热浸镀材料B中,静止保持1-20s后,再以1.0-15m/min的速度匀速从B中提出,获得二次热浸镀缸套D,所述的缸套D可在室温条件下放置0-48h;

[0013] (5) 将亚共晶铝硅合金加热至720-760℃,然后加入占亚共晶铝硅合金重量0.3-0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ ,搅拌5-8min,精炼熔体,精炼完成后加入Al-5Ti-B和Al-10Sr中间合金,分别占亚共晶铝硅合金重量的0.1-0.2wt.%和0.1-0.2wt.%,对合金熔体进行细化变质处理并保温1-20min,完成缸体合金材料熔炼,获得缸体材料E;

[0014] (6) 在室温条件下,将步骤(4)获得的二次热浸镀缸套D固定在铸型内,将步骤(5)获得的缸体材料E浇入铸型,完成复合铸造成型,获得铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F;

[0015] (7) 将步骤(6)获得的铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F在450-600℃下进行固溶处理6-15h后,空冷至室温,再在170-250℃下时效处理1-10h后,空冷至室温,获得二次热浸镀内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体。

[0016] 进一步地,所述亚共晶铝硅合金为ZL101,ZL104,A356或A360中的任意组合;

[0017] 进一步地,步骤(4)所述的缸套D可在室温条件下放置1-24小时;

[0018] 进一步地,步骤(4)所述的静止保持为3-8s;

[0019] 进一步地,步骤(6)所述的铸造成型为压铸、低压铸造或重力铸造中的任意一种。

[0020] 本发明的有益效果:

[0021] (1) 本发明采用二次热浸镀方法实现铝合金缸体和灰铸铁缸套间的冶金结合,具

有优良的结合强度和导热性能,剪切强度可达54-63MPa,克服了传统机械结合产生的贴合率不稳定,结合强度低,传热效果差的缺点,有利于提高发动机的性能和稳定性。

[0022] (2) 在一次浸镀中,通过缸套旋转工艺以及浸镀时间、温度和镀液成分的协同作用,有效将Fe-Al-Si金属间化合物层厚度控制在5-10 $\mu$ m,且化合物层形状规则,无尖锐突起,改善了化合物层的强韧性,有效避免了复合铸造和后续热处理过程中镀层开裂问题。

[0023] (3) 二次热浸镀去除难熔氧化铝层,并形成低熔点锌镀层,避免了复合铸造过程中氧化铝层对界面冶金反应的破坏,增强了的界面结合性,缸套无需经过预热处理,在室温条件下即可完成浇铸,此外经二次热镀后的缸套既可以立刻完成快速浇铸也可以在室温条件下放置48小时之后进行浇铸,均不会影响其与缸体的紧密结合以及缸套与镀层之间的剪切强度,因此降低了工序复杂性。

[0024] (4) 综上:本发明采用亚共晶铝硅合金和纯锌作为热浸镀材料,通过二次热浸镀复合铸造方法实现铸铁缸套铝合金缸体的高强度结合,本铸造方法简化了铸铁缸套前处理过程,通过缸套旋转工艺和浸镀时间和温度及一次浸镀材料成分的协同作用,改变了缸套表面冶金热力学和动力学条件,有效的控制了Fe-Al-Si金属间化合物脆硬层厚度,避免铸件热处理时沿脆硬层产生的开裂。采用纯锌进行二次浸镀,避免了铝合金镀层表面氧化,二次浸镀后的缸套无需在完成热浸镀后立即进行浇铸,即使长时间放置,也能在无预热情况下较好地完成浇铸,显著降低了生产难度。此外,一次热镀材料中的稀土等微量元素能够细化含锌化合物和含铁化合物晶粒尺寸,进一步改善镀层的力学性能。

## 附图说明

[0025] 图1是实施例1步骤(5)获得的二次热浸镀后的缸套外热浸镀层的SEM图谱;

[0026] 图2是实施例1-4中,步骤(8)获得的热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体复合铸造界面Fe-Al-Si金属间化合物层的厚度统计图;

[0027] 图3是实施例1步骤(8)获得的热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体复合铸造界面SEM图谱;

[0028] 图4是实施例1-4中,步骤(8)获得的内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体界面剪切应力强度;

[0029] 图5是对比例1-4中,步骤(6)获得的内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体界面剪切应力强度。

