

文章编号: 1006-852X(2008)02-0013-03

环形树脂结合剂金刚石线锯研制^{*}

侯志坚^{1,2} 葛培琪¹ 张进生¹ 李绍杰¹

(1. 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061)

(2. 济南大学机械工程学院, 山东 济南 250022)

摘 要 固结磨料线锯切割相当于磨削加工, 切割表面损伤层浅, 因而锯切表面质量更高。电镀金刚石锯丝已经在工程实际中获得一定应用, 但制造成本较高。而树脂结合剂锯丝成本则非常低。本文用 1Cr18Ni9 不锈钢丝作为环形锯丝的基体材料, 其焊接接头可承受最大拉力 110 N, 疲劳寿命超过 1.2×10^5 次。不锈钢丝经表面处理后, 直接刷涂树脂金刚石磨料混合物, 再经过干燥及烘烤工序制成树脂结合剂金刚石线锯丝。涂层中树脂占 35%、金刚石磨料(平均直径 $20 \mu\text{m}$)占 50%、纳米铜粉占 15%。用该锯丝切割硅晶体, 切割速度 4 m/s 恒力驱动进给。检测证明: 切割表面平整, 表面粗度达 $Ra 0.8 \mu\text{m}$ 。原因是树脂结合剂弹性较好, 能有效地减小切割系统的振动, 但其切削效率、使用寿命方面不如电镀金刚石线锯高。

关键词 树脂结合剂; 金刚石线锯; 切割; 硅晶体

中图分类号 TQ164 TG74 **文献标识码** A

Development of looped resin bonded diamond wire saw

Hou Zhijian² Ge Peiqi¹ Zhang Jinsheng¹ Li Shaojie¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Jinan University, Jinan 250022, China)

Abstract Cutting with fixed abrasive diamond wire is similar to grinding, so less damaged layer and better quality surface can be obtained. Electroplated diamond wire has got some applications but the production cost is high compared with resin bond diamond wire. In this paper, the stainless steel wire (1Cr18Ni9) was used as base material of looped wire. For the welding joint, its limit tension is 110 N and the fatigue life exceeds 1.2×10^5 passes. The stainless steel wire was coated directly with an admixture that consists of resin (35%), diamond (average diameter $20 \mu\text{m}$, 50%) and nanometer copper powder (15%). Cutting experiment on silicon crystal was conducted with the above made resin diamond wire. The wire velocity was 4 m/s with constant driving force for the feed movement. Because resin has better elasticity, it is beneficial to reduce the vibration. The cutting surface was much smoother, the machined surface roughness attained $Ra 0.8 \mu\text{m}$. However, resin diamond wire is still somehow lower in respect of cutting rate and working life than electroplated diamond wire.

Keywords resin diamond wire; cut; crystal silicon

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (50475132); 济南大学基金资助项目 (Y0606)

0 引言

与游离磨料线锯切割相比, 固结磨料线锯切割脆性材料时, 其材料的去除机理不同。游离磨料线锯切割中, 材料去除的机理是研磨, 磨粒垂直作用于切割表面; 而固结磨料线锯切割与磨削相似, 锯丝相当于金属结合剂的砂轮, 金刚石磨粒在脆性材料表面上刻划。刻划要比垂直压痕的表面裂纹浅^[1], 在单颗磨粒切削深度足够小的前提下, 有可能实现塑性域切削, 因此固结磨料线锯切割比游离磨料线锯切割加工质量更高。固结磨料线锯主要有金属结合剂和树脂结合剂两类。金属结合剂线锯即电镀金刚石线锯, 通常以镍为金属结合剂, 将金刚石磨料电镀在金属丝表面上, 其具有强度大、耐磨性好的特点, 已经在工程实际中获得一定应用。由于电镀工艺的限制, 其电镀工序需要很长时间, 制造效率低、成本高, 再就是电镀金刚石线锯因直径增大, 电镀层的剪切模量高, 导致线锯扭切强度降低。树脂结合剂线锯制造方法与树脂结合剂砂轮的制造类似, 直接将含有金刚石磨料的树脂混合物刷涂在金属丝表面, 经过干燥后再烘烤固化^[2-3], 树脂涂层的剪切模量较低, 锯丝的扭切强度基本不变, 更重要的是其生产率非常高、成本低。

