

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.06.027

塑料模具表面粗糙度变化机理及影响因素分析

蒋奔, 翟明

(郑州大学力学与工程科学学院, 郑州 450001)

摘要: 高温高压下塑料颗粒对模具表面的冲蚀, 引起模具表面粗糙度发生变化, 是造成塑料模具失效的重要原因。针对这个原因, 分析了塑料模具表面粗糙度的变化机理; 总结了影响塑料模具表面粗糙度变化的因素, 主要包括冲蚀速率、冲蚀角度和塑料颗粒的形状与硬度; 指出可以通过粒子注入技术、激光熔覆技术、碳氮共渗等技术来降低塑料模具表面粗糙度。

关键词: 塑料模具; 粗糙度; 冲蚀磨损; 氧化

中图分类号: TQ320.5+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)06-0137-04

Mechanism and Influence Factors for Surface Roughness Change of Plastic Mould

Jiang Ben, Zhai Ming

(School of Mechanics and Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: According to the fact that the surface roughness change of plastic mould caused by the erosion of plastic particle to the mould surface under the high temperature and high pressure is the main failure factor of plastic mould, the changeable mechanism of the surface roughness of the plastic mould was firstly analyzed. The factors that affect the change of the surface roughness of the plastic mould were summarized, especially the erosion rate, erosion angle, and the shape and hardness of the plastic particles. Finally, the methods to reduce the surface roughness of plastic mould by means of particle injection technology, laser cladding technology and carbonitriding technology and so on were proposed.

Keywords: plastic mould; roughness; erosion; oxidation

塑料制品具有质轻、加工性能好和比强度高优点, 在建材、汽车、航空航天等领域得到了广泛应用, 社会对塑料制品的需求不断增加, 塑料加工行业发展迅速。模具是成型塑料制品的工具, 其好坏对制品质量具有决定性的影响。近年来, 塑料模具在技术、质量和制造能力方面有了较大的进步, 但随着工业的发展以及对塑料制品精度要求的提高, 失效的塑料模具也越来越多。大约有 50% 左右的塑料模具失效与模具表面粗糙度变化有关。若模具表面粗糙度值过大, 在工作时会产生应力集中现象, 并在其峰、谷间容易产生裂纹, 影响模具的耐用度, 还会影响工件表面的耐蚀性, 直接影响模具的使用寿命和精度。因此研究塑料模具表面粗糙度的变化机理, 分析其影响因素, 对延长模具寿命, 提高塑料制品加工质量, 具有重要意义。

1 塑料模具表面粗糙度变化机理

在塑料注射成型过程中, 塑料模具的工作温度高, 承受的压力大。塑料颗粒在高温高压下释放出的氯化氢、氟化氢等腐蚀性气体, 会在塑料模具表面产生腐蚀作用。另外, 熔融状态下的塑料在高温高压下以一定的速度在模具型腔中流动, 也会对模具产生冲刷和磨损。如果塑料中含有云母粉、

硅砂、玻璃纤维等固体填料, 则其对模具的冲刷和磨损作用会加剧。表面磨损和腐蚀是造成塑料模具表面粗糙度变化的重要原因。冲蚀磨损和腐蚀等因素相互叠加, 使得模具表面表面粗糙度升高, 产生不合格的塑料制品。

影响塑料模具表面冲蚀磨损的因素很多, 如模具钢性能、塑料颗粒的性能、塑料颗粒冲击速度以及模具表面氧化物的厚度等。模具表面的氧化层很薄或者没有氧化层时, 塑料模具遭到塑料粒子冲击时发生的是以金属冲蚀为主的冲蚀磨损, 遵循塑性材料的冲蚀规律, 这时, 模具表面粗糙度的变化取决于模具材料的抗冲蚀能力。如果模具表面氧化膜足够厚, 可以抵挡塑料颗粒的冲蚀磨损, 则冲蚀磨损完全作用在模具表面氧化层, 不会对模具材料造成影响^[1]。但随着塑料粒子能量的增加, 冲蚀磨损强度加大, 塑料模具表面的氧化层会出现局部变形和磨损^[2]。当氧化膜的生长厚度小于冲蚀磨损的厚度时, 模具表面开始出现塑性变形, 模具材料受到冲蚀。

