[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
C23C 4/04 (2006.01)
C23C 4/12 (2006.01)
B05C 5/04 (2006.01)

[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200480022373.3

[43] 公开日 2006 年 9 月 13 日

[11] 公开号 CN 1833044A

[22] 申请日 2004.7.29
[21] 申请号 200480022373.3
[30] 优先权
[32] 2003. 7.31 [33] US [31] 10/631,260
[86] 国际申请 PCT/US2004/024260 2004.7.29
[87] 国际公布 WO2005/012588 英 2005.2.10
[85] 进入国家阶段日期 2006.2.5
[71] 申请人 普莱克斯 S·T·技术有限公司
地址 美国康涅狄格州
[72] 发明人 T·A·泰勒 J·E·杰克逊

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
代理人 韦欣华 段晓玲

权利要求书 2 页 说明书 17 页 附图 4 页

[54] 发明名称

遮蔽喷涂设备中流出物的方法

[57] 摘要

本发明提供环绕热喷涂设备流出物的独特气体遮蔽或屏蔽，其能有效地延长热喷涂设备和正被涂覆表面之间的工作距离或离开距离。 本发明提供在长的离开距离时喷涂材料(包括陶瓷材料和反应性材料)的方法，和使用加热的气体遮蔽来控制正被沉积的流出物的温度的方法。

1. 一种遮蔽热喷涂设备流出物的方法，包括加热遮蔽气体的环形源至高于环境温度的温度，所述遮蔽气流基本以共轴的方式环绕所述流出物，所述遮蔽气体的环形源在垂直于所述流出物的平面内，从而提供平行于流出物的所述气流。

2. 权利要求 1 的方法，其中所述环形源包括基本环绕所述流出物的第一气体流的第一内部共轴部分和环绕所述第一气体的所述内部流的第二气体流的第二共轴外部部分，并且所述第二流被加热至高于环境温度的温度，所述遮蔽气体的环形源在垂直于所述流出物的平面内，从而提供平行于流出物的所述气流。

3. 权利要求 1 的方法，其中所述遮蔽气体的温度被加热到至少 500 ℉，其在所述遮蔽流的源下游 13 英寸处的流圆锥部分的中心线上测得。

4. 权利要求 1 的方法，其中遮蔽气体为包括燃烧火焰和燃烧产物的可燃气体，或所述遮蔽气体为自所述流出物流的源起具有至少一层流段的流。

5. 权利要求 1 的方法，其中所述流出物包括反应性材料或氧化物材料。

6. 权利要求 1 的方法，其中所述流出物被沉积到基材上形成涂层或每英寸具有约 20 至约 200 个垂直分段裂纹的涂层。

7. 权利要求 6 的方法，其中使用第一组遮蔽气体条件沉积第一流出物的第一层，并使用相同或不同组的遮蔽气体条件用相同或不同的流出物重复该方法至少一次得到多重涂层。

8. 权利要求 1 的方法，其中所述遮蔽气体的总气流与所述热喷涂设备的总气流的比在约 0.05 和约 2.0 之间。

9. 权利要求 6 的方法，其中所述基材选自燃气轮机、柴油机和火箭发动机部件。

10. 权利要求 7 的方法，其中所述第一层为金属涂覆层，所述后面的层为陶瓷涂覆层或混合金属-陶瓷涂覆层，任选地，所述层选自氧化锆、氧化钇、氧化铪、氧化铝、氧化铬、NiCrAlY、CoCrAlY、NiCoCrAlY、CoNiCrAlY、锆基陶瓷、陶瓷和它们的混合物。

11. 权利要求 1 的方法，其中所述加热的遮蔽气体包括含碳气体

和氧化剂的可燃气体材料，其中所述遮蔽气体的碳/氧比在约 0.6 和约 1.0 之间。

12. 一种热气体遮蔽设备，具有适合于设备流出物的出口端，该设备包括环绕所述热喷涂设备出口端的喷嘴环，每个所述喷嘴具有由封闭壁限定的孔，封闭壁具有恰好布置在设备出口端之前的适合于从出口端引导遮蔽气体至少一层流段的直段，所述遮蔽气体适合于共轴环绕流出物，或气体遮蔽热喷涂设备包括环绕所述设备的出口端的喷嘴环；输送燃料气和氧化气体到所述喷嘴的装置；点燃离开所述喷嘴的所述燃料和氧化气体的装置，并适合于输送可燃气体和氧化气体形成燃烧火焰和燃烧产物的流，以便离开等离子喷涂设备的流出物被所述燃烧火焰和燃烧产物的所述流基本共轴环绕。

遮蔽喷涂设备中流出物的方法

发明领域

本发明一般涉及热喷涂领域和利用被加热的遮蔽气体遮蔽热喷涂流出物，从而能以延长的离开距离（standoff）进行流出物喷涂和/或提供可燃遮蔽气体来有效地包围流出物以延长离开距离。

发明背景

在热喷涂沉积中，粉末、线或棒形式的材料被加热至其熔点附近或刚好超过，熔化或接近熔化的颗粒在撞击到要被涂覆的表面即基材上前在气流中加速至高速。撞击时，颗粒流入到薄的层状板片（splat）上，并快速凝固和冷却。涂层由许多层板片构成。可使用热喷涂设备沉积金属、陶瓷、金属陶瓷和一些聚合物材料。各种热喷涂设备包括等离子、爆炸喷枪、高速氧-燃料、光丝弧和火焰喷涂。通常通过在多程中相对于要被涂覆的零件移动热喷涂设备在表面上均匀分布材料来产生涂层。这有助于控制正被涂覆的表面的温度和涂层中的残余应力。

在等离子喷涂沉积中，气体（通常基于氩气、氮气、氢气和/或氦气）在其流过等离子喷炬中的喷嘴时被电弧电离，形成高温、高速、部分电离的等离子流出物。通常为粉末形式的涂覆材料被喷射到等离子流出物中，被加热至接近或刚好超过其熔点，熔化或接近熔化的颗粒于撞击到要被涂覆的表面即基材上前在气流中加速至高速。撞击时，颗粒流入到薄的层状板片上，并快速凝固和冷却。涂层由许多层板片构成。可使用热喷涂设备沉积金属、陶瓷、金属陶瓷和一些聚合物材料。通常通过在多程中相对于要被涂覆的零件移动等离子喷涂设备在表面上均匀分布材料来产生涂层。这有助于控制正被涂覆的表面的温度和涂层中的残余应力。

决定涂层微观结构和性能的最重要参数包括颗粒温度、颗粒速度、颗粒在沉积过程中与环境反应的程度、沉积速度、撞击角、和基材温度以及先前沉积的涂层。颗粒被热喷涂设备的气态流出物加热（光丝弧方法除外）和加速，因此达到的温度和速度部分地为在流出物中停留时间的函数。对于等离子喷涂，颗粒被气态流出物加热和加速，因此达到的温

度和速度部分地为在流出物中停留时间的函数。停留时间又由颗粒速度和热喷涂设备出口与基材之间的距离（称为离开距离）限定。热喷涂设备流出物的温度和速度在设备出口处降低相当快。因此，存在最佳离开距离，其允许足以加热和加速颗粒的距离或时间，但不会大到流出物和颗粒温度和速度开始明显降低。撞击角对涂层的微观结构和性能有很大影响。通常，最佳角度为90度或垂直于基材。当角度变小时，微观结构变得更无序和更不致密。这种品质下降出现的速度部分地为撞击颗粒的速度和温度的函数。当热喷涂部件具有复杂形状时，有效离开距离和对沉积角度的敏感性尤其重要。热喷涂和等离子喷涂本质上为一类瞄准过程（sight process），喷涂设备的大小和正被涂覆的零件的形状限制喷涂设备能与零件靠多近并仍保持允许的沉积角度。因此可能不能使设备足够靠近表面以在足够的温度、速度和撞击角度下沉积颗粒产生具有合适微观结构的涂层。

