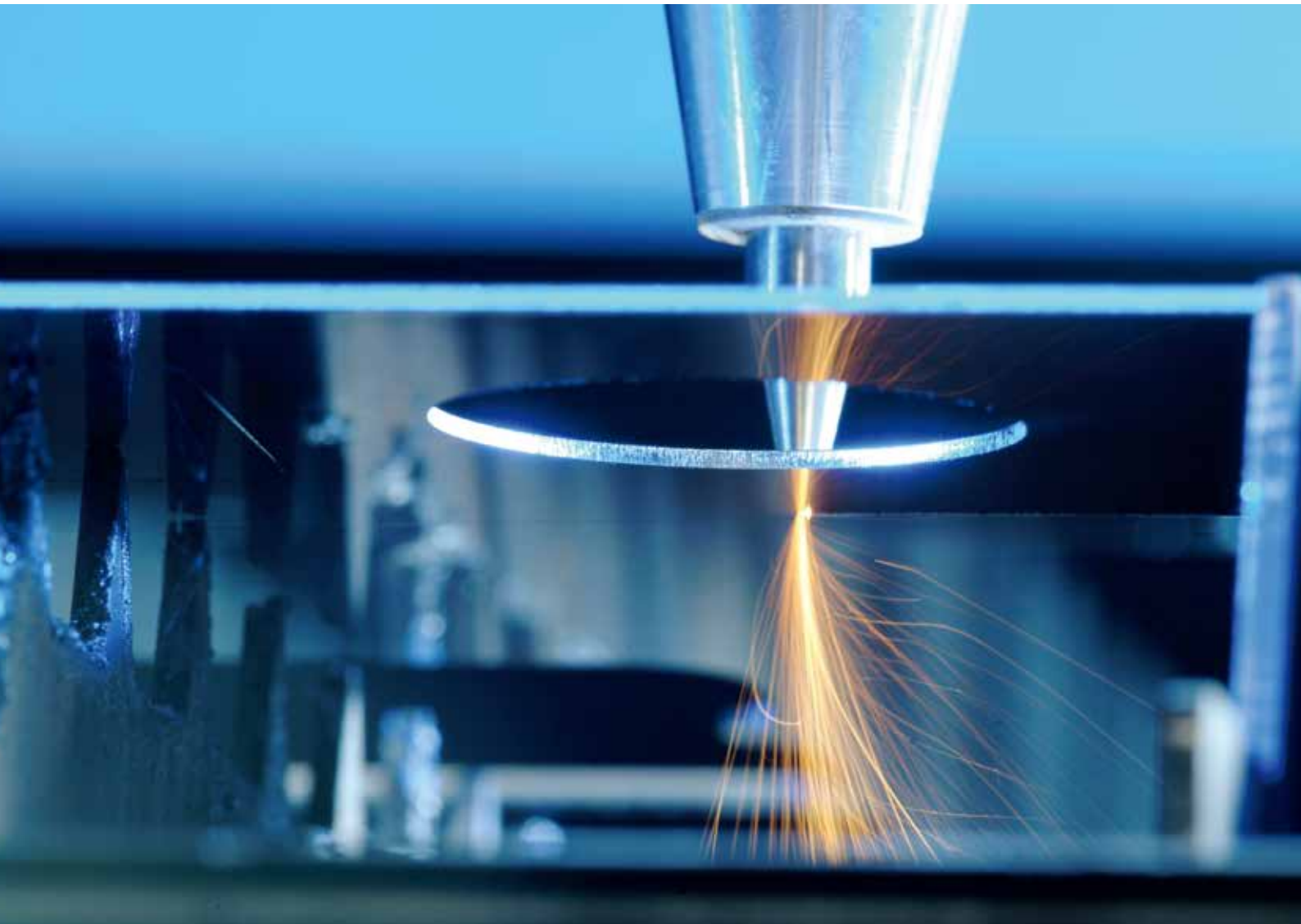
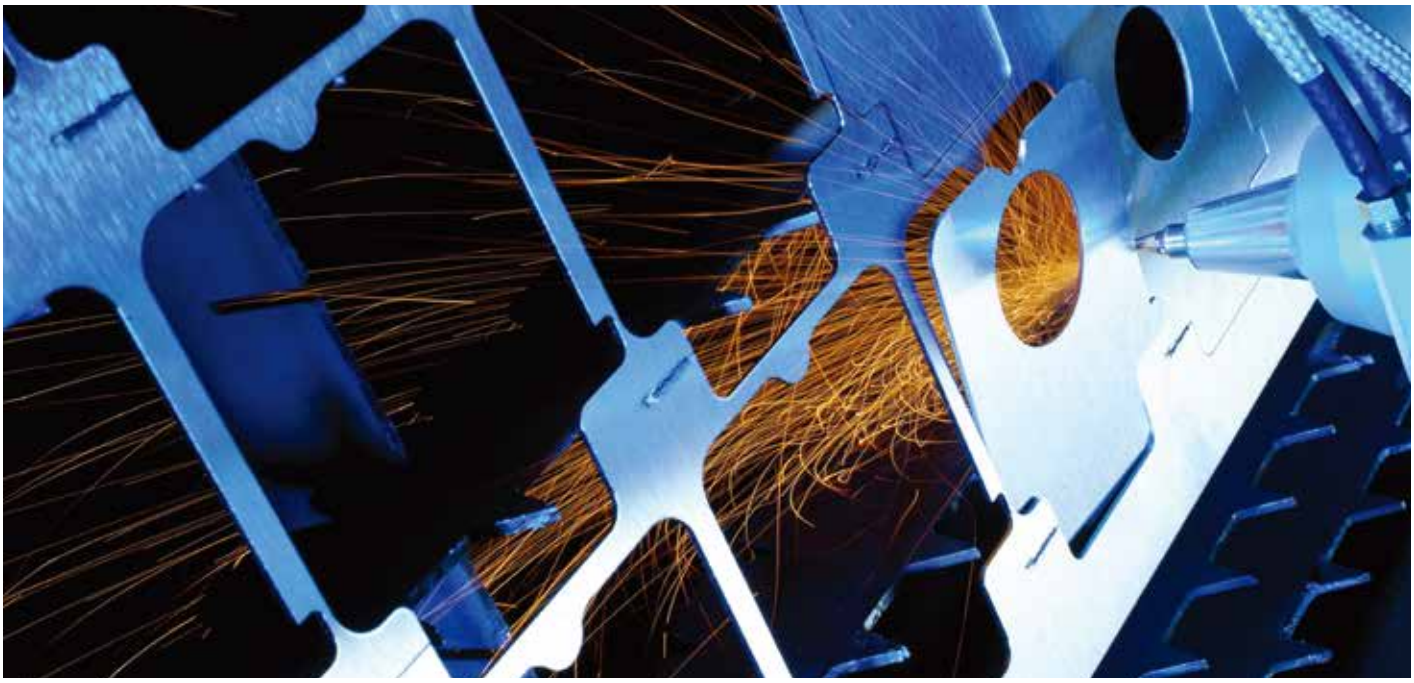
THE LINDE GROUP

激光气体整体解决方案

Laserline®





今时今日，我们已经很难想象脱离激光的生活会是怎样的。每个人每天或多或少都会接触与激光技术，打电话、看电视或上网时会用到激光技术 — 数据是通过激光二极管和光纤传输的；购物时会用到激光技术 — 用于产品贴标和收银机扫描器；驾驶时也会接触到激光技术。当然，我们也可以列举汽车生产过程中涉及的激光切割、激光焊接和激光标记，也别忘了车头灯、交通灯等灯具中充当指示器的激光二极管。最常用的激光（二极管）功率并不特别大，因此不适用于材料加工。

这些激光的结构和工作原理，与工业生产中许多领域执行激光切割、激光焊接和类似任务时所用的高能激光有根本上的区别。执行这些工业任务时所用的激光束，能量强大到足以自发熔化甚至汽化工件。激光切割是对钢、不锈钢、铝、铜等金属实施热切割时最常使用的激光方法，这种方法也被用于切割塑料、木材、纸张、纺织品等非金属。激光技术不但取代了现有的焊接方法，而且开拓了全新的应用领域，例如用拼焊板焊接作业。今天，激光也在表面处理、硬化、贴标和钻孔领域发挥着重要作用。

本技术资料旨在向读者介绍激光技术，简要地介绍波束生成过程的必要物理基本原理，解释激光的结构和工作原理。实际激光应用中通常会使用工艺气体，这些工艺气体或是用于产生激光辐射的激光气体，或是支持切割或焊接过程的工艺气体。这些气体的种类和纯度规格，可能对激光设施的经济效益产生显著影响，应当符合对相关应用的质量要求。本技术资料和其他技术资料文件旨在帮助读者加深关于这一主题的了解。

激光在工业中的应用介绍 2

激光切割工艺及用气 14

激光焊接工艺及用气 28

CO_2气体激光器的发生气体解决方案 40

激光切割辅助气的解决方案 50

激光在工业中的应用介绍

激光辐射的特性

单色性、相干性和发散性
强度分布和模态阶
激光辐射的质量特征
K和M^2质量参数

产生激光束的方法

激光束源的组成部件

激光激活介质
谐振器
激励
冷却
其他组成元件

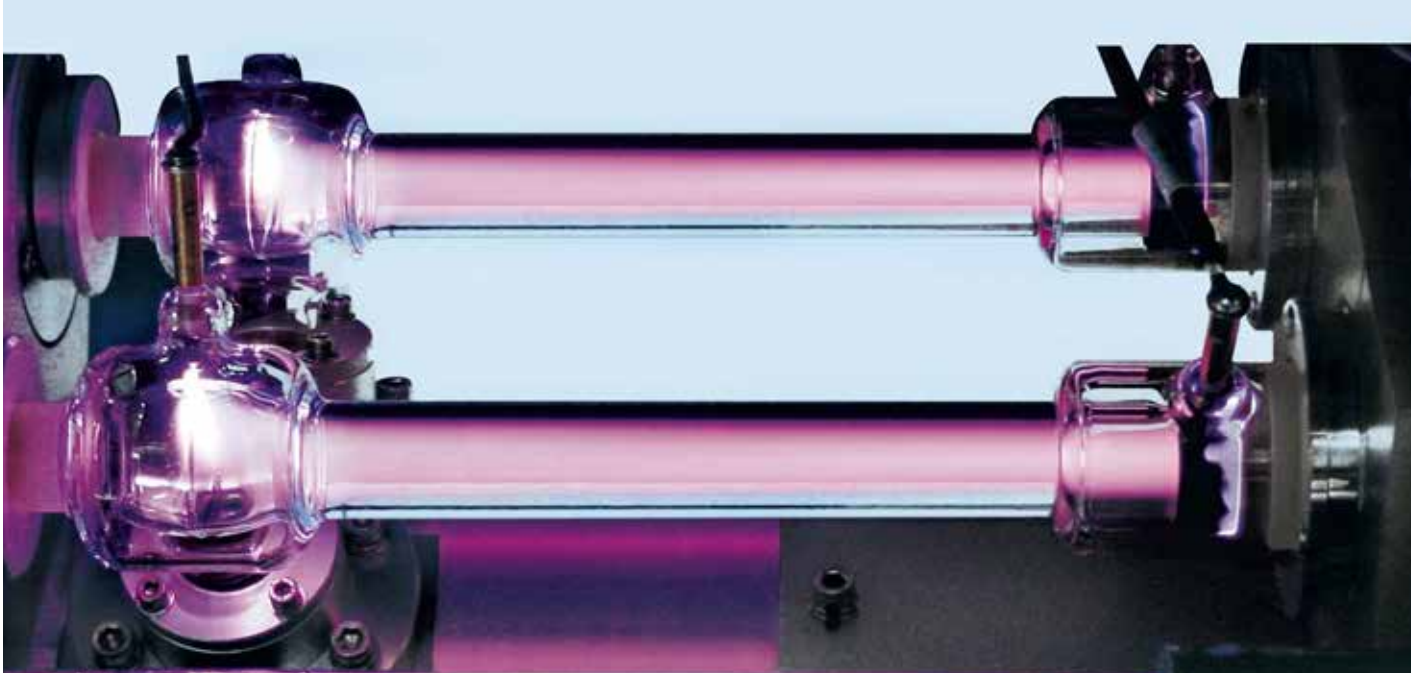
工业激光束源

CO_2激光器
YAG激光器
光纤激光器
准分子激光器

光束制导和整形

光束制导系统
光纤
加工头
材料处理

激光辐射的特性



单色性、相干性和发散性

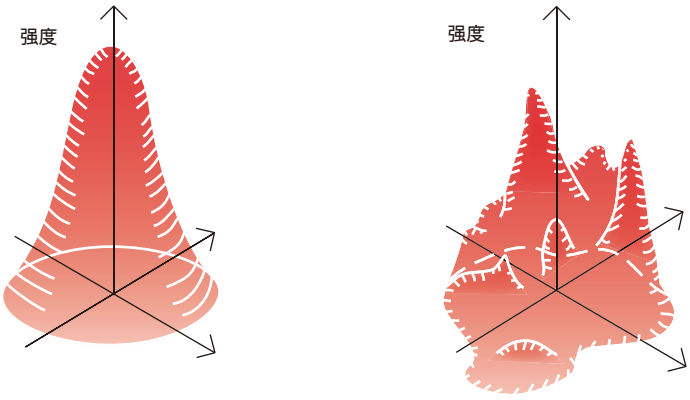
自然光和灯泡发出的光都是由许多不同波长的辐射组成的，描述这种现象最生动的例子是彩虹。灯泡的光向所有方向扩散，因此，它是无方向性的（见图1），所以特定位置的强度非常低。激光只由单一波长（单色）的辐射组成，所有波有相同的相位（相干性）并且它们的扩散方向近乎平行（低发散性），因此，激光束的强度是非常高的，即使在长距离传播的情况下也是如此。于是，在与辐射源相距很长距离（例如20米（60英尺））的情况下，人们可以将激光束"捆束"在一个直径通常小于0.5毫米（0.02英寸）的小焦斑中，从而获得足以熔化和汽化钢材的集中能量。

强度分布和模阶

穿过光束的光束能量分布（光束强度）取决于许多因素，例如谐振器的结构、使用的光学器件和光圈，人们用所谓的模阶（mode order）一词来描述强度分布。

理想的能量分布是高斯形状的，即光束的中心强度高，越靠近边缘强度越低（见图2）。这种模阶或强度分布用TEM_{00}（0阶横向电磁模式）表示，被称为基本模式或高斯模式。由于这种模式与其中心径向对称，特别适用于激光切割，切割结果不受切割方向限制。然而，不同的光束能量分布可能在其他应用中比较有利。

图2：激光束中的强度分布



高斯模式TEM_{00}　　低等（高阶）模式

何谓"激光"，是激光产生工艺过程即受激辐射光放大（Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation）的首字母缩写。换句话说，激光是指通过提供有能量的激光激活介质，然后激励它，使用现存辐射来激发它自身发射出辐射，进而达到放大一束光的目的。这种辐射并非总是位于可见光范围内，特别是在材料加工时使用的激光束，它们的辐射在红外和紫外范围内，因此是不可见的。

激光器产生有特定属性的、以电磁波形式向外扩散的光。激光的特殊在于它具有单色性、相干性和低发散性。

辐射的能量取决于频率，按E=h·√公式计算。通过这个公式可以计算出光的可见光子个体的能量。如此一来，我们得到了一种电磁波，它以一小份或小球（光子）的形式有效地携带着能量。这个简化的概念可以很好地解释众多现象，如光电效应；其他现象，例如干扰现象，往往用光的纯波特性来解释更好。

激光辐射的质量特征。

正如上文所述，光束内的理想能量分布是高斯分布，即激光辐射以基本模式TEM_{00}振动。然而，这个模式会受到与时间有关的变化影响，只能充当衡量光束质量的一个标准。

衡量激光束质量的另一个标准是激光辐射的发散性。尽管光束只有非常轻微的发散，但是这种发散是始终存在的。因此，无论激光器的构造和设计如何，随着与激光器的距离增加，激光束会变宽。这就是飞行光学加工系统中通常要在光路中插入望远镜的原因。这些望远镜弥补了发散，能够沿着光束传播或光路产生统一的光束参数，从而保持处理结果的恒定。

光束参数乘积，即光束直径和光束发散性的乘积，反映了辐射的发散性和光束直径，可以代表光束质量的质量特征。通常，激光的能量越大，光束参数积就越大，光束质量也就越差。金属加工所用切割激光的光束参数乘积的典型范围是 3 至 30 mm·mrad。

K和M^2质量参数

在激光切割中，激光辐射的级别对可获得的切割质量和生产力有直接影响。可以基于K或M^2质量参数，对不同的切割激光进行相对简单的比较（M^2在美国和英国常用，$K=1/M^2$）。K反映的是将激光辐射聚集在一个小焦斑中的能力，计算公式如下：

$$K = \frac{4\lambda}{\pi} \times \frac{f}{D} \times \frac{1}{d_f}$$

λ是激光的波长，π是常数，F是透镜的焦距， D中的原始光束的直径和df的焦点的直径（见图3）。因此，K基本上是由D和df确定，即，未聚焦激光束的直径和所述聚焦光束。因此，该束的发散也覆盖。

理想的高斯光束，K = 1；
真正的激光辐射，K <1。

激光切割用多千瓦CO2激光常用的K系数等于0.5-0.8，对应的M值等于1.25-2。在这个功率范围内，Nd:YAG激光的光束质量通常不如CO_2激光。

产生激光束的方法

图3：激光辐射的聚焦能力

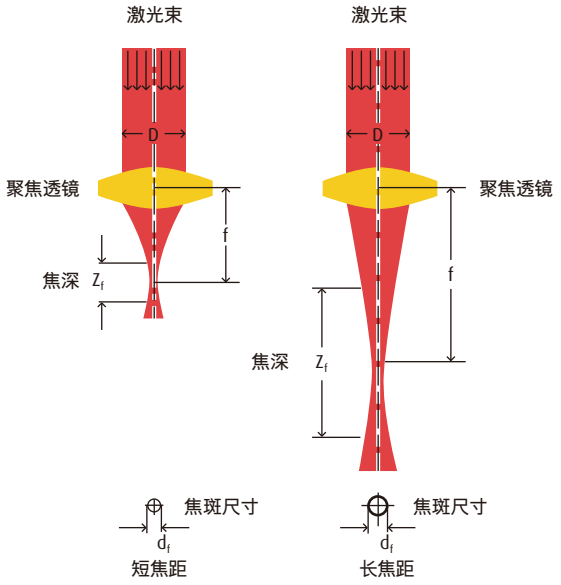
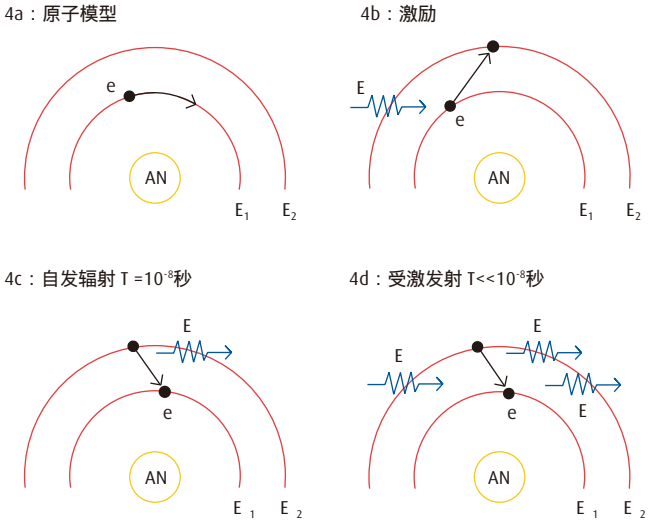


图4：原子模型、激励、自发辐射和受激发射



AN：原子核，e：电子；E：能量；E1和E2：能级

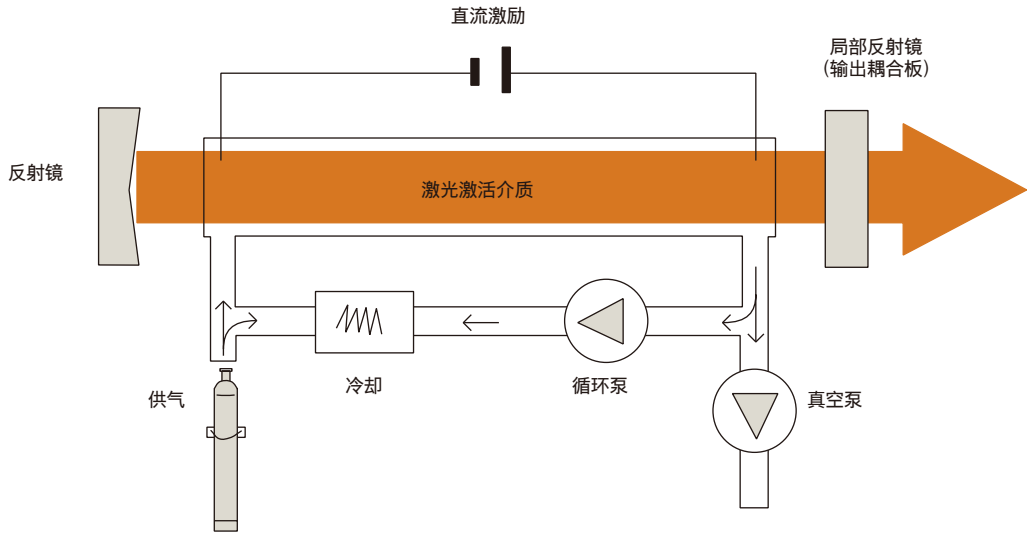
为了产生激光束，您需要激光激活介质，这种介质可以是气态、固态或液态的，能被某种能量如放电、高频或辐射激发。

激光激活介质的原子由一个原子核和环绕着原子核的电子构成（见图4a）。如果为此介质提供能量（E），它的原子或分子会进入更高的能量状态，即进入“受激”态。在这个过程中，介质的电子跃迁到更高能级上（E1- > E2，看图4b）。因为获得能量，分子开始振荡。然而，这种所谓的受激态并不稳定，而受激粒子总是希望回到自己原来的位置（最低能级）。在E2的特征驻留时间（10^{-7}至10^{-8}秒）过去后，受激粒子会以释放热量、脉冲能量或者再以放光的形式发射出储存的能量（E2- > E1，见图4c）。这个过程被称为自发发射。

