



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114182254 A

(43) 申请公布日 2022.03.15

(21) 申请号 202111484466.X

(22) 申请日 2021.12.07

(71) 申请人 郑州大学

地址 450001 河南省郑州市高新区科学大道100号

(72) 发明人 于津苏

(74) 专利代理机构 大连东方专利代理有限责任公司 21212

代理人 徐华燊 李洪福

(51) Int. Cl.

C23C 24/10 (2006.01)

B23H 7/00 (2006.01)

B23K 26/352 (2014.01)

B33Y 40/20 (2020.01)

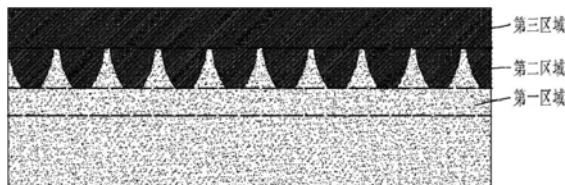
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种超结合强度的涂层及其制备方法

(57) 摘要

本发明提供一种超结合强度的涂层及其制备方法,方法包括如下步骤:提供具有待激光定向能量沉积表面的基体,所述基体待沉积表面上加工有仿生微结构,所述仿生微结构可以通过激光加工、3D打印和电火花加工等制造方法获得,加工的仿生微结构可以为楔形结构、凹圆弧结构、锯齿状结构、蜂窝状结构等,利用激光定向能量沉积技术在所述加工的仿生微结构表面制备激光定向能量沉积涂层,沉积材料可为铁基合金、镍基合金、镍基复合粉末等。本发明首先在基体表面加工仿生微结构,再利用激光定向能量沉积技术在仿生微结构表面制备涂层,可以低成本制备具有高冶金结合强度、高硬度且韧性好的高性能涂层。



1. 一种超结合强度的涂层的制备方法,其特征在于,包括如下步骤:

S1、提供金属基体;

S2、设计仿生微结构轮廓特征,通过加工技术在金属基体表面制备仿生微结构;

S3、在金属基体上进行仿生微结构不同深度的激光定向能量沉积实验,优化获得仿生微结构最优深度;

S4、根据提供的金属基体材质,选择优于金属基体表面性能的激光沉积粉材,优化沉积粉材的激光定向能量沉积工艺参数;

S5、根据激光定向能量沉积工艺参数,利用激光定向能量沉积技术在仿生微结构表面沉积激光沉积粉材,获得激光定向能量沉积涂层。

2. 根据权利要求1所述的超结合强度的涂层的制备方法,其特征在于,所述步骤S2中,仿生微结构包括:仿苍耳的楔形结构、仿向日葵的凹圆弧结构、仿蜜蜂窝的蜂窝状结构或仿倒金字塔结构仿生微结构。

3. 根据权利要求1或2所述的超结合强度的涂层的制备方法,其特征在于,所述步骤S2中,仿生微结构由以下至少一种加工技术加工:激光加工、3D打印或电火花加工技术;

在金属基体表面制备仿生微结构后,对仿生微结构表面进行处理,清除残余废屑。

4. 根据权利要求1所述的超结合强度的涂层的制备方法,其特征在于,所述步骤S3中,仿生微结构深度在微米数量级,且其边缘与金属基体平面夹角不考虑;

仿生微结构相邻单元之间距离大于微单元结构间的最大距离;

仿生微结构深度的选择依据为激光定向能量沉积涂层与基体形成良好冶金结合,无气孔和裂纹,内部组织分布均匀。

5. 根据权利要求1所述的超结合强度的涂层的制备方法,其特征在于,所述步骤S4中,激光沉积粉材包括:铁基合金、镍基合金或者异质元素增强镍基复合粉材;

所述激光沉积粉材在使用前置于干燥箱中进行恒温干燥,沉积复合粉材的母体粉材为镍基合金或铁基合金,沉积复合粉材中所含增强异质元素最佳重量比通过实验确定。

6. 根据权利要求5所述的超结合强度的涂层的制备方法,其特征在于,所述复合粉材包括如下材料中的至少一种:陶瓷/镍基复合材料、陶瓷/铁基复合材料、硬质颗粒/镍基复合材料、硬质颗粒/铁基复合材料、稀土元素/镍基复合材料或稀土元素/铁基复合材料。