## 具体实施方式

[0030] 实施例1

[0031] (1) 将灰铸铁缸套表面除油、除锈、干燥处理;

[0032] (2) 将10KgA356铝硅合金和0.8KgAl-50Si铝硅中间合金装入坩埚电阻炉中,熔化升温至690 $^{\circ}$ C,达到预设温度后加入50g C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>搅拌5min,进行精炼熔体,精炼完成后加入20gAl-5Ti-B、20gAl-10Sr和50gAl-10Sm稀土中间合金搅拌5min后保温,获得一次热浸镀材料A;

[0033] (3) 将纯锌加热至460 $^{\circ}$ C,待锌熔化后保温,获得二次热浸镀材料B;

[0034] (4) 将步骤(1)获得的灰铸铁缸套完全浸入步骤(2)中的一次热浸镀材料A中,并使

缸套以12转/分的转速旋转10分钟,而后以1.5m/min的速度匀速提拉出,完成一次热浸镀,获得一次浸镀缸套C;

[0035] (5) 将步骤(4)获得的一次热浸镀缸套C迅速完全浸没步骤(3)获得的二次热浸镀材料B中,静止保持8s后以1.5m/min的速度匀速提拉出,在室温空气中放置24小时,完成二次热浸镀,获得二次热浸镀缸套D;

[0036] (6) 将一定重量A356铝硅合金熔化变温至720℃,向其中加入A356铝硅合金重量0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ 搅拌5min,精炼熔体,精炼完成后加入A356铝硅合金重量0.2wt.%的Al-5Ti-B和0.2wt.%Al-10Sr中间合金,对合金熔体进行细化变质处理并保温5min,完成缸体合金材料熔炼,获得缸体材料E;

[0037] (7) 室温条件下,将步骤(5)获得二次热浸镀缸套D固定在树脂砂铸型内,将步骤(6)获得的缸体材料E按重力铸造方法浇入铸型,完成复合铸造成型,获得铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F;

[0038] (8) 将步骤(7)获得的铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F在500℃下进行固溶处理6h,空冷至室温,然后在180℃下时效处理4h,空冷至室温,获得热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体G。

[0039] 实施例2

[0040] (1) 将灰铸铁缸套表面除油、除锈、干燥处理;

[0041] (2) 将10KgA356铝硅合金和0.7KgAl-50Si铝硅中间合金装入坩埚电阻炉中,熔化升温至750℃,达到预设温度后加入50g  $C_2Cl_6$ 搅拌5min,进行精炼熔体,精炼完成后加入20gAl-5Ti-B、20gAl-10Sr和60gAl-10Sm稀土中间合金搅拌5min后保温,获得一次热浸镀材料A;

[0042] (3) 将纯锌加热至460℃,待锌熔化后保温,获得二次热浸镀材料B;

[0043] (4) 将步骤(1)获得的灰铸铁缸套完全浸入步骤(2)中的一次热浸镀材料A中,并使缸套以15转/分的转速旋转8分钟,而后以1.5m/min的速度匀速提拉出,完成一次热浸镀,获得一次浸镀缸套C;

[0044] (5) 将步骤(4)获得的一次热浸镀缸套C迅速完全浸没步骤(3)获得的二次热浸镀材料B中,静止保持6s后以1.5m/min的速度匀速提拉出,在室温空气中放置12小时,完成二次热浸镀,获得二次热浸镀缸套D;

[0045] (6) 将一定重量A356铝硅合金熔化变温至720℃,向其中加入A356铝硅合金重量0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ 搅拌5min,精炼熔体,精炼完成后加入A356铝硅合金重量0.2wt.%的Al-5Ti-B和0.2wt.%Al-10Sr中间合金,对合金熔体进行细化变质处理并保温5min,完成缸体合金材料熔炼,获得缸体材料E;

[0046] (7) 室温条件下,将步骤(5)获得二次热浸镀缸套D固定在树脂砂铸型内,将步骤(6)获得的缸体材料E按重力铸造方法浇入铸型,完成复合铸造成型,获得铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F;

[0047] (8) 将步骤(7)获得的铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F在500℃下进行固溶处理6h,空冷至室温,然后在180℃下时效处理4h,空冷至室温,获得热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体G。