爱因斯坦是识别令激光器生效的基本前提的第一人：可以有针对性地、在达到特征驻留时间之前，诱发或激发粒子发射出储存能量。这听起来也许像个悖论，但其实是可以做到的，办法是用额外的能量，例如以辐射的形式，轰击已受激的原子或分子。此时，这些原子或分子不会存储额外的能量，反而会在释放能量后回落到最低能级。受激发射过程中释放的辐射，会沿着入射能量的方向传播（见图4d）。与自发发射不同，这些辐射并不是在随机方向上释放的。因此，受激发射的过程放大了入射辐射：发射辐射的方向与入射辐射的方向相同。如果有足够多的原子/分子被激发并且能够通过供应能量的方式保证增强，则受激发射可以引发雪球效应，导致辐射扩增。产生的辐射的特征在于波长一致、相位一致并且散射方向也一致。

激光束源的组成部件

图5：谐振器的基本结构（例如：CO_2激光器）



构成激光束源的组件包括：一种激光激活介质、一个谐振器、激励组件和冷却组件。

激光激活介质

介质可以各种不同的形式，再发射出存储的能量。激光激活介质是能以激光辐射的形式发出部分发射能量的材料。在使用激光辐射加工材料的应用中，CO2气体激光的激光激活介质主要是二氧化碳，受激准分子气体激光使用的激光激活介质是一氟/卤素或氯/卤素混合物。固体激光器的激光激活介质是掺杂了特定元素的晶体，例如Nd:YAG激光中使用的掺钕钇铝石榴石（晶体）和Yt:YAG激光采用的掺镱钇铝石榴石。二极管激光由无数激光二极管构成，后者位于一个半导体中，通过电能激励。光纤激光作为一种相当新的激光，是固态激光的另一实例。在这种激光中，“稀土”组的镱元素，被嵌入在光纤的中心以充当激光激活介质。

我们还应联想到氦氖（HeNe）激光器，这是一种只有较低低能量的气体激光器。然而，相较于提到的其它激光，它的辐射在可见光谱范围内，并处于激光机起作用的光束相对定位材料的位置。激光二极管已在现代激光系统所取代氦氖激光。高能激光束通常在设立的激光束开始显现时被阻断。

谐振器

产生激光辐射所需的组件包含在谐振器中。在最简单的解决方案中，谐振器由两个反射镜以及在它们之间来回反射的激光辐射（参见图5）构成。一个反射镜完全反射，而另一个，通过该可用激光辐射出耦合（泄露），是部分透射。

反射镜的几何形状，谐振器的直径和长度，必须以达到良好的光束质量沿远光灯性能为目标予以匹配。如果光束性能高和谐振器是相当长的，谐振器将被折叠几次，例如在三角形或正方形的形状。

激励

激发多样形式的能量，如电能，光子，化学反应，等等，被用来激发激光激活介质。在二氧化碳气体激光器，能量被直接送入激光激活介质中的直接电流的形式，使用的电极或借由电磁场通过谐振器壁以电容传送。

使用DC（直流）激励时，如果在电极之间施加几千伏的直流电，气体将被排出（见图5）。电极经受制于强负载在此过程中可引起的侵蚀（电极侵蚀）。脉冲能力以大约 1 千赫为限，但超脉冲模式也是可行的（请参考“激光的运行条件”，第10页，了解详细信息）。

频率在几兆赫的范围内的高频激励，即RF（=射频）激励，通过位于谐振器外部的电极所产生的电磁场产生。激光激活介质内部的原子和分子试图随此电磁场的极性变化而变化，进而升温，相互碰撞，最终被激励。这种机制避免了电极腐蚀，脉冲能力良好，但相关的投资成本较高。

固态激光的激励是通过使用灯、激光二极管激光或二极管激光器里的电能（若条件允许）来实现的。

冷却

由于所用能量实际只有小部分转化成了激光辐射，所以必须有效地冷却激光介质。很遗憾，大部分能量被转化成热量，必须想办法从介质中“摘除”这些热量，因为热会干扰激光辐射。通过热交换器循环的激光气体，被用来冷却CO_2激光器内的激光激活介质（见图5）。在不适用激光气体循环的情况下，也可以通过谐振器壁来散热（扩散冷却），但是这种方式的除热量有限。

Nd：YAG激光的激光晶体只能从外部冷却，因此限制了除热效果，抑制了激光的最大性能。相比之下，Yt：YAG晶体则是直接安装在盘式激光器的热交换器中，这种直接冷却的效果是相较于Nd：YAG激光，Yt：YAG的激光性能更高，光束质量更好。

二极管激光的二极管也直接安装在热交换器中，从而确保良好的冷却效果。

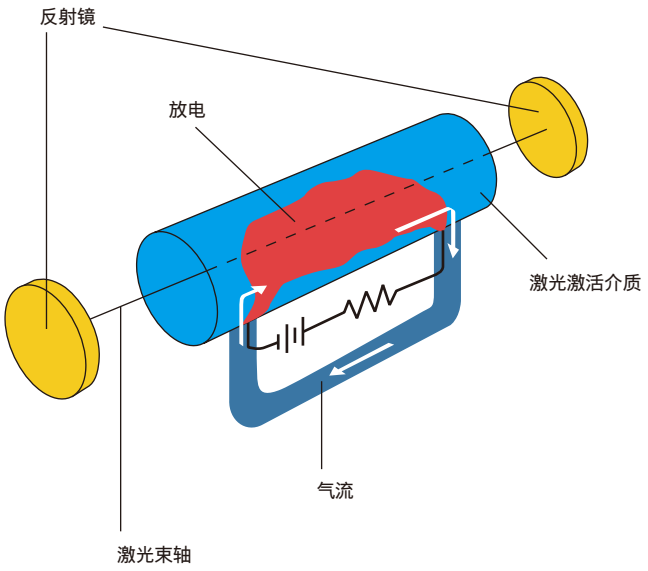
光纤激光由无数光纤构成，每条光纤只能转换相对较低的能量。此外，这种激光的效率接近50%，因此废热总量比其它系统少。鉴于此特点，这些系统通常可以运行功率高达数千瓦的激光而无需水冷却。

其他元件

虽然操作激光需要其他元件，如控制器，但是我们在这里只集中讨论产生光束最低的组件配置。

工业激光束源

图9：快速轴向气流CO_2激光器



激光器种类繁多，应用各有不同，但是其中大部分激光器只能提供功率非常低的激光束，因此不适合用于材料加工。工业应用中使用的激光器包括气体激光器（例如CO_2或准分子激光器）和固态激光器（如YAG或光纤激光器）。

CO_2激光器

从这种激光器的名称就可以看出，CO_2激光器的气体混合物中含有二氧化碳作为激光激活成分，此外还包含作为附加主成分的氦和氮。除了这些主要成分以外，有些CO_2激光器还需要搀和氧、氢、一氧化碳和/或氙以便为激光束生成过程中的物理和化学过程提供额外的支持。激光气体必须满足严格的纯度要求。即使是少量的污染物，如水分和烃类化合物，都会干扰光束生成、降低功率和导致光束质量不佳。

激光气体混合物位于谐振器反射镜之间的玻璃管中。玻璃管与一个管道系统相连接，这个管道系统用于将谐振器内的激光气体混合物送到热交换器中，然后再将其送回谐振器内，循环往复（参见图5）。激光气体可以不同的方向流动：可以激光束的方向流动（轴向气流）或垂直于激光束的方向流动（横向气流），气流速度可快可慢。每个系统都有自己的优点和缺点。激光气管形状可以是扁平而细长的，以管壁充当热交换器，从而不必再执行激光气体混合物循环操作（扩散冷却激光器）。

新鲜的激光气体混合物被持续地送到系统中以补偿损失掉的气体混合物，抵消混合物成分变化和污染物增加造成的影响。除此之外，停机时要用氮气来冲洗调谐器，或在调谐器于各激光器内重启时使用氮气对其实施净化。

轴向气流CO_2激光器

在这种类型的激光器中，激光混合物在谐振器中沿激光束方的向流动（参见图9）。慢流激光器在工作时，气流速度大约为5米/秒（16英尺/秒），通常使用一个直流电流激励，一般经由谐振器壁实现冷却，每米调谐器能够产生不超过几百瓦的激光束功率。因此，要产生高能激光束就需要使用更长的谐振器，谐振器可以经由折叠保持紧凑的结构。慢流激光器的光束质量高，最高光束功率在1kW范围内。这种激光适合在精密切割和精密钻孔等应用领域使用。

在快流激光器中，除热效果得到明显改善。激光气体混合物在罗茨泵或涡轮机的驱动下，通过热交换器进行循环（速度超过500米/秒（1640英尺/秒））和冷却（参见图9和图5），这让建造结构非常紧凑的、输出超过20千瓦的激光器成为可能。使用直流或高频方式实现激励。大多数用于材料加工的激光器都是基于这个原理建造的。

图10：横向气流CO_2激光器

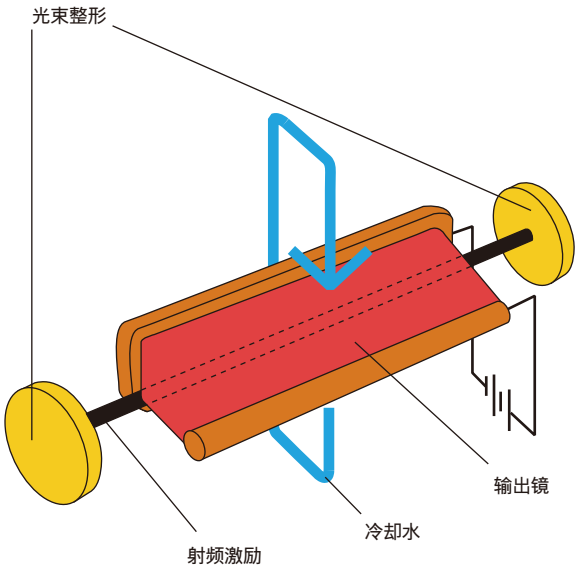
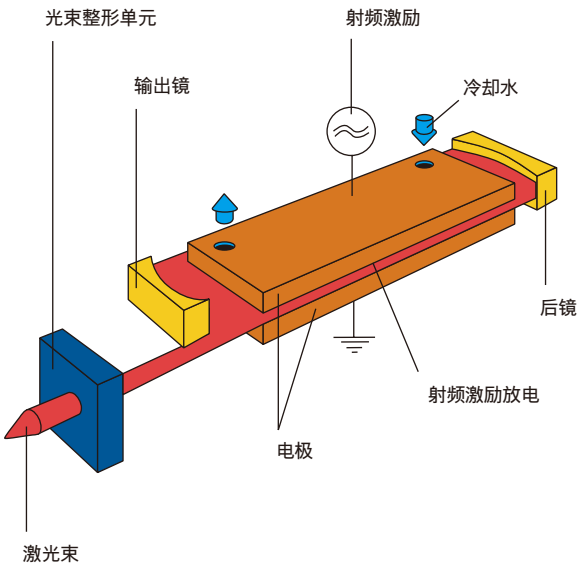


图11：扩散冷却CO_2激光器



横向气流CO_2激光器

可以通过将激光气体混合物安置在与激光束轴线垂直的方向上来获得更强的散热性能，横向气流激光器就采用了这样的结构（见图10）。通过一个鼓风机推动循环，激光气体混合物通过热交换器冷却。谐振器的大容量和高效冷却令激光束可能具备超过50kW的功率。此类激光通常由直流电激励。受垂直温度梯度的影响，这种激光器产生的光束质量不如轴向气流激光器的，光束的功率也不足以支持激光束切割，但这种光束适合用于焊接并且特别适合表面处理。

扩散冷却CO_2激光器

扩散冷却激光器配备一个谐振器，在这个谐振器中，激光气体混合物被容纳在两个扁平的、可以充当热交换器的水冷电极之间。能量通过高频激励传递（见图11）。谐振器中的气流只通过温差控制，通过热交换器板实现对流冷却。这种激光器因为不用进行气体循环，不需要安装鼓风机、外部热交换器等，所以结构特别紧凑。今天，这种激光器已经能够发射质量非常好的、功率约高达8kW的光束。最近，人们已经开发出一种新型扩散冷却激光器，这款激光器使用管状谐振器对激光气体混合物实施对流冷却。

TEA激光器

TEA是横向激励大气（Transversely Excited Atmospheric）压的首字母缩写词。TEA激光器也是一种CO_2激光器，但它不像其它CO_2激光器那样在低压下运行，它的工作压力约等于大气压。这类激光器总是以脉冲方式发射激光，对激光气体混合物实施对流冷却，气体混合物每年仅需更换几次，只产生几百瓦的功率，主要用于标记，例如，用于标记生产数据和到期数据。

图12：Nd：YAG激光器，灯泵浦

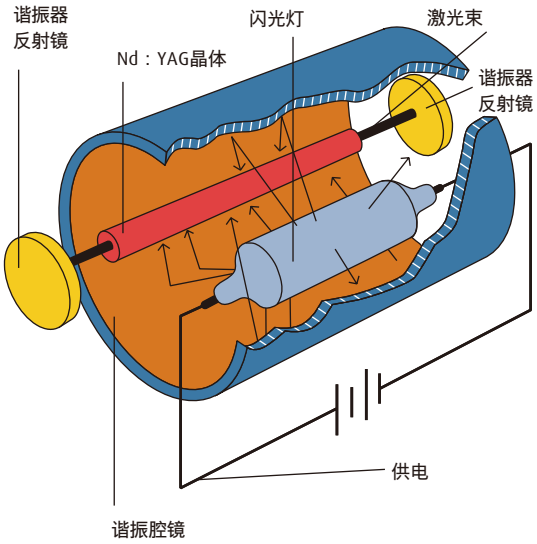
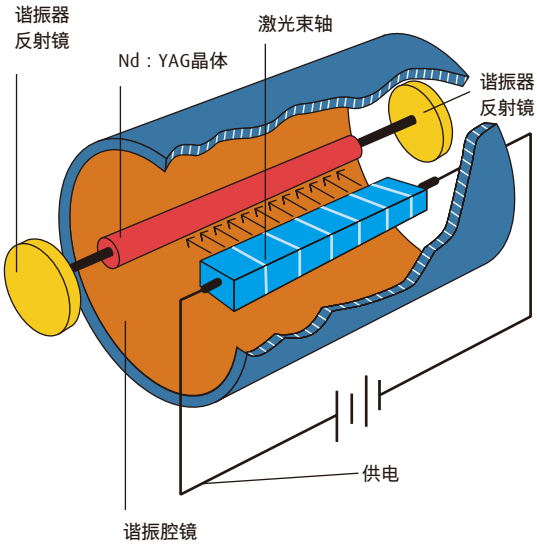


图13：Nd：YAG激光器，二极管泵浦



YAG激光器

YAG激光器的激光激活介质是人工培植的YAG单晶（钇铝石榴石=钇铝晶体），钕（Nd: YAG）或镱（Yt:YAG）被嵌入其中。因此，YAG激光器是不需要使用任何气体来生成激光辐射的的固态激光器，利用灯释放的能量或激光二极管的辐射激励晶体。

Nd：YAG激光器

这种激光晶体呈棒状，几个激光棒被放置在一个谐振器的两个反射镜之间，经由灯（见图12）或二极管条实现激励（见图13）。每个晶体或激光棒产生大约500W（灯激励）或750W（二极管激励）的激光功率。通过壳体实现对流换热。然而，在高功率下，晶体中会出现热张力，进而影响光束质量并导致功率受限。根据使用情况，灯只能工作几百小时到1000小时，寿命有限。激光束功率高，使用周期短，显著加速了灯的老化。二极管条中有许多使用寿命超过10,000小时（比灯的寿命长得多）的低功率激光二极管，但是投资要求较高。二极管泵浦的激光效能比灯泵浦的高，高功光束质量更好。

图14：Yt:YAG激光器（盘式激光器）

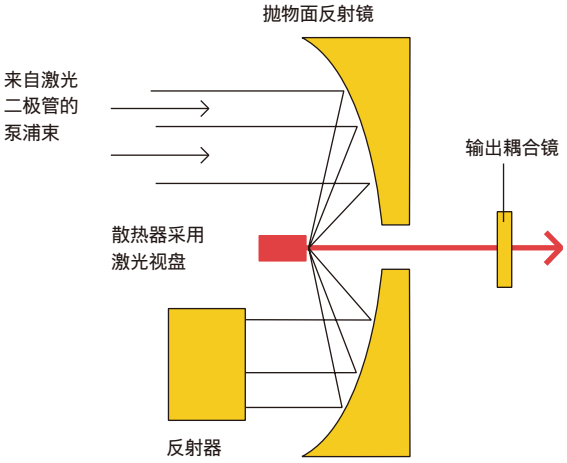
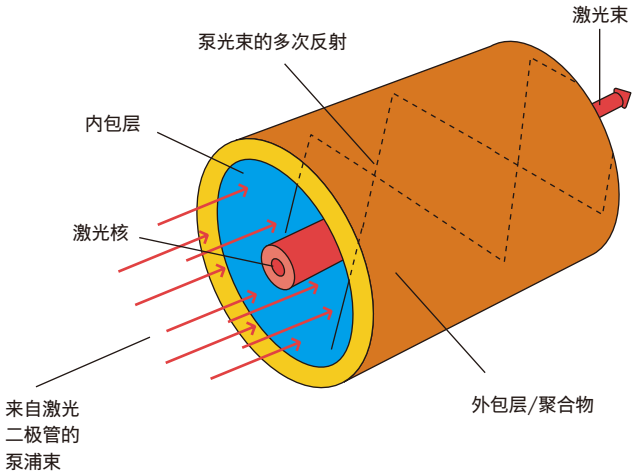


图15：光纤激光（光纤直径：260 μm）



Yt：YAG激光器（盘式激光器）
激光晶体状似窄盘，安装在热交换器上，这种设计确保了冷却有效且均匀，并在很大程度上避免了热张力。Yt：YAG晶体发射的激光辐射功率远远超过1千瓦而且光束质量比Nd：YAG激光辐射更好。Yt：YAG激光由二极管激光辐射泵浦，二极管激光辐射沿晶体方向多次反射。Yt：YAG激光器采用典型的谐振器结构：晶体后方的冷却体还充当总反射器，输出耦合镜让部分辐射透过以作加工之用（见图14）。利用位于同一光路中的光学元件将多个激光器释放的光束捆绑在一起以增加功率。

光纤激光器

光纤激光器由激光二极管、光纤和富集（掺杂）了激光激活介质的芯（或称激光核）构成。这个“激光芯”被“泵浦外皮”环绕，激光二极管释放的光从一端辐射入“泵浦外皮”内。在泵浦外皮的外缘上发生的多重反射，导致泵浦光反复被穿过安放有激光活性介质的激光芯，从而激发激光活性介质令其发射激光辐射。

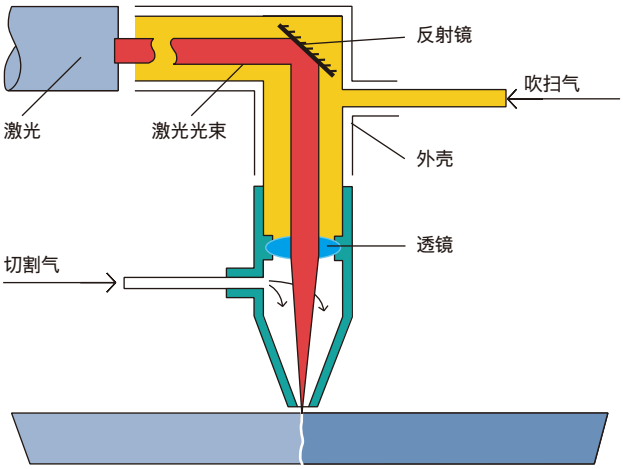
光纤两端安装有特殊的堵头，相当于光纤谐振器的“端镜”。它们的作用是阻止产生的激光被辐射回到泵浦二极管内，允许部分激光辐射离开谐振器。因此，光纤在光束生成和光束放大过程中发挥了谐振器的作用，同时也相当于一个光束传送系统。单根光纤产生功率高达500W的激光束，而且光束质量好、效能高，因此这种激光器的散热需求不太强烈，往往不必使用水冷却。可以通过捆绑光纤提高激光束功率，但这样做会降低光束质量。

准分子激光器

“准分子”（excimer）一词是受激二聚物（excited dimer）的简称，受激二聚物是有两个原子的、处于受激态的分子。准分子激光器也是一种气体激光器，使用的激光激活介质是由一种惰性气体（氩、氪、氙）和一种卤素（Fl、Cl）构成的人造分子。这种分子在“正常”情况下是不存在的，但是可以在放电过程中形成，当它离解时，可以激光辐射的形式释放键能。氟和氯是有毒的且具有腐蚀性的（特别是在与水分接触时），在布置供气系统和处理激光废气时需要采取特殊的措施。准分子激光器发出的辐射与材料的原子键发生相互作用，原子键断裂后，导致材料被去除（所谓的“冷”去除）。准分子激光被广泛应用于眼外矫正科手术，但也有用于材料加工的个别实例，例如用于在工件上生产特殊的结构（遮蔽技术）、清洁、除漆以及在称为立体光刻的工艺中制造微芯片。

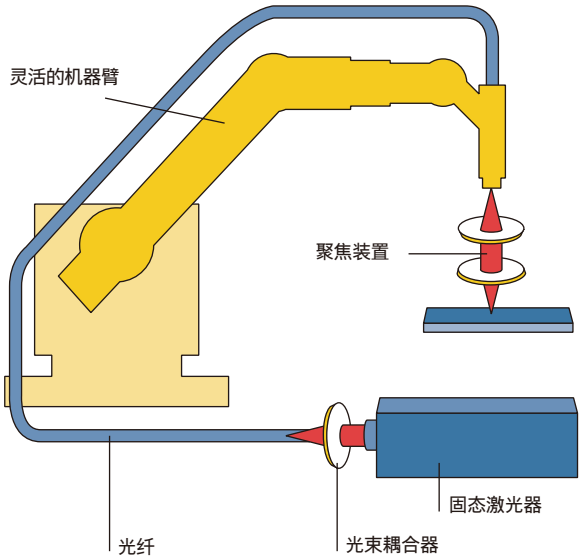
光束制导与整形

图16：带加工头的光束制导系统



示例：激光切割

图17：带光束耦合器和一个聚焦装置的光纤激光器



激光器产生的激光辐射在引导下，沿着一条长度可变的路径抵达加工现场。这个过程会用到玻璃纤维、反射镜，望远镜等光学元件对激光束实施制导和整形，通常会使用机床来处理工件。