7. 根据权利要求1所述的超结合强度的涂层的制备方法,其特征在于,所述步骤S5中,所述激光定向能量沉积技术中,在仿生微结构表面沉积所选择的激光定向能量沉积系统的激光发射器为连续激光器,激光定向能量沉积系统中送粉系统为同轴送粉系统;进行仿生微结构表面沉积前对基体进行预热处理。

8. 根据权利要求1或7所述的超结合强度的涂层的制备方法,其特征在于,所述步骤S5中,涂层直接沉积在金属基体的仿生微结构上。

9. 一种超结合强度的涂层,其特征在于,根据权利要求1-8任意一项权利要求所述的超结合强度的涂层的制备方法得到,为制备得到的激光定向能量沉积涂层,由三个区域组成:

在其基体上,第一区域为基体上的热影响区,其中第一区域材料为基体材料;

在其基体上,第二区域为基体上的仿生微结构与激光定向能量沉积涂层,其中第二区域材料为基体材料与沉积复合材料;

在其基体上,第三区域为金属基体上制备的激光定向能量沉积涂层,其中第三区域材

料为沉积复合材料。

10. 根据权利要求9所述的超结合强度的涂层,其特征在于,所述第二区域为提高涂层与基体结合强度的结构化层,所述结构化层内包含软基体金属区域和硬涂层区域,实现软基体与硬涂层过渡,降低结合区域出现缺陷的敏感性;

所述第三区域为激光沉积复合涂层,为提高基体表面机械性能的关键层,其中所述激光沉积复合涂层包括如下复合材料中的至少一种:陶瓷/镍基复合材料、硬质颗粒/镍基复合材料、硬质颗粒/铁基复合材料、稀土元素/镍基复合材料或稀土元素/铁基复合材料。

## 一种超结合强度的涂层及其制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及表面强化技术领域,具体而言,尤其涉及一种超结合强度的涂层及其制备方法。

### 背景技术

[0002] 随着科技的发展,航空发动机、全断面掘进机、大型燃气轮机等高端装备的叶片、齿轮、轴等关键零件在苛刻工况环境下造成的磨损、疲劳破坏、腐蚀等已经成为引起零件失效亟需解决的难题,同时也造成巨大的经济损失和资源浪费。零件表面性能强化是提高其使用寿命的重要途径之一。激光定向能量沉积是获得高性能涂层的先进技术之一。获得兼具高硬度、高强度、良好韧性、良好冶金结合界面质量对于实现零件表面强化至关重要。强度的提高意味着牺牲韧性,且高硬度涂层因与基体性能差异容易出现径向裂纹、分层,降低涂层服役过程中的稳定性,限制了激光定向能量沉积涂层在零件表面强化上的应用。通过设计优化涂层材料成分、进行梯度涂层设计、热处理等方法可以缓解这些缺陷,然而又会引来新的问题,如:弹塑性、强化成本提高、增加制造工艺过程的复杂性等。基于生物仿生学,本发明利用激光加工、3D打印和电火花等加工方法在基体表面进行仿生微结构加工,以提高涂层与基体之间的冶金结合强度。在微结构上制备激光定向能量沉积涂层,增加了涂层与基体冶金结合面积,同时软硬度基体与高硬度涂层的规律交替出现,提高了涂层结合强度,降低了裂纹敏感性,同时软基体与硬涂层的结合界面上形成一定程度的互锁结构。因此,该方法可以在高端装备关键零件表面获得冶金结合质量好、硬度高且兼具良好韧性的涂层,提高高端装备关键零件的工作稳定性及使用寿命。