涂层中的残余应力是为了最佳结果而必须控制的另一项性能。在大多数情况下，需要低的残余应力，但在一种情况下，可控制地操纵面内拉应力以产生长的垂直全厚度分段裂纹（Taylor，美国专利 5073433）。残余应力起因于多种因素的结合。一个是正被沉积的涂层材料当从凝固温度冷却时的收缩。其它因素可包括当颗粒撞击涂层时的喷射类机理以及涂层和基材在热喷涂设备横穿过零件移动时的温度周期变化。另一涂层应力源涉及到涂覆过程中吸热和散热的速率和程度。这些通过各种手段控制，包括涂覆开始前给予基材的预热水平和涂覆过程中使用的辅助冷却量。实现和控制预热可能是非常困难的，尤其当涂覆大的或复杂的形状时。还一个主要的涂层应力源是热喷涂设备横过基材时层削减的厚度。控制这种层厚度的因素有很多，并包括喷涂速度（每单位时间喷涂的粉末克数）、离开距离和基材上方喷炬的扫频速率。如果为了较高的生产速度保持高的喷涂速度，并且离开距离由于上述问题而被基本固定的话，则控制涂层中应力的大部分负担都落在基材上方喷炬相对扫频速率也称为表面速度的控制上。为了减小应力，提高了表面速度，并可达到高速度如10000英寸/分钟。对于涂覆简单形状，可达到这些速度，但对于复杂形状不行，如需要机器人机械的涡轮叶片，其只能获得级别为1000英寸/分钟的表面速度来优化离开距离和涂覆过程中的沉积角度。如果可增加离开距离并仍保持所需的涂层性能，则可适当地降低表面速度。

热喷涂设备的流出物即等离子喷炬在离开热喷涂设备时立即开始与

周围的环境气体通常是空气混合。如果反应性材料被沉积，如大多数金属、聚合物材料，和在较少程度上为碳化物和氮化物，与流出物混合的空气中的氧可氧化材料，显著改变涂层的性能。通常，离开距离越长，氧化程度越大。为避免这种氧化，存在两种主要方法。一种是在惰性气体低压下在真空室中沉积涂层。在这种情况下，惰性气体通常是氩气而非空气被引入到流出物中，因而没有氧化发生。这种技术已被很好地发展用于等离子喷涂沉积，并是非常有效的。由于低压环境，它具有较长离开距离的附加益处。但是，这种系统的投资成本和运行成本非常高，并且生产率低。替代方法是提供环绕流出物的共轴的惰性气体遮蔽或屏蔽。按照这种方式，惰性气体被引入到热喷涂设备的流出物中，并防止了涂层材料的氧化。

一种有效的气体遮蔽由 Jackson 发明，美国专利 3470347。该发明提供了环绕等离子喷炬流出物的均匀湍流惰性气体（通常是氩气）流。它在防止沉积过程中反应性材料的氧化方面非常有效，但它具有有限的离开距离能力。因此，当涂覆具有复杂形状的零件如具有深嵌条或突起的零件时，可能不能保持热喷涂设备足够靠近表面以保持有效的遮蔽。

另一发明通过在热喷涂喷嘴内引入垂直于热喷涂流出物的惰性气体流或通过平行于流出物排列的多孔介质到热喷涂设备的连接提供分层气体遮蔽，从而惰性气体对流出物流的相互作用将防止气体和/或蒸汽从周围环境渗入（M.S.Nowotarski 等人，美国专利 5486383）。

热喷涂涂层众多重要应用领域中的一个为在燃气轮机多个部件上的热屏障。用于飞机推进和用于地面发电的现代燃气轮机发动机继续推进到更高的操作温度，因为利用更高的温度可提高整体效率。一些燃气轮机在这样高的温度下运行，即直接加热的金属部件如燃烧器、叶片和翼将具有非常短的寿命，如果不提供保护陶瓷涂层的话。陶瓷涂层，称为热屏障涂层（TBC），为绝热体，并用于降低基材温度。

根据为涂层和涂覆方法选择的材料，有多种热屏障涂层的变型方案。大多数 TBC 包括施加在金属基材部件上的金属粘合层，和在粘合层顶部上的陶瓷层，陶瓷层通常基于氧化锆，因为它的热导率非常低。涂层的氧化锆层随具体要求而变化；例如从在一些涡轮叶片和翼上的约 0.25mm（10 密耳）到燃烧器上的超过 2.5mm（100 密耳）或更高。涂层可降低基材温度 200 华氏度（111 摄氏度）或更高，取决于热和冷侧边界条件。在叶片和翼上，TBC 必须保护机翼，和通常连接平台或端壁。在燃烧器上，

TBC 被施加到内部表面上。可通过各种方法施加金属粘合层，包括热喷涂方法（例如有罩的空气等离子炬、真空室等离子炬、爆炸喷枪或高速氧燃料喷枪）、气体扩散（例如包埋渗铝）和高级的电镀方法。可使用各种方法施加氧化锆陶瓷层，包括热喷涂和电子束物理气相沉积（EB-PVD）。

在复杂形状如涡轮叶片或翼上施加热喷涂涂层中，存在影响涂层质量或有时甚至施加涂层可能性的几个问题。离开距离就是这样一个问题，因为它影响涂层的微观结构，包括它的孔隙率和微裂纹。控制的孔隙率和微裂纹对 TBC 中氧化层的耐热冲击和热疲劳是必不可少的。零件的形状包括突起（如翼平台边）设定了可达到的最小离开距离，其对使用现有技术的热喷涂设备和遮蔽获得所需的微观结构来说太长。

大多数 TBC 金属粘合层包含一种或多种非常有活性的元素如铝或钇，以在使用中提供充分的耐蚀性，它们必须以这样的方式被沉积，即这些元素在沉积过程中不会被氧化（内部氧化）。如上所述，共轴惰性气体遮蔽（例如 Jackson，美国专利 3470347）为实现此的非常有效的手段。这种方法是比真空或低压等离子喷涂更方便和成本更低的涂覆反应性金属涂层如 NiCoCrAlY 的方法。但是，它只对相对短的离开距离有效，因此对于一些复杂零件如一些涡轮叶片和翼来说可能不是非常有效。

总之，对于沉积反应性材料如大多数金属而不会由于沉积过程中的氧化而明显劣化，热喷涂方法对本领域技术人员来说是已知的。但是，这些技术涉及在真空室中的非常昂贵的沉积或使用具有有限离开距离效率的惰性气体遮蔽。此外，沉积具有所需微观结构的陶瓷涂层的热喷涂方法是已知的，但同样具有有限的离开距离能力。还难以充分控制涂覆过程中基材和涂层吸热和散热的量和速度，尤其在涂覆大的或复杂形状时。