光束制导系统

人们采用所谓的光束制导系统（光束传送系统、光路，光束柜）将激光束从激光器引导到加工现场。光束制导系统运用各种光学元件来获得所需的波束属性，通常会安装一个防护罩或膜盒来保护激光束和光学元件（见图16）。

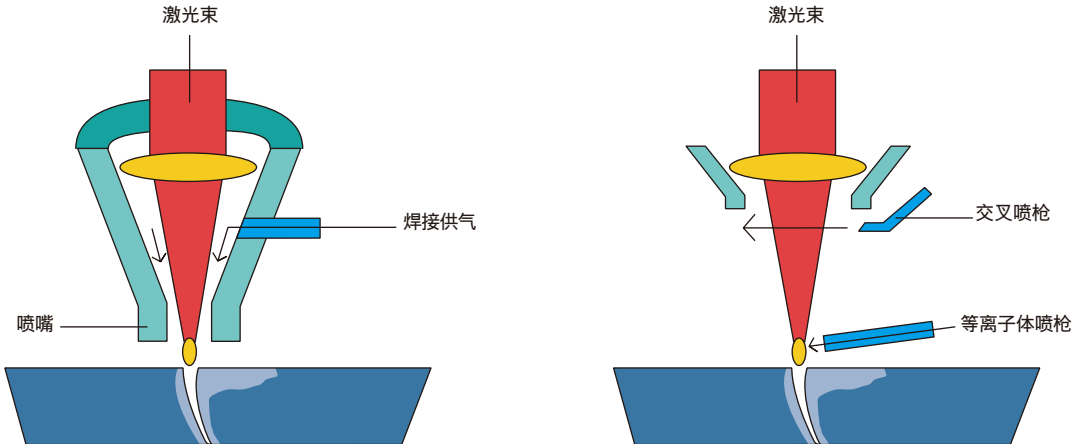
光束制导系统需要使用一种既不伤害反射镜，也不伤害光束的特殊气体气氛。反射镜通常是用水冷却的，所以外来气体，如潮气或碳氢化合物，可在反射镜上冷凝，改变反射镜的反射特性。外来气体可导致激光束本身受损，视光束的强度而定，外来气体可导致光束直径变化（“热晕”=光束直径放大），从而导致光束损坏甚至点燃反射镜底座和外壳组件。氩气、二氧化碳、碳氢化合物、水分溶剂和电负性气体都有可能产生影响，所以必须排除在外，特别是当激光束质量高并且功率大于3千瓦时。在这种情况下，应使用高纯度氮气作为光束柜的吹扫气。在光束强度低时，可以使用压缩空气代替氮，但必须排除碳氢化合物和水分。

光纤

人们也可以使用光纤将激光从激光器引导到工艺中。光纤是一种柔性的玻璃纤维，可以将YAG或光纤激光器出来的激光聚焦到安装于机械手上的聚焦头上（见图17）。光纤直径大小不等，可能小于100微米，也可能大到1000微米左右。激光束被光纤臂多次反射，失去了低发散度和良好的聚焦性。

有这样一个经验法则，即通过光纤传输的激光束可以聚焦在一个焦斑中，焦斑的最小直径等于光纤的直径。然而，光纤的用量存在上限，因为激光器产生的激光束必须首先耦合到光纤内，由此不能超过一定的强度值。此外，激光束也可以被拆分到多个光纤中，如此便为我们提供一个有趣的备选方案来代替借助处理系统来灵活控制光纤的做法。激光束拆分到多个光纤中之后，可用的激光束功率被各个光纤和站瓜分，当然也可以将所有功率分配给一个处理站。来自多个激光器的激光束，也可以被捆绑成一个光纤束。

图18：在交叉喷枪支持下，通过等离子体喷枪实施同轴进气和横向进气



加工头

在反射镜或透镜的帮助下，激光束被聚焦到位于光束传送系统端部的加工头或光纤中。必须为位于加工头内的光学元件提供防止外来气体和颗粒（如烟雾和飞溅物）的防护。在许多应用场合中，还必须提供工艺气体。同样地，很多情况下要使用带同轴动作或横向作用机制的不同种类的进气系统。

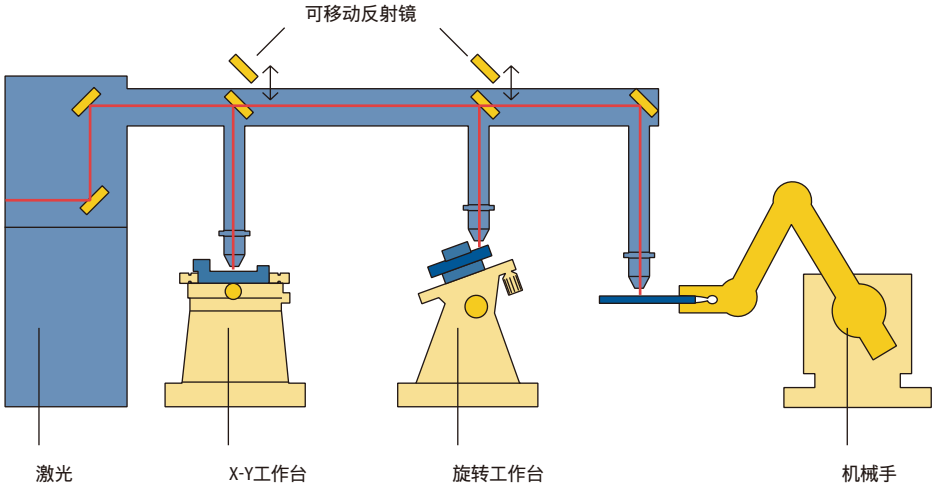
在同轴进气系统中，激光束和喷流沿着相同的路径行进，所以气体会与激光束发生密集地接触并且可以被电离（见图18）。另一方面，这个系统只需要一种气体，因为这种气体既可以充当防护气体又可以充当工艺气体；另外，还有进料方向不相关这一优点。

横向进气系统还要加装一个气体喷嘴（等离子体喷枪），这个喷嘴可以将工艺气体直接导入加工区域，不用与激光束发生密集接触。此外，还需加装一个气体喷嘴以保护光学器件。具体做法是：将一个有突边的气体喷枪，即交叉喷枪，安装在光学器件的正下方，这个喷枪可以有效地将烟雾和飞溅物从焊接熔池中横向吹走（18）。必须避免因调节不当导致交叉喷枪干扰工艺气体气氛。

最初设计等离子体喷枪是为了影响等离子体形成。这个喷枪会产生强有力的、狭窄的、湍流气体射流，周围空气被喷射的情况极有可能发生，导致焊接熔池无法得到或只能得到有限的保护。更好的解决方案是在相同的位置上安装一个有较大开口的喷嘴以产生平滑的层状气流。

使用"近乎"横向的进气系统时，同轴喷嘴主体被钻了多个孔，防护气体流出中心，流经喷嘴底侧的几个通道。这种设计克服了对方向的依赖。通常需要加装交叉喷枪以吹走灰尘和烟雾。

图19：使用分束激光进行多站操作



材料处理

为了加工某个特定表面，可能需要工件与激光束之间发生相对运动（称为进料或行进）。如果工件非常小，例如珠宝业涉及的工件，这项操作可以手工完成；但是大型工件通常会被安置在激光加工头下的X-Y工作台上，由工作台负责进料，加工头部执行高度调节操作（Z轴）。特别大的工件也可以静止不动，由加工头执行所有维度的进行，例如在门户系统中。

由加工头完成所有方向上的移动的系统被称为“飞行光学系统”。在三维应用中，工件可以静止不动，通过机械手等装置来移动激光束。另外，激光束位置固定，由工件执行所有方向上移动的也是可能的。切割复杂的结构时可能需要移动光束和工件。

整个循环时间内，工件加工时间可能非常短暂，具体加工时间取决于自动化程度和每个工件的作业规模，所以有时候会用一个激光束源为多个加工装置服务，向多个加工站交替提供激光束（见图19）。

激光切割工艺及用气

激光切割工艺

切割工艺类型
用于激光切割的激光器

激光切割参数

连续波（CW）或脉冲激光器运行
激光功率和强度
透镜焦距
相对于工件的焦点位置
激光束模式
激光束波长
喷嘴尺寸和喷距
气体类型和压力

不同材料的压力和用气量需求

碳钢和低合金钢
不锈钢和其它高合金钢
铝和铝合金
钛、镍合金、铜合金及非金属

激光切割工艺

在过去十年中，激光切割已经发展成为一项最先进的加工技术。预计在全球范围内，用于金属和非金属的切割的高功率切割系统超过40,000套。如果把低功率切割应用（例如塑料切割和纸张切割）包括在内，切割系统的数量远不止于此。

现代激光切割应用主要包括：

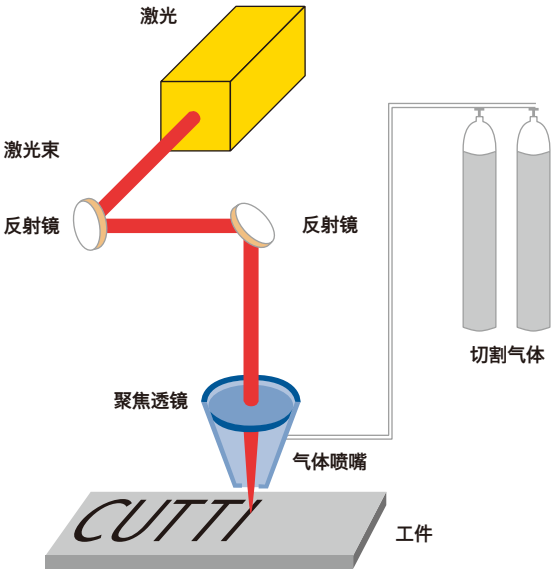
- 液压成形部件和管切割
- 薄板金属高速切割
- 厚截面材料切割

开发具有更高输出功率、同时不降低激光束质量的激光器在过去一直都是一个重要目标。其它研发工作主要是改进执行系统的驱动技术和提高切割台上的材料处理能力。

预测认为，基于更高切割速度、更小的工具磨损和无限灵活性的激光切割将进一步取代现有的一些技术。市场调查表明，平板激光切割机的安装数量在接下来的十年中将翻番。此外，激光器制造商将开发新的市场（例如管件和管道切割）。

用于生成激光束和清除切缝中的熔融金属的气体是激光操作过程中的重要消耗品。气体能够延长光学部件的使用寿命、提高切割速度并且改进切割质量。所有这些都有助于提高激光系统运营的盈利能力。因此，本技术信息的目标是帮助激光切割系统的潜在用户熟悉这项技术，并且提供一些正确使用切割气体的指南。本技术信息中介绍的许多研究成果是在林德集团应用实验室进行的项目或林德集团发起和赞助的项目中获得的。

图1：激光切割系统原理（示意图）



切割工艺类型

在激光源中生成通常不可见的几乎平行的激光束，使用反射镜把激光束指向切割头，在切割头使用一个透镜把激光束聚集（聚焦）在一个小光斑上（图1）。根据工艺需要，光斑位于工件表面或待切割材料基体（图1，另外参见技术信息"工业应用激光器"）。

强激光束迅速加热工件和熔化材料。使用辅助气体（也被称为切割气体）来保护和冷却聚焦透镜，同时清除切缝中的熔融金属。根据使用的辅助气体不同，可分为两种切割工艺：

- 在使用氧气进行切割时，激光束将金属材料加热至熔点，材料被局部燃烧和气化。氧与金属之间的燃烧反应产生支持切割工艺的额外热能。由于这些放热反应，在被用作切割气体时，氧能够穿透较厚和表面反射较强的材料。

- 在使用惰性气体（例如氮或氩）进行切割时，金属材料完全被激光热量熔化，切割气体将熔融物从切缝中吹除。由于惰性气体不与熔融金属发生反应并且不产生额外的热量，因此所需的激光功率通常远远高于在相同厚度的氧切割中所需的激光功率。使用惰性气体进行切割通常被称为清洁切割或高压切割。

气化切割是另一种切割工艺。在气化切割中，固体材料在不经过液相过程的情况下直接被转化成蒸气。气体可以被用于支持工艺过程、清除蒸气和保护切割光学部件。

在"冷"切割中，激光束能量切断材料基体的化学键，因而会产生粉状残余物。激光束能量和化学键能量必须相配，此切割工艺通常不需要切割气体。

用于激光切割的激光器

许多激光器可以被用于激光切割，只要它们生成的激光束能够被聚焦在一个小光斑上，具有充分的热量以熔化材料，并且它们特定波长被材料吸收。二氧化碳和准分子气体激光器以及固体激光器（例如Nd:YAG和Yt:YAG激光器）最常用于材料加工领域。

二极管激光器是另一种固体激光器，这种激光器不提供类似的激光束质量和强度，可以被用于非金属材料切割。

激光切割参数

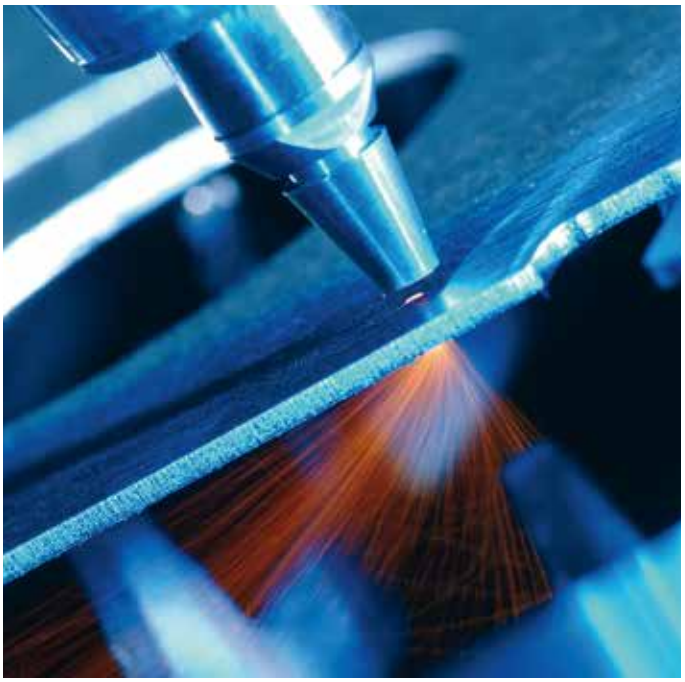
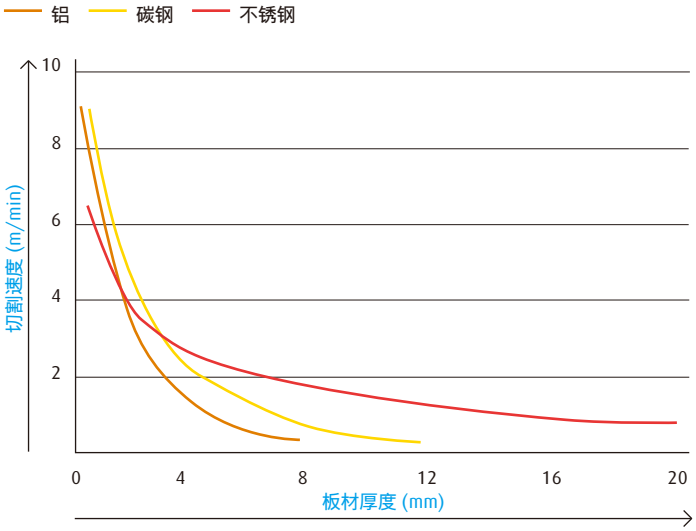


图2：约3 kW激光功率的典型切割速率



连续波（cw）或脉冲激光器运行

连续波（cw）模式运行可以在高功率水平上达到最高切割速度。连续波意味着激光功率输出是恒定的，随着时间推移不会中断。

在高速切割中，激光功率几乎被完全用于熔化或气化切口前缘上的材料，相对很少的热量被传导到基底材料中。但是，当切割方向倒转或在锐角周围进行切割时，一些热量将被传导到基底金属中。这将降低进给速率并且导致工件变热，从而导致切割质量降低。

在切割细微结构或在较厚的材料中穿孔时，使用高功率连续波激光器难以达到合格的切割质量。在这些情况下，脉冲加工能够获得更高质量的切口。短脉冲中的高峰值功率能够确保高效加热，并且有效清除切缝中的热材料，同时低平均功率能够保持工件冷却。

在脉冲切割中可以达到的切割速度远远低于使用连续波激光束可以达到的切割速度。为了显著提高脉冲切割质量，通常需要把平均功率降至几百瓦。这经常导致切割速度只有在连续波模式中可以达到的切割速度的10%。在切割金属材料时，峰值功率一般必须在1～10 kW范围内，每一个脉冲必须有足够的时间长度（通常是1～3毫秒）以熔化切割前缘层。

激光功率和强度

通常用功率对激光器进行描述（例如1,000 W或6 kW）。激光功率是每秒单位以激光形式发射的总能量。激光束强度等于激光束功率除以功率聚集面积。

例如，把1 kW激光束聚焦在0.1 mm（0.004 in）直径上将产生大约125 kW/mm2的功率密度。

高强度导致材料迅速加热，因此热量消散到周围材料所需的时间也非常短。这样可以达到高切割速率和优良的切割质量。

$$\text{强度} = \frac{\text{激光功率}}{\text{照射面积}}$$

激光强度还决定了能够被切割的厚度。被切割材料越厚，需要的强度越高。强度可以通过提高激光功率或使用更短焦距的聚焦透镜来提高。但是，把激光束聚焦在一个更小的光斑上也将减少焦深，因此不适于厚材料切割。

脉冲和连续激光都可以做到高强度。因此，脉冲切割中的最高峰值脉冲功率或连续切割中的平均功率决定了切割的穿透力。

但是，切割速度取决于平均功率水平。平均功率越高，切割速度越高（图2）。二氧化碳和光纤激光器的强度非常高，可以对薄材料进行连续气化切割。切割厚度为1～1.5 mm的金属可以达到超过10米/分钟以上的速度。切割气体被用于清除金属蒸气和保护聚焦光学部件。由于反应时间非常短，因此气体类型并不重要，使用压缩空气即可。

光纤激光器提供了优良的长距离聚焦能力，这种激光器被用于高速飞行切割，在高速飞行切割中，扫描光学部件被用于在待切割材料上快速移动激光束。由于切割气体无法被长距离应用并且被切割材料自然蒸发，因此不使用切割气体。

图3：激光束聚焦

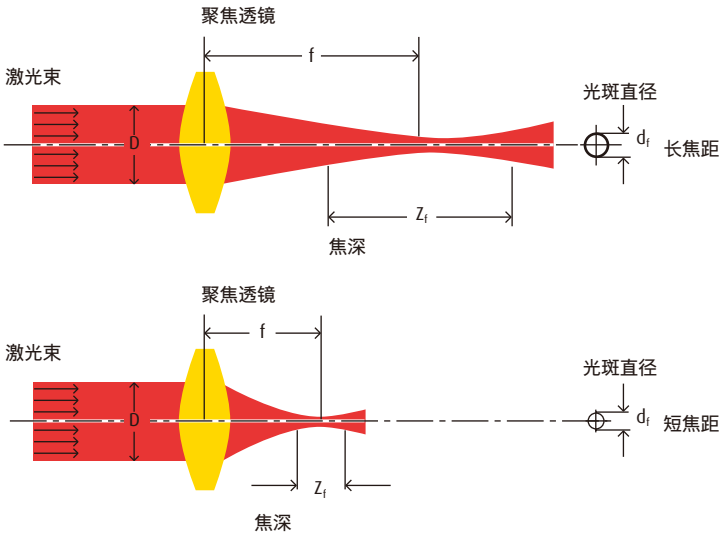
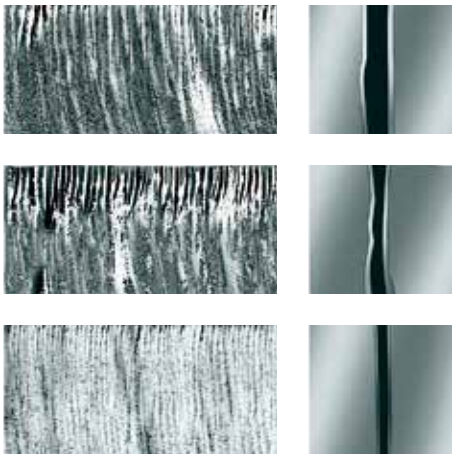


图4：焦点位置对切割性能的影响



焦点位置：+3.0 mm
→ 焦点位置过高

焦点位置：-2.5 mm
→ 焦点位置过低

焦点位置：0 mm
(表面上)
→ 焦点位置正确

透镜焦距

透镜的焦距决定了聚焦激光束的形状。最小光斑直径（df）取决于波长（λ）、激光束模式（K）、透镜处的未聚焦激光束直径（D）和透镜焦距（f），公式如下：

$$d_f = \frac{4\lambda}{\pi} \times \frac{f}{D} \times \frac{1}{K}$$

以下因素有助于形成小光斑直径：

→ 短焦距 (f)

→ 良好的模式 = 均匀的强度分布
(接近高斯强度分布，$K = 1/M^2 = 1$)

→ 短激光束波长 (λ)

→ 透镜处的大激光束直径 (D)

焦深（Zf）决定了从透镜到工件的距离变化的容差水平以及能够被切割的厚度，决定焦深的参数与决定光斑直径的参数相同。通常小光斑伴随着浅焦深。

这意味着短焦距透镜将形成小光斑直径和短焦深，通常这样可以达到很快的速度和良好的薄板金属切割质量。但是，有必要仔细控制透镜与工件之间的距离（透镜工作距离）。在切割较厚的材料时，必须选择较长的焦距，从而使焦深适合材料厚度（图3）。由于较长的焦距也会产生较高的焦斑功率，因此必须增大焦距以保持强度和切割速度。

相对于工件的焦点位置

通过激光束聚焦获得的小光斑直径为材料处理提供了高强度。如果偏离焦点（在焦点上方或下方），激光束中的强度也将受到影响而降低。焦深反映了激光束宽度增加和强度降低的速度。较短的焦距将形成较小的光斑直径和较小的焦深。

通常必须比照工件表面，对焦点进行准确定位，焦点位置在加工过程中必须保持恒定。

激光束腰或焦点（激光束直径最小点）应位于工件表面上（在把氧气用作切割气体时，参见图4）或直至工件材料厚度的75%。高功率激光器的聚焦灵敏度低于较低功率的激光器。某些材料的焦点定位灵敏度也高于其它材料的焦点定位灵敏度。