### 发明内容

[0003] 根据上述提出的现有技术可提高强度但牺牲了韧性,且高硬度涂层因与基体性能差异容易出现径向裂纹、分层,降低涂层服役过程中的稳定性,限制了激光定向能量沉积涂层在零件表面强化上的应用;虽通过设计优化涂层材料成分、进行梯度涂层设计、热处理等方法可以缓解这些缺陷,然而又会引来新的问题,如:弹塑性、强化成本提高、增加制造工艺过程的复杂性等的技术问题,而提供一种超结合强度的涂层及其制备方法。本发明主要基于生物仿生学,利用激光加工、3D打印和电火花等加工方法在基体表面进行仿生微结构加工,以提高涂层与基体之间的冶金结合强度。在微结构上制备激光定向能量沉积涂层,增加了涂层与基体冶金结合面积,同时软硬度基体与高硬度涂层的规律交替出现,提高了涂层结合强度,降低了裂纹敏感性,同时软基体与硬涂层的结合界面上形成一定程度的互锁结构。因此,本发明方法可以在高端装备关键零件表面获得冶金结合质量好、硬度高且兼具良好韧性的涂层,提高高端装备关键零件的工作稳定性及使用寿命。

[0004] 本发明采用的技术手段如下:

[0005] 一种超结合强度的涂层的制备方法,包括如下步骤:

[0006] S1、提供金属基体;

- [0007] S2、设计仿生微结构轮廓特征,通过加工技术在金属基体表面制备仿生微结构;
- [0008] S4、在金属基体上进行仿生微结构不同深度的激光定向能量沉积实验,优化获得仿生微结构最优深度;
- [0009] S5、根据提供的金属基体材质,选择优于金属基体表面性能的激光沉积粉材,优化沉积粉材的激光定向能量沉积工艺参数;
- [0010] S5、根据激光定向能量沉积工艺参数,利用激光定向能量沉积技术在仿生微结构表面沉积激光沉积粉材,获得激光定向能量沉积涂层。
- [0011] 进一步地,所述步骤S2中,仿生微结构包括:仿苍耳的楔形结构、仿向日葵的凹圆弧结构、仿蜜蜂窝的蜂窝状结构或仿倒金字塔结构等仿生微结构。
- [0012] 进一步地,所述步骤S2中,仿生微结构由以下至少一种加工技术加工:激光加工、3D打印或电火花加工技术等制造方法;
- [0013] 在金属基体表面制备仿生微结构后,对仿生微结构表面进行处理,清除残余废屑。
- [0014] 进一步地,所述步骤S3中,仿生微结构深度在微米数量级,且其边缘与金属基体平面夹角不考虑;
- [0015] 仿生微结构相邻单元之间距离大于微单元结构间的最大距离;
- [0016] 仿生微结构深度的选择依据为激光定向能量沉积涂层与基体形成良好冶金结合,无气孔和裂纹,内部组织分布均匀。
- [0017] 进一步地,所述步骤S4中,激光沉积粉材包括:铁基合金、镍基合金或者异质元素增强镍基复合粉材;
- [0018] 所述激光沉积粉材在使用前置于干燥箱中进行恒温干燥,沉积复合粉材的母体粉材为镍基合金或铁基合金,沉积复合粉材中所含增强异质元素最佳重量比通过实验确定。
- [0019] 进一步地,所述复合粉材包括如下材料中的至少一种:陶瓷/(镍基、铁基)复合材料、硬质颗粒/(镍基、铁基)复合材料或稀土元素/(镍基、铁基)复合材料。
- [0020] 进一步地,所述步骤S5中,所述激光定向能量沉积技术中,在仿生微结构表面沉积所选择的激光定向能量沉积系统的激光发射器为连续激光器,激光定向能量沉积系统中送粉系统为同轴送粉系统;进行微结构表面沉积前对基体进行预热处理。
- [0021] 进一步地,所述步骤S5中,涂层直接沉积在金属基体的仿生微结构上。
- [0022] 本发明还提供了一种超结合强度的涂层,根据上述所述的超结合强度的涂层的制备方法得到,为制备得到的激光定向能量沉积涂层,由三个区域组成:
- [0023] 在其基体上,第一区域为基体上的热影响区,其中第一区域材料为基体材料;
- [0024] 在其基体上,第二区域为基体上的仿生微结构与激光定向能量沉积涂层,其中第二区域材料为基体材料与沉积复合材料;
- [0025] 在其基体上,第三区域为金属基体上制备的激光定向能量沉积涂层,其中第三区域材料为沉积复合材料。
- [0026] 进一步地,所述第二区域为提高涂层与基体结合强度的结构化层,所述结构化层内包含软基体金属区域和硬涂层区域,实现软基体与硬涂层过渡,降低结合区域出现缺陷的敏感性;
- [0027] 所述第三区域为激光沉积复合涂层,为提高基体表面机械性能的关键层,其中所述激光沉积复合涂层包括如下复合材料中的至少一种:陶瓷/镍基复合材料、硬质颗粒/(镍