本发明的一个目的是提供环绕热喷涂设备流出物的新型气体遮蔽或屏蔽。

本发明的另一个目的是通过使用所述独特的气体遮蔽延长热喷涂设备和被涂覆表面之间的有效工作距离或离开距离。

本发明的另一个目的是使用由内部惰性气体遮蔽和外部气体遮蔽组成的独特双重气体遮蔽来热喷涂反应性材料的方法。

本发明的还一个目的是提供使用本发明的方法涂覆的制品。

本发明的再一个目的是提供独特的气体遮蔽或屏蔽，其包括环绕热喷涂设备如等离子喷涂设备的流出物的燃烧火焰和燃烧产物。

发明概述

本发明的一个实施方案提供遮蔽热喷涂设备流出物的新方法，包括加热遮蔽气体的环形源至高于环境温度的温度，所述遮蔽气流基本以共轴的方式环绕所述流出物，所述遮蔽气体的环形源在垂直于所述流出物的平面内，从而提供平行于流出物的所述气流。优选所述遮蔽气体的温度被加热到至少 500℉，该温度在所述遮蔽流的源下游 13 英寸处的流圈锥部分的中心线上测得。优选地，遮蔽气体为具有离开所述流出物流的源的至少一层流段的流。本发明的另一实施方案提供一种新型气体遮蔽，其包括环绕热喷涂设备流出物的燃烧火焰。本发明提供在长的离开距离处喷涂材料（包括非反应性和反应性材料）的方法，和使用所述气体遮蔽设备控制正被涂覆的基材的温度的方法。本发明还提供使用由内部惰性气体遮蔽和外部气体遮蔽组成的双重气体遮蔽喷涂反应性材料的方法。本发明的方法可用于涂覆燃气轮机、柴油机和火箭发动机的零件或部件。优选地，通过本发明的方法产生的涂层可具有在约 5%和约 40%之间的孔隙率。

本文使用的流出物应指输送气体和要在基材上沉积的所需层的涂层材料。

附图简述

图 1 为本发明的 24 孔示范火焰环的层流火焰长度作为总气流（丙烯+氧气）和气体混合物的氧/碳比（O/C 比）的函数的曲线图。

图 2 为本发明的 24 孔示范火焰环的等温线作为总气流（丙烯+氧气）和气体混合物的氧/碳比（O/C 比）的函数的曲线图。

图 3 为本发明的 45 孔示范火焰环的火焰的层流火焰长度作为总气流（丙烯+氧气）和气体混合物的氧/碳比（O/C 比）的函数的曲线图。

图 4 为本发明的 45 孔示范火焰环的等温线作为总气流（丙烯+氧气）和气体混合物的氧/碳比（O/C 比）的函数的曲线图。

优选实施方案描述

已经发现，通过从已知的湍流惰性气体遮蔽改变到至少流的初始长度基本为层流的遮蔽，遮蔽气体和周围空气（或其它气态环境）之间的混合量以及遮蔽气体和热喷涂流出物之间的混合量可大大减少。

本发明的另一实施方案为用于热喷涂的新型气体遮蔽，其包括环绕热喷涂设备流出物的燃烧火焰和燃烧产物的环或覆盖层。这种燃烧火焰遮蔽大大增加了产生所需涂层中使用的离开距离有效范围。认为其实现部分地是因为对于与现有技术的遮蔽相比长得多的距离，遮蔽气体和周围空气（或其它气态环境）之间的混合量以及遮蔽气体和热喷涂流出物之间的混合量大大减少。通过本发明的方法产生的涂覆层的例子有NiCoCrAlY、NiCrAlY、CoCrAlY、FeCrAlY、氧化锆基陶瓷和其它陶瓷。

这些实施方案降低了喷涂流出物的温度和速度随离喷涂设备出口的距离降低的速度。可能存在由此产生的几种益处。这些益处之一是可增加离开距离而不会削弱涂层性能。较长的离开距离允许更复杂的形状被涂覆，降低涂层对沉积角度的敏感性，有利于控制残余应力，允许更多的时间加热粉末颗粒，并可具有其它有益效果。

本发明的一种实施方案是通过增加遮蔽气体的粘度产生更层流的遮蔽气流。已知大多数常态气体，包括经常用于遮蔽的那些如氩气或氮气，在室温下基本具有相同的粘度。但是，可通过加热气体得到气体粘度的大大提高。文献（Y. Chyou，Modeling of Thermal Plasma Systems，Ph.D.Thesis，U.Minnesota，1987年6月，附录H）中的数据表明，在从室温加热到2000°F时，氩气和空气的运动粘度（定义为由气体粘度除以它的密度）增加到10倍。

先前已研究了管中气体层流和湍流之间的转换，并与称为雷诺数的流动参数关联。雷诺数定义为：

$$Re = \frac{(\text{气体速度}) \times (\text{管内径})}{\text{气体的运动粘度}}$$

它结合了气体性质和气体流过的管的几何形状。实验上，发现雷诺数小于约2300的管中流为层流。本文关注的是气体离开这种管后的空气流。

开发出一种方法，该方法基于被加热的和环境温度气体的折射率差异，显现气流并确定粘度和流速对气体离开管或喷嘴后的层流的影响。这种方法使用纹影照相机，并详细描述在下面的实施例1中。使用这种方法和预热至220°-1050°F温度的空气作为遮蔽气体，发现如果在管中建立层流，则气流在离开管后能保持层流一定距离。发现对于小于5000的雷诺数，可形成喷嘴出口外部可测量长度的层流，并且当雷诺数降低

到 5000 以下时层流的长度增加。还发现，如果恰好在出口之前的一定长度的管或喷嘴的区段为直的，则能很好地建立层流。经过管或喷嘴出口给定距离的层流需要的直段长度为气体几种性质的函数。

尽管在实施例 1 的试验中使用空气，但应注意到氮气、氢气或大多数其它气体都以类似的方式表现。因此当通过热喷涂沉积非反应性材料时可选择空气，或沉积反应性材料时选择惰性气体，都能获得延长离开距离的相同益处。还应注意到，不必使用具有圆形横截面的管或喷嘴。实施例 1 中使用在各种尺寸的孔或喷嘴板中的矩形“缝”，但在热喷涂设备上的气体遮蔽组件中可使用这些或其它形状的喷嘴。尽管使用预热空气或其它气体的方法可适用于一些应用，但希望使用更高温度的气体和更容易使用的热源。

利用气体混合物燃烧形成火焰环和燃烧产物（下文中称为火焰遮蔽）作为高粘度气体的气体遮蔽能满足更高粘度气体的需要和非常容易使用热源的需要。通过提供在围绕热喷涂流出物周围的环形阵列中具有合适喷嘴的固定装置和可控制的燃料和氧化剂源能容易地适用于热喷涂设备。喷嘴可为具有各种构造的缝，包括孔板中的圆形孔。优选地，缝应具有恰好在出口前的直段。可使用各种燃料，包括但不限于乙炔、 丙烷、甲基乙炔和丙烯，不饱和烃具有一些优势。可使用各种氧化剂，包括但不限于氧气和空气。燃料和氧化剂气体可在流过喷嘴前混合或流过分开的喷嘴。可使用各种火焰点燃方法。

实施例 2 中详细描述了本发明的实施方案.使用在单环中具有等间距圆孔阵列的两个火焰遮蔽，所述单环具有 1.2 英寸的直径，并环绕直径为 0.125 英寸的热喷涂喷嘴，一个阵列具有直径为 0.031 英寸的 24 个孔，另一个阵列具有直径为 0.016 英寸的 45 个孔，显示火焰层流的长度达到约 5 英寸长，然后是约 7-9 英寸的湍流。这些代表用上述和实施例 1 中的预热气体示范的层流区域的非常明显的扩大。尽管实施例 2 中显示了使用氧气和丙烯的 24 和 45 孔火焰环遮蔽的最佳操作参数的确定，但显然，在本发明的范围内，可使用其它喷嘴形状、喷嘴分布形式和操作参数。