但是，焦点位置是一个必须控制的参数以确保最佳切割性能。此外：

→ 材料和厚度变化可能要求改变焦点。

→ 激光束形状或模式变化、冷却水温度变化和透镜污染也可能改变焦点位置。

图5：激光束强度分布

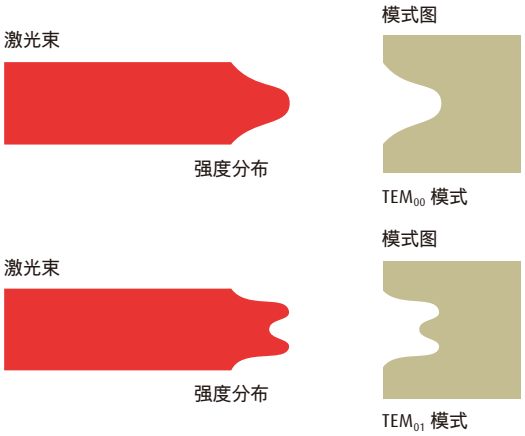
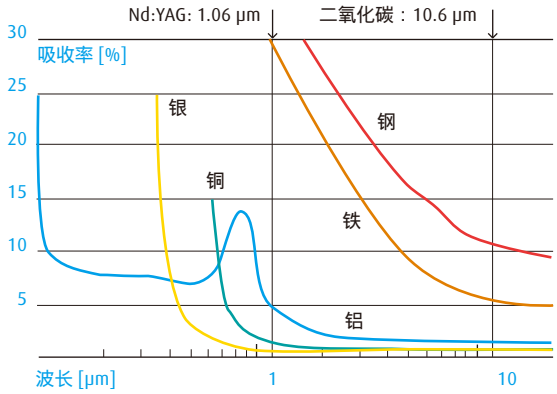


图6：不同材料对不同波长的吸收率



激光束模式

激光束模式是指能量在其截面上的分布（图5）。
激光束模式对切割工艺也会产生影响：

→ 激光束模式会影响焦斑直径和聚焦激光束强度

→ 激光束模式会影响激光束和焦点中的强度分布从而影响切割质量

因此，一个良好的模式在激光切割中是非常重要的。最佳模式是高斯强度分布，这是确保最佳聚焦特性所需的模式。高斯模式通常被表示为TEM00（横向零阶电磁模式）。

激光束波长

被切割的材料的热量吸收率取决于激光束波长（图6）。例如，冷钢中对二氧化碳激光的吸收率约为11%，89%的照射被反射，然而对Nd:YAG的吸收率约为30%。Nd:YAG和二氧化碳激光器能够克服许多金属初始的高反射率，只要聚焦激光束强度足够高。吸收率随材料温度升高而显著提高。例如，可见或近红外（Nd:YAG激光器）波长的激光无法被用于切割玻璃，因为激光通过透过玻璃，没有任何能量被吸收。

然而一些高反射材料（例如铝或铜）可以比其它材料更好地吸收某些波长，某种特定类型的激光器通常会比其它类型的激光器更适于某种特定应用。相较于波长特性，适用性通常更取决于其它激光参数（例如峰值功率、脉冲长度和聚焦能力）。因此，如果与二氧化碳激光器相比，Nd:YAG激光器可以达到更好的切割质量或更精确，只有在对脉冲Nd:YAG激光器与连续波二氧化碳激光器进行比较时，这样的表述才是正确的。

图7：喷嘴几何形状和喷距

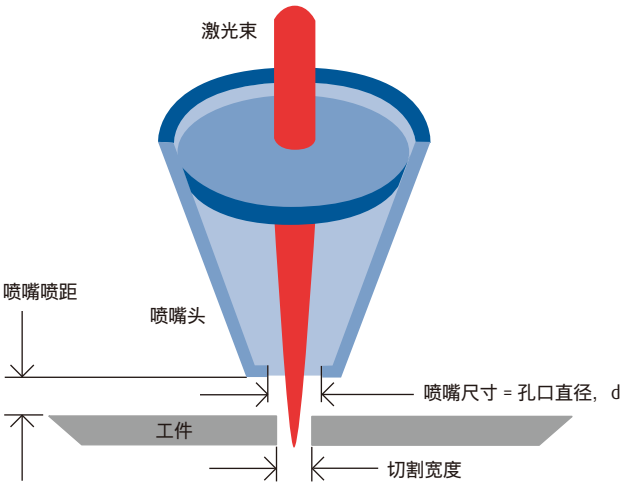
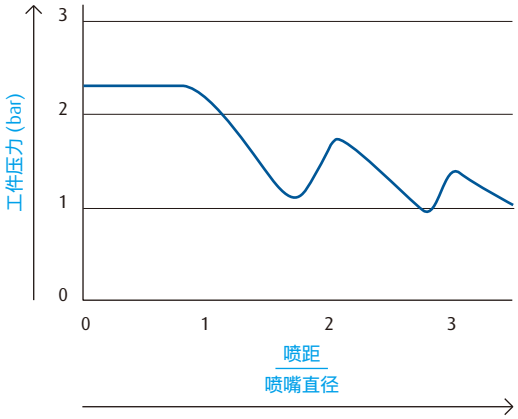


图8：喷嘴参数对切割气体有效压力的影响



喷嘴尺寸和喷距

气体辅助在激光切割中是不可或缺的。因此，喷嘴的几何形状和喷距是很重要的。激光喷嘴设计和喷嘴流量动态特征与其它热切割工艺存在实质性区别（图7）。这主要是因为喷嘴的紧凑性和喷嘴的直径，喷嘴总是大于在喷嘴下方形成的切缝。因此，在喷嘴形成的气体射流中，只有一部分穿透切缝。

喷嘴喷距取决于喷嘴设计。激光切割应用中的喷嘴喷距应小于喷嘴直径，因为如果距离较大，切割气体射流可能发生湍流和压力变化（图8）。在短喷距中，切缝本身起到喷嘴的作用，喷嘴头几何形状并不是非常重要。如果要求大喷嘴喷距，必须非常仔细地对喷嘴头进行设计，尤其是在喷嘴压力超过2～3 bar（30～45 psi）时。

典型的喷嘴直径范围是0.8～3 mm（0.03～0.12 in）。因此，为了取得最佳切割效果，喷距范围应为0.5～1.5 mm（0.02～0.06 in）。

气体类型和压力

使用的切割气体对于切割效果是非常重要的。氧气在碳钢和低合金钢中一般具有良好的切割性能。但是，氧气与基底金属发生反应，切口边缘覆盖了一个氧化层。因此，如果可以提供充分的激光功率，越来越经常使用氮切割高合金钢切割。

氮气还越来越多地被用于后续粉末涂覆部件。切口边缘上的氧化物降低涂层与材料之间的结合，因此可能导致腐蚀问题（参见参考文献1，第19页）。

把切割气体从氧气改为氮气需要对切割机设置进行另外改动。以下是关于切割压力的一些经验法则（详见以下各图表）。

随着激光行业近年来的发展，切割激光器输出功率已经高达8 kW。因此，越来越多的企业改用氮气切割不锈钢和其它高合金材。由于没有支持激光工艺的放热反应，因此切割气体压力随材料厚度增加而升高。

由于聚焦透镜是气体回路的一个整体组成部分，因此聚焦透镜强度对气体压力有一定限制，老式切割机中的气体压力可能不超过12 bar（175 psi）（取决于透镜材料和尺寸）。但是，现代切割机配备了较厚的切割透镜，可以达到厚截面不锈钢切割所需的较高切割气体压力（20 bar甚至更高）。

不同材料的压力和用气量要求

表1：碳钢使用氧气进行激光切割的参数（其中包括压力和用气量要求）

材料厚度 mm (in)	激光功率 W	喷嘴喷距 mm (in)	喷嘴直径 mm (in)	氧气压力 bar (psi)	气体用气量 m^3/h (scf/h)	切割速度 m/min (in/min)
0.5 (0.02)	500	0.3–0.6 (0.01–0.02)	0.6–0.8 (0.03–0.04)	3.5–6.0 (50–90)	2.0 (70)	15.0 (600)
1.0 (0.04)	800	0.3–0.6 (0.01–0.02)	0.6–0.8 (0.03–0.04)	3.5–6.0 (50–75)	1.8 (64)	11.0 (440)
2.0 (0.08)	1,000	0.3–0.8 (0.01–0.03)	0.6–1.2 (0.03–0.05)	2.5–4.0 (35–60)	3.0 (105)	7.0 (280)
4.0 (0.16)	1,000	0.3–0.8 (0.01–0.03)	0.6–1.2 (0.03–0.05)	2.0–4.0 (30–60)	2.7 (95)	4.0 (160)
6.0 (¼)	1,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	1.0–1.5 (0.04–0.06)	1.5–3.0 (20–45)	3.2 (115)	2.5 (100)
8.0 (0.32)	1,500	0.5–1.0 (0.02–0.04)	1.2–1.5 (0.05–0.06)	1.5–2.5 (20–35)	3.0 (105)	2.0 (80)
12.0 (½)	1,500	0.5–1.0 (0.02–0.04)	1.2–1.5 (0.05–0.06)	1.0–2.0 (15–30)	2.4 (85)	1.0 (40)
18.0 (¾)	2,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	1.2–1.5 (0.05–0.06)	0.5–1.0 (7–15)	1.4 (50)	0.5 (20)
25.0 (1.0)	4,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	1.5–2.0 (0.06–0.08)	0.5–0.7 (7–10)	1.3 (46)	0.5 (20)
25.0 (1.0)	6,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	2.0–2.3 (0.08–0.09)	0.5–0.7 (7–10)	1.5 (52)	0.9 (36)

注：以上数值仅供参考，不同切割系统可能会有差异。

碳钢和低合金钢

使用二氧化碳激光器用氧气切割是最常用的板材碳钢和低合金钢切割方法。比如常用于汽车行业的空心型材和管状结构通常使用由机器人操纵的Nd;YAG激光器切割。

目前，可以方便地使用高达6 kW的激光功率切割厚度高达25 mm（1 in）的板材。焦点位置应接近工件的上表面。表1中包含了一些重要参数的指南。图10显示了气体消耗量。本技术信息中的切割表应仅被视为指南，可能存在差异（取决于激光器类型、激光束输送系统、喷嘴布置和焦点状态）。这尤其适用于型材切割。型材切割速度通常远远低于切割表中的示值，因为执行系统（也就是机器人）无法足够迅速地仿形随动。

在切割厚度不超过6 mm（1/4 in）的板材时，可以使用焦距为127 mm（5 in）的透镜。对于超过6 mm（1/4 in）的材料厚度，应使用焦距为190 mm（7.5 in）的透镜。

在切割厚度为12～25 mm（0.5～1.0 in）的板材时，要求至少3 kW或更高的激光功率。切割氧压力一般低于1 bar（14.7 psi），喷嘴直径较大（2～3 mm（0.08～0.12 in））。聚焦点可以位于工件的上表面上方1～3 mm（0.04～0.12 in）。

在切割碳钢和低合金钢时，氧气纯度是一个重要的参数（参见参考文献2,第19页）。可以使用更高纯度氧（99.9%～99.95%）而不是标准纯度氧（99.5%，参见图9）来提高切割速度。

虽然切割速度可以提高10～30%（取决于材料厚度和钢型），但是生产率提高在很大程度上取决于被生产的部件性质。与切割复杂形状相比，在切割简单几何形状的较大部件时可以取得更好的效果，在切割复杂形状时，切割速度受到机械转向系统的能力限制而不是切割工艺本身的限制。

图9：氧气纯度对1 mm碳钢切割速度的影响
(使用800 W激光功率和3 bar压力的氧切割)

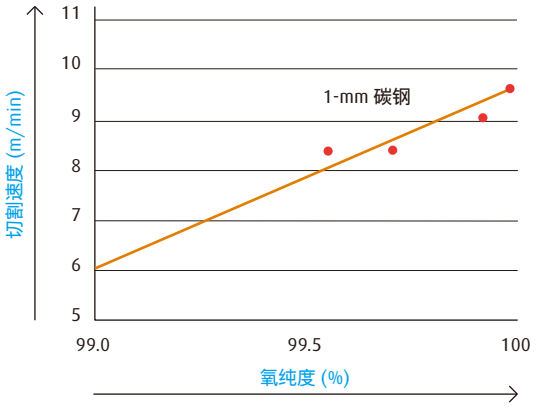
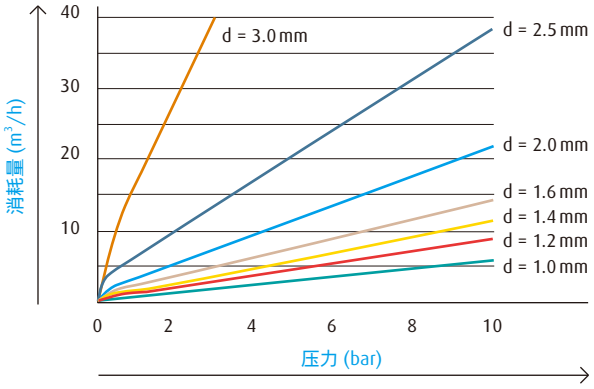


图10：氧气消耗量
(取决于喷嘴内的气体压力和喷嘴尺寸d)



在碳钢和低合金钢的氧切割过程中，切口边缘上会形成一个薄氧化层。在大部分情况下，这不会导致问题。但是，如果切割部件将进行涂装或粉末涂覆，这可能导致问题（在这种情况下，涂料附着力可能不充分，从而导致腐蚀防护不充分）。可以使用高压氮切割作为替代方案来获得无氧化物切口。但是，在切割厚材料时，切割速度会降低。现代高功率激光器可以提供相同的切割速度，在切割薄材料（厚度小于0.08 in）时，甚至可以达到更高的切割速度。

碳钢和低合金钢的表面条件在激光切割中是很重要的。例如，对锈蚀板材进行氧切割可能导致浮渣和凹口。同样，喷涂表面也可能导致问题。这对于涂覆锌底漆和氧化铁车间底漆的板材尤其明显。在氧切割过程中，只有当涂料层面向气体喷嘴时，才会出现问题。切口经常会伴有浮渣和凹口。

当涂料层位于板材的下侧时，不会出现这些问题。虽然可以使用高压氮切割来避免与涂装板材有关的问题，但是切割速度会变低。

在使用氧气进行切割时，镀锌碳钢导致许多问题。总是会形成浮渣，切割面可能非常粗糙。因此，高压氮切割在行业中被用于切割镀锌钢。可以达到合格的切割质量并且没有浮渣附着。

表2：不锈钢使用氧气进行激光切割的参数（其中包括压力和用气量要求）

材料厚度 mm (in)	激光功率 W	喷嘴喷距 mm (in)	喷嘴直径 mm (in)	氧气压力 bar (psi)	Gas volume m^3/h (scf/h)	Cutting speed m/min (in/min)
0.5 (0.02)	1,000	0.3–0.6 (0.01–0.02)	0.3–0.6 (0.01–0.02)	4.0–6.0 (60–90)	5.0 (175)	15.0 (600)
1.0 (0.04)	1,000	0.3–0.6 (0.01–0.02)	0.3–0.6 (0.01–0.02)	4.0–6.0 (60–90)	5.0 (175)	11.0 (440)
2.0 (0.08)	1,000	0.3–0.8 (0.01–0.03)	0.3–0.6 (0.01–0.02)	4.0–6.0 (60–90)	5.0 (175)	7.0 (280)
4.0 (0.16)	1,500	0.3–0.8 (0.01–0.03)	0.3–0.6 (0.01–0.02)	4.0–5.0 (60–90)	7.0 (250)	3.0 (120)
6.0 (¼)	1,500	0.3–0.8 (0.01–0.03)	0.5–0.8 (0.02–0.03)	3.5–5.0 (50–75)	7.0 (250)	0.6 (24)
9.0 (3/8)	1,500	0.5–1.0 (0.02–0.04)	0.5–0.8 (0.02–0.03)	3.5–4.0 (50–60)	5.5 (195)	0.3 (12)

注：与碳钢切割相比，氧气的压力和用气量更高。以上数值仅供参考，不同切割系统可能会有差异。

不锈钢和其它高合金钢

氧气和氮气在行业中被用作不锈钢和其它高合金钢切割气体。

在使用氧气时，由于放热能量的作用，因此可以达到高切割速度。目前，最大厚度是16 ~ 18 mm（3/4 in）。最佳焦点位置位于板材的上表面或上表面正下方。相对于碳钢切割，用氧气切割不锈钢较厚板材时，使用大约5 bar（75 psi）的相对高压力也会有助于切割。比标准氧气纯度（大约99.5%）更高的纯度（99.90 ~ 99.95%）可以提高切割速度。表2显示了一个关于使用氧气进行不锈钢激光切割的切割表。

氧切割的缺点是切口总是有毛刺，而且氧化铬和氧化铁导致切割面变色（参见参考文献3，第19页）。这些氧化物将妨碍后续焊接程序。例如，TIG焊缝在焊根侧有黑色氧化物斑点，这些氧化物斑点有时可能导致未焊透。此外，氧化后的切割面将助长切口边缘腐蚀。氧切割中的这些缺点是很严重的，因为这些缺点经常要求进行高成本精整作业。虽然可以使用高压氮切割来获得无氧化物和无毛刺切口，但是与氧切割相比，切割速度必须大幅降低。可以使用更高功率的激光器达到更高的切割速度。功率至少为2.5 kW的二氧化碳激光器通常被用于这个应用。目前，可以获得无毛刺切口的最大板材厚度范围约为12 ~ 16 mm（0.50 ~ 0.64 in）。

在高压氮切割过程中，为了获得无毛刺切口，焦点应接近板材的背表面。切缝然后变得更宽，因此更多的氮流能够穿透到切缝中并且清除熔融材料。与氧切割相比，更低的焦点位置导致气体喷嘴内的激光束截面更大（参见图11）。还必须扩大喷嘴直径，以确保激光束在不被削减的情况下穿过喷嘴。高压氮切割通常要求至少1.5 mm（0.05 in）的喷嘴直径。

表3中包含了一个关于不锈钢高压氮切割的切割表。图12显示了气体消耗量。

氮气纯度对切割速度的影响很小，只要氮纯度至少高于99.5%。但是，即使是少量的氧杂质也具有氧化作用。在不锈钢中，这意味着切割面变色。工件的耐腐蚀性也会被削弱。氧杂质含量需要低于20 ppm（0.002%）以避免氧化。虽然在不锈钢激光切割过程中有必要达到这个规格，但是在其它工业应用中通常没有这项要求。

在使用钢瓶或集装格中的气态氮时，由于可以提供各种不同的纯度等级，因此氧杂质含量是很重要的。在使用储槽中的液态氮时，由于杂质含量一般非常低，因此不会导致切割面变色。

表3：不锈钢使用氮气进行激光切割的参数（其中包括压力和用气量要求）

材料厚度 mm (in)	激光功率 W	喷嘴喷距 mm (in)	喷嘴直径 mm (in)	氮气压力 bar (psi)	气体用气量 m^3/h (scf/h)	切割速度 m/min (in/min)
1.0 (0.04)	1,500	0.3–0.6 (0.01–0.02)	1.2–1.5 (0.05–0.06)	6.0 (90)	8.0 (280)	7.0 (280)
2.0 (0.08)	1,500	0.3–0.6 (0.01–0.02)	1.2–1.5 (0.05–0.06)	9.0 (135)	12.0 (420)	4.0 (160)
4.0 (0.16)	3,000	0.3–0.8 (0.01–0.03)	2.0–2.5 (0.08–0.10)	13.0 (195)	28.0 (990)	3.0 (120)
6.0 (¼)	3,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	2.5–3.0 (0.10–0.12)	14.0 (210)	52.0 (1,840)	1.5 (60)
9.0 (3/8)	4,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	2.5–3.0 (0.10–0.12)	16.0 (240)	60.0 (2,120)	1.0 (40)
12.0 (½)	4,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	2.5–3.0 (0.10–0.12)	18.0 (260)	68.0 (2,400)	0.5 (20)
20	5,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	2.5–3.0 (0.10–0.12)	22 (320)	89.1 (3,120)	0.4 (16)
25	6,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	2.5–3.0 (0.10–0.12)	22 (320)	89.1 (3,120)	0.25 (10)

注：材料越厚，氮压力越高。以上数值仅供参考，不同切割系统可能会有差异。

图11：高压氮切割和氧气切割焦点位置的比较

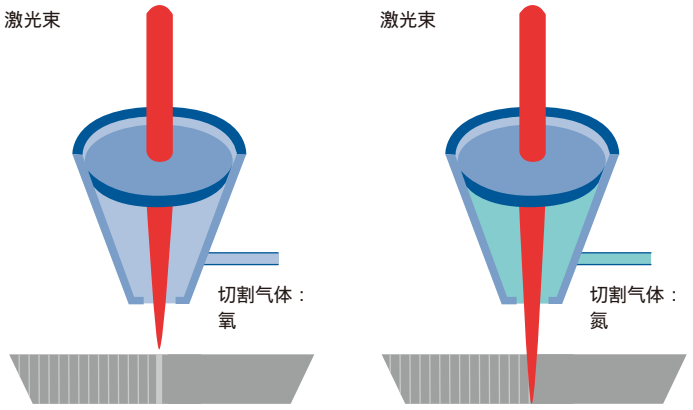
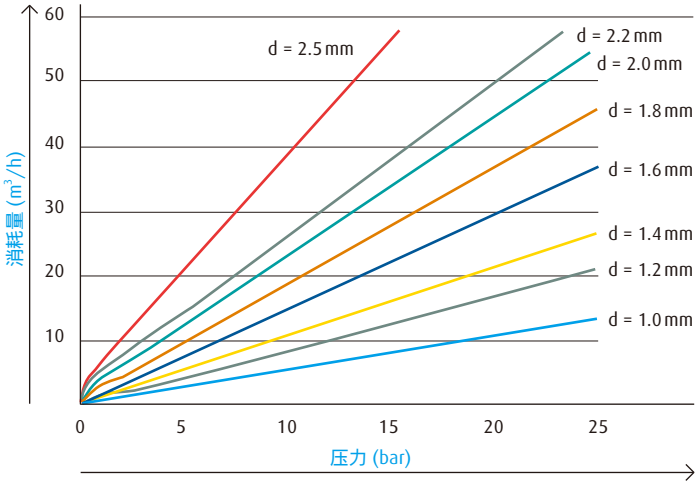
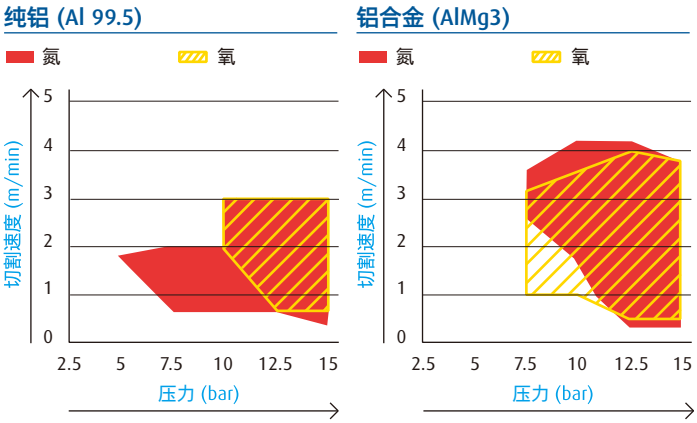