[0048] 实施例3

- [0049] (1) 将灰铸铁缸套表面除油、除锈、干燥处理；
- [0050] (2) 将10Kg A356铝硅合金和0.5Kg Al-50Si铝硅中间合金装入坩埚电阻炉中，熔化升温至800℃，达到预设温度后加入50g  $C_2Cl_6$ 搅拌5min，进行精炼熔体，精炼完成后加入20gAl-5Ti-B、20gAl-10Sr和70gAl-10Sm稀土中间合金搅拌5min后保温，获得一次热浸镀材料A；
- [0051] (3) 将纯锌加热至460℃，待锌熔化后保温，获得二次热浸镀材料B；
- [0052] (4) 将步骤(1)获得的灰铸铁缸套完全浸入步骤(2)中的一次热浸镀材料A中，并使缸套以18转/分的转速旋转7分钟，而后以1.5m/min的速度匀速提拉出，完成一次热浸镀，获得一次浸镀缸套C；
- [0053] (5) 将步骤(4)获得的一次热浸镀缸套C迅速完全浸没步骤(3)获得的二次热浸镀材料B中，静止保持5s后以1.5m/min的速度匀速提拉出，在室温空气中放置36小时，完成二次热浸镀，获得二次热浸镀缸套D；
- [0054] (6) 将一定重量A356铝硅合金熔化变温至720℃，向其中加入A356铝硅合金重量0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ 搅拌5min，精炼熔体，精炼完成后加入A356铝硅合金重量0.2wt.%的Al-5Ti-B和0.2wt.%Al-10Sr中间合金，对合金熔体进行细化变质处理并保温5min，完成缸体合金材料熔炼，获得缸体材料E；
- [0055] (7) 室温条件下，将步骤(5)获得二次热浸镀缸套D固定在树脂砂铸型内，将步骤(6)获得的缸体材料E按重力铸造方法浇入铸型，完成复合铸造成型，获得铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F；
- [0056] (8) 将步骤(7)获得的铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F在500℃下进行固溶处理6h，空冷至室温，然后在180℃下时效处理4h，空冷至室温，获得热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体G。
- [0057] 实施例4
- [0058] (1) 将灰铸铁缸套表面除油、除锈、干燥处理；
- [0059] (2) 将10Kg A356铝硅合金和0.2Kg Al-50Si铝硅中间合金装入坩埚电阻炉中，熔化升温至850℃，达到预设温度后加入50g  $C_2Cl_6$ 搅拌5min，进行精炼熔体，精炼完成后加入20gAl-5Ti-B、20gAl-10Sr和80gAl-10Sm稀土中间合金搅拌5min后保温，获得一次热浸镀材料A；
- [0060] (3) 将纯锌加热至460℃，待锌熔化后保温，获得二次热浸镀材料B；
- [0061] (4) 将步骤(1)获得的灰铸铁缸套完全浸入步骤(2)中的一次热浸镀材料A中，并使缸套以20转/分的转速旋转5分钟，而后以1.5m/min的速度匀速提拉出，完成一次热浸镀，获得一次浸镀缸套C；
- [0062] (5) 将步骤(4)获得的一次热浸镀缸套C迅速完全浸没步骤(3)获得的二次热浸镀材料B中，静止保持4s后以1.5m/min的速度匀速提拉出，在室温空气中放置48小时，完成二次热浸镀，获得二次热浸镀缸套D；
- [0063] (6) 将一定重量A356铝硅合金熔化变温至720℃，向其中加入A356铝硅合金重量0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ ，再经搅拌5min，精炼熔体，精炼完成后加入A356铝硅合金重量0.2wt.%的Al-5Ti-B和0.2wt.%Al-10Sr中间合金，对合金熔体进行细化变质处理并保温5min，完成缸体合金材料熔炼，获得缸体材料E；

[0064] (7) 室温条件下,将步骤(5)获得二次热浸镀缸套D固定在树脂砂铸型内,将步骤(6)获得的缸体材料E按重力铸造方法浇入铸型,完成复合铸造成型,获得铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F;

[0065] (8) 将步骤(7)获得的铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F在500℃下进行固溶处理5h,空冷至室温,然后在180℃下时效处理5h,空冷至室温,获得热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体G。

[0066] 对比例1

[0067] (1) 将灰铸铁缸套表面除油、除锈、干燥处理,获得预处理铸铁缸套A;

