

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.04.006

磨粒固化气囊光整技术及试验研究*

计时鸣, 李 笑, 金明生, 张 利, 许亚敏

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310032)

摘要: 针对模具激光强化表面高硬度、高耐磨性以及局域硬度差异等问题,提出了一种磨粒固化气囊光整加工新技术,以期实现模具激光强化表面的高效精密自动化光整加工。该技术将处于游离态的磨粒通过高分子粘结剂固化于橡胶基体表层,使磨粒群获得更稳定的支撑,形成了更有效和平稳的切削效果。根据磨粒固化气囊的性能要求,从材料特性着手,确定出通过酸性硅酮密封胶将磨粒直接固化在丁苯橡胶基体表面,以制得磨粒固化气囊的工艺方法;借助机器人辅助加工平台,对制得的不同粘结层厚度的磨粒固化气囊进行了光整试验研究。研究表明:通过控制磨粒固化气囊的均匀性,加强复合层的粘结效果,可以降低工件表面粗糙度,提高加工效率,为模具高效光整加工奠定了坚实的基础。

关键词: 气囊抛光; 磨粒固化; 光整加工; 粘结剂; 成型工艺

中图分类号: TG356.28; TH161.1⁺.1 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)04-0407-04

Abrasive solidified balloon polishing technique and experimental study

Ji Shi-ming, Li Xiao, Jin Ming-sheng, Zhang Li, Xu Ya-min

(Key Laboratory of E & M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: In order to solve the problems of mould laser enhanced surface's high hardness, wear resistance and local hardness difference, a new technique of abrasive solidified balloon polishing was proposed to achieve the efficient, precision and automatic polishing. This technique made free abrasive solidify out of the rubber balloon surface by polymer binder, so that the abrasive group could obtain more stable support, form more effective and smooth cutting effect. Consideration of the abrasive solidified balloon's performance requirements, a process method that makes abrasive solidify out of the acid silicone sealant surface by SBR was established. With the robot auxiliary platform, the abrasive solidified balloon was tested. The experimental results show that by controlling the uniformity of abrasive solidified balloon, and strengthening the bonding effect of composite layer, it could reduce the surface roughness, and improve processing efficiency, which lays a solid foundation for the mold efficient polishing.

Key words: balloon polishing; abrasive solidified; finishing cut; binders; molding process

0 引 言

模具表面激光强化处理^[1-2](包括激光相变硬化、激光熔覆和激光合金化等)是代表国际先进水平和未来发展方向的高效绿色制造方法。在激光强化模具表面使用性能得到大幅度提高的同时,其加工难度也随之加剧。高硬度、高耐磨性、自由曲面面形的复杂

性和局域强化带来的局域硬度差异成为制约激光强化模具表面后续加工的瓶颈因素。传统的气囊抛光是基于柔性抛光工具气囊特有的自适应性和气压可控性,在加工过程中始终保持气囊与工件之间的紧密吻合,保证加工精度的同时,获得较高的材料去除率和较低的表面粗糙度^[3-6],但一般采用游离磨粒,运动姿态相对自由,难以获得较好的切削效果。

收稿日期: 2012-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175471)

作者简介: 计时鸣(1957-),男,浙江温州人,教授,博士生导师,主要从事机电控制及自动化、精密与超精密加工和机器视觉方面的研究。

E-mail: jishiming@zjut.edu.cn

本研究在传统气囊抛光基础上,针对模具激光强化表面高硬度、高耐磨性的特点,提出一种新型磨粒固化气囊光整技术,以期实现模具激光强化表面的高效精密自动化光整加工。该技术采用固结磨粒气囊为加工工具,将磨粒与气囊基体柔性有机结合,既利用固结磨粒切削力平稳、材料去除率高的特点,又利用空心气囊柔性使工具与自由曲面形成大面积仿形接触,以提高高硬度自由曲面的加工效率。气囊表面的弹性粘合层保证磨粒在微观上既受到弹性支撑,又受到弹性约束,确保稳定和较强切削力同时,发挥切削加工痕迹精细、不产生深度划痕的优势,促使加工过程较快达到所需的表面粗糙度,能够在显著提高加工效率的同时,在弹性支撑作用下保证加工质量。

1 磨粒固化气囊光整技术

将两种不同弹性的材料相结合,再将磨粒固结于复合弹性体表面形成的柔性固结气囊,称为磨粒固化气囊。该固化气囊由两层弹性体材料和磨粒层组成,其中弹性体一为基体,承担结构的各种工作载荷;弹性体二为增强体,起到粘结磨粒层和传递应力的作用。