为了提供扩大本发明到其它热喷涂设备包括等离子喷炬(例如具有一般在 0.25 英寸以下或更大的等离子喷嘴出口直径）的原则，测定试验中使用的 Praxair 等离子喷炬和实施例 1 中详细描述的其它典型等离子喷炬的火焰遮蔽的热能和气流与等离子流出物的比例。根据这些测定并假

定最佳火焰与等离子炬流出物流无关，则总火焰气流受到控制，对于恒定火焰气流，不同炬和火焰长度的功率比将从约 0.5 到约 5.0 变化。如果最佳火焰流必须与等离子炬流出物流成比例，则控制冷气流比例。本文使用的冷流率定义为燃烧前燃料气流速度和氧化气流速度的和。不同的炬在不同的总流出物气流下具有最佳流出物。即使对于给定的炬，当不同种类的粉末被喷涂时，这些也会变化；例如，氧化锆和 NiCoCrAlY 一般需要不同的流出物流。对于丙烯加氧火焰，冷气流比例为约 0.1 到 0.7。其它燃料气体如乙炔或丙烷可能需要更多的流以提供相同的加热，因为它们具有较低的燃烧热。因此，这些气体火焰将可以包括约 0.1 至约 1.2 的较宽的冷气流比例。总遮蔽气流的碳/氧比应在 0.6 至 1.0 的范围内，优选 0.7 至 0.9，最优选 0.75 至 0.85。这些范围应只被认为是原则，而不以任何方式作为对本发明的限制。

用等离子喷涂氧化锆说明了火焰遮蔽的本发明效用。对使用具有实施例 2 中描述的 24 孔火焰环的等离子喷炬产生的涂层与使用具有环境温度惰性气体遮蔽的相同等离子喷炬制备的那些进行比较。进行设计的实验，其中在各种条件下沉积具有 CoNiCrAlY 底涂层和氧化锆顶涂层的热屏障涂层并评价微观结构特性和耐热冲击性。实施例 3 中详细描述了这种实验。发现与使用环境温度惰性气体遮蔽的炬沉积的那些涂层相比，用火焰遮蔽的炬产生的涂层可在大很多的离开距离下被沉积，具有更高一致性的微观结构，对沉积角度远远不敏感，并具有更好的耐热冲击性。例如，使用特定炬的离开距离从利用环境温度惰性气体遮蔽的 1.25 至最大 1.5 英寸的范围扩大到 4 至大于 6 英寸的范围。但是，这不被认为是限制，利用其它等离子喷炬或热喷涂设备可获得更大或更小的范围。

尽管实施例 2 和 3 中的试验使用特定的等离子喷炬、特定的火焰遮蔽和对于两者的特定操作参数，但显然，本发明可使用其它热喷涂设备、其它层流气体遮蔽、其它高温遮蔽气体、其它加热遮蔽气体的方式、火焰遮蔽的其它设计、火焰遮蔽的其它燃料和氧化剂、和为热喷涂设备和气体遮蔽两者优化的其它操作参数。同样明显的是，本发明的气体遮蔽，尤其是火焰遮蔽和/或层流遮蔽，可用于产生各种各样的其它陶瓷或抗氧化材料包括其它氧化物、碳化物和氮化物的涂层。

火焰遮蔽还可用于控制正被涂覆的基材的温度。当必需在高温下涂覆基材以得到要求的微观结构时，这尤其有利。通过调整气体遮蔽的功率和/或气体遮蔽的总气流可实现这种控制。

本发明的另一实施方案为双重共轴遮蔽，其具有内部惰性气体共轴流，和环绕它的加热气体或火焰气体共轴流。因此将获得外部气体的加热益处和内部惰性气体遮蔽的防氧化益处。

尽管上面本发明的描述和实施例主要涉及等离子喷涂沉积，但本发明也适用于大多数其它热喷涂形式，包括但不限于等离子喷涂、高速氧燃料和它的多种变化、和火焰喷涂。

热或等离子喷涂涂层可包括一种或多种氧化物组成或微观结构的单层或多层、金属或具有一种或多种组成的金属合金的一个或多个外层、或上述层的任意组合。

下面的实施例说明本发明，但不应被认为以任何方式限制。

实施例 1

利用常规气体遮蔽的离开距离即使用高速气流也受到限制。这被认为部分是由于遮蔽气流的湍流特性造成的。因此认为独特的气流遮蔽基于遮蔽气体的层流。另外，认为通过使用高粘度的气体可实现层流，和高粘度可通过加热气体得到。为了证明本发明的可行性，使用几种方法使各种遮蔽气体流（它的界面或与周围气氛的气体边界）的表面（即界面或与周围气氛的边界）变得可见，包括阴影摄影法和纹影干涉摄影术。简单地说，就装置的左侧而言，纹影照相机具有聚焦在热气体流过的区域的光源，这个区域被聚焦在右边的小圆孔上，同时该孔又在装置的最右侧聚焦到照相机的成像面上。所用透镜的焦距都为 21.8cm，这为热气流在透镜之间提供了充分区域而不损害玻璃光学。当中心区域中的介质具有均匀的折射率时，如静止空气或甚至在环绕静止空气区域中的流动空气射流（都在相同温度下），光路就不会被扰乱，通过照相机就得到无特色的空白图象。如果加热气体射流产生与周围介质不同的折射率，则光路被折射出前进束路径，并且不能通过小孔，在照相机图象处导致暗色特征。热的湍流气体射流因此将成像为与周围空气具有边界的截然不同的射流，周围空气随距离当然也随时间波动和起伏。为了消除时间因素，并一下子凝固射流图象，使用 EG&G 型号 549 Microflash 频闪灯作为光源。选通脉冲的时间宽度为 1/50000 秒。使用具有 49mm 纹影透镜的 Linhof 4x5-英寸照相机。对于每次试验条件，曝光 Polaroid 型 52 胶片和 Kodak Plus-X 底片。使用底片对层流长度测量进行放大并观察湍流细节。关闭所有房间灯，拍热气体射流的照片。

本发明的一种热气体遮蔽设计具有喷射环绕炬流出物的气体流的狭窄环形缝，与等离子炬的中心线共轴，并具有为炬阳极出口直径几倍的直径。为了简化对干涉摄影研究的这种设计，制备具有不同宽度、全部0.60英寸长的平矩形缝的一系列喷嘴。包括在流动方向上具有不同缝深度的喷嘴，以确定离开前使流动稳定自身在缝内层流模式中的影响。缝宽度为0.055和0.100英寸，沿流动方向的缝深度为0.5、1.0和2.0英寸。供入到试验缝的气体为加热的空气，因为空气具有与氩气相同的运动粘度-温度曲线，并在试验上更安全，因为试验在试验室中进行，没有扭曲试验流型的通风流。使用连接在试验段上游的4000瓦Leister CH-6056 Electric Hot Air Tool加热空气。使用Brooks R-8M-127-4旋转流量计测量到加热器的室温进入空气流。使加热器和试验段之间的连接管绝热以帮助最小化热损失。使用超小型K热电偶仅仅在出口和出口下游0.1英寸增量处测量加热气体的出口温度。这种温度信息允许在层流和湍流之间的断点处插入温度，稍后从干涉照片中测量。在作为离缝的距离的函数绘制出口气体温度后，移去热电偶，并在拍干涉照片前使流稳定10分钟。