基、铁基)复合材料或稀土元素/(镍基、铁基)复合材料。

[0028] 较现有技术相比,本发明具有以下优点:

[0029] 1、本发明提供的超结合强度的涂层及其制备方法,基于生物仿生学,利用激光加工、3D打印和电火花等加工方法在基体表面进行仿生微结构加工,以提高涂层与基体之间的冶金结合强度。在微结构上制备激光定向能量沉积涂层,增加了涂层与基体冶金结合面积,同时软硬度基体与高硬度涂层的规律交替出现,提高了涂层结合强度,降低了裂纹敏感性,同时软基体与硬涂层的结合界面上形成一定程度的互锁结构。因此,本发明方法可以在高端装备关键零件表面获得冶金结合质量好、硬度高且兼具良好韧性的涂层,提高高端装备关键零件的工作稳定性及使用寿命。

[0030] 2、本发明提供的超结合强度的涂层及其制备方法,通过提供具有待激光定向能量沉积表面的基体,所述基体待沉积表面上加工有仿生微结构,所述仿生微结构可以通过激光加工、3D打印和电火花加工等制造方法获得,所述加工的仿生微结构可以为楔形结构、凹圆弧结构、锯齿状结构、蜂窝状结构等,从而利用激光定向能量沉积技术在所述加工的仿生微结构表面制备激光定向能量沉积涂层,所述沉积材料可为铁基合金、镍基合金、镍基复合粉末等。本发明首先在基体表面加工仿生微结构,再利用激光定向能量沉积技术在仿生微结构表面制备涂层,可以低成本制备具有高冶金结合强度、高硬度且韧性好的高性能涂层。

[0031] 综上,应用本发明的技术方案能够解决现有技术可提高强度但牺牲了韧性,且高硬度涂层因与基体性能差异容易出现径向裂纹、分层,降低涂层服役过程中的稳定性,限制了激光定向能量沉积涂层在零件表面强化上的应用;虽通过设计优化涂层材料成分、进行梯度涂层设计、热处理等方法可以缓解这些缺陷,然而又会引来新的问题,如:弹塑性、强化成本提高、增加制造工艺过程的复杂性等的问题。

[0032] 基于上述理由本发明可在零件表面强化等领域广泛推广。

## 附图说明

[0033] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图做以简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0034] 图1为本发明具有苍耳结构的微楔形结构基体金属三维示意图。

[0035] 图2为本发明具有向日葵结构的微圆凹坑结构基体金属三维示意图。

[0036] 图3为本发明具有蜂窝结构的微六边形结构的基体金属三维示意图。

[0037] 图4为本发明在楔形微结构表面制备激光沉积涂层示意图。

[0038] 图5为本发明在圆凹坑微结构表面制备激光沉积涂层示意图。

[0039] 图6为本发明在正六边形微结构表面制备激光沉积涂层示意图。

## 具体实施方式

[0040] 需要说明的是,在不冲突的情况下,本发明中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。下面将参考附图并结合实施例来详细说明本发明。

[0041] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例

中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。以下对至少一个示例性实施例的描述实际上仅仅是说明性的,决不作为对本发明及其应用或使用的任何限制。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0042] 需要注意的是,这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式,而非意图限制根据本发明的示例性实施方式。如在这里所使用的,除非上下文另外明确指出,否则单数形式也意图包括复数形式,此外,还应当理解的是,当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时,其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。