[0068] (2) 将10Kg A356铝硅合金装入坩埚电阻炉中,熔化升温至690℃,达到预设温度后加入50g  $C_2Cl_6$ 搅拌5min,进行精炼熔体,精炼完成后加入20gAl-5Ti-B、20gAl-10Sr中间合金搅拌5min后保温,获得热浸镀材料B;

[0069] (3) 将一定重量A356铝硅合金熔化变温至720℃,向其中加入A356铝硅合金重量0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ 搅拌5min,精炼熔体,精炼完成后加入A356铝硅合金重量0.2wt.%的Al-5Ti-B和0.2wt.%Al-10Sr中间合金,对合金熔体进行细化变质处理并保温,完成缸体合金材料熔炼,获得缸体材料C;

[0070] (4) 将步骤(1)获得的灰铸铁缸套A完全浸入步骤(2)中的热浸镀材料B中,保持10分钟,而后以1.5m/min的速度匀速提拉出,完成热浸镀,获得热浸镀缸套D;

[0071] (5) 将步骤(4)获得热浸镀缸套D迅速固定在树脂砂铸型内,将步骤(3)获得的缸体材料C按重力铸造方法浇入铸型,完成复合铸造成型,获得铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体E;

[0072] (6) 将步骤(5)获得的铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体E在500℃下进行固溶处理5h,空冷至室温,然后在180℃下时效处理5h,空冷至室温,获得热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F。

[0073] 对比例2

[0074] (1) 将灰铸铁缸套表面除油、除锈、干燥处理,获得预处理铸铁缸套A;

[0075] (2) 将10Kg A356铝硅合金装入坩埚电阻炉中,熔化升温至750℃,达到预设温度后加入50g  $C_2Cl_6$ 搅拌5min,进行精炼熔体,精炼完成后加入20gAl-5Ti-B、20gAl-10Sr中间合金搅拌5min后保温,获得热浸镀材料B;

[0076] (3) 将一定重量A356铝硅合金熔化变温至720℃,向其中加入A356铝硅合金重量0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ 搅拌5min,精炼熔体,精炼完成后加入A356铝硅合金重量0.2wt.%的Al-5Ti-B和0.2wt.%Al-10Sr中间合金,对合金熔体进行细化变质处理并保温,完成缸体合金材料熔炼,获得缸体材料C;

[0077] (4) 将步骤(1)获得的灰铸铁缸套A完全浸入步骤(2)中的热浸镀材料B中,保持10分钟,而后以1.5m/min的速度匀速提拉出,完成热浸镀,获得热浸镀缸套D;

[0078] (5) 将步骤(4)获得热浸镀缸套D迅速固定在树脂砂铸型内,将步骤(3)获得的缸体材料C按重力铸造方法浇入铸型,完成复合铸造成型,获得铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体E;

[0079] (6) 将步骤(5)获得的铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体E在500℃下进行固溶处理5h,空冷至室温,然后在180℃下时效处理5h,空冷至室温,获得热处理态内嵌灰铸铁缸套铝

合金缸体F。

[0080] 对比例3

[0081] (1) 将灰铸铁缸套表面除油、除锈、干燥处理,获得预处理铸铁缸套A;

[0082] (2) 将10Kg A356铝硅合金装入坩埚电阻炉中,熔化升温至800℃,达到预设温度后加入50g  $C_2Cl_6$ 搅拌5min,进行精炼熔体,精炼完成后加入20gAl-5Ti-B、20gAl-10Sr中间合金搅拌5min后保温,获得热浸镀材料B;

[0083] (3) 将一定重量A356铝硅合金熔化变温至720℃,向其中加入A356铝硅合金重量0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ 搅拌5min,精炼熔体,精炼完成后加入A356铝硅合金重量0.2wt.%的Al-5Ti-B和0.2wt.%Al-10Sr中间合金,对合金熔体进行细化变质处理并保温,完成缸体合金材料熔炼,获得缸体材料C;

[0084] (4) 将步骤(1)获得的灰铸铁缸套A完全浸入步骤(2)中的热浸镀材料B中,保持10分钟,而后以1.5m/min的速度匀速提拉出,完成热浸镀,获得热浸镀缸套D;

[0085] (5) 将步骤(4)获得热浸镀缸套D迅速固定在树脂砂铸型内,将步骤(3)获得的缸体材料C按重力铸造方法浇入铸型,完成复合铸造成型,获得铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体E;