联系人: 翟明, 博士, 教授, 主要从事聚合物成型过程模拟与模具优化设计研究

收稿日期: 2017-03-16

如果塑料模具表面生成的氧化膜是脆性的且足够厚,在冲蚀状态下发生开裂但未脱落时,冲蚀颗粒对模具表面的冲击使得模具基体材料从裂缝中挤压到模具表面,久而久之,模具表面形成了氧化物和模具基体材料的复合层,此后的冲蚀磨损变成了对复合层的冲蚀磨损,模具表面粗糙度的变化和表面复合层有关^[3]。如果塑料模具表面的氧化膜是脆性的且无粘附性,此时模具表面质量的损失是连续的;如果模具表面氧化膜到达临界厚度时才被冲蚀掉,塑料模具表面的氧化膜将会脱落,模具表面质量损失是不连续的^[4]。

2 影响塑料模具表面粗糙度的因素

模具表面粗糙度的变化来自塑料颗粒对氧化层和模具材料的冲蚀。在塑料成型的过程中,影响塑料模具表面粗糙度变化的因素有很多,如塑料颗粒的冲蚀速度、塑料颗粒的特性、冲蚀的角度等。模具表面材料损失越严重,冲蚀率越大,模具粗糙度变化也越大。

2.1 冲蚀速度的影响

在塑料注射成型过程中,塑料颗粒的速度对冲蚀效果有较大的影响。冲蚀磨损量和颗粒的速度存在以下关系^[5]:

$$D=K \cdot V^n$$

上式中, D 为磨损量, K 为常数, V 为磨粒冲蚀速度, n 为速度指数,塑性材料取 $n=2.3\sim 2.4$,脆性材料取 $n=2.2\sim 6.5$ 。

如果冲蚀粒子的速度过低,从变形的角度来说模具材料可能只发生弹性变形而不发生塑性变形,几乎没有冲蚀磨损发生,此时塑料模具的粗糙度变化不大^[6]。如果冲蚀的速度过高,模具型腔在高压塑料熔体连续不断的冲击下,模具材料产生局部塑性变形,模具表面粗糙度加大。若冲蚀速度不高,模具表面发生疲劳磨损,一般只产生凹坑和麻点等现象;但如果冲蚀速度较高,模具表面会产生断裂现象,可能发生断裂失效。

2.2 冲蚀角度的影响

塑料颗粒冲蚀角度对模具表面粗糙度的变化也有影响。塑料模具在高温氧化冲蚀过程中,如果冲蚀磨损仅仅发生在模具表面氧化层,当冲蚀角度为 90° 时模具表面材料损失最严重,模具表面粗糙度变化最明显。如果模具材料发生了冲蚀磨损,则遵循塑性材料的冲蚀规律,冲蚀角为 $20\sim 30^\circ$ 时对模具表面粗糙度的影响最大^[7]。

2.3 塑料粒子的影响

塑料粒子的形状和尺寸对塑料模具表面粗糙度的影响也较大^[8]。在相同的实验条件下,多角形粒子对模具的冲蚀作用比球形粒子大很多。在冲蚀角为 45° 时,多角形塑料粒子的冲蚀量是球形粒子的4倍。在粒子尺寸影响方面,当塑料粒子的尺寸为 $20\sim 200\ \mu\text{m}$ 时,模具材料的冲蚀率一般随着粒子尺寸的增大而上升,表面粗糙度也随之变大,但粒子

尺寸超过 $200\ \mu\text{m}$ 后,由于尺寸效应,粒子尺寸的增加并未对模具表面粗糙度产生较大的影响。

2.4 其它因素的影响

在塑料成型过程中,模腔中添加的颗粒以及通过外部环境进入模腔的颗粒刮擦模具表面,对模具表面形成切削,改变了模具表面的粗糙度。如果模具中颗粒的硬度较小,颗粒在模具和塑料制品之间被挤压破碎,模具表面材料会发生应力集中,产生高应力的凿削磨损,在模具表面产生犁沟,形成塑性变形,对模具粗糙度有较大影响。如果颗粒较硬,颗粒不发生破碎,这时颗粒只在模具表面产生平移,金属表面被划伤,但划痕较浅,对塑料模具表面粗糙度影响较小。

另外,如果塑料模具材料和塑料制品材料之间亲和力较强,在塑料模腔高温高压的环境下,塑料材料会和模具材料之间产生很强的粘连作用,出现所谓的粘模现象。严重的粘模现象会导致塑件和模具表面材料的脱落,在模具材料表面产生较深的划痕,模具的表面粗糙度因为粘着磨损而加大。

