

激光和干冰清洗轮胎模具技术与应用

王超群

(三角轮胎股份有限公司, 山东 威海 264200)

摘要:介绍轮胎模具清洗新技术——激光和干冰清洗技术的工作原理、技术特点和应用。激光清洗通过控制能量密度和波长等激光工艺参数,不损伤模具,清除的废料可回收,清洗过程实现自动化控制,劳动强度小,清洗效率高,且清洗设备使用寿命长,运行成本低,尽管首期投资大,但推广应用前景广阔。干冰清洗技术在轮胎模具上已成功应用,可以直接清洗硫化后的高温模具,不损伤模具,不污染环境,不留下任何残留物,且可以清洗细小排气孔,但运行成本高,噪声和劳动强度大。

关键词:轮胎;模具;清洗;激光清洗;干冰清洗

中图分类号:TQ330.4⁺93;TQ336.1⁺1 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-8171(2018)00-0000-04

轮胎模具在长期硫化使用过程中受橡胶、配合剂和脱模剂的综合作用,模腔内表面附着一层粘结牢固的有机、无机残留污染物(主要成分是硫化物、氧化物、硅油和炭黑等),沉积在轮胎花纹死角位置,严重影响硫化轮胎外观质量。

1 轮胎模具清洗技术简介

1.1 常规清洗方法

常规轮胎模具清洗方法包括采用擦、刷、喷砂等方法去除污垢的机械清洗及采用有机化学药剂通过喷淋、浸泡等措施清除污垢的化学清洗。这两种方法存在较大劣势,如反复拆装、清洗效率低、清洗效果差和劳动强度大等。机械清洗还会对模具表面造成机械损伤、缩短模具使用寿命;化学清洗会造成模具腐蚀、化学药剂污染环境等。

1.2 模具清洗新技术

20世纪80年代,激光和干冰清洗轮胎模具技术开始发展,经过30多年的推广应用,在模具清洗领域以其自身的优势迅速取代了传统清洗工艺。

1.2.1 激光清洗技术

轮胎模具激光清洗是将激光发射器发射的高能量激光束通过光学系统照射到轮胎模腔内表面,激光束被模具表面的污垢层吸收,破坏污垢层

与模具基体表面之间的结合,通过光剥离、气化等作用,使污垢脱离模具表面。针对模具污垢的性质和结垢程度,可调整相应的激光能量密度,以确保激光束的作用力足以使污垢脱离模具表面而不损伤模具。激光清洗轮胎模具有以下特点。

(1)激光束可以高度集中,能量聚焦后可达数万度高温,使污垢瞬间气化或分解。

(2)激光束方向性好、集中度高、不易发散,通过控制光学系统形成不同直径的激光束光斑,从而调整激光的能量密度。当被照射污垢的膨胀力大于污垢对模具表面的附着力时,污垢便会分解、气化剥离。