[0086] (6) 将步骤(5)获得的铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体E在500℃下进行固溶处理5h,空冷至室温,然后在180℃下时效处理5h,空冷至室温,获得热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F。

[0087] 对比例4

[0088] (1) 将灰铸铁缸套表面除油、除锈、干燥处理,获得预处理铸铁缸套A;

[0089] (2) 将10Kg A356铝硅合金装入坩埚电阻炉中,熔化升温至850℃,达到预设温度后加入50g  $C_2Cl_6$ 搅拌5min,进行精炼熔体,精炼完成后加入20gAl-5Ti-B、20gAl-10Sr中间合金搅拌5min后保温,获得热浸镀材料B;

[0090] (3) 将一定重量A356铝硅合金熔化变温至720℃,向其中加入A356铝硅合金重量0.5wt.%的 $C_2Cl_6$ 搅拌5min,精炼熔体,精炼完成后加入A356铝硅合金重量0.2wt.%的Al-5Ti-B和0.2wt.%Al-10Sr中间合金,对合金熔体进行细化变质处理并保温,完成缸体合金材料熔炼,获得缸体材料C;

[0091] (4) 将步骤(1)获得的灰铸铁缸套A完全浸入步骤(2)中的热浸镀材料B中,保持10分钟,而后以1.5m/min的速度匀速提拉出,完成热浸镀,获得热浸镀缸套D;

[0092] (5) 将步骤(4)获得热浸镀缸套D迅速固定在树脂砂铸型内,将步骤(3)获得的缸体材料C按重力铸造方法浇入铸型,完成复合铸造成型,获得铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体E;

[0093] (6) 将步骤(5)获得的铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体E在500℃下进行固溶处理5h,空冷至室温,然后在180℃下时效处理5h,空冷至室温,获得热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体F。

[0094] 图1给出了实施例1中,步骤(5)获得的二次热浸镀缸套表面浸镀层微观组织。可以看出二次热浸镀层是一种多层结构。在紧邻铸铁缸套表面是一层Fe-Al-Si金属间化合物层,厚度约5 $\mu$ m,膜层完整,内部无裂纹,与铸铁基体结合良好。在Fe-Al-Si金属间化合物层外侧是一次热浸镀形成的铝硅合金层,厚度约为40 $\mu$ m,膜层完整,内部无裂纹,与Fe-Al-Si

金属间化合物层紧密结合。在铝硅合金层外是二次热浸镀形成的锌铝合金层,厚度约120 $\mu$ m,膜层结构完整,无裂纹,无气泡,与铝硅合金层结合紧密,锌铝合金层内锌元素含量从膜层内部到外部逐渐升高,外表面具有极高的锌含量。

[0095] 图2给出了实施例1-4中,步骤(8)获得的热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体复合铸造界面Fe-Al-Si金属间化合物层的厚度分布。图中可见,Fe-Al-Si金属间化合物层的厚度在5-10 $\mu$ m之间,当温度从690 $^{\circ}$ C增至800 $^{\circ}$ C随着一次热浸镀的温度增加,层厚略有增长,800 $^{\circ}$ C-850 $^{\circ}$ C区间内,化合物层厚增加并不明显,由此可以说明,本发明通过缸套旋转,浸镀时间和温度及一次浸镀材料成分等参数的协同作用调整化合物层生长的厚度,本化合物层形状规则,无尖锐突起,改善了化合物层的强韧性,有效避免了复合铸造和后续热处理过程中镀层开裂问题。

[0096] 图3是实施例1中,步骤(8)获得的热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体复合铸造界面微观组织。可见铸铁缸套与铝合金缸体界面无裂纹,无气泡,无夹杂,实现了良好的冶金结合;对比图1,热浸镀层中原有的铝硅合金层和铝锌合金层在复合铸造过程中完全与缸体材料熔合,完全消除了致密氧化铝层对界面结合过程的破坏性作用,说明本发明中的二次热浸镀缸套在较长时间放置后且不预热条件下热浸镀层外表面与缸体材料能够实现完全熔合。紧邻铸铁缸套表面的Fe-Al-Si金属间化合物层没有明显变化,它与铸铁缸套和铝合金缸体紧密结合。