1 树脂结合剂线锯的制造

1.1 线锯基体材料选择

固结磨料线锯基体材料为直径较细的金属丝, 要求其具有足够的抗拉强度和抗疲劳强度。环形线锯不仅要切割工件, 还要能够传递动力并承受冲击振动。因此还要求基体材料具有好的焊接性能, 焊接接头应具有足够的抗拉及抗疲劳强度。经过对几种材料性能检测、比较, 我们首先选用直径为 0.4 mm 的 1C18N9 不锈钢丝进行焊接及焊接质量的相应试验评定, 以期能够作为环形线锯的基体材料。

焊接是环形线锯制造的关键工序。线锯焊接采用弹簧顶锻式对焊机, 其原理是控制后的交流电通过焊接变压器的电磁感应变成低电压、大电流, 电流通过焊接工件和变压器次级电路形成的回路, 焊件接触面电阻产生电阻热, 使工件接触处在锻压状态下加热达到再结晶状态, 断电后继续在锻压状态下冷却再结晶而形成焊缝并焊接在一起(图 1)。焊接电流、加热时间和弹簧顶锻压力对焊接质量影响很大, 应根据焊接材

料的尺寸及含碳量进行相应调节。1C18N9 不锈钢丝含碳量较高, 焊后要进行回火处理。图 2 为焊点形貌, 可以看出: 外形平滑, 截面尺寸几乎没有变化。

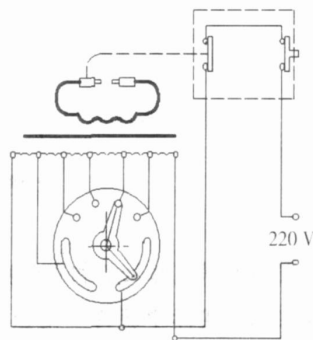


图1 焊接原理

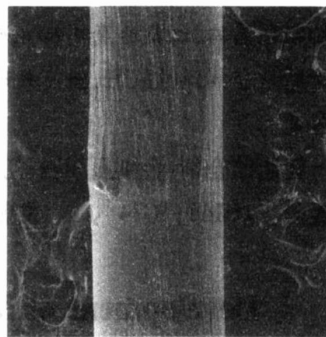


图2 焊点形貌

线锯的焊点是其薄弱环节, 破坏往往是从此处开始。我们对焊点也进行了相应的检测。检测包括抗拉强度和疲劳实验寿命, 不锈钢丝基体承受最大拉力为 160 N 而焊点为 110 N 虽然焊点比基体强度要低, 但试验锯床所需预紧力仅为 10—20 N 焊点强度能满足要求。基体疲劳寿命试验是在环形锯丝线锯床上进行的(如图 4), 焊成环状的不锈钢丝套在三个导轮上, 由张紧机构张紧, 在动力驱动下高速旋转。试验条件如下: 锯丝线速度 10 m/s, 锯丝预紧力 20 N。试验结果表明疲劳寿命达到 1.2×10^5 次以上, 持续时间至少可达 2 个小时, 可以作为环形树脂结合剂线锯的基体材料。

1.2 树脂混合物刷涂

树脂结合剂线锯制作过程是: 锯丝基体表面处理——树脂混合物刷涂——干燥、烘干。表面处理包括: 用细砂纸打磨不锈钢丝表面, 除去氧化物以改善与树脂的结合强度, 用丙酮清洗金属丝表面, 干燥后涂薄层树脂, 这样可使混合物涂层均匀。树脂混合物中树