在热气体出口温度和热气体出口速度的一定范围内进行试验。热气体出口温度从220到1050℉。可由测量的进口冷气体流速、热/冷绝对温度比和缝尺寸计算出口速度。计算缝流的雷诺数，与上面所示的管流例稍微不同，其使用水力直径代表缝。水力直径为4倍缝横截面积除以内部缝周长。计算出口处和从层流到湍流过渡点处流的雷诺数。后者一定程度上高于出口值，因为过渡点处气体温度较低，通过温度图测得。为了简明，这里只给出出口雷诺数的结果。

层流测量

来自矩形横截面喷嘴的加热氩气流

纹影干涉照片的数据

喷嘴尺寸*		长宽比	出口流	出口速度	过渡点**		层流长
缝宽度	流长度		cu.ft./hr.	ft./sec.	温度F	雷诺数	度，in.
0.055	0.5	9.1	217	263	603	3950	0.00
0.055	1.0	18.2	217	263	588	4055	0.08
0.055	1.0	18.2	202	245	720	3070	0.14
0.10	1.0	10	202	135	592	3515	0.07
0.10	1.0	10	202	135	889	2320	0.08
0.10	2.0	20	202	135	604	3445	0.07
0.10	2.0	20	202	135	852	2120	0.11

*英寸。所有缝高度均为 0.6 英寸。

**从层流变化到湍流的外流中的点。

发现对于小于 5000 的出口雷诺数，热气体射流能发展成可测量的层流长度，对于给定的喷嘴长宽比，当雷诺数降低到 5000 以下时，层流长度增加。这可通过使用更高的出口气体温度或更慢的出口气体速度实现。雷诺数为 1000 时的层流长度为约 0.2 英寸，这从数据插值得到。发现增加缝中流道的长度有助于稳定出口处的层流。试验的最佳条件具有 20 的流长度/缝宽度比，而对于 9 的流长度/缝宽度比，甚至对于 3950 的低雷诺数，流也完全不是层流。这些试验中的温差受管线气体加热器的加热能力和热损失影响限制。尽管在这些试验中没有获得长的层流区，但结果表明，用于层流的热气体遮蔽想法是有效的，如果使用较高的气体温度和/或较低的气体速度，则层流区长度会增加。

实施例 2

利用热氩气或空气作为粘性介质改进遮蔽的工作表明，更高的气体温度和更低的速度是理想的，以及提供这种热粘性气体流的更简单方法。由燃烧火焰和燃烧产物组成的遮蔽气流被认为能满足这些需要。最初的设计是为用于 Praxair 型 1108 等离子喷炬的可连接遮蔽设备。它包括具

有出口圈的环形室，出口圈具有 24 个直径为 0.031 英寸的孔，它们在直径 1.2 英寸的环形圆上钻取。对于 2.6 的流长度/直径比，孔的长度或深度为 0.079 英寸。孔的出口在炬面的平面内，孔的轴平行于炬的轴，环形圆的中心在炬的轴上。使用的初始气体为丙烯和氧气，它们在进入遮蔽体前在标准“氧-乙炔”气焊手柄中被混合。丙烯和氧气流通过焊接手柄进入管路上的旋转流量计控制。当气体混合物离开喷嘴时被点燃，形成基本环绕等离子流出物并与其共轴流动的燃烧火焰和燃烧产物的遮蔽。燃烧火焰和燃烧产物的圆筒形遮蔽具有约 1.5 英寸的直径，“壁”厚为约 0.125 英寸。

试验了各种各样的丙烯和氧气流，在 X-Y 图上绘制火焰状态对两种气体的流速。发现低氧高丙烯的嫩黄色火焰和高氧低丙烯的“无序溅射”火焰区域，并显示了层流火焰长度趋势。然后确定层流火焰长度和在离炬体固定距离（为方便选择 13 英寸）处的火焰温度方面的火焰特征。在流道中心线上用 K 型热电偶测量温度。用尺子直接测量层流长度和火焰长度。

结果显示在图 1 和 2 的等高线图中.绘制在纵轴上的数值是气体混合物的碳/氧比，等于以 cfh（立方英尺/小时）表示的丙烯对氧气流的比乘以 3/2，因为每个丙烯分子有三个碳原子，每个氧分子有二个氧原子。绘制在横轴上的数值为总气流，对于每个丙烯和氧气设定的 cfh 值都加在一起。发现从蓝色到黄色火焰的转变发生在 C/O 比为约 0.85 处。在约 0.80C/O 和约 50cfh 的总气流处在蓝色火焰区域中得到最长的层流火焰长度。包括下游湍流区的总火焰长度为 16 英寸长。火焰温度即使在 13 英寸离开距离处也是非常高的，并发现随总气流增加，在 0.8 C/O 比线处达到最高。利用未运行的等离子炬自身测量全部这些火焰特征；否则明亮得多的等离子弧将不允许目视观察遮蔽火焰。对于运行时的炬和火焰遮蔽两者，遮蔽的火焰特征可能在层流长度和总流方面改变。

然后设计遮蔽体附加装置的类似火焰环，但环绕相同的 1.2 英寸环形直径具有 45 个孔,每个孔直径 0.016 英寸.对于流长度/直径比为 4.9，孔的长度或深度为 0.079 英寸。45 孔环的总流面积为 24 孔的一半。进行火焰相同流图的绘制。得到的曲线示于图 3 和 4。最长层流火焰的最佳设定值同样在约 0.8C/O 比处，但现在在约 30cfh 总遮蔽气流处。得到类似的最大层流火焰长度 4.5 英寸，但总火焰长度只有 14 英寸，对于 45 孔火焰环，13 英寸离开距离温度在一定程度上较低。认为两种环对预定目

的都是极好的。

计算几组总气流的冷气体速度和热能或火焰功率，C/O 比都为 0.8。计算用于产生典型氧化锆涂层的等离子喷炬的火焰功率与平均功率的比，以及 Praxair 等离子喷炬和其它典型等离子喷炬的气流比。功率比定义为以 BTU/hr 计算火焰的加热速度然后转化成千瓦除以以千瓦计的等离子炬的功率。冷气流比定义为燃料气体加氧化剂气体的冷气流除以进入等离子喷炬流出物的总气流。结果显示在表 1 中。显然，对于相同的等离子喷炬条件，上述两种火焰环设计具有稍微不同的功率比。两者都产生长的层流火焰，但具有稍微不同的遮蔽气流。通过延伸，其它火焰环设计也可在不同遮蔽气流下产生最佳火焰；但是，认为功率比应在 1.0 和 4.0 之间。虽然如此，给出功率比只是原则，不能被视为限制。

对于火焰环喷嘴和操作参数设计中的原则，如果最佳火焰与等离子炬流出物流无关，则总火焰气流起控制。对于恒定火焰气流，对于不同炬和火焰长度，功率比应为约 0.5 到约 5.0。如果最佳火焰流必须与等离子炬流出物流成比例，则冷气流比起控制。不同的炬在不同的总流出物气流下具有最佳流出物。当正喷涂不同种类的粉末时，即使对于给定的炬，这些也可变化；例如，氧化锆和 NiCoCrAlY 一般需要不同的流出物流。从上面表看到，对于丙烯加氧气火焰，冷气流比为约 0.1 到 0.7。其它燃料气体如乙炔或丙烯可能需要更多的流以提供相同的加热。因为它们具有较低的燃烧热。因此，这些气体火焰将更多包含约 0.1 至约 1.2 的较宽冷气流比。结果显示在表“用于最佳炬附加装置设计的可燃气体的计算功率”中。