[0097] 图4是实施例1-4中,步骤(8)获得热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体界面剪切应力强度。热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体结合界面剪切强度在54MPa-63MPa左右,与铸态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体相比,热处理态结合界面剪切强度没有显著变化,依然能够保持高剪切强度,由此说明本发明通过合金组分以及工艺的协同作用使得内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体界面结构在热处理条件下性能依旧能够保持稳定,由此说明本发明的缸套和缸体结合十分紧密,克服了机械压入装配和传统热浸镀复合铸造技术界面结合强度低的缺点,有利于提高发动机的性能和稳定性。

[0098] 图5是对比例1-4中,步骤(6)获得经一次热浸镀热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体界面剪切应力强度。热处理态结合界面强度在16-26MPa之间,与实施例1-4相比,界面结合强度明显降低,本发明的热处理态内嵌灰铸铁缸套铝合金缸体界面结合强度也是由一次热浸镀工艺决定的,但获得的热处理态的界面结合强度却远远高于对比例1-4的强度,主要是因为本发明的界面剪切强度是由缸套旋转,浸镀时间和温度及一次浸镀材料成分等多参数的协同作用实现的,而不是由单一因素和成分决定的。

[0099] 综上:本发明通过材料成分以及工艺的协同作用,实现了化合物层生长厚度的可控、完全消除致密氧化铝层对界面结合过程的破坏性作用,使得缸体和缸套无缝结合。在省略浇铸前预热情况下,二次热镀后的铸铁缸套在室温条件既可以马上浇铸也可以放置48小时后浇铸依然能保持缸套和缸体的紧密结合,并且在热处理后依旧能保持界面的高剪切强度等优异性能,有效改善了化合物层的强韧性,有效避免了复合铸造和后续热处理过程中镀层开裂问题。本发明简化了工艺流程、节约了成本,适用于产业化生产。