图12：氮气消耗量（取决于喷嘴内的气体压力和喷嘴尺寸d）



13：使用压力高达15 bar的氮气和氧气切割2 mm纯铝和2 mm铝合金(激光功率1,500 W) 的无浮渣参数范围



铝和铝合金

铝包括纯铝和铝合金。纯铝是软的，经常与少量镁、铜、锰、硅或锌形成合金以改进其机械强度。

由于铝的高反射率和热导率，因此使用二氧化碳激光器切割铝被认为有一定难度。但铝合金通常比纯铝更易于切割而且切割速度更快。

由于氧化铝厚表面层中的激光吸收增强，因此阳极氧化铝也比较易于切割。高激光功率（超过2 kW）和良好的激光模式有助于改进铝的切割适合性。

由于焦斑中的较高功率密度，因此大约63 mm（2.5 in）的小焦距对于较薄的板材是有利的。能够被切割的最大板材厚度约为6 ~ 8 mm（0.24 ~ 0.32 in）。

虽然氧气和氮气都可作为切割气体对铝进行切割，但是使用氧的切割速度并不显著高于使用氮的切割速度。这是由于氧化铝的熔点极高（2,072°C（3,762°F））。固态或粘性氧化铝在切口前缘上形成一个密封，阻碍氧穿透到金属中。由于湍流熔体流动，因此氧化物密封经常爆裂，即使在低速率下，氧化反应仍然可能进行。

表4：铝合金（AlMg3）激光切割参数（无浮渣切口，切割气体：氮气）

材料厚度 mm (in)	Laser power W	Nozzle stand-off mm (in)	Nozzle diameter mm (in)	Nitrogen pressure bar (psi)	Gas volume m^3/h (scf/h)	Cutting speed m/min (in/min)
1.0 (0.04)	1,800	0.3–0.6 (0.01–0.02)	1.2–1.5 (0.05–0.060)	12.0 (180)	11.0 (390)	8.2 (320)
2.0 (0.08)	1,800	0.3–0.6 (0.01–0.02)	1.2–1.5 (0.05–0.060)	14.0 (210)	15.0 (530)	3.6 (140)
3.0 (0.12)	3,000	0.3–0.8 (0.01–0.03)	1.2–1.5 (0.05–0.060)	14.0 (210)	15.0 (530)	2.5 (100)
4.0 (0.16)	3,000	0.3–0.8 (0.01–0.03)	1.8–2.2 (0.07–0.085)	14.0 (210)	35.0 (1,240)	1.8 (70)
6.0 (¼)	4,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	2.0–2.4 (0.08–0.090)	16.0 (240)	40.0 (1,410)	1.8 (70)
8.0 (3/8)	4,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	2.0–2.5 (0.08–0.100)	16.0 (240)	45.0 (1,590)	0.8 (30)
12 (½)	5,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	2.0–2.5 (0.08–0.100)	18 (260)	53.0 (1,880)	0.5 (19)
15 (3/8)	6,000	0.5–1.0 (0.02–0.04)	2.0–2.5 (0.08–0.100)	16 (230)	47.0 (1,670)	0.4 (16)

注：以上数值仅供参考，不同切割系统可能会有差异。

低于6 bar（85 psi）的低压氧切割经常被用于切割铝。激光束应聚焦在板材的上表面。使用标准氧纯度（99.5%）即可，因为更高的氧纯度并不提高切割速度。低压氧切割的缺点是切口边缘有浮渣而且切割面非常粗糙。

可以使用高压氮气或高压氧气进行切割来获得无浮渣切口。在切割铝合金时，氮气是更好的选择；在切割纯铝时，氧气是更好的选择（参见参考文献4，第19页）。图13在原则上表明了这一点，该图显示了在切割2 mm（0.08 in）纯铝（Al99.5）和铝合金（AlMg3）时获得无浮渣切口的参数范围。在对铝进行高压切割时，激光束应聚焦在板材的下表面。表4概括了AlMg3的典型切割参数，

钛

氧气和氮气不适于用作钛和钛合金切割气体，因为这些气体（例如氢）会被吸收到金属表面中并在表面形成一个硬脆性层。这个硬脆性层可能破裂，裂纹扩展可能导致部件失效。

因此，使用完全惰性气体进行高压切割是钛激光切割的首选方法。此外，在切割工艺过程中，工件经常被固定在惰性气氛容器中。最常使用氧含量非常低（99.996 ~ 99.999%）的高纯度氩和氩/氦混合气。切割气体中的氦含量是有利的，因为焦点中的高强度导致扰动的等离子体形成，切口会没有明显的浮渣附着。深焦点位置定位在板材的上表面下方是有利的。

镍合金

镍是许多重要工业合金中的基底金属，例如因科耐尔合金（镍铬合金）、尼莫尼克合金（镍铬钴合金）、哈氏合金（镍钼铬合金）和蒙乃尔合金（镍铜合金）。

虽然可以使用低于6 bar（85 psi）的低压氧切割达到高切割速度，但是切口边缘有浮渣而且切割面被氧化。

虽然可以使用高压氮获得无毛刺和无氧化物切口，但是与氧切割相比，切割速度显著降低。焦点应位于板材的上表面下方的材料内部深处。

铜合金

由于高反射率和热导率，铜的切割难度很大。必须采取预防措施以避免激光束再反射和谐振腔受到损坏。黄铜是一种重要的铜合金（铜锌合金），其反射率和热导率低于铜。因此，使用二氧化碳激光器更易于切割黄铜。很高的激光功率和非常短的透镜焦距 - 约63 mm（2.5 in）有利于铜合金的切割。

在使用二氧化碳激光器切割黄铜和其它铜合金时，氧切割更可取。氧气更适于用作切割气体，因为切口前缘的氧化层提高激光束的吸收率。不超过6 bar（85 psi）的低氧压力和高达20 bar（300 psi）的高氧压力都可使用。在高达20 bar（300 psi）的高氧压力水平上切割黄铜时，必须为工作区提供适当的通风以避免危险的富氧环境。能够被切割的最大板材厚度是4 ~ 5 mm（0.16 ~ 0.20 in）。高压氮气有时也被用于切割铜合金。

非金属

激光被广泛应用于非金属切割。

二氧化碳激光器被用于切割塑料、橡胶、纺织品、木材、陶瓷和石英。在使用1 kW二氧化碳激光器时，塑料和胶合板的最大厚度约为25 mm（1 in）。YAG激光器在行业中有时被用于切割某些类型的陶瓷（例如碳化硅和氮化硅）。

激光焊接工艺及用气

激光切割工艺

激光焊接的原理
焊接接头构造
焊接工艺类型

激光焊接的参数

焊接气体的作用
形成等离子体的可能性
机械性能
覆盖/遮蔽效果
气体喷嘴装置
喷嘴的位置

不同材料对气体压力和用量到要求

使用CO_2激光焊低碳钢时适用的焊接气体
使用盘式或光纤激光焊接低碳钢时适用的焊接气体
使用Nd:YAG激光焊低碳钢时适用的焊接气体
使用CO_2激光焊不锈钢时适用的焊接气体
使用Nd:YAG激光焊不锈钢时适用的焊接气体
使用CO_2激光焊铝时适用的焊接气体
使用Nd:YAG激光焊铝时适用的焊接气体

使用CO_2激光焊接适用的焊接气体

Nd:YAG激光焊接适用的焊接气体

激光焊接工艺

图2：激光焊头

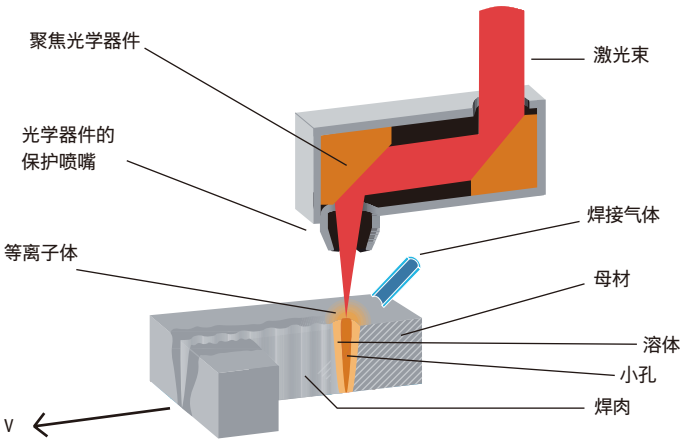
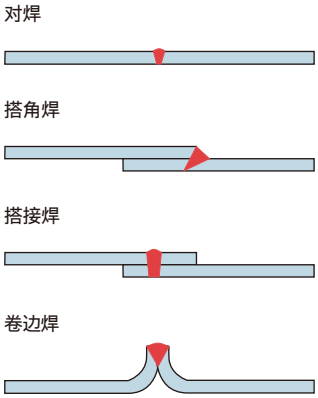


图3：4种主要的焊接接头配置



激光焊接的原理

激光束是由一组反射镜聚焦到工件上。使用反射镜而不是透镜是因为前者比后者容易冷却得多，通常在低功率切割时使用透镜。激光束相对于工件移动时，聚焦的激光束的能量令金属熔化以形成接头。图2示显示了高功率CO_2激光的焊头。

焊接接头构造

如图3所示，焊缝构造主要有四种：对焊，搭角焊，搭接焊，卷边焊

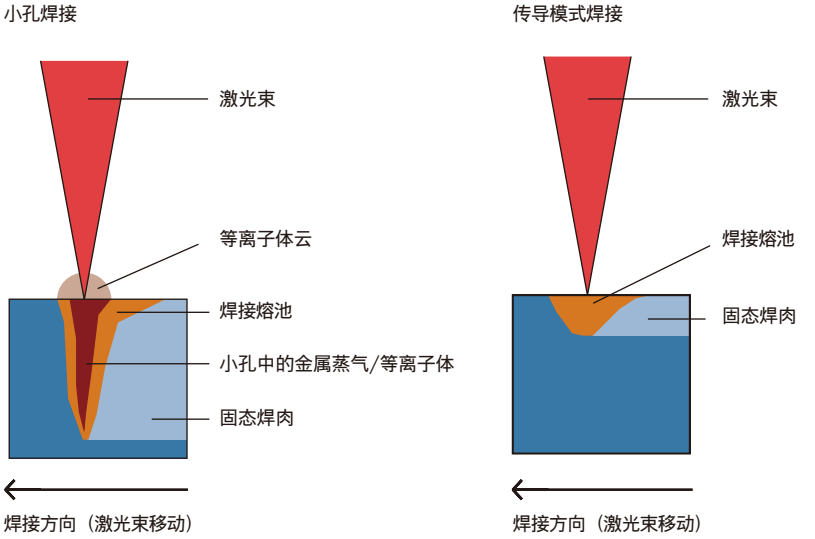
- 对焊是一种将位于同一平面的若干部件组装在一起的焊接构造。汽车拼焊板就是典型的对焊成果。熔化部件的边缘，然后施压以令其接合，从而尽量减少接合部位的间隙。边缘组对非常关键，特别是在焊接拼焊板时（<2.0毫米即<0.125英寸）：如果光束穿过超过材料厚度10%左右的间隙，则焊缝有缺陷。有涂层的材料可正常焊接作业，只要材料的边缘没有涂层。

- 搭角焊的做法是将部件在彼此的上方，熔化一个部分的边缘以令其与其他部件的表面相接合。焊缝边缘加工时，主要关注纯金属表面连接，还要去除连接区域的氧化物和表面层。

- 搭接焊作业时，部件位于彼此的上方。激光点焊就是一种典型的搭接焊。与搭角焊一样，搭接焊也严格要求清除待连结部件的交界面氧化物层和表面层，对装配的要求尚在其次。光束的能量必须强到足以穿透约等于所有材料总厚度的程度。难以从重叠区域逸出的涂层材料（锌等）是棘手的问题，可能导致焊缝中出现孔隙和其它夹杂物。这个问题可以通过在要组装的部件之间留出一个小间隙（0.05-0.2毫米，即0.002-0.008英寸）来预防；留出此间隙是为了让涂层可以蒸发的方式逸出焊接区，从而保证接缝品质不受影响。

- 实施卷边焊时，要弯曲被焊接的部件以形成凸缘，然后在边缘处接合。装配对于卷边焊也是至关重要的。

图4：两种不同的激光焊接法



焊接工艺类型

如图4所示，激光焊接的方法主要有两种：

→ 传导模式焊接，热量经由热传导从表面传到材料内

→ 小孔焊接，通过填充着电离化的金属蒸汽的孔洞，将激光束的能量深转移到材料中

传导模式焊接是典型的低功率激光（<500W）焊接，这种激光的功率密度通常不足以产生小孔，形成的焊缝有轮廓相对宽且浅的特征。

高功率激光焊接的特征是小孔焊接。功率密度超过10^5W/mm^{2}的激光，熔化并且部分汽化了金属。蒸汽的压力导致熔融金属位移，形成孔洞即小孔。激光束在小孔内部发生多次反射，激光辐射吸收率增加，每当光束撞击孔壁时，就有一部分光束能量被材料吸收。基于这个原理，小孔焊接可能形成非常深的（>20毫米，即>0.8英寸）狭窄焊缝，因此也被称为深熔焊。

激光深熔焊作业时，小孔内的温度变得非常高，几乎符合形成等离子体的物理条件，即电离化的金属蒸气和远高于10,000K的温度。等离子体吸收了激光束的部分能量，相当于热传递过程中的中间物：

在孔内蒸发压力的作用下，等离子体扩散到小孔上方，等离子体云继而令CO_2激光束散焦且分散，焦点直径增大，焦点位置和能量密度发生变化。激光辐射也被等离子体吸收。扩散的等离子体云导致焊缝熔深减小。因为能量被等离子体云吸收，焊缝呈钉子头形状；如果等离子体大量形成，焊接过程甚至可能完全中断。

等离子体云的特征是发射蓝色光，一般是由金属原子、离子、电子和环境气体气氛的组分组成的混合物。有些情况下，等离子体也可以点燃焊接气体本身，特别是在使用氩作为焊接气体时。

对于高功率的Nd:YAG激光焊接作业而言，形成等离子体并不是最严重的问题，因为Nd:YAG激光辐射波长较短，相较于CO_2激光辐射，等离子体云对前者的吸收率更低。

激光束 → 等离子体 → 工件

激光焊接的参数

表1：不同气体的化学行为和物理属性

激光焊接气体	分子量 (g/mol)	热传导率 @1巴, 15°C (W/m · K)	电离能 (eV)	离解能 (eV)	相对于空气的密度 (相对)
氦	4	0.15363	24.6	0	0.14
氩	40	0.01732	15.8	0	1.38
氮	28	0.02550	15.6	4.3	0.96
二氧化碳	44	0.01615	13.8	2.9*	1.52
注：	*CO_2 3 CO + O				

焊接熔池的局部气氛对焊接结果具有决定性的影响，可被用于调整焊缝特性。气氛取决于气体对供应的气体类型和气体喷嘴的设计和位置。

焊接气体的作用

利用喷嘴系统将焊接气体引导到工件处以保护处于熔融态的被加热的金属不受大气的影响。此外，焊接气体还有其他功能。使用CO_2激光时，可以利用焊接气体来防止烟雾和飞溅物伤害聚焦光学系统并且控制等离子体云的形成。焊接气体可以在焊接过程中发挥积极的作用，例如加快焊接速度、改善接头的机械性能。

气体有不同的化学反应和物理性质，它们是否适合成为不同焊接作业的辅助气体会受这些因素的影响。判断是否合适时，至少必须考虑三个重要的问题：

→ 形成等离子体的可能性
→ 对机械性能的影响
→ 覆盖/遮蔽效应

形成等离子体的可能性

形成等离子体在高功率CO_2激光焊接 (>3kW)中的关联性最高，因为需要达到高强度来形成等离子体。形成等离子体的可能性取决于气体的原子/分子量、热传导率和电离能。气体分子在电离之前也会消耗离解能。

低分子量会导致金属离子与等离子体的电子之间的重组率增加，从而抑制等离子体或令其密度降低。焊接气体的高导热性，增加了等离子体对周围环境的热传递，从而降低了等离子体的温度及其密度。

电离能是影响等离子体形成的一个最重要的因素，这种能量支持气体分子/原子除去一个电子，形成一个自由电子和离子。因此，高电离能可以降低焊接气体点燃形成自己的等离子体的可能性。

分子量、热导率，电离能和气体密度值如以上图1所示。

氦是分子量最低、热导率最大并且电离能最大的气体，因此是最适合用于抑制等离子体形成的气体。与之相反的是氩，比较容易离子化，因此用氩作焊接气体更容易产生过量等离子体，特别是使用功率超过3kW的CO_2激光进行焊接时。

图5：激光焊接用的气体喷嘴设计

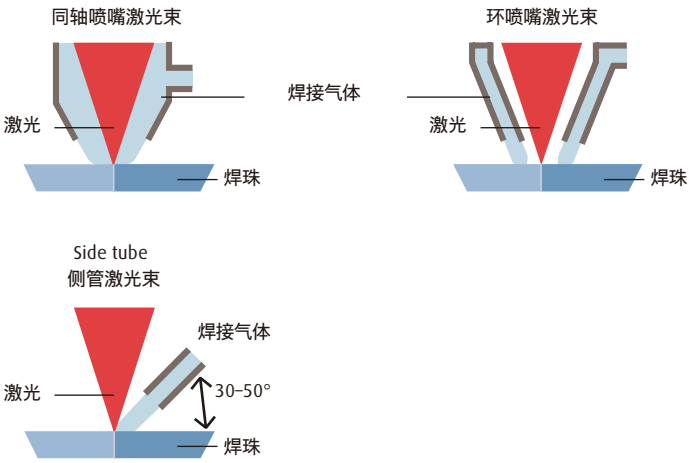


表2：常见喷嘴直径和不同类型的喷嘴装置的隙距

喷嘴装置	直径 (mm)	隙距 (mm)
同轴	6–20	5–8
侧管	5–9	2–8

机械性能

在许多情况下，使用惰性气体作为焊接气体是有利的，因为它们不与焊肉反应。氦气和氩气是完全的惰性气体，不对焊接产生冶金方面的影响。

二氧化碳和氮气则不然，它们是可与焊肉反应形成氧化物、碳化物或氮化物并且停留在毛孔中的反应性气体，进而导致焊缝机械性能不佳。因此，有些应用不适合用纯二氧化碳或氮气充当焊接气体。然而，在某些情况下，使用反应性焊接气体是可以接受甚至可能是有利的。例如，焊接某些类型的不锈钢时，使用氮气作为焊接气体成分可提高焊缝的耐腐蚀性，并且改善焊缝的微观结构。

覆盖/遮蔽效果

气体密度对于焊接区能否得到有效的保护有重要影响。低密度气体不像高密度气体那样容易取代空气。氦的密度比空气的低得多（见表1），因此，它会迅速上升脱离焊接区。有效的焊接区保护需要高速（小喷嘴，高压）或高流速（大喷嘴，低压）的定向氦气流。朝熔池中心流动的氦气流可能会干扰熔体。与之相对的是氩气，具有较高的密度，因此能够更有效地取代空气（重心位置）。

氦/氩混合物兼具这两种气体的长处，即氩气的较高密度和氦气的较高电离电势，可以在CO_2激光焊接中使用以更好地保护焊接区。

气体喷嘴装置

图5中显示了一些常见的喷嘴设计。同轴喷嘴、环喷嘴和侧管用于配合功率高达5kW 的激光作业，在这种激光焊接作业中等离子体的形成尚未构成严重问题。

喷嘴的尺寸（即开孔的直径）应相对较大，以便形成层状低速气流，这种气流的抗氧化遮蔽效果良好而且不干扰熔体在小孔周围的流动。焊接气体沿着激光束的光路流动，受到同轴喷嘴内激光辐射的影响。不过上述描述不适用于环喷嘴和侧管。

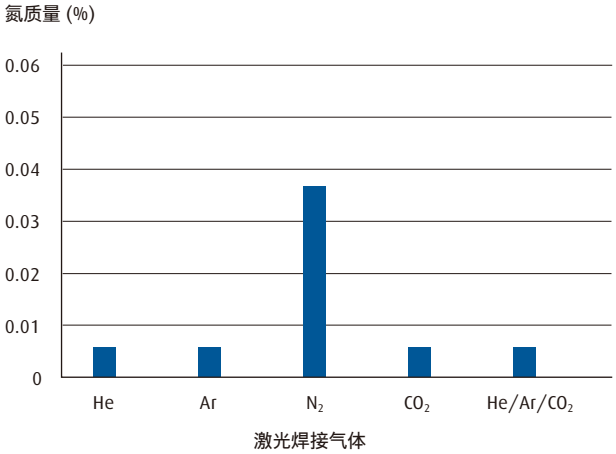
当等离子体的形成会造成严重问题时，例如在使用高功率CO_2激光（见图5）焊接较厚的部件时，人们往往会使用控制等离子体的氦气喷枪。等离子体射流喷嘴直径小，有此产生的高速气流驱散小孔上方的等离子体云。等离子体射流喷嘴常常搭配同轴喷嘴使用，以便更好地遮蔽焊接熔池。

常见的喷嘴直径和同轴喷嘴、侧管和等离子体喷枪的隙距见表2。

使用侧管或等离子体射流喷嘴时，必须为聚焦光学器件（也就是反射镜或透镜）提供防烟尘和飞溅保护，通过同轴喷嘴输入保护气流就可以达到目的，或者也可以使用十字喷枪来提供穿过激光束的高速气流以驱逐烟雾和飞溅物。