3 降低塑料模具表面粗糙度的措施

3.1 提高塑料模具表面的抗氧化能力

塑料模具表面粗糙度的变化与模具表面在高温状态下的氧化腐蚀有很大关系,因此增强模具表面的抗氧化能力可以降低模具表面粗糙度。

(1) 加入与氧亲和力强的金属元素。

模具用钢材料中的成分对模具表面的冲蚀氧化行为有一定影响。在模具用钢材料中加入与氧亲和力强的其它金属元素,通过使其优先氧化,在模具表面生成薄而致密的氧化膜,可明显提高模具表面的抗氧化和抗腐蚀性能。有研究显示,当模具用钢材料中铬的含量达18%以上时,就会生成复杂致密的尖晶石结构的铬氧化膜,粒子在这种氧化膜中的移动速度缓慢,移动所需的能量增大,因此显示出优异的抗氧化性能。模具钢中铬的含量越高越易生成这种保护膜。此外,在模具用钢材料中加入稀土元素,也可以提高模具表面的抗冲蚀氧化能力。

(2) 采用离子注入技术。

利用离子注入技术,通过注入不同的离子,也可改善塑料模具的抗氧化性能^[9]。离子注入技术是通过小型离子加速器,把需要注入元素的原子通过高压电场形成高速离子流,强行注入塑料模具的工作表面,改变模具表面氧化层电荷的空间分布,模具表面将产生具有缓慢的离子扩散速度的结晶相,引起模具表面微观组织和宏观性能的变化,阻止氧化物的破裂,降低模具表面的氧化速率^[10]。简单地说,离子注入的过程,就是在真空系统中,把经过加速的掺杂剂原子变成离子并注入固体材料,从而在被注入的区域形成一个具有特殊性质的表面层,这是把掺杂剂的原子引入固体中的一

种材料改性方法。该技术可以把元素深深地注入到模具基体表面,与模具基体表面材料形成表面合金,注入层和基体并没有明显的分界面,因此,在工作过程中不会发生脱落现象。离子注入技术在高真空和较低的温度下进行,能够保持塑料模具的几何尺寸,以及形状不变形,保证模具表面的粗糙度不变,适合精密塑料模具的抗氧化处理,是一种影响或改变模具表面性能的有效手段。

(3) 采用激光熔覆技术。

激光熔覆技术是近年来随着大功率激光器的发展而兴起的一种新的材料表面改性技术,对模具表面抗氧化性能的提升也有较好的效果。该技术以激光为热源,在被熔覆的基体上通过不同的加料方式放置熔覆材料,经激光照射后,熔覆材料与基体表面薄层同时熔化,并快速凝固形成一种表面涂层^[11]。经过激光熔覆技术处理后的塑料模具表层结构致密,性能优良,抗氧化性能显著提高,适合复杂、精密塑料模具的抗氧化性修复。

熔覆工艺参数的确定和熔覆材料的选择是影响激光熔覆技术应用效果的重要因素。熔覆工艺参数,如激光器的功率、光斑直径和激光的扫描速度等影响了脉冲能量密度,决定了熔覆层的质量。另外,熔覆材料选择也直接影响熔覆层的硬度和耐磨性。熔覆材料与基体材料须有相近的膨胀系数和熔点以及较好的湿润性。一般熔覆材料有自熔性合金粉末、陶瓷粉末、复合粉末和其它金属体系材料如铜基、钛基等。MCrAlY (M 代表 Ni, Co 等过渡族元素, Y 为金属钇) 系列熔覆材料较为常用。这种熔覆材料在高温氧化的环境下形成表面氧化保护膜,如氧化铝等,如果再加入适当的氧化反应元素,可以增加氧化膜的附着力,模具表面氧化膜的剥离程度会减轻^[12]。

另外,对于稀土元素,其一方面可生成稳定的化合物,另一方面,其与氧的亲合力强,可阻碍氧化过程的进行,能提高模具的抗高温氧化冲蚀能力,因此,在激光熔覆时也经常加入稀土元素。加入稀土元素后熔覆层的耐磨性和硬度均显著提高。

激光熔覆技术近年来吸引了愈来愈多的研究者从事其开发研究。随着应用范围的日益扩大和理论研究的不断深入,激光熔覆技术将日趋成熟。

3.2 提高塑料模具的表面硬度

在塑料成型过程中,磨粒的硬度,以及冲蚀的速度都大大的增加了模具表面的粗糙度,实验和理论都已表明,提高模具表面硬度可以降低冲蚀等对模具表面粗糙度的影响。

(1) 采用渗碳技术。

渗碳技术可以用于强化低碳钢以及低碳合金钢加工的塑料模具。渗碳技术渗层深,渗速快,硬度梯度和成分梯度容易控制,经过淬火、低温回火处理后,塑料模具表面产生了高碳回火马氏体,因此塑料模具表面发生了相变强化,可