[0043] 除非另外具体说明,否则在这些实施例中阐述的部件和步骤的相对布置、数字表达式和数值不限制本发明的范围。同时,应当清楚,为了便于描述,附图中所示出的各个部分的尺寸并不是按照实际的比例关系绘制的。对于相关领域普通技术人员已知的技术、方法和设备可能不作详细讨论,但在适当情况下,所述技术、方法和设备应当被视为授权说明书的一部分。在这里示出和讨论的所有示例中,任向具体值应被解释为仅仅是示例性的,而不是作为限制。因此,示例性实施例的其它示例可以具有不同的值。应注意:相似的标号和字母在下面的附图中表示类似项,因此,一旦某一项在一个附图中被定义,则在随后的附图中不需要对其进行进一步讨论。

[0044] 如图所示,本发明提供了一种超结合强度的涂层的制备方法,为一种提高涂层与基体结合强度的制造方法,所述方法包括如下步骤:

[0045] 一提供金属基体;

[0046] 一设计仿生微结构轮廓特征,所述仿生微结构包括:仿苍耳的楔形结构、仿向日葵的凹圆弧结构、仿蜜蜂窝的蜂窝状结构,或仿倒金字塔结构等仿生微结构;

[0047] 一根据提供所述金属基体材质,选择优于基体表面性能的激光沉积粉材,所述激光沉积粉材包括:铁基合金、镍基合金或者异质元素增强镍基复合粉材,优化所述沉积粉材激光沉积工艺参数;

[0048] 一利用所述激光定向能量沉积工艺参数在所述基体上进行所设计仿生微结构不同深度的激光定向能量沉积实验,优化获取所述微结构深度;

[0049] 一在所述基体表面制备仿生微结构,所述微结构可以由以下至少一种技术加工:激光加工、3D打印和电火花加工等制造方法,利用激光定向能量沉积技术在所述微结构表面制备涂层。

[0050] 作为优选的实施方式,其中所述设计的微结构深度在微米数量级且其边缘与基体平面夹角不考虑。

[0051] 作为优选的实施方式,其中所述复合粉材包括如下材料中的至少一种:陶瓷/(镍基、铁基)复合材料、硬质颗粒/(镍基、铁基)复合材料、稀土元素/(镍基、铁基)复合材料。

[0052] 作为优选的实施方式,其中在所述金属基体表面制备仿生微结构后,对所述微结构表面进行处理,清除残余废屑。

[0053] 作为优选的实施方式,其中所述微结构深度的选择依据为激光定向能量沉积涂层与基体形成良好冶金结合,无气孔和裂纹,内部组织分布均匀。

[0054] 作为优选的实施方式,其中所述微结构相邻单元之间距离大于微单元结构间的最

大距离。

[0055] 作为优选的实施方式,其中所述沉积粉材在使用前需在干燥箱中恒温干燥,所述沉积复合粉材的母体粉材为镍基合金或铁基合金,所述沉积复合粉材中所含增强异质元素最佳重量比通过实验确定。

[0056] 作为优选的实施方式,其中所述激光定向能量沉积在所述微结构表面沉积所选择激光沉积系统的激光发射器为连续激光器,所述激光定向能量沉积系统中送粉系统为同轴送粉系统;进行所述仿生微结构表面沉积前需要对基体进行预热处理。

[0057] 作为优选的实施方式,其中所述涂层直接沉积在所述金属基体的仿生微结构上。

[0058] 本发明还提供了一种通过超结合强度的涂层的制备方法制备得到的超结合强度的涂层,即制备得到的激光定向能量沉积涂层,其中在所述基体上制备的涂层包含有三个区域组成:

[0059] 一在其所述基体上第一区域为基体上的热影响区,其中所述第一区域材料为基体材料;

[0060] 一在其所述基体上第二区域为基体上的仿生微结构与所述激光定向能量沉积涂层,其中所述第二区域材料为基体材料与所述沉积复合材料;

[0061] 一在其所述基体上第三区域为基体金属上制备的所述激光定向能量沉积涂层,其中所述第三区域材料为所述沉积复合材料。

[0062] 作为优选的实施方式,其中所述第二区域是提高涂层与基体结合强度的结构化层,所述第二层内包含软基体金属区域和硬涂层区域,实现软基体与硬涂层过渡,降低了结合区域出现缺陷的敏感性;