(3)激光束可以通过在模具表面产生超声波,通过力学共振使污垢破碎脱落。

轮胎模具激光清洗装置如图1所示,主要包括YAG激光器、导光装置、清洗工作台、控制系统和

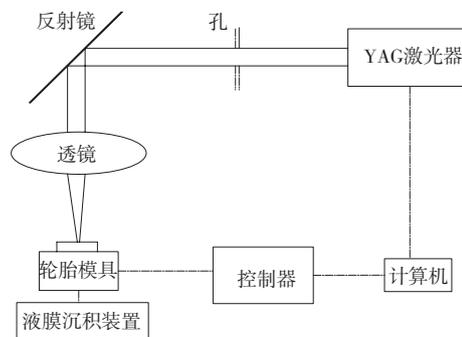


图1 激光加液膜清洗设备示意

作者简介:王超群(1974—),男,安徽颍上人,三角轮胎股份有限公司工程师,学士,从事橡胶设备技术与管理工作。

E-mail:1410004241@qq.com

辅助系统等。模具清洗通常采用激光加液膜的清洗方法,还配置有液膜沉积装置,用于收集废液。

1.2.2 干冰清洗技术

干冰清洗是采用干冰喷射清洗机,以压缩空气为动力源,将清洗机内装好的干冰颗粒高速冲击到模具表面,表面沉积的污垢受冲击和骤冷剥离,达到清洗效果。

干冰清洗常用的圆柱状干冰颗粒直径为3 mm,长度在10 mm以内。干冰喷射清洗机的动力源为压力不小于0.5 MPa、流量为 $2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 以上的洁净压缩空气。干冰颗粒在压缩空气的驱动下由输送系统均匀地输送到空气混合器中混合加压,以2~3倍音速从喷嘴喷出,冲击清洗模具表面。干冰是 $-78 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温固体颗粒,当其高速喷射到模具表面时,一方面,冲击动能瞬间使干冰汽化,并吸收大量热,在模具表面产生剧烈热交换,迫使附着物骤冷收缩、脆化脱落;另一方面,模具表面污垢和模具本身具有不同的膨胀系数,表层与内层的温差将破坏两种材料的结合,瞬间的快速冲击能够撕开非结构性连接,同时干冰在千分之几秒的时间内体积骤增800倍,在冲击点形成“微型爆炸”,有效脱落污垢粒子^[1]。

干冰清洗是典型的热力学效应,轮胎模具内表面污垢层主要是橡胶,具有明显的冷脆性,模具处于在线高温状态时,干冰清洗效果更好。干冰清洗机结构如图2所示。

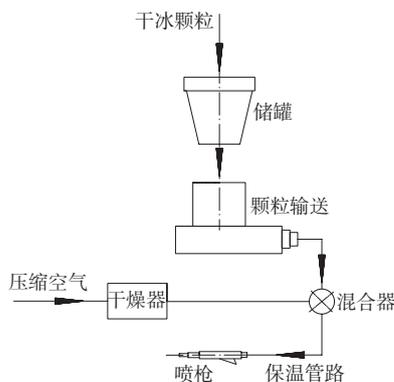


图2 干冰清洗设备示意

2 新清洗技术工作原理分析

2.1 激光清洗

激光清洗模具原理包括光分解、光剥离和激

光脉冲作用导致污垢离子振动而脱离模具基体三方面。模具表面存在的有机污垢附着物的分子中有O—O,H—H,O—H,C—H和C—C等化学键,当激光光子能量大于污垢化学键能时,激光光分解、光剥离可清洗掉有机污垢。模具基体与表面污垢两种材质性能差异较大,对某一波长激光能量吸收系数差别很大。照射时,通过控制适当的激光波长和能量密度,能量大部分被表面污垢(硫化物、无机氧化物、硅油、炭黑等)吸收,受热膨胀、气化、挥发,实现经济、安全、高效的模具清洗。

激光清洗有激光干洗、激光加液膜清洗、激光加惰性气体清洗和激光加非腐蚀性化学方法去污4种清洗方法。模具激光清洗通常采用激光加液膜的清洗方法,如图3所示。

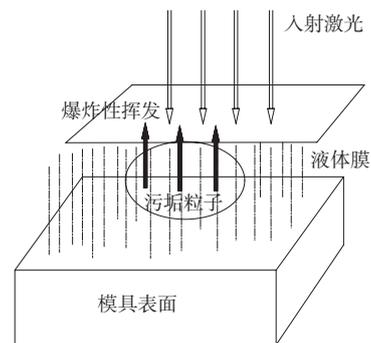


图3 激光加液膜清洗示意

激光加液膜的清洗方法是液膜受激光照射急剧受热膨胀,产生爆炸性汽化,具有极大加速度的爆炸性冲击波使模具表面的污垢松散、剥离并随冲击波飞离模具表面,达到清洗目的。此种清洗方法以爆炸性冲击波为主要清洗因素,同时存在污垢粒子热膨胀和振动。液膜是在模具表面喷淋水形成的水膜,也可采用含少量甲醇和乙醇的混合液。液膜覆盖模具表面厚度约为 $10 \mu\text{m}$,激光在模具表面的作用时间为 $10^{-13} \sim 10^{-11} \text{ s}$,可在瞬间产生 $10^9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 加速度,具极大爆炸冲击力^[2]。