以显著提高模具表面的耐磨性、硬度和抗疲劳强度^[13]。但渗碳技术温度较高,渗碳后需要进行热处理,模具的变形较大,若塑料模具对精度要求较高,则该技术并不适合。常见的塑料模具的渗碳方法有固体渗碳,气体渗碳,真空渗碳和离子渗碳。离子渗碳方法的效率较高,碳浓度的变化较为平缓,模具变形小,而且能够对模具中的狭缝和小孔进行较好的处理,目前在塑料模具中的应用较多。工业生产实践表明,渗碳深度为 0.5~2.5 mm,渗碳层中的碳的质量分数为 0.85%~1.1% 时效果最好。

(2) 采用渗氮技术。

塑料模具也可以进行渗氮处理。渗氮是把模具钢放入氮原子气氛中保温一段时间,使氮原子渗入模具表面的技术。渗氮可分为强化渗氮和抗蚀渗氮,强化渗氮主要提高模具表面强度和耐磨性,抗蚀渗氮主要提高模具表面的抗蚀性能。渗氮处理后模具表面产生了较硬的氮化层,其硬度和耐磨性等都显著提高,而且处理过程是在较低的温度下进行的,塑料模具的变形较小,适合对精度要求较高的塑料模具。

模具的渗氮工艺常见的有液体渗氮,气体渗氮和离子渗氮。其中,离子渗氮具有渗速快、渗层硬度分布平缓,不易产生剥落和热疲劳等优点,几乎适用于所有模具。但是,离子渗氮对模具表面带有小孔或沟槽的区域强化效果较差,对于一些形状复杂的塑料模具,也存在加热不均及渗氮层均匀性差等缺点。

(3) 采用碳氮共渗技术。

碳氮共渗技术是指在塑料模具表面同时渗入碳、氮两种原子,形成碳氮共渗层的一种渗层技术,其应用于塑料模具可以获得高达 900~1 000 (维氏硬度) 的表面硬度,模具的耐磨性和抗粘着性显著提高,并且费用低,渗速快。由于氮元素的加入,渗层的淬透性也显著增强^[14]。稀土元素与碳氮共渗技术相结合,还可以缩短渗碳渗氮周期,细化深层组织晶粒,使模具表面硬度变化均匀^[15-16]。但是碳氮共渗后的表面化合物易发生膨胀,模具易发生变形,不适合精密的塑料模具。

(4) 采用气相沉积技术。

气相沉积技术是一种从气相物质中析出固相物质沉积在基体表面的镀膜技术^[17],根据使用原理的不同,可以分为物理气相沉积 (PVD) 和化学气相沉积 (CVD)。PVD 技术的镀膜材料容易获得,并且沉积温度低,处理后的模具变形小,粗糙度低,适用于精密模具,但 PVD 技术绕镀性差,不适用于形状复杂的模具。CVD 技术镀膜的膜层化学成分容易控制,可以获得致密性好、纯度较高的镀膜,另外, CVD 技术的沉积温度较高,镀膜和模具基体有较高的结合强度。CVD 技术还有绕镀性好的特点,对于复杂形状的模具,可以获得均匀的镀层。另外,经过 PVD 技术处理的镀层和模具基体的粘着力较差,不能充分发挥镀层的优势,而 CVD 技术处理

的镀层和基体的结合性好,这两种技术结合产生的离子化学气相沉积(PCVD)具备了沉积温度低,污染少和与基体结合能力强的特点,产生的镀层致密均匀,硬度高,耐磨性好,耐腐蚀性强,适用于塑料模具表面的强化处理^[18-19]。

(5) 采用激光淬火技术。

激光淬火技术可使模具被照射的表面温度迅速升高到相变温度以上,但由于加热时间短,模具表面未被照射的部分仍为冷态,随着激光的移动,被加热表层热量迅速向周围散去,表层温度急剧下降,达到相变强化的目的。激光淬火技术使材料表面获得马氏体组织,位错密度比一般淬火处理明显提高,也可以有效提高模具材料硬度,极大地增强塑料模具的耐磨性能^[20-21]。经激光淬火处理的塑料模具钢表面光滑,犁沟现象不明显,粘着作用较弱,而未经过激光淬火处理的模具钢犁沟现象明显,模具表面有明显的塑性变形^[22]。激光淬火技术可以根据模具的形状和使用要求在局部区域进行,是适合塑料模具表面处理的一种方法。