气囊基体层橡胶良好的柔性可控特征不会破坏被加工面的几何形状,并能柔顺地贴合于不同曲率的模具表面,满足自由曲面大面积仿形接触的光整需求。增强体层和磨粒层的相互作用,保证了磨粒具有良好的弹性支撑条件和动力学行为约束状态,确保了一定的切削性能,又充分发挥切削痕迹精细、不至于产生过深划痕的优势,能够更快地获得较好的表面粗糙度;同时固结磨粒不会飞溅,利于提高气囊转速。硬质砂轮磨削、游离磨粒抛光和磨粒固化气囊光整技术的加工特征对比如图1所示。

2 磨粒固化气囊成型工艺

新型磨粒固化气囊依靠气囊特有的自适应性和可变气压结构,内部气压通过气泵实时在线可调,在光整过程中始终保持固化气囊与不同曲率半径工件紧密接触,保证面形精度的同时,提高抛光效率。基体层作为磨粒固化气囊的关键构件,应具有良好的弹

性和韧性,同时可承受一定的压力与变形。丁苯橡胶是一种不饱和非极性碳链橡胶,具有耐高低温、耐磨耗、耐压缩、耐油以及耐老化等优点^[7]。因此,磨粒固化气囊基体采用丁苯橡胶与短纤维混合制作,短纤维选用超细尼龙纤维,通过乳胶共沉预处理使之在橡胶基质中分散,经硫化后成型。

考虑到介质与介质之间的相互作用和配合,以及界面相之间的各种物理、化学反应和相关力学性能等,第2种弹性材料在选材上性能必须与橡胶材料相匹配,起到力的传递作用,同时又能与磨粒有效结合。因此,笔者确定采用粘结剂^[8-9]作为第2种弹性材料。本研究在室温、常压下对其进行粘结效果对比实验以优选粘结剂,实验结果如表1所示。

表1 不同粘结剂的性能对比

粘结剂	红星509	801	EX504	酸性硅酮密封胶
基本性能	耐高低温 耐水、酸 密封性好	有刺激 性气味	耐酸碱耐水 油耐高温	耐高低温抗拉伸 密封性好
固化时间 /min	30	45~50	45~50	25
固化厚度	变小	无厚度	变小	基本不变
固化弹性	无弹性	较好	无弹性	较好
粘结效果	冷凝	粘不牢	冷凝下坠	冷凝

通过表1的对比结果可知:膏状酸性硅酮密封胶与橡胶粘结后固化所需时间较短、塑性较好、厚度基本保持不变,且成型后弹性良好、粘结可靠、强度大。因此,在本研究的分析和光整试验中,粘结层选用酸性硅酮密封胶。

一般而言,利用磨粒与工件材料的硬度差实现材料去除,所以磨粒硬度越高,切削能力越强,材料去除效果越好。磨粒的强度指的是磨粒在承受外力时不被压碎的能力,即磨粒强度越高,切削力越强,使用寿命越高。磨粒种类很多,常用的有碳化硅、金刚石、白刚玉、陶瓷氧化铝等,考虑到成本与应用对象等因素,本研究优先选用碳化硅磨粒作为磨粒固化气囊的磨粒层材料。

磨粒固化气囊成型工艺方法可选择手工冷粘成型、模压成型和喷射成型等。其中,手工冷粘成型成本低,设备投资少,操作简便,但制品均匀性较差;模

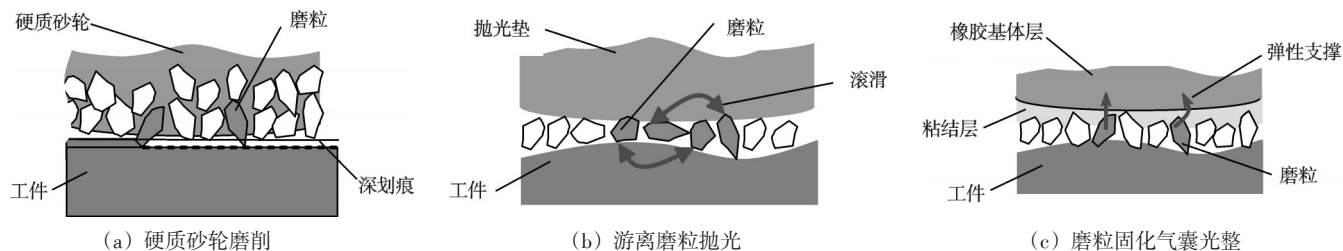


图1 磨削、游离磨粒抛光和磨粒固化气囊光整技术对比

压成型是在手工冷粘成型基础上,利用凹凸模进行压制成型,相对手工冷粘成型,制品均匀性得到改善,且性能稳定;喷射成型是基于制品均匀性考虑而提出的另一种工艺方法,通过喷枪的匀速喷射保证制品的均匀性,但设备投资大,成本较高。