模具表面的主要附着物是橡胶污垢,有较高吸收系数且热导率极低,在激光照射过程中,模具表面产生明显的的烟雾、火花,并散发出橡胶烧焦的气味。

激光脉宽在纳米级时,表面温升(T_s)为

$$T_s = [2S(1-R)/K] \times 2a/c^3 \quad (1)$$

式中, S 为激光能量密度, R 为表面反射率, K 为热导

率, a 为热扩散系数, l 为激光脉冲宽度, c 为光速。

对于特定的材料(橡胶), 参数 R , a 和 K 值是固定的。由于激光器的脉冲宽度不发生变化, 从式(1)可知, 模具表面温升只与激光能量密度呈正比关系。

假设 T_1 和 T_2 分别表示橡胶层的气化温度和模具钢材的熔点, 显然 $T_2 > T_1$, 为了保证只除去污垢层而不损伤模具, T_s 必须满足条件: $T_1 \leq T_s \leq T_2$, 结合式(1), 有

$$S_1 \leq S_s \leq S_2 \quad (2)$$

式中, S_s , S_1 和 S_2 分别为激光加热时模具表面温升为 T_s 、达到污垢气化温度和达到模具熔点时的激光能量密度。

从式(2)可以看出, 激光的起始清洗阈值为 S_1 , 损伤阈值为 S_2 。模具的激光清洗范围在 S_1 与 S_2 之间, 即当激光束能量密度条件满足式(2)时, 激光清洗只除去橡胶污垢层而不损伤模具, 其范围大小与模具表面结垢层厚度有关。模具表面激光热作用深度(D)与 l 呈正比关系:

$$D = 4al \quad (3)$$

由于橡胶污垢层的热扩散率极低, 且采用的激光脉宽为纳米级别, 因此激光的热作用深度只有几微米。尽管橡胶污垢层的膨胀幅度非常小(10^{-8} m), 但激光作用的时间极短, 产生的热冲击力很大, 能使污垢粒子克服模具的表面附着力发生爆炸性飞溅脱离模具。而模具受热较少, 产生的热膨胀极小。在实际应用过程中, 可以观察到大量松散的橡胶颗粒随挥发性气流高速飞离模具表面, 证实了这一机理^[3]。

激光清洗模具相关工艺参数具有试验重现性, 可规范化设置。在实际生产中, 可在一定范围内加大激光能量密度、提高激光扫描速度、减小扫描通道间搭接量及采用长聚焦镜头进一步提高清

洗效率。

2.2 干冰清洗

干冰清洗过程包括低温冷冻剥离、吹扫剥离和冲击剥离3个阶段。

(1) 低温冷冻剥离。当 -78.5 °C 的干冰颗粒产生的巨大冲击作用在模具表面时, 首先冷冻脆化污垢层, 污垢在模具表面上皴裂, 脆性增大、粘性减小, 同时吸附力骤减, 表面积增大, 部分污垢自行剥离。

(2) 吹扫剥离。在压缩空气动力的作用下, 对脆化的污垢层产生剪切力, 引起机械断裂, 由于污垢与模具表面低温收缩比差别很大, 在接触面产生应力集中, 污垢在剪切力作用下剥离。

(3) 冲击剥离。干冰颗粒在压缩空气推动下产生动能(E)和冲击力(F)。

$$E = mv^2/2 \quad (4)$$

$$Ft = m\Delta v \quad (5)$$

$$\Delta v = v_1 - v_2 \quad (6)$$

式中, m 为干冰颗粒质量, v 为干冰在压缩空气作用下产生的速率, t 为冲击时间, v_1 和 v_2 分别为干冰颗粒冲击模具前、后的速率。

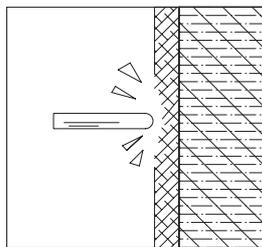
干冰清洗过程^[3]如图4所示, 高速冲击的干冰颗粒将动能传递给污垢, 并迅速发生热交换, 使干冰颗粒迅速升华气化, 在冲击点造成气掀作用, 将污垢冲击剥离, 并随气流卷走, 达到清洗目的。

3 新清洗技术的特点及应用分析

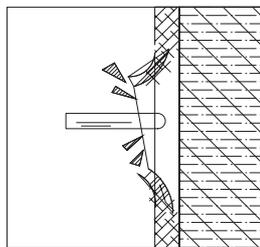
3.1 激光清洗

激光清洗成本低, 自动化程度和效率高, 具有如下技术优势。

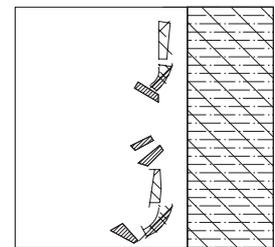
(1) 可在线或非在线清洗, 通过控制能量密度和波长等激光工艺参数, 对模具热作用小, 不损伤模具, 有效去除模具表面橡胶污垢层。