不同材料对气体压力和用量的要求

图7：使用不同焊接气体时，低碳钢焊肉内的氮含量



材料厚度：2 x 0.8 mm (0.032 in)，搭接接头，4-kW CO_2激光，
∅ 4-mm (0.16-in) 侧管，焊接速度 4.2 m/min (165 ipm)

焊接熔池适用怎样的气氛取决于材料和期望得到的焊缝特性，另外还要考虑激光的类型和功率以及进气装置。

使用CO_2激光焊低碳钢时适用的焊接气体

基于下述考虑，选择CO_2激光焊低碳钢时适用的焊接气体：
→ 需要避免形成过量的等离子体
→ 工艺使用的喷嘴装置的类型
→ 待焊金属的冶金效果

使用盘式或光纤激光焊接低碳钢时适用的焊接气体

形成等离子体对于激光功率在 1 kW 至约 6kW范围的固态激光焊接（YAG、盘式和光纤激光）来说不是大问题。但是，功率超过10kW的光纤激光可以激发大量等离子体形成，进而导致工艺问题。因此，可以使用基于氦的焊接气体如Ar/30%He或Ar/50%He。请联系林德代表以了解这方面的最新成果和最适合您使用的焊接气体。

使用Nd：YAG激光焊低碳钢时适用的焊接气体

在等离子体形成问题上，Nd:YAG激光焊接遇到的麻烦比CO_2激光焊接的少得多，这在很大程度上可以归结于两种激光辐射的波长和强度差异。实施软钢焊接时，Nd:YAG激光辐射很容易被工件吸收，实际上并不需要含氦的焊接气体，因此，对软钢实施Nd:YAG激光焊接时适合采用惰性气体氩作为焊接气体。不过，在有些应用领域，也可以使用反应性焊接气体，如二氧化碳、氩气/10%的氧气或氩/20%的二氧化碳作为替代方案。

冶金效果

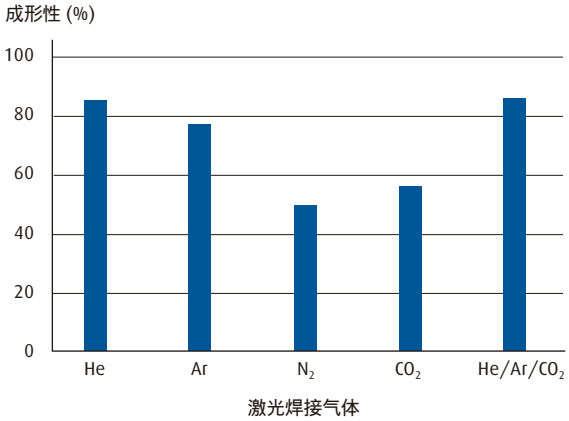
氦气和氩气是不与焊肉反应的完全惰性气体。相比之下，其他的焊接气体或焊接的气体组分，如氮、氧和二氧化碳，都属于反应性气体。因此激光焊接过程中可能会形成孔洞。成孔的其中一个原因是在小孔中流动的熔体不稳定，会以气泡形式捕集金属蒸气和焊接气体，然后在固化时形成孔洞。使用纯氮气作为焊接气体时，也可能会出现细孔。如图7所示，氮会溶入焊肉中。随着金属的固化，氮的溶解度降低。在这种情况下，小孔中形成气态氮（气体中氮含量略有增加可能与间隙的空气注入重叠区域中有关）。

反应性焊接气体和可疑溶解在材料中的气体可影响焊肉的硬度和脆性。外来原子可以进入并堵塞金属基体，从而降低了焊缝的延展性。此外，它们还可能干扰结构转变过程。使用氮时，氮会被吸收到焊接熔池内，导致激光焊接所得焊缝硬度增加。因为氮气是有效的奥氏体稳定剂，所以高温焊肉中会形成更多的奥氏体。奥氏体冷却后转变成马氏体和贝氏体。这些硬质相使焊缝更硬。

使用氧气作为焊接气体则可导致焊缝较软，这种影响在碳锰钢焊接中表现得尤其显著。高速焊接时，氧气会改变晶粒结构，形成含有针状铁素体的、更有延展性的材料。使用激光焊接技术建造船舶时，非常注重焊缝的延展性。添加了氧气组分的焊接气体，例如96%氦/4%氧气，能够提高焊缝的延展性。如果氧气含量更大并且采用缓慢的速度进行焊接，则能提供足够的时间使氧气发生进一步反应，形成氧化物以阻断基体，从而达到相反的效果，令结构变脆。

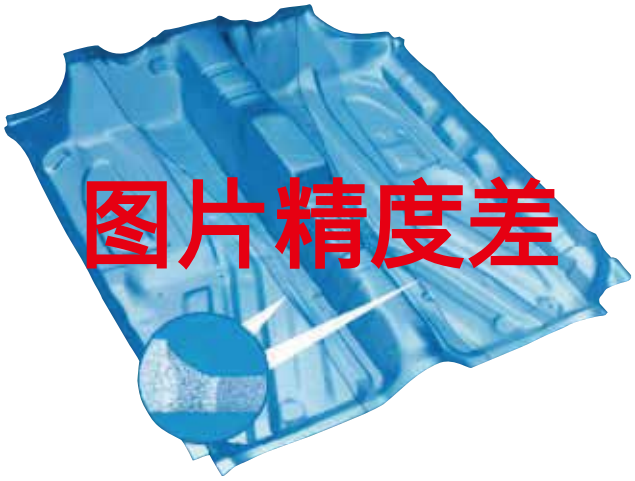
在焊接气体中混入二氧化碳会发生类似的现象。少量的二氧化碳可以降低焊接熔池的表面张力，形成光滑的焊缝接口；而大量的二氧化碳则会增加焊肉的碳含量。额外的碳吸收，对于碳含量超过0.25%的钢来说，由于这些钢在激光焊接过程时容易开裂，可能会是造成严重的问题。因此在对这些钢实施焊接作业时，最好使用不含二氧化碳的辅助气体。在对软钢或其它铁素体钢实施激光焊接时，切记不得使用含氢的焊接气体，因为氢会溶解到焊接熔池中，导致金属基体脆化。

图 8 汽车级钢板对母材的接头成形性



材料厚度： 2 x 0.8 mm (0.032 in)，对焊，4-kW CO2 激光，
∅ 4-mm (0.16-in) 侧管，焊接速度7 m/min (275 ipm)

图9：激光焊接而成的拼焊板



应用实例

焊缝的成形性是衡量拼焊质量的一项基本标准。拼焊板是采用两片或多片钢板对焊而成的一块平板（参见图9）。这些钢板可能有不同的厚度和不同的钢号，有无涂层不限。焊接后，拼焊板会被压制成组件，成为底板或汽车内门板等。

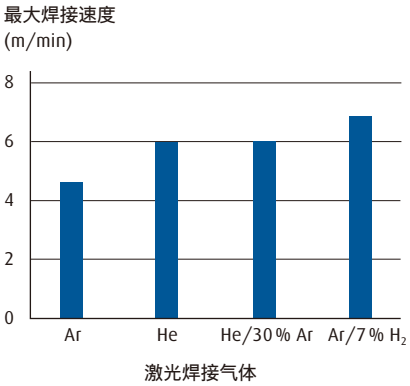
通常使用张拉试验来测试激光焊对接接头的成形性。试验的做法是，用冲头拉伸焊缝区直到其断裂，然后比较冲头和基材移动的距离。图8显示了0.8毫米（0.032英寸）钢板对焊作业时采用不同纯焊接气体和一种专业混合物的测试结果。所有气体都是通过一个侧管喷射的。使用氮气或二氧化碳时的成形性明显不如使用氦气或氩气时，因为接头内有孔存在。如果使用空气作为焊接气体，结果一样糟糕：空气中的氮被焊接熔池吸收后被捕集在孔中。此外，环形焊缝的重叠区域可能出现焊缝缺陷。含有氦气、氩气和二氧化碳的焊接气体集合了每种气体的优势，成形性优异，焊缝边缘平滑。

就过程的可靠性、效率和结构完整性而言，氦气是用CO_2激光焊接实施低碳钢焊接时是适用的焊接气体。氦气可以搭配同轴喷嘴、侧管和等离子体喷枪使用。氦的特点在于对侧管位置变化的容限度非常大，焊板的成形性也比较好，因此氦气非常适合拼焊。氦能够非常有效地抑制等离子体，能够配合所有功率的激光作业，甚至可以辅助实施厚板焊接。然而，氦作为一种储量有限的自然资源，它的可用性是有限的。因此，激光焊接作业对纯氦的替代品的需求正日益增加。

LASGON®C1是特别适合功率高达8kW的CO_2激光作业的混合物，由15%CO_2、50%的氩和35%的氦组成，这种焊接气体能在减少氦气消耗的同时，还能提高焊接速度，进而产生良好的焊接质量。

使用功率高达3kW的激光实施焊接作业时，也可以使用氩作为防护气体，激光功率超过3kW 时，氩可能会形成过多的等离子体，导致生产率和质量下降。相较于纯氩，氩气混合物（例如氩/30%的氦、氩气/10%的氧和氩/20%的二氧化碳）在特定的激光功率下能更有效地抑制等离子体。

图10：各种焊接气体适用的焊接速度



奥氏体不锈钢 (AISI 304)：2mm (0.08in)， 2.2kW CO_2激光，
∅ 8mm (0.315 in) 同轴喷嘴

使用CO_2激光焊不锈钢时适用的焊接气体

焊接软钢时对于焊接气体的考虑，如等离子体形成和喷嘴设置，在不锈钢焊接时也适用，然而就焊接气体对焊肉的冶金影响而言，不锈钢是有别于软钢的，因为不锈钢的合金元素含量比软钢多得多。

焊接气体的选择取决于不锈钢的类型 — 奥氏体钢、铁素体钢或奥氏体 — 铁素体钢 — 及其具体的合金组成。一般应避免使用含有氧和二氧化碳的焊接气体。氧气会导致焊肉中和表面上生成氧化夹杂物，进而可能会降低耐腐蚀性。二氧化碳会氧化焊缝，还可能增加晶间腐蚀危险。

使用Nd：YAG激光焊不锈钢时适用的焊接气体

与CO_2激光焊接相比，在Nd：YAG激光焊接中，等离子体形成导致的激光束吸收和散射并非最严重的问题（见第12页上的说明），因此，在Nd：YAG激光焊接中使用氦氦混合气作为焊接气体，好处并不明显。

对不锈钢实施Nd：YAG激光焊接时，应该选择何种焊接气体？这个问题在很大程度上取决于是否需要防止氧化。氩气充当低功率（小于500W）Nd：YAG激光焊接作业（用于焊接小不锈钢组件）的焊接气体已有多年的历史，但是氩气也可以用于高功率焊接作业（1-5kW）。焊接奥氏体钢时，为了获得善良的焊接面，可以使用氩气/6-10%氢气来减少表面氧化物。在一些情况下，可以使用活性焊接气体（例如氮气）来提高耐腐蚀性并且获得合适的焊缝微结构。进行不锈钢CO_2激光焊接时的考虑因素，在这些情况下也适用。

奥氏体不锈钢

奥氏体钢是最常见的不锈钢类型，以铬和镍作为其主要的合金元素，有时少量添加氮以提高机械强度和耐点蚀性。超奥氏体钢是拥有比普通奥氏体钢更高的合金含量（特别是钼和氮含量）的奥氏体钢典范。

奥氏体钢加工时经常使用氦、氩和氩/氦混合物（氩/30%氦和氩/50%氦）。激光功率越高，为减少等离子体的形成，焊接气体的氦含量也必须越高。

激光功率较低的情况下，可以使用含氢的焊接气体，如氩气/6-10%的氢。除了控制等离子体的形成，氢还可以减少表面氧化物量并影响熔体的粘度。图10显示了对2mm（0.08in）的奥氏体钢施加一些焊接气体时的焊接速度。在这些试验中，使用氩气/7%氢气混合物作为焊接气体时焊接速度最高，超过了使用氦、氩或氦/30%氩时达到的焊接速度，可以通过低功率CO_2激光焊接获得闪亮的金属焊面。

为了在使用高功率CO_2激光时减少等离子体的形成，可以使用LASGON®H混合物，这种混合物由氩和8-10%的氢和20%-40%的氦构成。基于氢、氩和氦的混合物可以帮助高功率CO_2激光焊接获得闪亮的金属焊面。

对于含氮合金组分的奥氏体和超奥氏体钢而言，氮是合适的焊接气体成分。氮气作为焊接气体，补偿了焊肉损失的氮，从而避免了因失氮导致的焊缝耐点蚀性下降。

然而，含钛和铌合金组分的奥氏体钢不适合使用氮作为焊接气体。氮会与这些元素形成氮化物，减少了用于预防碳化铬形成和晶间腐蚀的自由钛和铌。

铁素体不锈钢

铬是铁素体不锈钢的主要合金元素。惰性焊接气体，如氦气、氩气和氩/氦混合气，适用于CO_2激光焊接。氮气充当焊接气体可增加熔体中的氮含量，因此，铁素体钢焊接时使用氮气和使用碳有相同的效果，即会增加焊肉中的马氏体含量，进而增加焊缝的脆性。含氢的焊接气体不适用，因为铁素体不锈钢类似于软钢，很容易出现氢脆问题。

奥氏体 — 铁素体不锈钢

奥氏体 — 铁素体钢也被称为双相或超级双相不锈钢，特征是拥有含奥氏体和铁素体的两相微组织。通常，奥氏体和铁素体的体积分数是相等的；主要合金元素是铬，镍和钼。双相不锈钢通常也有少量的氮作为合金组分。超级双相钢是奥氏体-铁素体钢的更高合金化变体。

焊接双相钢遇到的其中一个问题是，相较于母体金属，焊珠中的奥氏体含量显着减小，导致接头的机械性能和耐腐蚀性降低。使用氮气、氩/氦混合气或氦/氦混合气作为焊接气体，可以增加焊珠中的奥氏体含量，因为吸入焊肉中的氮能够促进奥氏体形成。

处理双相钢时，应避免使用含氢的焊接气体。双相钢含有大量铁素体，容易出现氢脆问题。

对不锈钢实施激光焊接时，有时需要为根侧提供防止焊接和/或背衬气体氧化的额外防护。高焊接速度会导致焊肉在还没冷却到非临界温度之前就离开保护区，进而可能与环境空气发生反应。在这种情况下，需要增设一个气罩为顶层焊珠提供额外的保护。

氩气和氮/氢混合气被用作奥氏体钢的背衬气体。然而，不推荐对钛稳定的奥氏体钢使用氮/氢混合气，因为有形成氮化钛的风险。为避免氢致开裂的风险，推荐对铁素体钢使用无氢的背衬气体，如氩气。氮适合充当双相钢和超级双相钢的背衬气体，因为它能令焊肉内生产更多奥氏体。

使用CO_2激光焊铝时适用的焊接气体

对铝和铝合金实施CO_2激光焊接被认为颇有难度，因为铝的反射率高，导热性强。反射率高使得工件难以吸收CO_2激光辐射;导热性强则令吸收的热量很容易离开焦斑区域，从而导致很难突破深熔焊的阈值，也就是即达到令铝蒸发进而形成小孔所需的高温。因此，相较于焊钢，用CO_2激光焊铝所需的激光功率要高得多，对光束质量的要求也更高。

多孔是铝激光焊接的典型现象。孔隙的生产在很大程度上，可能与氢有关，因为氢很容易溶解在焊接熔池中。

显然，焊铝时要避免使用含氢的焊接气体；此外，焊接气体的供气系统必须能够防止扩散以避免渗氢。

孔也可能变大、变深（导致所谓的空腔），材料可能从小孔中喷出，这个现场通常被称为驼峰焊道。出现驼峰焊道是因为小孔在湍急的焊接熔池中变得不稳定，继而发生了崩溃。为了稳定小孔，可用特殊的反射镜（双焦技术）将激光束拆成两束。两束光的焦点彼此靠近，从而扩大和稳定了小孔。

对铝和铝合金实施CO_2激光焊接时，使用氦和氩混合气（例如Ar/30%He）作为焊接气体最为合适，这种焊接气体可令激光辐射更有效地耦合到工件中，取得良好的焊接质量。

有时在对铝实施激光焊接时，需要使用惰性背衬气体来保护焊缝的根侧不受周围空气的影响，例如湿气就可以导致焊缝中出现氢诱发孔。氩气和氦气可用作背衬气体。

第18页上表3中总结了铝和铝合金CO_2激光焊接适用的焊接气体和背衬气体。

使用Nd：YAG激光焊铝时适用的焊接气体

由于Nd：YAG激光的波长较短，它们产生的红外辐射相较于CO_2激光辐射，更容易被铝和铝合金吸收，因此，用Nd：YAG激光焊铝比用CO_2激光器容易，遇到的能量耦合和等离子体形成问题也相对轻松一点。

使用高功率的Nd：YAG激光（1-5kW）对铝实施焊接作业时，最适合的焊接气体为氦和氦/氩混合气。事实证明，氦气造成的焊接飞溅比氩气的少。使用氦/氩混合气体（氩气含量10-30%）可以获得良好的焊接结果。

有时需要使用背衬气体来防止环境空气伤害焊缝根部侧，特别是发挥防湿作用。使用氩气和氦气都能达到这个目的。

第19页上表4中总结了铝和铝合金Nd：YAG激光焊接适用的焊接气体和背衬气体。

使用CO_2激光焊接适用的焊接气体

表3：CO_2激光焊接适用的焊接气体

材料	焊接气体	备注*	背衬气体
软钢和碳锰钢	氦	所有激光功率，可通过同轴喷嘴或侧管供气，焊接质量高，成形性好	氩
	氩	高达3kW的激光功率，通过同轴喷嘴或侧管供气	
	氩/30%的氦 氩/50%的氦	同轴喷嘴或侧管供气，焊接质量高，成形性好	
	氩/10%的氧	高达5kW的激光功率，同轴喷嘴供气，成形性好	
	氩/20%的二氧化碳	高达5kW的激光功率，侧管供气，对喷嘴参数变化容忍有限，可接受的低碳钢焊接质量	
	LASGON®C：氩/氦/二氧化碳	高达8kW激光功率，侧管供气，焊接质量高(尤其是带涂层的材料)	
奥氏体和超级奥氏体不锈钢	氩/6-10%的氢	高达5kW的激光功率，同轴喷嘴或侧管供气，焊接速度快，闪亮的焊面	氩和氮/氢混合物
	LASGON®H：氩/氦/氢	L高达8kW的激光功率，同轴喷嘴或侧管供气，焊接速度快，闪亮的焊面	
	氩	高达3kW的激光功率，同轴喷嘴或侧管供气	
	氩/30%的氦 氩/50%的氦	同轴喷嘴或侧管供气	
	氦	所有的激光功率，同轴喷嘴或侧管供气	
	氮	同轴喷嘴或侧管供气，氮合金钢	
铁素体不锈钢	氦	高达3kW的激光功率，同轴喷嘴或侧管	氩
	氩/30%的氦 氩/50%的氦	同轴喷嘴或侧管供气	
	氦	所有的激光功率，同轴喷嘴或侧管	
奥氏体 — 铁素体不锈钢（双相）	氮	同轴喷嘴或侧管供气，氮合金钢	氮
	氩/氮混合物	同轴喷嘴或侧管供气	
	氦/氮混合物	高激光功率，同轴喷嘴或侧管供气	
铝和铝合金	氩/30%的氦 氩/50%的氦 氦/30%氩	侧管或同轴喷嘴，高熔深，焊接质量好	氩和氦
	氦	所有的激光功率，同轴喷嘴或侧管供气	

注：* 上述值仅供参考，实际数值视焊接系统而定。林德的 LASERLINE®方案包括优化气体、定制供气系统和全面服务。

Nd：YAG激光焊接适用的焊接气体

表4：Nd：YAG激光焊接使用的焊接气体

材料	焊接气体	备注*	背衬气体
软钢和碳锰钢	氦	所有的激光功率，惰性气体，焊接质量好	氩
	二氧化碳	特殊应用	
	氩/二氧化碳	所有的激光功率，焊接质量好（尤其是带涂层的材料）	
奥氏体和	氩	所有的激光功率，惰性气体，焊接质量好	氩和氮/氢混合物
超级奥氏体	氩/6-10%氢	所有的激光功率，闪亮的焊面	
不锈钢	氮	氮合金钢	
铁素体不锈钢	氩	所有的激光功率，惰性气体，焊接质量好	氩
奥氏体 — 铁素体不锈钢（双相）	氮	所有的激光功率	氮
铝和铝合金	氦	所有的激光功率，焊接质量好	氩和氦
	氦/10-30%的氩	所有的激光功率，焊接质量好	
	氩	所有的激光功率，焊接飞溅物	
	氦	所有的激光功率，同轴喷嘴或侧管供气	
注：	*上述值仅供参考，实际数值视焊接系统而定。		

CO_2激光器的发生气体解决方案

激光气体

用于二氧化碳激光器的激光气体
用于准分子激光器的激光气体

激光发生气体的纯度

杂质来源
杂质与激光器性能
激光气体中的关键杂质
激光气体中的非关键杂质
高纯气体质量

激光气体供应系统

激光发生气体容器
钢瓶减压器或汇流排
手动/自动气体供应系统
气体供应管路
使用点

激光气体

受激的辐射光放大（激光）产生单一和特定波长的狭窄和强大的光束。激光器把一种能量形态（电、光子、辐射）转换成另一种能量形态（也就是激光，参见图1）。这样将产生能够长距离移动的激光束，把激光束聚焦在一个小光斑上将产生非常高的温度。

通常有两种类型的激光器被用于材料加工：气体激光器和固态激光器。二氧化碳和准分子激光器是常用的气体激光器。二氧化碳激光最常用于激光切割，激光媒质是一种气体，或者更准确而言，是一种以二氧化碳作为活性组分的混合气。准分子激光器最适用于表面处理应用和微加工。准分子混合气由一种稀有气体/卤素组成。准分子（受激二聚体）是指在电子激发状态把一个卤素原子和一个惰性气体原子相结合的短寿分子。在激发状态，它们形成一种亚稳态复合物（准分子）。

固态激光器涵盖许多系统（例如Nd:YAG或Yt:YAG激光器、二极管激光器和光纤激光器），这些系统中的激光媒质是一种固体。因此，这些激光器不需要气体生成激光束。

关于激光原理和激光器类型的更多信息，参见技术信息"工业应用激光器"。

图1：激光器共振腔内的激光气体激发

用于材料加工的气体激光器可以分成两类：二氧化碳激光器和准分子激光器。这两类激光器生成不可见的激光辐射。还有许多低功率气体激光器会生成可见激光束例如氦氖激光器，它们被用于二氧化碳激光加工系统中的材料定位。