[0063] 作为优选的实施方式,其中所述第三区域是激光沉积复合涂层,是提高基体表面机械性能的关键层,其中所述激光沉积复合涂层包括如下复合材料中的至少一种:陶瓷/镍基复合材料、硬质颗粒/(镍基、铁基)复合材料、稀土元素/(镍基、铁基)复合材料。

[0064] 如图1-3所示,分别为采用本发明方法制备得到的具有苍耳结构的微楔形结构基体金属三维示意图、具有向日葵结构的微圆凹坑结构基体金属三维示意图以及具有蜂窝结构的微六边形结构的基体金属三维示意图。如图4-6所示,分别为采用本发明方法在楔形微结构表面制备激光沉积涂层示意图、在圆凹坑微结构表面制备激光沉积涂层示意图以及在正六边形微结构表面制备激光沉积涂层示意图。

[0065] 实施例1

[0066] 一种提高涂层与基体结合强度的制造方法,在轴表面制备一种与基体冶金结合质量良好且兼具优异机械性能的涂层,具体包括如下步骤:

[0067] a、提供圆柱形基体(45#钢);

[0068] b、将轴装夹在工作台上,采用激光加工制造方法,利用脉冲激光在轴表面加工仿生微结构;

[0069] 具体而言:所述轴表面仿生微结构需进行实验获得,步进电机控制轴的旋转运动,根据实验过程中脉冲激光最佳工作距离调整轴待加工表面与激光光斑聚焦点之间相对位置,根据设计的仿生微结构分别控制步进电机以及激光器的运动;

[0070] 具体而言:所述轴加工过程中仅控制其旋转运动,所述控制轴旋转运动的工作台安装在脉冲激光加工平台上,所述轴加工过程中通过控制脉冲激光加工平台z轴升降实现



轴表面径向加工,通过控制脉冲激光加工平台沿着轴轴向运动并配合着轴旋转运动,实现轴表面仿生微结构加工;

[0071] 具体而言:所述仿生微结构至少包括以下中的一种:仿苍耳的楔形结构、仿向日葵的凹圆弧结构、仿蜜蜂窝的蜂窝状结构,或仿倒金字塔结构等仿生微结构;在所述基板上设计不同仿生微结构深度的激光定向能量沉积实验,优化确定微结构最优深度;

[0072] 具体而言:其中所述设计的仿生微结构深度在微米数量级且其边缘与基体平面夹角不考虑,所述微结构为中心对称图形;

[0073] 具体而言:其中所述仿生微结构深度根据实验确定,所述仿生微结构相邻单元之间距离大于微单元结构的最大距离;

[0074] 具体而言:其中所述仿生微结构深度的选择依据为沉积涂层与基体形成良好冶金结合,无气孔和裂纹,内部组织分布均匀;

[0075] c、其中在所述轴表面制备仿生微结构后,对所述仿生微结构表面进行处理,清除仿生微结构内部残余废屑以及加工表面的变质层;

[0076] d、根据提供所述轴材质,选择优于轴表面性能的激光沉积粉末,所述激光沉积粉末包括:铁基合金、镍基合金或者异质元素增强镍基复合材料,优化所述沉积粉末激光定向能量沉积工艺参数;

[0077] 具体而言:其中所述复合粉末包括如下材料中的至少一种:陶瓷/(镍基、铁基)复合材料、硬质颗粒/(镍基、铁基)复合材料、稀土元素/(镍基、铁基)复合材料;

[0078] 具体而言:其中所述激光沉积粉末在使用前需在干燥箱中恒温干燥以去除涂层中的水分,激光沉积复合粉末的母体粉末为镍基合金,所述激光沉积复合粉末中所含增强异质元素重量比根据实验确定;

[0079] e、轴(表面已加工出仿生微结构)由步进电机控制进行旋转运动,并装夹在激光沉积系统的工作平台上,并完成激光沉积实验准备工作;

[0080] f、利用激光定向能量沉积技术在所述微结构表面沉积所述激光沉积复合粉末;

[0081] 具体而言:其中所述激光定向能量沉积技术在所述仿生微结构表面沉积所选择激光沉积系统的激光发射器为连续激光器,所述激光定向能量沉积系统中送粉系统为同轴送粉系统,激光头由六自由度库卡机器人控制其实现加工运动,所述微结构表面沉积前需要对基体进行预热处理;