本研究采用简单传统的手工冷粘成型方法制备低成本磨粒固化气囊,并对其进行力学性能分析和光整试验研究,以验证其可行性和有效性,并为将来采用模压成型或喷射成型制备磨粒固化气囊提供技术准备和经验积累。采用不同粒度碳化硅磨粒制备的磨粒固化气囊实物图如图2所示。

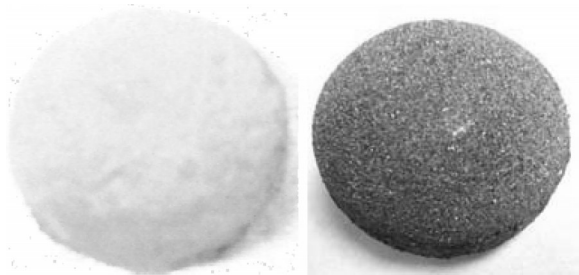


图2 不同粒度值的磨粒固化气囊

3 磨粒固化气囊理论分析与试验研究

3.1 力学性能分析

本研究中气囊基体选用邵氏硬度为48,厚度为2 mm的丁苯合成橡胶材料,根据公式:

$$E = \frac{15.75 + 2.15H_s}{100 - H_s} \quad (1)$$

式中: H_s —硬度, E —弹性模量。

可得橡胶基体层的弹性模量 $E = 2.29$ MPa; 粘结剂固化后邵氏硬度为32,则粘结层的弹性模量 $E = 1.24$ MPa。

对于只有两相组成的磨粒固化气囊,即 $N = 2$,利用公式:

$$E_c(J) = \left[\sum_{i=1}^N \Phi_i E_i^J \right]^{1/J} \quad (2)$$

式中: i —整数, $J = -1 \sim 1$, Φ_i —体积分数。

当 J 分别取 ± 1 时,表示该磨粒固化气囊弹性模量的上、下限^[10],计算结果如表2所示。

通过表2可知:磨粒固化气囊相比传统意义的气囊,弹性模量低,但没有数量级的差异,故相对工件的

表2 不同粘结层厚度的磨粒固化气囊理论弹性模量

J	粘结层厚度/mm		
	0.5	1	1.5
-1	2.00	1.79	1.67
1	2.08	1.94	1.84

吻合特性没有明显下降,满足自由曲面大面积仿形接触的光整需求。

假定该固化气囊模型是各向同性的超弹性材料,具有不可压缩的性质,则根据 Mooney-Rivlin 模型可确定其材料系数:

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (3)$$

式中: W —应变能密度; C_1 , C_2 —材料的力学性能常数; I_1 , I_2 —第一张量不变量和第二张量不变量。

I_1 和 I_2 可表示为:

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: λ_1 , λ_2 , λ_3 —3个方向的主伸长比。

理想不可压缩材料的体积是不变的,则 $J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ 。对于材料的力学性能常数 C_1 和 C_2 ,可用轴向拉伸等方式测量。同时由 Kirchhoff 应力张量和 Green 应变张量之间的关系得出:

$$t_i = 2(\lambda_i - 1/\lambda_i^2)[\partial W / \partial I_1 + (1/\lambda_i) \partial W / \partial I_2] \quad (5)$$

式中: t_i — λ_i 方向上的真实应力,与工程应力 σ_i 的关系为 $t_i = \sigma_i \lambda_i$ 。

由此可得出该模型的应力应变关系,为之后的有限元分析提供了理论依据,同时可避免实际抛光时超出材料所能承受的最大应力范围,导致材料破坏。

3.2 抛光试验

笔者应用制备的磨粒固化气囊,结合机器人辅助抛光技术进行试验,观察试验效果,以验证该磨粒固化气囊的可行性和有效性。该实验制备出6种不同粘结层厚度的磨粒固化气囊,分别为0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm、3.0 mm,编号为1~6。试验条件为:半球型直径40 mm的磨粒固化气囊,抛光工具转速1 400 r/min,下压量2.0 mm,气囊倾角 $\pi/9$ rad。该6组磨粒固化气囊针对同一类工件、相似的表面粗糙度,定点抛光100 s,观察其表面抛光效果,实验结果如表3~5所示。

表3 不同粘结层厚度的磨粒固化气囊磨粒脱落量(单位:g)

编号	1号	2号	3号	4号	5号	6号
	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
抛光前质量	13.278 5	13.458 2	14.835 7	17.205 6	18.014 1	23.794 7
抛光后质量	13.233 8	13.427 6	14.805 3	17.193 6	17.995 2	23.777 2
磨粒脱落量	0.044 7	0.030 6	0.030 4	0.012 0	0.018 9	0.017 5

表4 不同粘结层厚度的磨粒固化气囊工件材料去除量(单位:g)

编号	1号	2号	3号	4号	5号	6号
抛光前质量	42.093 1	41.875 2	41.951 7	41.942 9	41.853 0	41.996 5
抛光后质量	42.092 6	41.874 6	41.951 1	41.942 3	41.852 2	41.995 5
材料去除量	0.000 5	0.000 6	0.000 6	0.000 6	0.000 8	0.001 0