用于二氧化碳激光器的激光气体

顾名思义，气体激光器需要气体生成激光束。二氧化碳激光器是其中最常见的一种，它使用二氧化碳作为活性激光媒质。

二氧化碳激光混合气中几乎总是含有氦、氮和二氧化碳作为基本组成。某些激光器可能要求添加少量一氧化碳、氧、氢和/或氙，触发共振腔内的化学过程。一氧化碳和氧抵消二氧化碳分解（解离），从而获得更高的输出功率。氢具有类似的作用，能够有助于共振腔内更均匀的放电。还可以通过添加氙来改进输出功率和效率。这具有最低的电离势和最大的电离界面，从而成为放电中的离子的主要来源。

激光发生气体可以分置在不同的钢瓶中分开供应，或者也可以在单个钢瓶中预混合。

二氧化碳的作用

二氧化碳是生成激光（也就是波长10.6 μm的红外辐射）的活性气体。通过二氧化碳分子中的不同振动能级之间的跃迁产生辐射。

激光辐射产生过程：

1. 通过与放电中的电子碰撞，二氧化碳分子被激发到激光上能级。
2. 通过从激光上能级跃迁到激光下能级，产生10.6 μm激光辐射。
3. 在达到激光下能级之后，通过与其它气体分子碰撞，二氧化碳分子被转移到最低能级。这被称为"弛豫"。

可以仅使用二氧化碳作为激光气体来运行二氧化碳激光器。但是，为了产生激光切割和焊接所需的功率，有必要添加氮和氦。

氮的作用

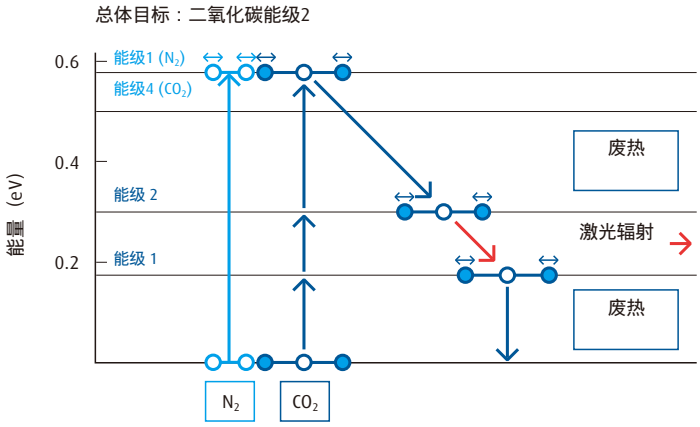
通过电场或放电，相对易于把氮分子激发到第一振动能级。氮的这个第一能级具有几乎与二氧化碳的上能级相同的能含量（参见图2）。通过两个分子之间的碰撞，完成从氮到二氧化碳的振动能转移。因此，通过引入氮，更易于激发二氧化碳的激光上能级。把氮添加到二氧化碳中将获得更高的激光功率。

氦的作用

氦的主要作用是有助于二氧化碳弛豫（也就是从下能级移到最低能级并且再进入激发过程）。氦原子与二氧化碳分子碰撞，振动能从二氧化碳分子被转移到氦原子。因此，可以获得更高的激光功率。

氦还有助于把热量导离电场或放电（在所有的气体中，氦的导热系数是最高的）。这对于慢流二氧化碳激光器是非常重要的，在这类激光器中，必须把过热传导到放电管壁。对于快流二氧化碳激光器，氦能够提供更稳定的放电并且支持激发效率。

图2：氮在二氧化碳激发过程中的作用



用于准分子激光器的激光气体

准分子激光器也是多气体激光器。可以生成多个光谱线（波长）（取决于激光混合气中的稀有气体/卤素组合类型）。在激发状态，它们形成一种被称为"准分子"（受激二聚体）的亚稳态复合物。当这种复合物崩解时，射出紫外辐射。氪氟激光器是这类激光器的典型示例（生成248 nm激光辐射）。另一种类型是氙氯激光器（射出308 nm辐射）。稀有气体通常是氩、氪或氙、缓冲气体、氦或氖以及代表卤素的氟或氯。

氟和氯有毒性和高度腐蚀性（尤其是在与水分接触时），对于气体供应系统以及在处理激光废气时，要求执行特殊流程和规程。

在提供准分子激光器时，一般供应定制混合预混合气（卤素成分被稀释低于10%）。

激光发生气体的纯度

所有的主要激光器制造商限定了激光发生气体的"最低纯度"：

激光发生气体的最低纯度

激光氦	99.996 % (4.6)
激光氮	99.996 % (4.6)
二氧化碳	99.995 % (4.5)

但是，仅仅是这些纯度水平并不能保证可靠的激光器运行。气体中存在的某些杂质可能影响激光器性能，即使是在这些高纯度水平上。然而，氮作为氦气中的一种杂质并不产生任何影响，因为氮已经是激光混合气的一个成分。但其它杂质可能对激光器性能产生灾难性的有害的影响。

杂质来源

气体钢瓶经常被认为是杂质的来源，然而情况并不是这样，因为气体钢瓶在出运前经过了大量的检查。激光器共振腔混合气的潜在杂质来源包括：

- 在钢瓶更换过程中被断开的软管
- 气体管路
- 气体泄漏
- 激光束生成过程（解离、分解以及形成次生化合物的解离元素之间的反应导致在放电中形成杂质）
- 内电极溅射形成的颗粒（电弧放电）

在许多情况下，气体供应系统是涉及导致高纯激光气体在从气体钢瓶输送到共振腔的过程中受到污染风险最高的地方。

杂质与激光器性能

激光混合气中的某些杂质可能影响二氧化碳激光器性能，从而导致以下某些后果：

放电不稳定性
阴离子（例如NO_2^-、H^-或OH^-）导致放电中越来越多的热不稳定性。这可能导致普通辉光放电收缩成不利的电弧放电或者电流和电压的波动。因此，电极或发电部件可能受到损坏。

反射镜上的沉积物
在烃化合物（例如油蒸气）放电过程中产生的粉尘颗粒和粉尘解离将导致在水冷反射镜上形成沉积物从而影响反射率。反射镜上的沉积物吸收激光辐射，并且可能导致间歇性过热和反射镜涂膜受到严重损坏（参见图4）。热冲击将导致激光束的均匀性受到破坏，反射镜将最终失效，并可能发生非常惨重的后果，例如铜基底熔化。

激光功率损失
杂质可能以某些方式降低激光功率。某些杂质吸收10.6 μm激光辐射，这些杂质可能解离并且与存在的其它元素发生进一步反应。其它杂质可能与被激发到上能级的二氧化碳分子碰撞。这些被激发的二氧化碳分子将失去能量，不射出激光辐射。

对激光器性能的影响
在日常运行中，无法轻易地把激光器性能问题归因于杂质。激光功率损失在开始时是最小的，可以通过提高功率设定或降低切割速度来补偿激光功率损失，也可以通过功率或速度调节来补偿反射镜上的沉积物导致的激光束轮廓中的小凹陷。因此，激光器故障通常是意外发生的，并且可能导致高成本损失（不仅包括修理成本和部件成本，而且包括激光器停机、生产延迟和失去客户导致的收益损失）。

图4：受到损坏的激光光学部件

关于激光气体纯度的事实信息

- 激光器制造商限定了LASERLINE®气体纯度
- 水蒸气和碳氢化合物杂质的影响非常大，即使是在非常低的浓度（低于10 ppm）
- 氧杂质在高浓度水平上（超过100 ppm）将产生显著影响
- 最有可能的杂质来源是气体钢瓶更换、气体管路和减压器

激光气体中的关键杂质

杂质可能对激光器性能产生损失惨重的影响，杂质是一种切实存在的风险。

水蒸气

由于水蒸气杂质可能在放电中分解并且生成阴离子OH^-和H^-，因此放电变得不稳定。这个问题对于高功率激光器是尤其严重，因为这些激光器总是在极端条件下运行。在分解中生成的活性氧可能产生进一步反应（其中包括脆性反射镜和输出窗表面受到损坏）。

碳氢化合物

碳氢化合物可能以多种方式影响激光器性能。碳氢化合物在放电中分解，可能在反射镜上形成碳或聚合物沉积物。碳氢化合物还可能减少激光增益。激光增益是激光器放大激光辐射的能力的一个衡量指标，激光辐射对激光器的输出功率和性能有影响。

氧

当二氧化碳在放电中解离时形成氧，氧浓度可能达到几千ppm。氧对快速轴流二氧化碳激光器是一种杂质，可能对光学部件产生严重影响，即使是在低于1,000 ppm的浓度情况下也会产生影响。氧浓度对光学部件产生的负面影响是由于在放电中形成臭氧，从而导致光学部件受到侵蚀。与横流激光器相比，轴向流激光器通常对氧更敏感。目前还不充分了解导致这种情况的原因。但是，轴流激光器中较高的激光束强度可能是其中一个原因。

激光发生气体中的非关键杂质

非关键杂质通常并不影响激光工艺，除非这些杂质浓度超过1000 ppm，超过这个浓度，这些杂质将会影响激光混合气平衡。

由于氮本身是一种激光气体，因此在其它激光气体中存在的氮是没有关系的。

二氧化碳在放电中解离导致在激光器共振腔内生成一氧化碳。因此，在激光气体钢瓶中的一氧化碳杂质也是没有关系的。

在任何激光气体中，氩杂质都不影响激光器性能。

氮氧化物（一氧化氮、二氧化氮、一氧化二氮、三氧化二氮）可能对激光器性能产生不利影响。特别是二氧化氮和三氧化二氮可能影响放电的稳定性，即使是非常低的浓度水平上。所幸的是二氧化氮和三氧化二氮并不是常见的杂质。解离二氧化碳中的解离氮和氧原子之间的反应导致在激光器中形成一氧化氮。因此，激光气体中的氮氧化物杂质含量是没有关系的。

高纯气体质量

林德公司的激光行业培训好的气体供应工程师网络，有一只强大的激光应用专家组成的全球团队进行支持，该专家团队拥有超过40年的激光应用经验。与您一起合作，我们将确保从一系列气体中挑选出正确的激光气和辅助气，并以最高标准供应，服务于您的激光切割和焊接应用。

工艺	气体		%纯度
用于现场混配的高纯激光气	二氧化碳	CO_2	99.995%(4.5)
	氮气	N_2	99.999%(5.0)
	氦气	He	99.996%(4.6)
纯净辅助气	氧气	O_2	99.95%(3.5)
	氮气	N_2	99.999%(5.0)
	氩气	Ar	99.999%(5.0)
激光焊接及表面处理	氩气	Ar	99.999%(5.0)
	氦气	He	
	LASGON®氮气特殊混配气	N_2	99.999%(5.0)
			99.999%(5.0)
等离子粉末喷涂气体	氩气	Ar	99.996%(4.6)

气体产品	组分体积分数%						
	CO_2	N_2	He	CO	H_2	O_2	Xe
LASERMIX®302	1.70	23.40	74.90				
LASERMIX®312	3.14	31.40	65.46				
LASERMIX®320	4.50	13.50	82.00				
LASERMIX®321	5.00	55.00	40.00				
LASERMIX®322	5.50	29.00	65.50				
LASERMIX®324	3.40	15.60	81.00				
LASERMIX®328	12.00	12.00	76.00				
LASERMIX®330	7.00	28.00	65.00				
LASERMIX®331	5.00	35.00	60.00				
LASERMIX®344	4.00	26.00	70.00				
LASERMIX®477	8.00	16.00	72.00	4.00			
LASERMIX®483	8.00	60.00	28.00	4.00			
LASERMIX®581	7.50	15.00	74.25	3.00	0.25		
LASERMIX®584	8.00	8.00	8.00	4.00	4.00		
LASERMIX®690	4.00	19.00	65.00	6.00		3.00	3.00

H2O < 5 ppm, THC (总碳氢化合物) < 1 ppm
对于所有主要的激光应用，林德公司目前都有一定数量的LASERMIX® 混配气库存。然而林德公司最先进的气体充装工厂可以按客户需求生产任何配比的混配气。

激光气体供应系统

图5：气体供应的系统设置

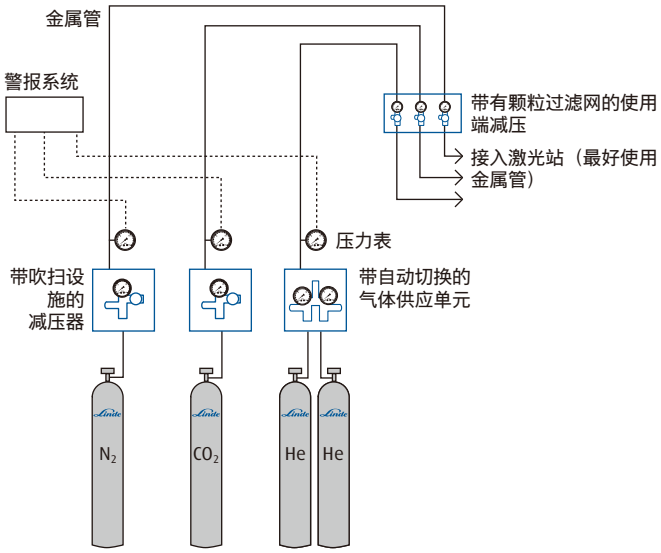
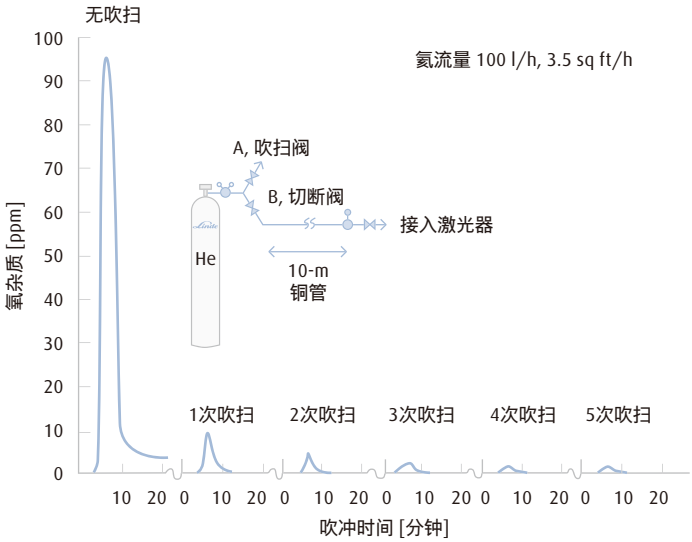


图6：钢瓶更换和吹扫之后的氧杂质残余



激光气体系统把气体钢瓶的气接入共振腔（参见图5）。激光气体系统由减压器、硬管/软管、出口阀、接头和特殊设备组成。气体供应系统从气体钢瓶开始，需要把钢瓶的充装压力降至工作压力。

压力控制

在钢瓶中的高纯度气体一般被压缩到100 bar（1,450 psi）以上，从而可以在钢瓶储存更多的气体。必须把这个充装压力降至工作压力（一般低于10 bar）。不同长度的气体供应管路把气体输送到使用点（激光器被接入使用点），出口阀或出口减压器通常在这个使用点运行。

高纯减压器

要维持稳定的压力，一般要求双级减压，或直接使用高纯双级减压器，或者分别在钢瓶处和使用点各使用一个单级减压器。与标准的焊接减压器相比，高纯减压器的一个优点是高纯减压器采用的是金属膜片（与标准聚合物膜不同的是，金属膜不射出颗粒或不允许杂质渗透）。

吹扫设施

在气体钢瓶更换过程中，除非采取了预防措施，否则气体钢瓶的高压接头是暴露在外的，粉尘、烟尘、湿气和其它存在的气体可能进入软管，并且被置换气体吹入共振腔。因此，在把新的气体钢瓶气接入激光器共振腔之前，必须对这些杂质进行吹扫。

使用两个额外的阀门有助于避免所有这些问题：一个阀门关闭与激光器共振腔的连接（B），另一个阀门打开气体管路将污染物释放至大气环境中（A，参见图6）。氧杂质含量测量表明，只需少许几次吹扫即可清除减压器和软管中的氧杂质（如图6所示）。通过快速打开和关闭阀门A，对吹扫过程进行控制。打开阀门A几分钟时间形成的连续气流是不充分的，因为这无法有效地清除被截留的杂质（例如死角中的一些杂质）。相比较而言，当阀门A关闭时，高压软管中含污染的气体会被稀释；当阀门A打开时，被污染的混合气将被释出到周围环境中。

气体供应类型取决于消耗量和消耗曲线。在LASERLINE®气体供应系统设计过程中，都会考虑到经济和业务两方面的因素。

激光发生气体容器

由于相对较小的容量要求，因此通常在压缩气体钢瓶中供应激光气体。如果通过一个气体分配网络向许多激光器进行供应，钢瓶集装格是一种替代供应模式。

钢瓶减压器或壁装式汇流排

钢瓶减压器非常易于安装，但不允许不间断运行。壁装式汇流排允许激光器不间断运行，即使是在空的气体钢瓶更换过程中，汇流排也可实现不间断运行。可以把钢瓶储存在一个远离使用点的中心点实行集中供气，这样以符合安全法规要求并且提供更多的工作空间。另外也可以提高操作人员安全并且减少钢瓶数量，从而更便于钢瓶区的管理和监控。此外，还可以提供低压警报器和全自动气体钢瓶更换方案。

手动/自动气体供应系统

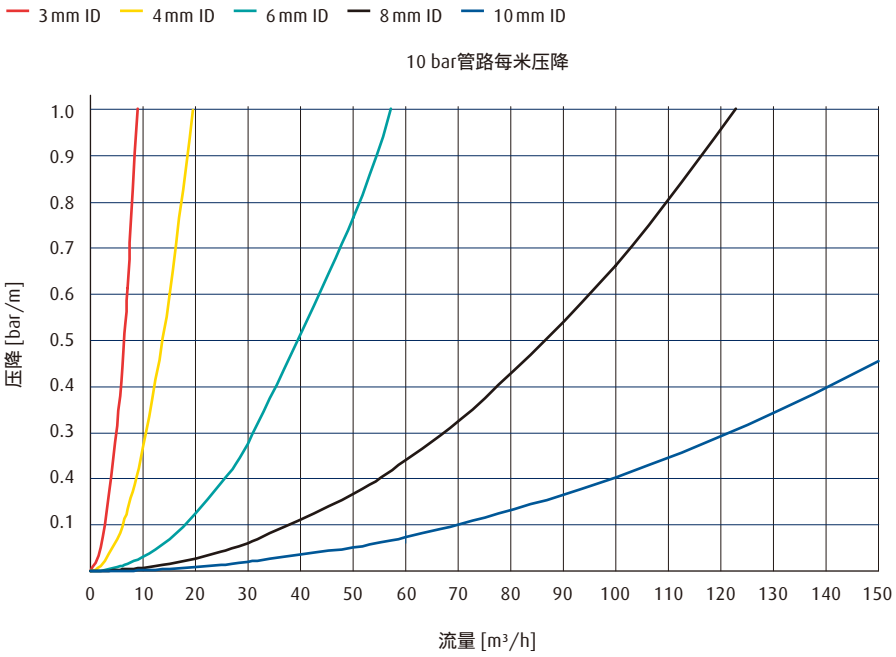
最简单的激光气体供应形式是运送钢瓶后由激光加工机操作人员接入气体钢瓶和订购钢瓶。在这种情况下，激光操作人员负责对气体钢瓶进行安全操作和正确更换，并且在钢瓶更换之后进行清洗和维护。为了避免气体被意外用尽，还可以提供汇流排切换和低压警报器，手动操作由用户/操作人员承担所有的相关责任。

对于寻求更加自动化和受控的气体供应服务的企业，林德集团提供众多解决方案，以减少操作人员干预并且确保低风险和供应可靠性。

关于激光气体容器的事实

- 气体钢瓶是最常用的激光发生气体供应形式
- 还有更加自动化的供应服务方案可供选择

图9：气体供应管路每米长度的压降



气体供应管路

气体供应管路一端连接高压减压器，另一端连接使用点和激光器共振腔。根据当地气体钢瓶储存情况和安全法规要求的不同，管路长度可达数米。

气管尺寸

管子和软管所需的直径取决于管路长度、弯管数量、进行供应的激光器数量（参见图9）。标准短距离装置的最小直径是6 mm。

塑料软管

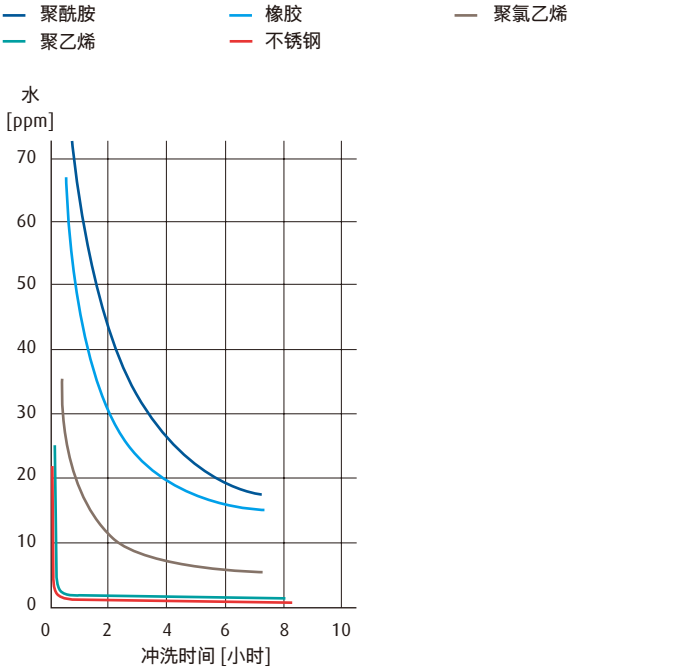
虽然塑料软管便于搬运和设置，但是一般不适用于激光气体供应。由于塑料软管具有渗透性，因此涉及较高的污染风险。污染量取决于塑料类型和杂质类型。图7显示了在一项试验中，不同材质的管子和软管的杂质含量的相对顺序。