[0082] 具体而言:实验过程中,轴表面距离沉积头喷嘴间距为激光加工最佳间距;

[0083] 具体而言:实验过程中,轴由步进电机控制为旋转运动,激光头由库卡机器人控制为直线运动,实际沉积轨迹为在轴表面的螺旋运动,螺旋间距为最佳搭接间距;

[0084] 具体而言:其中所述激光沉积涂层直接沉积在所述轴的微结构上;

[0085] 具体而言:其中在所述轴表面进行具有楔形微结构表面沉积时,激光头旋转一个微结构倾斜角度,保证涂层与微结构表面更好的冶金结合。

[0086] 采用本发明方法制备的所述激光定向能量沉积涂层包含有三个区域组成:

[0087] 一在其所述轴上第一区域为轴基体上的热影响区,其中所述第一区域材料为轴材料,

[0088] 一在其所述轴上第二区域为轴上的仿生微结构与所述激光沉积涂层,其中所述第二区域材料为轴棒料与所述激光沉积复合材料,

[0089] 一在其所述基体上第三区域为轴上制备的所述激光沉积涂层,其中所述第三区域材料为所述激光沉积复合材料。

[0090] 其中所述第二区域是提高涂层与轴结合强度的结构化层,所述第二层内包含轴表面材料和涂层材料,实现轴(软基体)与硬涂层的过渡,降低了结合区域出现缺陷的敏感性;

[0091] 所述的激光定向能量沉积涂层,其中所述第三区域是激光沉积复合涂层,是提高轴表面机械性能的关键层,其中所述激光沉积复合涂层包括如下材料中的至少一种制备得到:陶瓷/镍基复合材料、硬质颗粒/(镍基、铁基)复合材料、稀土元素/(镍基、铁基)复合材料。