脂占 30%、金刚石磨料占 50% (图 3 a, 平均颗粒直径 $20\text{ }\mu\text{m}$)、纳米铜粉占 15%, 由于树脂与金刚石磨料表面的浸润性差以及树脂不耐热, 使得树脂结合层的把持强度降低, 会出现磨粒及早脱落, 而树脂与金属有良好的浸润性, 最好使用表面电镀处理过的金刚石磨粒。由于树脂粘度较大, 不容易与磨料及铜粉充分混合, 我们先在混合物中加入适量丙酮作溶剂, 在自动搅拌装置中搅拌均匀, 最后将丙酮蒸发, 注意蒸发温度不能太高, 否则树脂粘度降低太多, 粘度合适即可进行表面涂抹。树脂结合剂烘干过程中, 会出现“兰脆”现象, 即内部芯线变脆, 抗扭强度降低。Toshiyuki Enomoto^[4]采用增大混合物中铜粉含量的办法, 增强树脂导热性, 金刚石把持力增大, 提高了线锯的耐热性、耐磨性和断裂强度, 很好的解决了“兰脆”问题。我们采用烘烤中分阶段加温的措施, 降低最高烘烤温度, 也是解决“兰脆”问题的有效措施。图 3 b 和图 3 c 分别为烘烤后的树脂结合剂锯丝外观及断面涂层形貌。涂层厚度均匀, 平均厚度约 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。

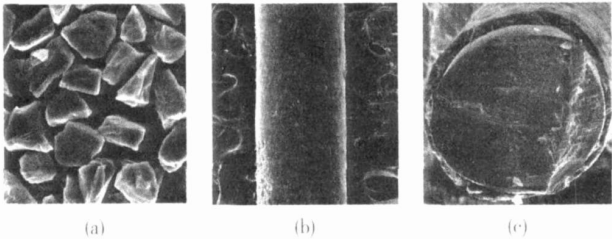


图 3 金刚石磨粒及锯丝外观

2 线锯切割试验

2.1 试验描述

试验使用树脂结合剂金刚石线锯, 锯切设备为自行研制的环形锯丝线锯床。图 4 为锯切示意图, 锯床

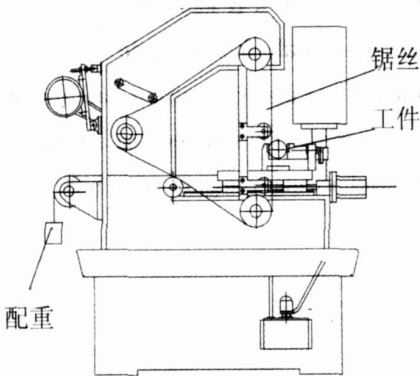


图 4 锯切示意图

有多种速度, 并且有伺服电机驱动和用配重块恒拉力驱动两种进给方式。切割材料为直径 $\phi 40\text{ mm}$ 硅棒。切割时, 锯丝线速度 4 m/s , 配重块恒拉力驱动方式, 改变配重块质量变换驱动力, 驱动力 $6\sim 8\text{ N}$ 用水冷却。

2.2 试验结果

用该线锯锯切的表面光滑平整, 表面粗糙度达 $Ra\ 8\text{ }\mu\text{m}$ 。图 5 a 为锯切表面放大 1000 倍的 SEM 照片, 图 5 b 为电镀金刚石锯丝切割表面放大 1000 倍的 SEM 照片 (磨粒平均直径 $30\text{ }\mu\text{m}$ 往复式直线运动线锯切割, 锯丝线速度 3 m/s , 进给速度 0.075 mm/min)。两种不同加工中, 虽然磨粒平均直径和运动参数差别不大, 仅仅是使用不同结合剂的线锯, 可以看出图 5 a 中凹坑及凸起要小得多, 并且棱角圆滑, 图 5 b 中块状崩碎非常明显, 沟槽较深, 表面较粗糙。其原因是树脂结合剂弹性较好, 能有效地减小切割系统的振动, 减轻表面损伤, 而金属结合剂硬度大, 与工件之间冲击也大, 从这一点来讲, 树脂结合剂线锯切割能获得质量更好的表面。图中切割纹理间距不同, 是进给速度不同所致。