试验条件允许100 l/h（3.5 sq ft/h）氦（4.5）流经长度为10 m（33 ft）的不同材质的软管和管子，然后对水蒸气、氧和氮杂质含量进行测量。

污染量取决于塑料类型和杂质类型。例如特富龙能够有效地把水蒸气杂质含量保持在低水平上，但是易受氧和氮杂质影响，因为这些杂质会通过大气环境中气体的扩散而连续进入软管。聚乙烯和聚酰胺对关键激光器杂质具有最高的耐渗透性，但是，聚乙烯和聚酰胺不具有与金属管相同的致密性，在使用时，长度应尽可能缩短。

建议使用专业接合的金属管来保持最高纯度水平。如果每周7天、每天24小时运行激光器，使用塑料软管（PE、PA）即可，因为虽然少量杂质将进入激光器，但是这些杂质在共振腔正常气体更新过程中也将被清除。问题可能出现在气流中断期间（夜晚或周末），较多的杂质在气流中断期间渗透软管并且积聚。当气流恢复时，这些杂质将被直接冲入激光器。

图7：软管材料对水蒸气的耐渗透性



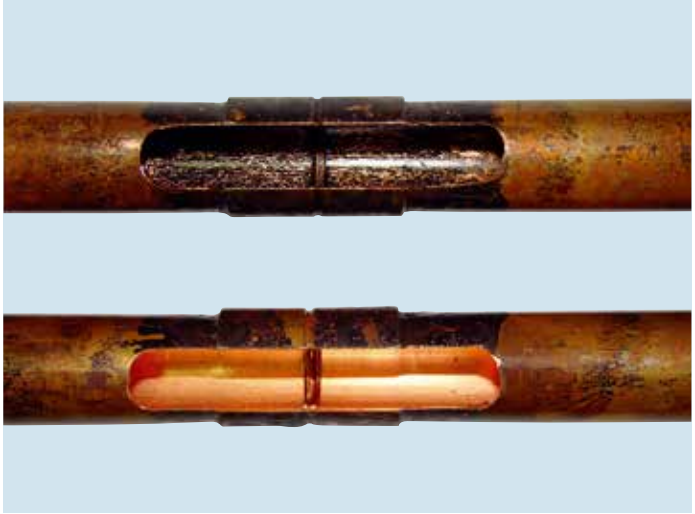


图8：硬钎焊不良导致的激光气体污染

金属管

金属管对关键激光器杂质具有最高的耐渗透性，在使用前必须清除铜管或不锈钢管中的生产残留物并对管路进行专业的连接。

建议采用与焊根保护和卡套连接相结合的TIG焊管焊连接。由于焊根侧的氧化物污染激光气体并且妨碍激光工艺，因此许多激光器制造商一般不接受硬钎焊（参见图8）。

使用点

在使用点，气体从气体供应系统输送到激光器。在激光器被连接前或者激光器被断开时，切断阀将保持气体管路清洁。

如果是极长的气体供应管路，第二级调压处应位于使用点处（第一级位于气体钢瓶处）。

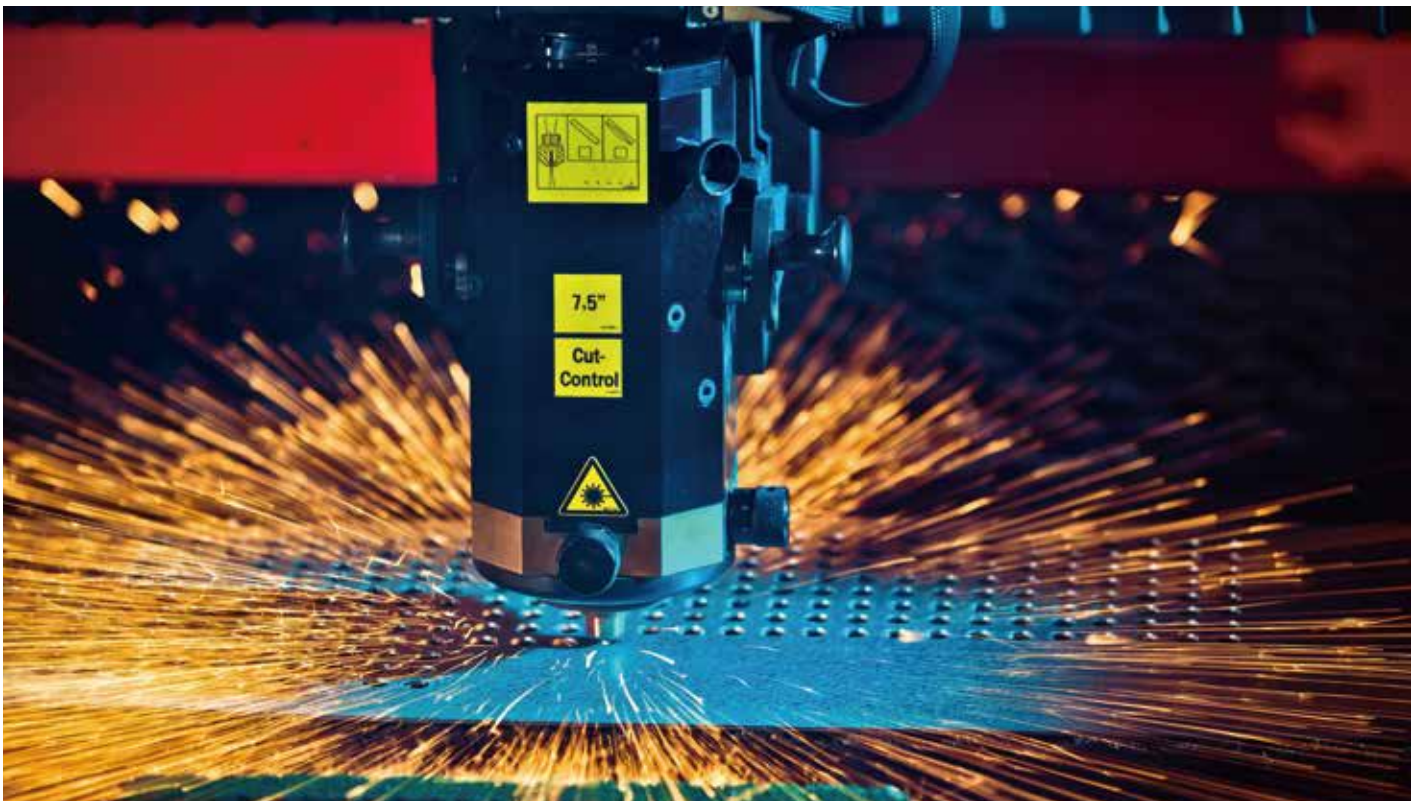
位于使用点的微过滤器为激光器内的比例阀提供了额外的安全性。

关于激光气体供应系统的事实信息

- 使用适用高纯气体的双级减压器（带有金属膜片的高纯减压器）
- 在气体钢瓶更换之后用吹扫设备来吹扫
- 提高安全性和效率的壁装式汇流排
- 专业焊接或卡套连接的金属管路
- 尽可能短的塑料软管（PE或PA）（如果不可避免需要使用塑料软管）
- 最小管道内径6 mm

激光切割辅助气的解决方案

客宜得™小型低温储罐气体供应方案



客宜得™ 知多少?

客宜得™是林德通过专用低温槽车对客户现场的小型储罐进行充装供气的一种全新供气方案。针对气体用量超过钢瓶供气量的客户，传统方式是使用杜瓦罐或钢瓶集装格完成供气。相较于这种传统供气模式，客宜得™气体供应方案为客户在生产现场设立储罐，根据客户不同的需求量可提供各种尺寸的储罐，采用独特的槽车运输具有低温性能的液态气体，整套设备中带有集成控制系统，并配有自动关闭装置，提高了整套设备的安全性。

林德在中国推出客宜得™小型低温储罐气体供应方案之前，已经在全球范围内设计、开发、应用这套方案超过40年，其可靠性高、方便快捷、为客户提供专业服务等特点使客宜得™在全球荣获赞誉。

林德全球领先的技术创造最高纯度标准的超低温氮气、氧气、氩气和二氧化碳，同时我们的专业服务为客户提供日常配送，且能持续不断地供应这些品质卓越的气体产品。为满足不同客户的个性化需求，我们提供多种规格的客宜得™容器及相关设备来配送和存储气体，并确保客户使用过程中的安全和稳定。

我们的产品

氮气

氧气

氩气

二氧化碳

我们的整套系统

容器

阀组

汽化器

安全设备

远程监控

我们的服务

供应管理

网络订货

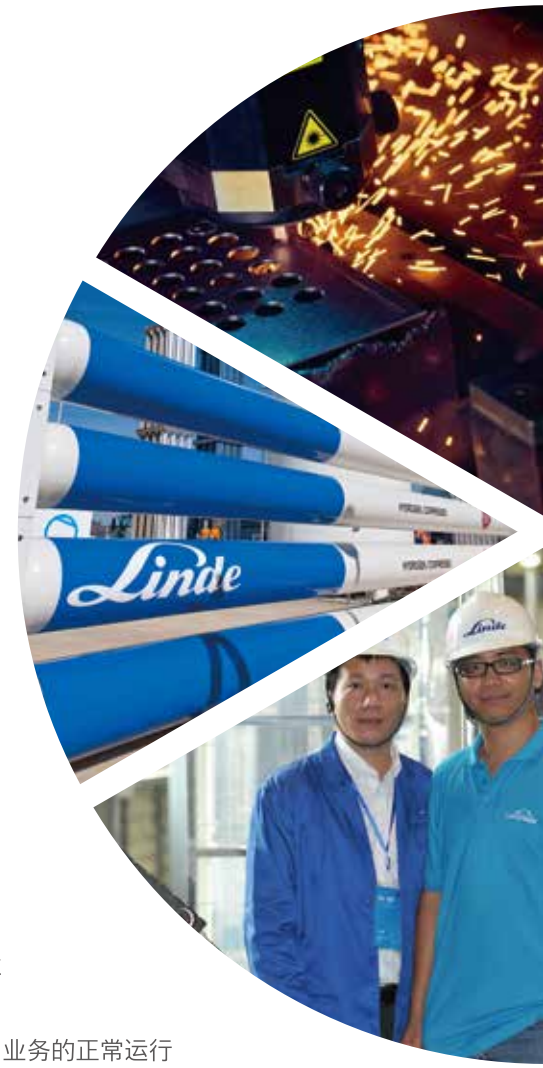
日常维护

安全指南

客户答疑

客宜得™ 三大优势　助您业务稳步增长

无论您是因为有超过钢瓶供气的较大用气量需求，还是因为您需要利用液态气体的低温性能，客宜得™ 都可以为您提供一个稳定、安全、完整的系列气体产品和不同规格容器的气体供应解决方案。



安全稳定

- 不再使用钢瓶，消除现场存放钢瓶的隐患，也无需再为丢失钢瓶而烦恼
- 原本需要多次运输钢瓶，现在通过槽车一次解决
- 减少客户与高压、低温气体的接触，一切交给林德
- 国际标准的专用容器，消除潜在的污染风险
- 林德提供稳定、不间断的供应，帮助客户提升运营效率

高效便捷

- 节省更换钢瓶的成本和人工，以及存放钢瓶的空间
- 灌装系统和使用过程不会浪费多余的气体
- 可现场混配任意配比的气体，混配后通过管路传输到应用点
- 客户通过专用账户在线进行用量分析，设置个性化工作模式
- 配置现场液位监控，远程分析客户气体用量，及时跟进客户需求

专业服务

- 林德专家对客户用量进行评估，无需客户下单，自动生成配送系统
- 林德定期评估客户业务拓展情况，及时更新供应，满足客户气体需求的变化
- 简化采购和付款等流程，降低管理和交易成本的同时，大幅提升交易便捷性
- 每次送货时，随车安排一位服务操作性人员，协助客户 日常管理设备
- 林德还提供钢瓶气体的配送或应急服务，短时间内响应客户需求，保证客户业务的正常运行

客宜得™ 高纯氧、高纯氮助力在工业制造中的应用

项目背景

上海电器厂实业有限公司隶属上电控股集团，是中国防爆电器行业协会副理事长单位，中国船舶工业标准化工作促进会成员及军工企业。公司专业生产高低压成套电器设备、电力自动化控制系统、三级计量分析管理系统、灯光智能照明控制系统、视频模拟监控系统、能源管理大数据系统、化工防爆电器、矿用防爆电器、船用电器、军工电器等产品，广泛用于交通、能源电力、冶金、化工、采矿、建筑、烟草、军工等领域。

上海电器厂实业有限公司基于业务需要，决定增加电控柜生产线。利用氮气和氧气激光切割冷轧钢板和不锈钢板，进行板型加工，使电控柜生产高质高效。

应用方案

林德通过评估上海电器厂实业有限公司电控柜生产线的应用需求，推荐使用林德客宜得™气体供应方案，即利用独特的低温储槽供应液氮和液氧，储槽中的液氮和液氧经过汽化变成气态氮气和氧气，用于激光切割机的使用，并配套高质量的管路、阀门等设备提升客户整体价值，确保供气的高质、高效、安全。同时，林德根据客户业务更新状况，及时提供相应量的气体配送，最大程度便捷客户。上海电器厂实业有限公司电控柜生产线在两年多的运行中，一直采用客宜得™气体供应方案，确保了激光切割的效率和气体使用的安全性，减少了可能产生的故障和事故导致的高成本损失，提高了投资回报率。

案例客户：上海电器厂实业有限公司

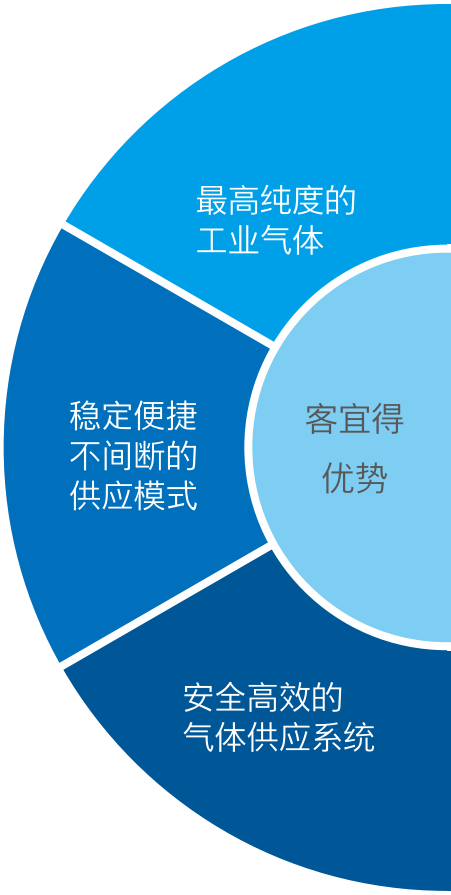
应用类型：金属激光切割

应用目标：应用林德客宜得™小型低温储罐气体供应方案，激光切割冷轧钢板和不锈钢板，助力电控柜高效生产

服务内容：林德提供最高标准的液氮和液氧两个客宜得储气罐、激光工艺切割技术、安全指导，以及相关安装、配送等配套服务

客宜得™气体供应方案在激光切割领域如何力拔头筹

客宜得™气体供应方案是林德通过专用低温槽车对客户现场的小型储罐进行充装供气的一种全新供气方案，有超过40年的历史，凭借全方位的优势在金属激光切割领域大展拳脚。



最高纯度的工业气体

目前，激光切割已发展成为一项最先进的加工技术，在高要求的板材加工中优势尤为明显。根据使用辅助气体不同，可以分为使用氧气切割和使用惰性气体（如氮或氩）进行的清洁切割或高压切割。无论哪种方式，使用的切割气体质量对于切割效果而言至关重要。比如用氮气切割不锈钢，如果在高压氮中掺入了少量氧杂质，也会产生氧化作用，使不锈钢切割面变色，工件的耐腐蚀性被削弱。

林德全球领先的技术创造最高纯度标准的超低温氮气、氧气，可以减少激光切割中气体杂质造成的切割不稳定，以及切割质量和速度的下降，避免污染聚焦镜片，从而造成其使用寿命的降低。对于确保激光切割最佳性能，提高切割效率和较高的投资回报率有独到的优势。

安全高效的气体供应系统

如果采用钢瓶气体供应模式，结合传统手动方式，钢瓶由激光加工操作人员负责操作、更换，以及事后的清洗和维护，将大大增加事故风险的发生。

林德积极寻求更加自动化和受控的客宜得™气体供应方案，通过槽车减少钢瓶的多次运输和存放，减少操作人员干预。同时，国际化标准的各种大小专用储罐，配有自动关闭装置，消除潜在的污染问题，确保供气低风险和可靠性。

稳定便捷、不间断的供应模式

林德还贴心地对客户应用进行评估，按需供应及时配送，并且根据客户业务变化更新气体供应数量，减少客户库存管理和维护工作，提高效率。强劲的专业综合实力为客户解决了各种后顾之忧，也赢得了客户的口碑和青睐。

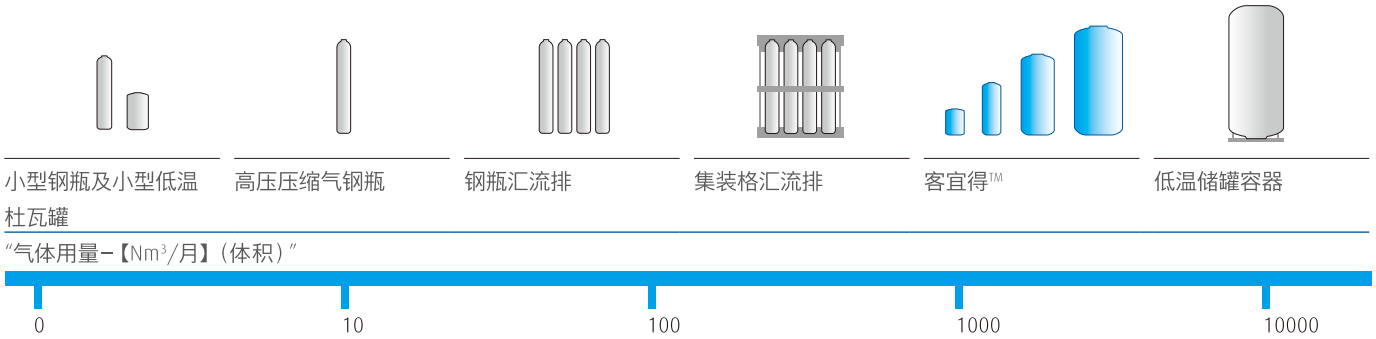
“林德凭借出色的产品和完善的服务从竞争者中脱颖而出，两年多来始终保持高纯度的气体供应，配送响应及时，服务态度良好，与工厂人员配合默契。事实证明了我们当初的选择是正确的。”

上海电器厂总工程师 白雁礼

客宜得™ 供应模式选择

林德的专业操作人员事先悉心理解客户气体应用模式，当客户使用要求改变时，我们的专家也会根据客户新的气体应用需求提供相应的模式。林德会对您的运行进行评估，并给出适合您业务的最佳气体供应模式及配送方案，确保气体供应的高效和安全。

供应模式选择指导–适用于氧气、氮气、氩气和二氧化碳



客宜得™提供各种大小储罐供您选择，我们也会根据您的实际应用提供最合适、最优化、最经济的方案。

三步轻松获享客宜得™：

- 只需要平地基而无需钢筋混凝土地基
- 用叉车将罐子搬运到指定位置
- 集成客宜得™ 与气化器，更可节约空间及安装时间

林德公司可以提供全系列的容器，容积从1000L到5000L，下面是常用产品的技术规范

容器规格	1000升	3000升	1000升	5000升
容器类型	高压	高压	超高压	高压
最大许用工作压力（bar）	24	24	35	24
储存容量				
氮 (Nm³)	618	1778	618	3051
氧 (Nm³)	763	2196	763	3786
氩 (Nm³)	747	2149	747	3748
二氧化碳 (Nm³)	491	1412	-	-
气体输出流量 (Nm³/h)	25.2	42.5	25.2	100

容器规格	3000升	5000升
容器类型	超高压	超高压
最大许用工作压力（bar）	35	35
储存容量		
氮 (Nm³)	1778	3051
氧 (Nm³)	2196	3786
氩 (Nm³)	2149	3748
二氧化碳 (Nm³)	-	-
气体输出流量 (Nm³/h)	85.0	100

* 如有需要，请联系我们，索要全系列产品技术规范

客宜得™ 的其它应用

液态氮和氮气的常见应用

	液态氮 – 因其低温而应用	氮气 – 因其惰性而应用
冷冻手术	●	
冷缩装配	●	
食品冷却	●	
研发	●	
惰性保护		●
化工过程		●
气体吹扫		●
热处理		●
激光切割		●

氩气的常见应用

	氩气 – 因其惰性而应用	氩气 – 因其极低热导率而使用
TIG 焊接	●	
光谱分析	●	
半导体晶元制造	●	
科研样品存储	●	
激光切割	●	
激光焊接	●	
炉体气体清除及惰性保护	●	
金属制造过程	●	
双层中空玻璃制造		●

二氧化碳的常见应用

	二氧化碳
游泳池的PH值控制	●
碳酸饮料	●
食品冷却	●
泡沫塑料	●
化学溶剂	●
水处理	●
与氩气混配作为MIG焊接保护气	●
科研样品孵化	●
气调食品包装	●

氧气的常见应用

	氧气 – 用于维持生命	氧气 – 用于助燃	氧气 – 因其氧化性
医疗保健	●		
水处理	●		
水产	●		
发酵	●		
氧气 – 乙炔切割		●	
高炉		●	
碳钢的激光切割			●
气调保鲜包装			●

创新为先

林德以创新理念，在全球市场上常居先锋地位。作为技术领军者，我们以不断提升技术水平为己任。我们保持着开拓进取的优良传统，始终致力于开发优质产品和革新工艺。

林德的服务不仅于此。我们为客户创造附加值、显著的竞争优势和更高的效益。每一种理念都为满足客户的需求而量身定做 – 从标准化到定制化解决方案一应俱全，适用于所有工业和各类规模的企业。

要保持与时俱进，您需要一个把高质量、工艺优化和高产率为作为日常运作一部分的合作伙伴。我们所定义的合作不仅是在您身边待命，而是与您并肩同行。终究，通力合作才是商业成功的核心。

林德 – 精于品 诚于行

林德东亚区
中国上海浦东新金桥路27号9号楼 邮编201206
电话：+86-21-6105 9888
林德气体网站：www.linde-gas.com.cn

林德是林德集团旗下各公司使用的商标名称。林德标识是林德集团的商标。©2012年林德集团，版权所有。

扫一扫，关注林德官微