3.3 其它措施

采用电刷镀技术,在塑料模具表面镀上纳米或者稀土复合镀层,镀层表面均匀致密,可以有效的防止金属在摩擦时发生的粘着磨损以及模具表面出现的切削型沟磨损等现象,显著改善模具的耐磨性^[23-24]。纳米镀层中的纳米微粒比微米级的固体微粒小很多,在模具工作过程中即使脱落,也会填充到模具表面微小的缝隙和凹坑处,起到增加接触面积,减少单位面积载荷的作用,很少成为磨粒划伤模具表面。纳米镀层还可以形成具有更高的显微硬度和超高分散的镀层结构,和基体金属形成牢固的化学键,加大镀层和基体的结合强度,提高塑料模具的抗腐蚀能力。近年来发展的氧化铝-镍-铬纳米复合镀层,在硬度,耐磨性,抗氧化能力方面都有显著提高,可以应用在塑料模具的表面强化上^[25]。

此外,选择合理的模具钢,采用适当的热处理工艺,增加塑料模具表面铬元素的含量,也能有效地减小塑料模具的表面粗糙度^[26]。

4 结语

(1) 高温高压下的塑料颗粒对塑料模具表面氧化层和基体的冲蚀是造成塑料模具表面粗糙度变化的主要原因。

(2) 冲蚀的速度,角度以及冲蚀粒子的性质都是影响塑料模具表面粗糙度变化的因素。

(3) 可以通过粒子注入技术、激光熔覆技术等提高模具表面的抗氧化能力,降低塑料模具表面粗糙度;也可以通过渗氮、渗碳、碳氮共渗等技术提高塑料模具的表面硬度,降低模具表面粗糙度。另外,激光淬火技术,气相沉积技术等对降低塑料模具表面粗糙度也有较大的改善。

参考文献

[1] Jafar R H, et al. Wear, 2013, 303(1-2):302-312.

- [2] Liu Z, et al. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(9):1 886-1 894.
- [3] Yadav R N, et al. Materials and Manufacturing Process, 2014, 29(5):585-592.
- [4] Jafar R H, et al. Wear, 2013, 303(1-2):138-145.
- [5] Bora M O, et al. Polymer Composites, 2015, 36(11):1 958-1 966.
- [6] Yadav R N, et al. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(8):1 293-1 299.
- [7] Hadavi V, et al. Wear, 2015, 342:310-321.
- [8] Hagbabin N, et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5-8):1 031-1 043.
- [9] 陶学伟,等. 材料导报, 2014, 28(4):112-115.
- Tao Xuewei, et al. Materials Review, 2014, 28(4):112-115.
- [10] 赖华清,等. 热加工工艺, 2007, 36(5):95-97.
- Lai Huaqing, et al. Hot Working Technology, 2007, 36(5):95-97.
- [11] 袁庆龙,等. 材料导报, 2010, 24(2):112-116.
- Yuan Qinglong, et al. Materials Review, 2010, 24(2):112-116.
- [12] 樊自拴,等. 材料保护, 2013(7):49-51.
- Fan Zishuan, et al. Materials Protection, 2013(7):49-51.
- [13] Jafar R H, et al. Journal of Manufacturing Process, 2015, 17:127-140.
- [14] 瞿芳,铸造技术, 2013, 34(11):1 480-1 481.
- Qu Fang, et al. Foundry Technology, 2013, 34(11):1 480-1 481.
- [15] 张红霞,等. 金属热处理, 2011, 36(3):91-94.
- Zhang Hongxia, et al. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(3):91-94.
- [16] 李双喜,等. 金属热处理, 2014, 39(5):114-117.
- Li Shuangxi, et al. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(5):114-117.
- [17] 李春波,等. 广西轻工业, 2011(4):88-89.
- Li Chunbo, et al. Guangxi Journal of Light Industry, 2011(4):88-89.
- [18] Yuan Qiaoling, et al. Powder Technology, 2016, 302:153-159.
- [19] Syamsundar C, et al. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2015, 68(4):587-599.
- [20] 何柏林,等. 表面技术, 2016, 45(11):180-186.
- He Bolin, et al. Surface Technology, 2016, 45(11):180-186.
- [21] 吴华春,等. 热加工工艺, 2011, 40(2):145-147.
- Wu Huachun, et al. Hot Working Technology, 2011, 40(2):145-147.
- [22] Monno M, et al. International Journal of Materials & Product Technology, 2015, 51(4):345-358.
- [23] Rauba A A, et al. Journal of Friction and Wear, 2013, 34(1):51-56.
- [24] Marquez-Vera C A, et al. Wear, 2015, 328:132-139.
- [25] 胡振峰,等. 中国表面工程, 2010, 23(1):87-90.
- Hu Zhenfeng, et al. China Surface Engineering, 2010, 23(1):87-90.
- [26] 吴茜,等. 模具工业, 2017, 43(3):1-7.
- Wu Qian, et al. Die & Mould Industry, 2017, 43(3):1-7.