表5 抛光后工件表面粗糙度 R_a

粗糙度值	1号	2号	3号	4号	5号	6号
1	0.255	0.228	0.127	0.258	0.116	0.280
2	0.304	0.223	0.177	0.255	0.240	0.273
3	0.287	0.287	0.315	0.252	0.270	0.278
4	0.086	0.276	0.236	0.200	0.277	0.298
5	0.297	0.271	0.316	0.259	0.202	0.198
6	0.176	0.292	0.304	0.288	0.309	0.268
平均值	0.234	0.262	0.246	0.252	0.236	0.266
原始粗糙度	0.352	0.353	0.353	0.353	0.352	0.353
标准差	0.086	0.030	0.080	0.029	0.069	0.035

通过手工冷粘成型的磨粒固化气囊均匀性较差,精度较低,主观因素影响较大,但从上述数据中仍可以看到:粘结层厚度越小,磨粒固着效果较差,工件材料去除量较少,但都在一定程度上降低了工件表面粗糙度,提高了工件表面质量。产生这种现象的原因是粘结层厚度越小,固化的磨粒越少,但固化气囊的均匀性越容易控制。固化气囊的均匀性对整个抛光加工质量稳定性有很大的影响,因此研究者需要通过进一步的模压成型或喷射成型工艺来保证固化气囊的均匀性,以提高工件表面精度。

笔者选用均匀性较容易控制且粘结层厚度为0.5 mm的磨粒固化气囊做进一步的实验,以研究气囊转速对工件表面加工质量的影响,下压量均为2.0 mm,定点抛光100 s,结果如图3所示。

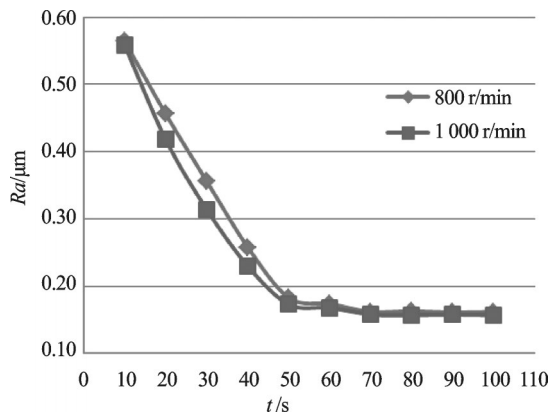


图3 不同转速下工件表面粗糙度随时间的变化

根据图3可得:磨粒固化气囊在前50 s内,转速越高,材料去除效果越好,表面质量提升越快;而50 s

后磨粒的脱落导致光整效果明显下降。因此在后续的研究中,需要充分加强复合层,特别是磨粒与粘结层的粘结效果,在保证表面质量的同时提高加工效率。

4 结束语

本研究针对模具激光强化表面高硬度、高耐磨性的特点,提出了一种新型磨粒固化气囊光整技术,以期实现模具激光强化表面的高效精密自动化光整加工。通过研究磨粒固化气囊光整技术,确定出利用酸性硅酮密封胶将磨粒直接固化在丁苯橡胶基体表面,以制得磨粒固化气囊的工艺方法。通过抛光实验得出,控制磨粒固化气囊的均匀性,加强复合层的粘结效果,可以降低工件表面粗糙度,提高加工效率的结论。

该光整技术与传统气囊抛光相比,具有一定的创新意义和实用价值,值得进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 王振华,揭晓华,黄诗君,等. 718塑料模具钢激光相变硬化层的性能研究[J]. 热加工工艺,2008,37(6):22-24.
- [2] 闫忠琳,叶宏. 激光熔覆技术及其在模具中的应用[J]. 激光杂志,2006,27(2):73-74.
- [3] 计时鸣,金明生,张宪,等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报,2007,43(8):2-6.
- [4] 计时鸣,张利,金明生,等. 气囊抛光技术及其研究现状[J]. 机电工程,2010,27(5):1-12.
- [5] WALKER D D. First aspheric form and texture results from a production machine embodying the precession process [C]. Proc. SPIE,2001:267-276.
- [6] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, BROOKS D, et al. Novel CNC polishing process for control of form and texture on aspheric surfaces[C]. Proc. SPIE,2002:99-106.
- [7] 金明生. 模具自由曲面气囊抛光机理及工艺研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2009.
- [8] 张向宇. 粘结剂分析与测试技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [9] 熊腊森. 粘接手册[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [10] 柏振海,黎文献,罗兵辉,等. 一种复合材料弹性模量的计算方法[J]. 中南大学学报:自然科学版,2006,37(3):439-443.

[编辑:洪炜娜]