[0092] 最后应说明的是:以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。

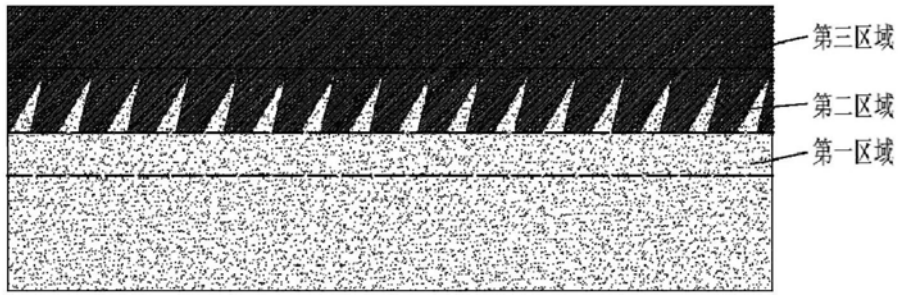


图1

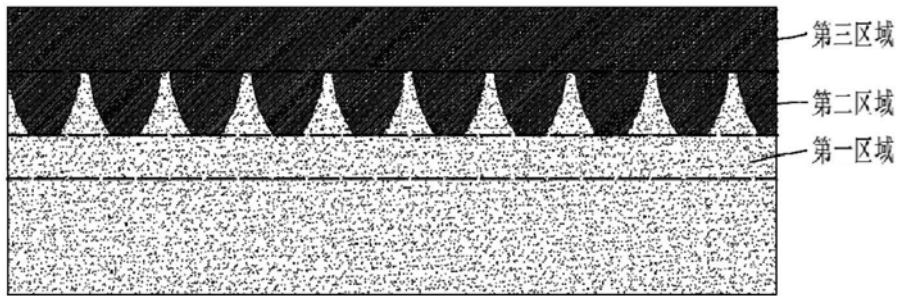


图2

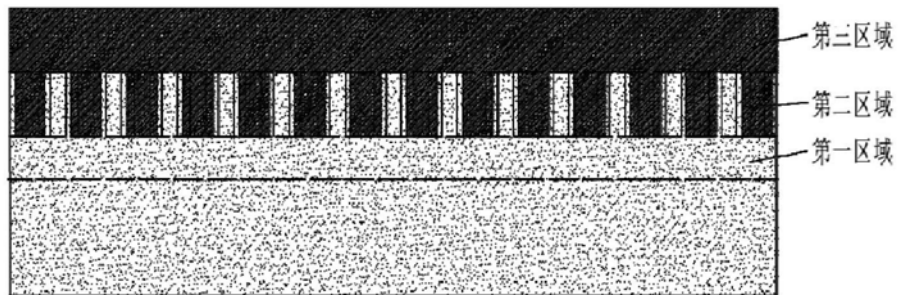


图3

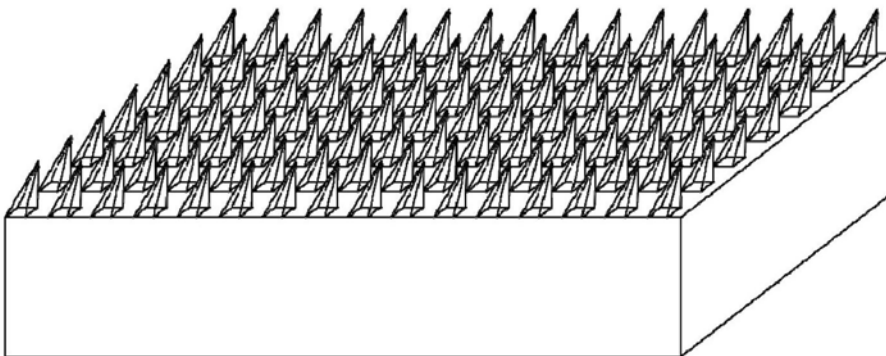


图4

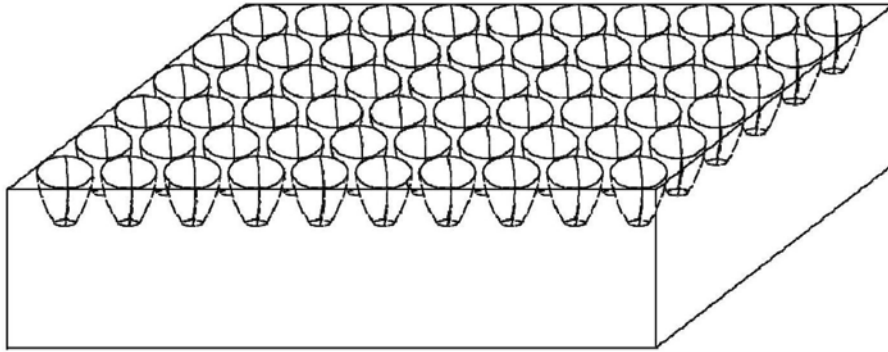


图5

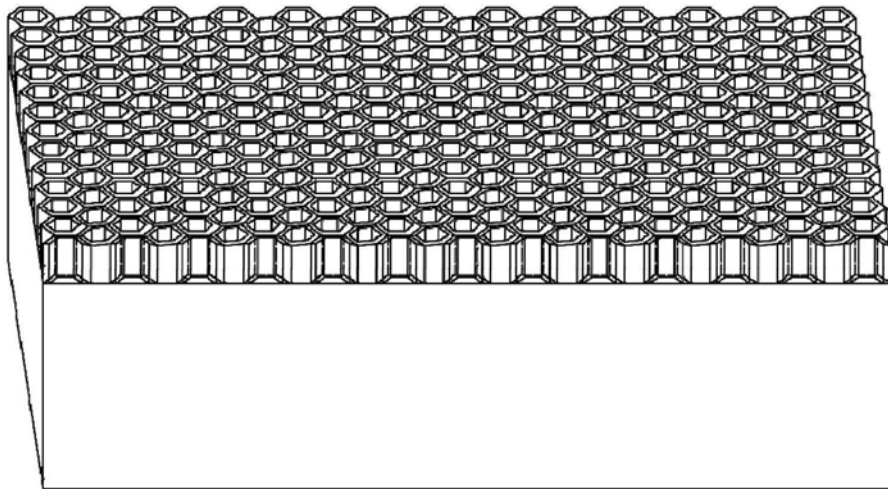


图6