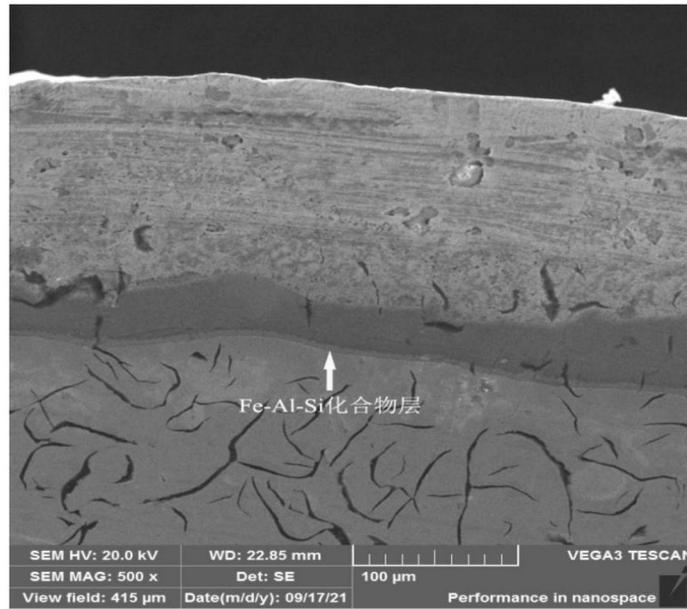


图1

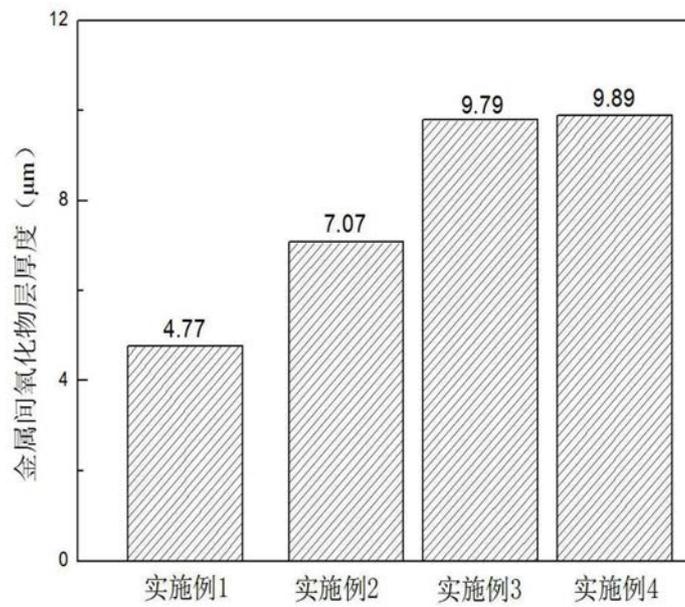


图2

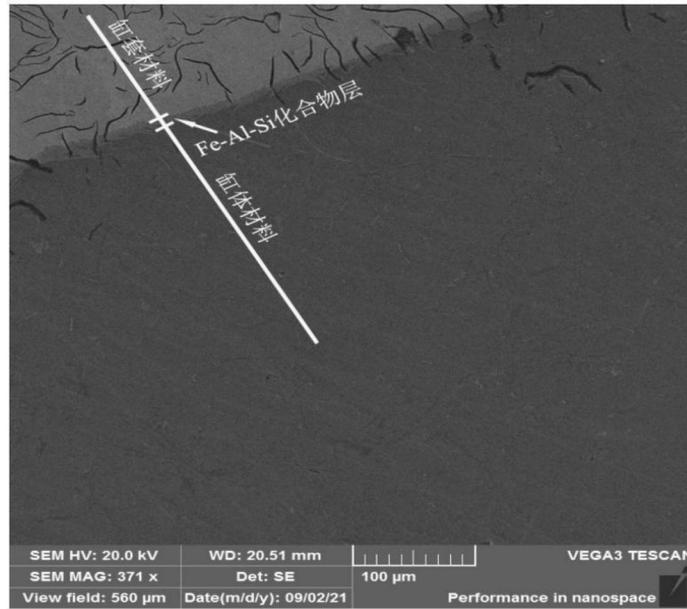


图3

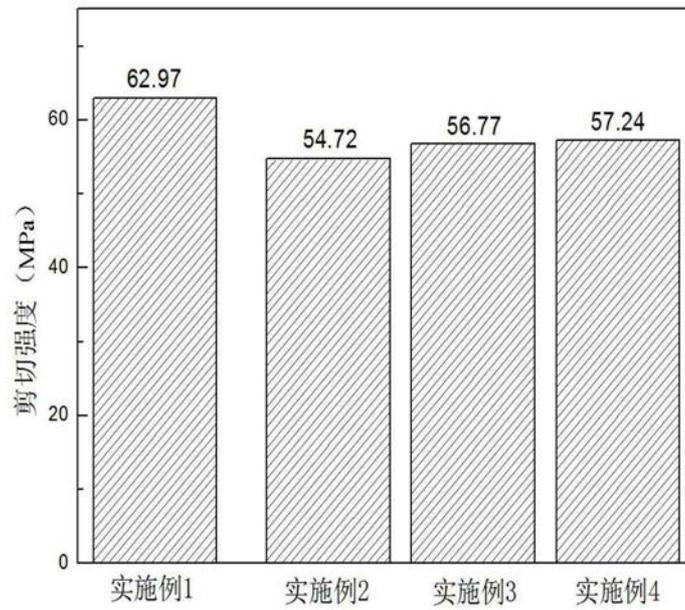


图4

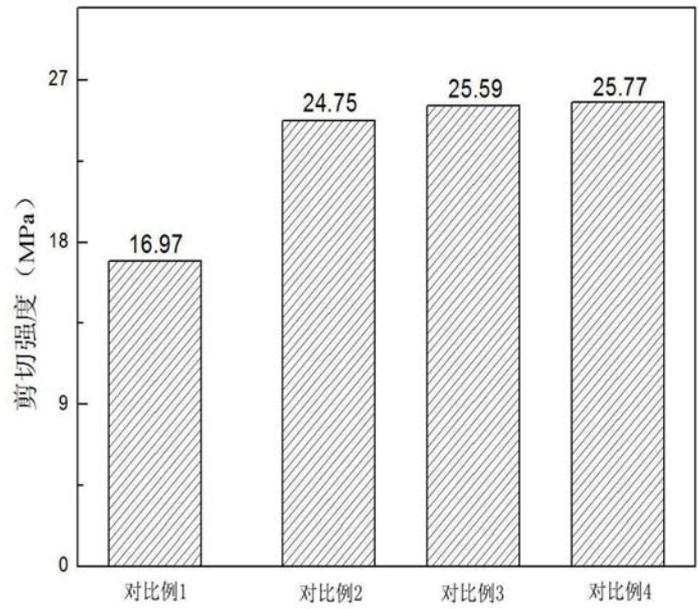


图5