表1

用于最佳炬附加装置设计的可燃气体的计算功率

丙烯+氧气燃烧热，BTU/ft³2740

24-孔保护环（孔直径0.031英寸）

条件	0.8 C/O比时的流量		总流量	火焰功率	火焰功率	KW 等离子	等离子KW	功率比：火焰/等离子		气体比：火焰/等离子	等价火焰流
	燃料	氧气	cfh	BTU/hr.	KW	PST 1108	其它炬	PST 1108	其它炬	PST 1108	其它炬
4"层流的较低流量	10.4	19.6	30	74100	21.7	14.2	40	1.63	0.54	0.14	14
最大层流长度	17.4	32.6	50	123500	36.2	14.2	40	2.65	0.90	0.23	23
4"层流的较高流量	23.0	43.0	66	163020	47.8	14.2	40	3.38	1.19	0.30	30
	流面积，总共全部孔，ft^2			0.0001258							
	每孔流量，cfh			2.08							
	（在最大层流长度时）										

45-孔保护环（孔直径0.016英寸）

3.5"层流的较低流量	7.0	13.0	20	49400	14.5	14.2	40	1.02	0.38	0.09	9
最大层流长度	10.4	19.6	30	74100	21.7	14.2	40	1.53	0.54	0.14	14
3.5"层流的较高流量	13.9	26.1	40	98800	28.9	14.2	40	2.04	0.72	0.18	18
	流面积，总共全部孔，ft^2			0.00006285				单位：KW per KW		单位：cfh/cfh（冷气流）	单位：冷气总cfh
	每孔流量，cfh			0.67							
	（在最大层流长度时）										

使用的方程和常数

火焰功率，BTU/hr=总流量，cfh X 燃烧热，BTU/ft^3

火焰功率，KW=BTU/hr X 0.293/1000，其中0.293 X BTU/hr=瓦

ZrO_2涂层的平均值或典型KW，PST炬	14.2
ZrO_2涂层的平均值或典型KW，F4，9MB，SG100炬	40
等离子炬的总气流，PST 1108，ZrO_2涂层，cfh	220
等离子炬的总气流，F4，9MB，SG100，ZrO_2涂层，cfh	100

实施例 3.

对使用实施例 2 中描述的连接到 Praxair 1108 型等离子炬的 24 孔火焰环产生的氧化锆涂层与使用具有环境温度惰性气体遮蔽和标准气流的相同炬产生的涂层进行比较。使用 17.5cfh 丙烯和 39cfh 氧气流运行火焰环，碳/氧比为 0.67。粉末为氧化钇稳定的氧化锆。整个过程中使用相同的粉末份数、粉末进料速度、炬体和涂覆室。

在三个水平上各自改变四个因素进行设计的试验：炬电流、炬到基材的离开距离、基材的表面速度和喷涂角度。设计的试验需要制备 13 个独立的试验线或涂层。形成在设计中点上的基线涂层参数是对于垂直分段的涂层。这种涂层的关键特征是它的垂直的基本全厚度分段裂纹，这给予它出色的耐热冲击性。在相对近的离开距离下进行具有环境温度气体遮蔽的喷涂过程，该过程对上述全部四种因素都敏感，以得到所需的裂纹密度。从早期试验看，对于良好的热冲击性能，需要沿平行于抛光横截面上界面的线测得的最小 20 个裂纹/英寸(CPI)。

涂层被施加在 1 英寸直径、1/8 英寸厚 MarM-509 合金块基材的一个面上，基材具有首先通过使用环境温度惰性气体遮蔽的独立炬施加的 0.006-0.008 英寸厚 CoNiCrAlY 粘合层。施加氧化锆涂层。首先评价设计的试验以检查块的抛光横截面，并记下长度为至少氧化锆厚度一半的所有垂直裂纹的数量。在氧化锆涂层中还具有一些较短的微裂纹，与长的分段裂纹相比，它们对耐热冲击性具有较小的影响。在该研究中不计算它们的数量。评价的涂层的宽度为约 0.8 英寸。在评价完第一个抛光面后，重新抛光全部样品至第二个面，并再次评价。在回归分析中使用平均 CPI。试验中所有涂层都非常接近相同的陶瓷厚度，约 0.030 英寸。利用测量的裂纹数和从试验设计中得知的控制变量值，进行数据的多重相关回归分析。结果为能给出每英寸裂纹数作为四个因素的函数的方程。即使没有计算机回归分析，CPI 结果的粗略检验也表明环境温度气体炬对于 13 个涂层有一个宽的范围，即从 0 到 70CPI。当喷涂角度小或离开距离长时几乎无裂纹。火焰炬涂层具有窄得多的 CPI 范围，都大大超过良好耐热冲击性的最小值，而且似乎对角度和离开距离不太敏感。两种炬装置的方程如下。

具有冷气体遮蔽的标准炬：

CPI =81.1+0.82 x ANGLE-72.1 x SOFB-0.030 x SS+0.285 x AMPS

火焰炬，24 孔环遮蔽：

CPI =83.2+0.19 x ANGLE-21.4 x SOFB-0.006 x SS+0.046 x AMPS

其中 ANGLE 为以度数计的喷涂角度（垂直于表面为 90 度），SOFB 为从 Praxair 1108 型炬体到基材测量的以英寸计的离开距离，SS 为以英寸/分钟计的基材表面速度，AMPS 为炬流。计算机回归分析用数值证实了在粗略检验中观察到的趋势。火焰炬允许得到对全部四种因素都不太敏感的所需 CPI。在检查的范围内，对涂覆角度几乎不敏感，而它对于标准炬是主要因素。在上述方程的每个类似项中，对于火焰炬来说，因素的系数更少。这是有利于火焰炬的非常有用的发现；它能允许这种特定涂层的涂覆方法具有较宽的“处理窗口”。也就是说，喷涂角度、离开距离和表面速度方面的涂覆设置宽泛得多，在得到所需破裂结构方面，涂覆复杂形状的零件将更容易。使用本发明的方法，可产生约 20 和约 200 垂直分段 CPI，优选在约 30 和约 70CPI 之间的氧化锆涂层。优选氧化锆涂层应具有在约 5%和约 40%之间的孔隙率。

对于标准炬和火焰炬两者，都测量该系列中制造的全部涂层的基材温度。在涂覆后立即使用接触式高温计接触涂层面得到这些温度。标准炬涂层的平均块温度为 440°F（标准偏差 22.6°F）。对于火焰炬，相应的平均温度为 1125°F（标准偏差 49.5°F）。

在为 CPI 评价制备样品的同时，涂覆热冲击样品。对于每条线，立刻涂覆具有相同热处理 CoNiCrAlY 粘合层的 4 个 1 英寸直径圆块。全部样品的陶瓷层都基本具有相同的厚度，约 0.030 英寸（标准炬为 0.0321 英寸，火焰炬为 0.0312 英寸，都是在样品 13 条线集合上平均）。如上所述，将一个圆块切成片用于 CPI 评价。在热冲击试验中评价三个圆块。在这个试验中，每个圆块都被夹持在松的夹具中，有很少的边接触。将夹具固定在轮上，该轮依次将热屏障样品送到火焰加热站、鼓风冷却站，然后是两个环境空气冷却站。这种加热-冷却循环重复 2000 次。热冲击装置在每个站停留 20 秒。陶瓷层面向火焰，并到加热阶段结束时被加热至 2330°F，并到最后冷却阶段结束时被冷却至约 600°F。在试验前，磨光圆块的边缘，以提供没有棱角半径的成方形的涂覆层。在这一点上，通过 30X 放大倍率下的测量可注意到指示分离的任何水平边缘裂纹。试验后，再次测量边缘裂纹，并且任何增长都归因于热冲击试验。两个试验矩阵的全部样品具有基本为零的