(a) 利用低温及冲击力使污垢龟裂剥离



(b) 利用大幅度温差使剥离力提升



(c) 利用急剧升华及吹力清除污垢

图4 干冰冷喷射清洗过程示意

(2) 激光清洗清除的废料呈固体粉末状,可回收,不会造成二次污染。

(3) 清洗工序简单,劳动强度小,相同模具设置固定参数,易实现规模化清洗作业。

(4) 液膜加激光方式清洗可以清除各种规格轮胎模具不同厚度的橡胶层污垢。

(5) 清洗过程实现自动化控制,清洗效率提升,有利于缩短产品制造周期。

(6) 激光清洗设备使用寿命长,运行成本低,不受模具温度限制。

根据模具表面橡胶层污垢的厚度,清洗一套模具需要45~75 min。在20世纪末已有国际轮胎公司在轮胎硫化机台上实现了在线清洗,即将激光清洗系统移到硫化结束打开蒸汽室的硫化机前进行模具清洗。在清洗过程中,清洗头贴近模具表面,从4个不同角度照射,保证模具各部位死角都能清洗干净。各扇模具分别清洗后,将清洗装置移到另一台需清洗的硫化机旁,可连续作业,模具清洗完成后可立即投入生产使用。

3.2 干冰清洗

干冰清洗具有如下技术特点。

(1) 可以直接清洗硫化后的高温模具,实现在线清洗。

(2) 不损伤模具,不污染环境,不留下任何残留物。

(3) 可以清洗细小排气孔,对于直径在0.7 mm以上、深度在50 mm以内的排气孔,可直接洗透,这是其他清洗方法无法做到的。

(4) 清洗效率较高,清洗周期短。

3.3 两种新清洗技术应用比较

干冰清洗技术在轮胎模具上已成功应用,其成熟性也得到业界广泛认可,米其林和固特异等世界著名轮胎企业都使用干冰清洗模具。

目前,国内绝大多数轮胎厂没有激光清洗设备,主要原因是用于轮胎行业的200 W以上大功率清洗机只有少数几家供应商,设备首期投资在200万元以上。相对于干冰清洗,目前国际上处于价格垄断的激光清洗机随着国内技术的进步和逐步投入到生产验证,具有更大的优势和更好的发展前景,但目前设备首期投资大、投资回收周期长是制约其广泛应用的关键。

(1) 激光清洗前期投资高,但设备稳定,可长期低成本运行,每小时的总运行操作成本(包括耗电、维修服务和易损件更换维修费用等)为10美元左右,可以实现自动化操作;干冰清洗设备虽然投资较少(单台费用在十几万至数十万元),但每小时运行费用(干冰颗粒120 kg和能耗)在600元左右,按单班清洗,仅此一项,激光清洗系统每年(按照350天计算)节约成本148万元,16个月可收回投资成本。

(2) 在日益注重环境作业改善的现代化企业中,激光清洗过程噪声控制较好;干冰清洗噪声高达110 dB以上,严重超标,且操作工需穿戴厚重的防护服和面具作业。

(3) 激光清洗设备技术先进,自动化程度高,只需安装和启动,每次所用劳动时间少于10 min;干冰清洗由人工操作,需人工全程参与,劳动强度大。

(4) 激光清洗可以远程控制,灼热的硫化模具对激光清洗安全影响不大;干冰清洗要求人员在打开的灼热两半模之间操作,需预防烫伤,增加了作业环境不安全因素。

(5) 激光清洗不要求加热模具,新上模具之前需要清洗时,激光清洗具有优越性,可在模具库脱产清洗;干冰清洗要求加热模具,热模清洗效果最好,存在清洗局限性。

4 结语

轮胎模具的激光和干冰清洗新技术备受行业关注,目前国内应用较多的是干冰清洗技术,该技术已经在轮胎工业模具清洗领域中得到普遍应用。然而,通过对比分析可见,激光清洗技术以其独具的优势,在轮胎模具清洗上的应用一定会越来越广泛。

参考文献:

- [1] 左华. 二氧化碳干冰清洗技术综述[J]. 低温与特气, 2005, 23(2): 12-14.
- [2] 侯俊英, 赵程, 胡尔建. 激光清洗技术及其应用[J]. 洗净技术, 2003(8M): 16-19.
- [3] 王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 激光清洗轮胎模具表面橡胶层的机理与工艺研究[J]. 中国激光, 2000, 27(11): 1050-1054.
- [4] 任建新. 物理清洗[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

收稿日期: 2017-09-17