试验前边缘裂纹。如果超过15%的圆周具有分离裂纹，则认为热屏障涂层试验失败。在这种比较中，两组样品都相当好，但火焰炬样品更好。环境温度遮蔽气体炬样品的全部 13 个涂层具有 2.8%的平均边缘裂纹值，最差的样品有 13.3%的边缘破裂。对于火焰炬，相同的试验条件得到 0.8%的平均值，最差的情况为 2.3%。因此，火焰炬比标准炬能在加工条件的范围内产生耐热冲击性高得多的涂层，尤其在极端加工条件时，如长离开距离或差的涂覆角度。

尽管使用 Praxair 1108 型等离子炬完成了表明高粘度气体遮蔽对热喷涂涂层改进的试验数据，但本发明不限于这种热喷涂设备。同样，本发明不限制于所用气体遮蔽的特定设计。显然，热喷涂设备的操作参数和遮蔽将随各自的具体设计而变化。另外，尽管用特定的陶瓷材料进行了涂覆试验，但显然本发明将包括任何陶瓷或耐氧化材料。

本实施例通过改进随后热冲击试验所示的氧化锆样品的涂层，清楚表明了等离子炬火焰遮蔽附属装置的有用性。不受理论约束，火焰遮蔽改进涂层的确切机理是未知的。数据表明，火焰提高了正被涂覆的基材的温度，在实施例 2 中，数据表明，火焰大大提高了炬下游的共轴气体温度，并形成几英寸的可见层流长度。这些后面的结果示于图 1 至 4。但是，图的数据是在炬流出物关掉、炬打开、弧太亮以至于不能看到火焰时获得的，因此有可能火焰特征因炬打开而变化。当炬打开时，火焰遮蔽可能仍具有一定的层流长度，并且除了保持流出物更热至更长的距离外，可能加热基材，该层流区在一定程度上导致涂层改进。

具有内部共轴惰性气体流和环绕它的层流气体和/或可燃气体共轴流的双重共轴遮蔽能从它的离开距离延长特征和它的防氧化物特征中受益。

所公开方法的其它变型方案在如下面所要求的本发明的预定范围内。如前所述，本文公开了本发明的详细实施方案；但是，应认识到公开的实施方案仅仅是说明可以以各种形式实施的本发明的示例。

24-孔环

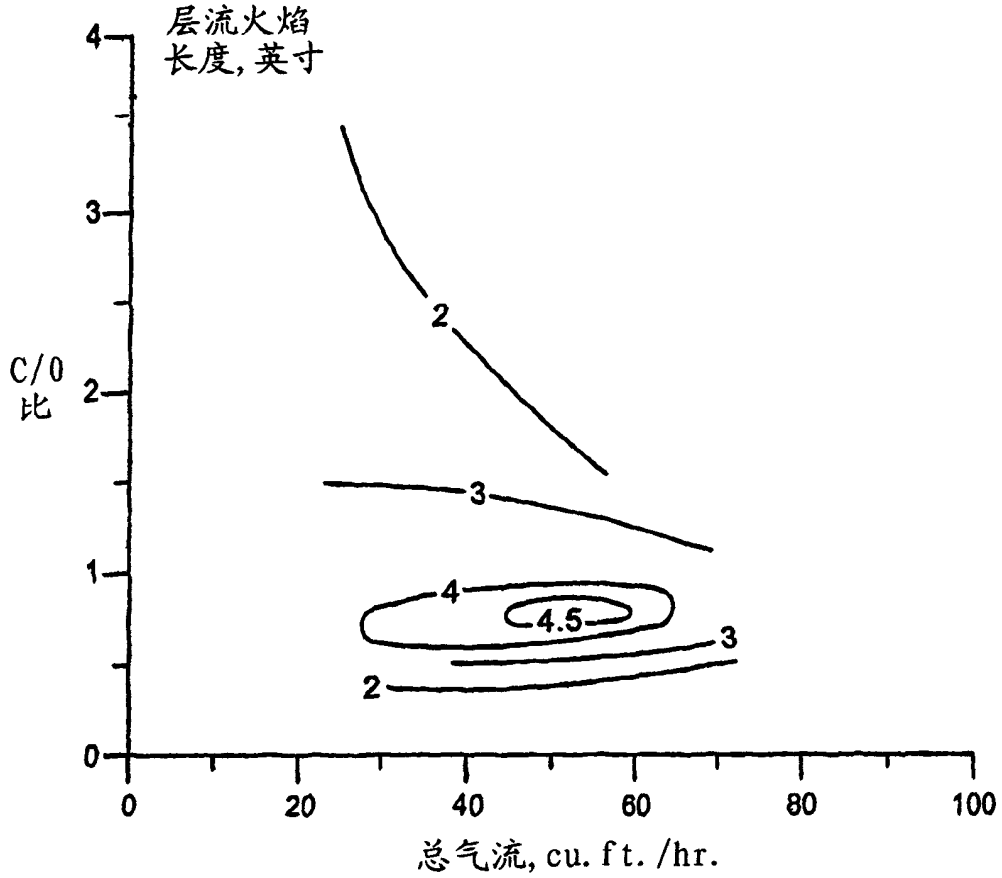

图 1

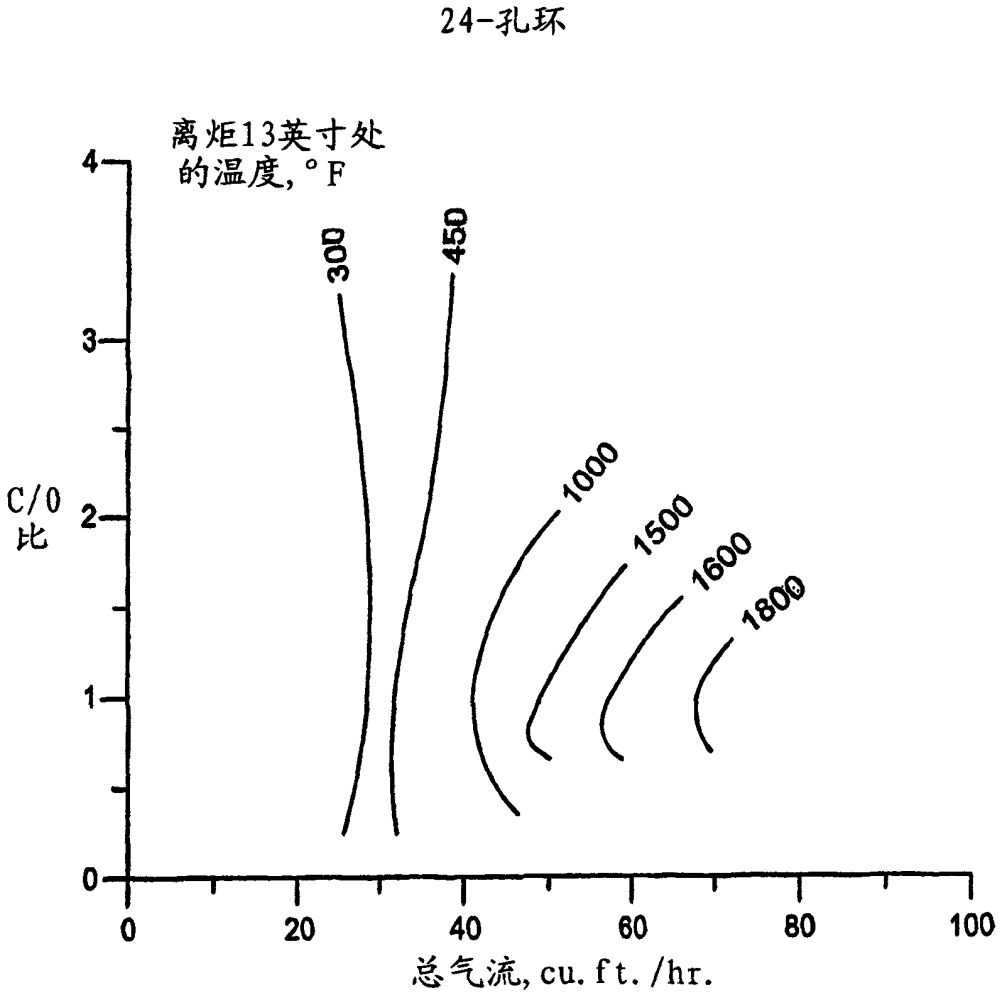
24-孔环
离炬13英寸处
的温度,°F
300
450
1000
1500
1600
1800
C/O
比
4
3
2
1
0
0
20
40
60
80
100
总气流,cu.ft./hr.

图 2

24-孔环

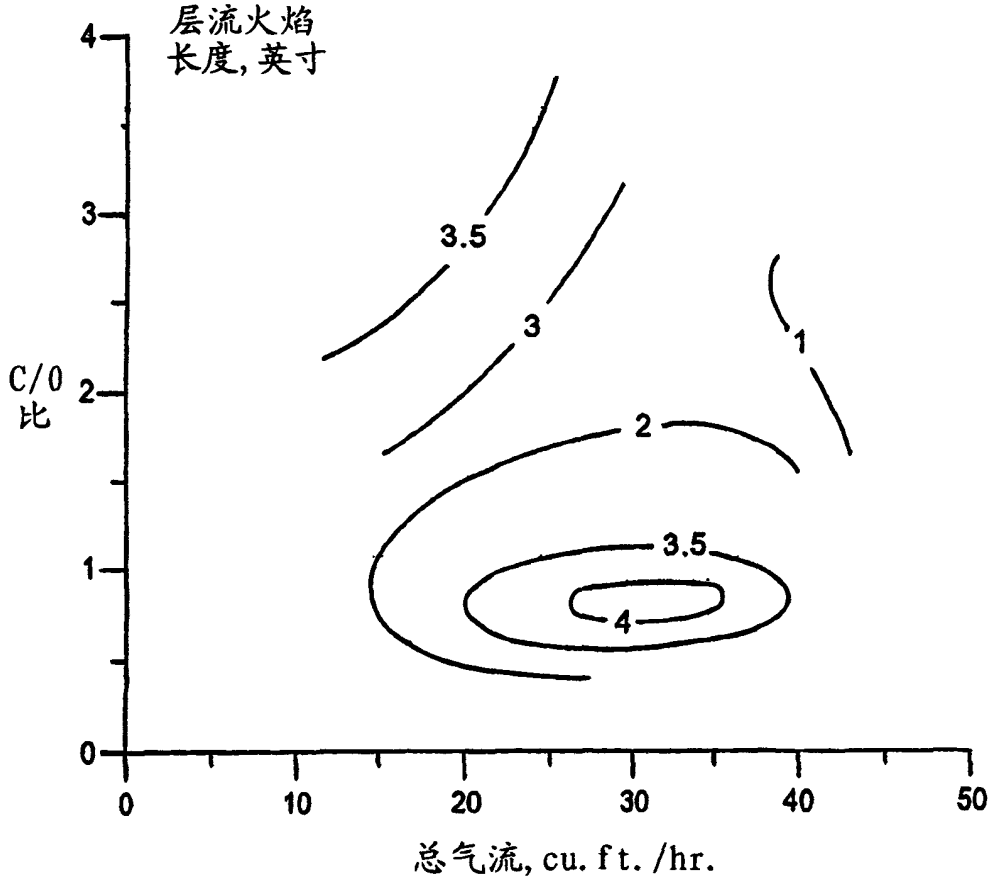

图 3

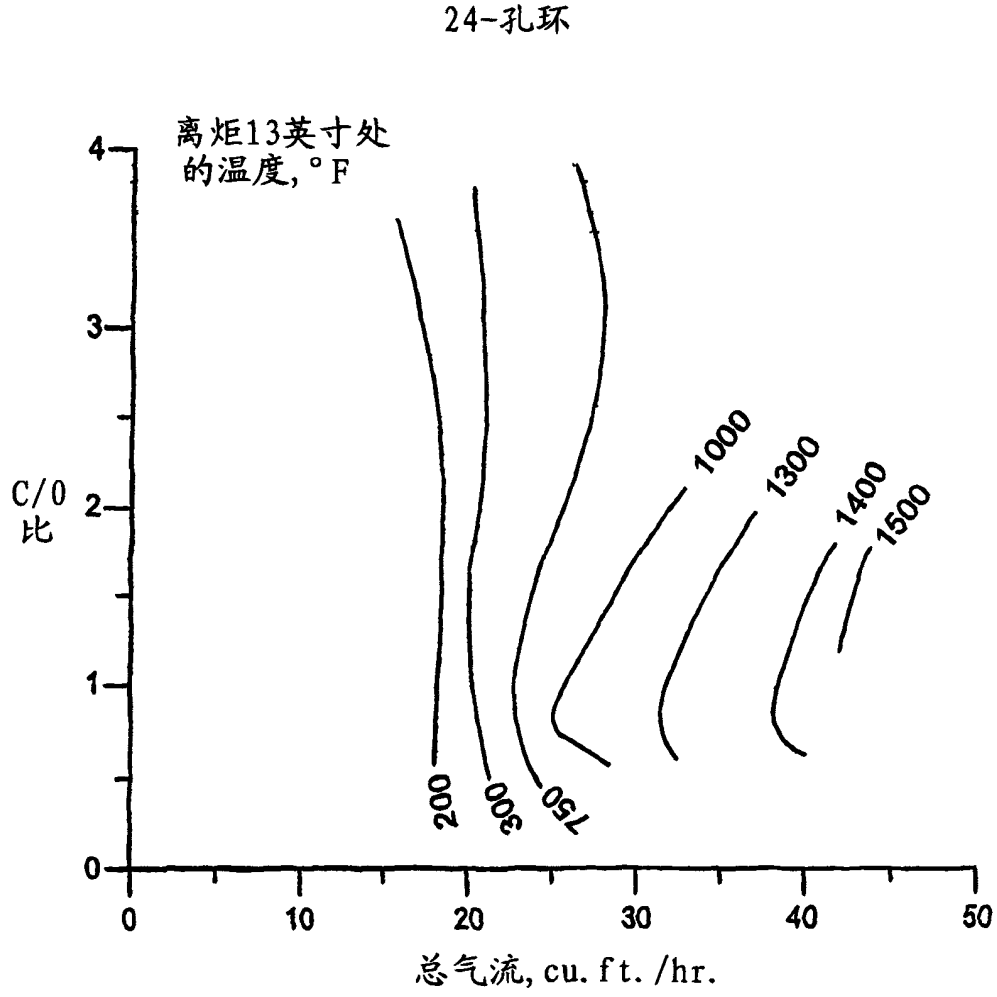
24-孔环
离炬13英寸处
的温度,°F
C/O
比
4
3
2
1
0
0
10
20
30
40
50
总气流, cu. ft. /hr.
200
300
750
1000
1300
1400
1500

图 4