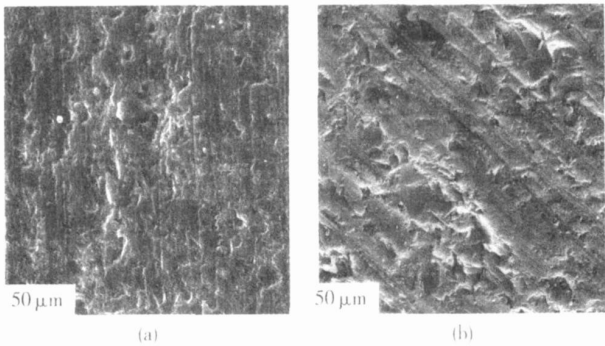


图 5 切割表面的 SEM 照片

由于树脂结合剂的弹性大、强度小, 单颗粒磨料切削深度小, 树脂结合剂线锯切割效率较低, 同样原因造成其使用寿命不如金属结合剂线锯高。

3 结论

选用 1C48N9 不锈钢丝作为环形线锯的基体材料, 进行焊接及焊点抗拉强度和疲劳寿命试验。涂层混合物包括适当比例的树脂、金刚石磨料及纳米铜粉, 不锈钢丝经表面处理后再刷涂树脂混合物, 最后经干燥、烘烤工序制成树脂结合剂线锯。用该线锯切割硅

(下转第 20 页)

炮”的现象,合成稳定性差。究其原因是因为焙烧温度高,叶蜡石压缩后多棱体尺寸偏大,合成压力高,且叶蜡石在超压和卸压过程中均匀变形的能力差,容易放炮而导致合成稳定性差。因此,叶蜡石焙烧温度最高不能超过 400℃。

2 结论

六面顶金刚石合成的稳定性与设备、合成工艺、原材料都有关系,可以说贯穿于整个金刚石生产之中。与合成块元件制造、组装方式、气候变化等或多或少有着联系。本文只就以上主要方面加以探讨,通过分析和讨论,可以归纳如下几点:

(1)顶锤尺寸与叶蜡石尺寸的匹配合理是金刚石合成稳定性的前提。当 $\lambda \geq 29.49\%$ 时,金刚石合成不能稳定进行, Δ 值最小不能小于 3.316 mm。

(2)顶锤小角度对合成压力影响比较大,在 40°~42° 范围内,顶锤小斜面角度每减小 0.5°,合成总压力增加 6% 左右,从而影响合成的稳定性。

(3)白云石—叶蜡石复合块是一种比较好的传压

保温材料,其烘烤工艺的好坏直接关系到合成的稳定性。低温时间不要太长,焙烧温度最高不要超过 400℃。

参考文献

- [1] 陈启武. 人造金刚石合成研究 [Q]. 见中国超硬材料发展战略研讨会论文集——庆祝人造金刚石工业发展三十年. 深圳: 1993 41—44
- [2] 陈启武, 邓福铭, 熊湘君. 超高压技术的研究 [J]. 矿冶工程, 2001, 21(1): 62—65
- [3] 郝兆印, 贾攀, 卢灿华. 高温高压下叶蜡石的相变 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2003 3: 59—63
- [4] 王松顺. 人造金刚石工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986

作者简介

李启泉, 男, 1968 年生, 主要从事人造金刚石单晶合成和制品的研究开发。

收稿日期: 2007—12—09

(编辑: 张慧)

(上接第 15 页)

晶体, 锯切表面光滑平整, 表面粗糙度达 $R_{\text{a}} 8 \mu\text{m}$ 。与电镀金刚石线锯切割表面相比, 加工纹理凹坑及凸起要小得多, 并且棱角圆滑, 其原因是树脂结合剂弹性较好, 能有效地减小切割系统的振动, 减轻表面损伤, 因此树脂结合剂线锯切割能获得质量更好的表面。但其切削效率、使用寿命方面还不如金属结合剂线锯高。

参考文献

- [1] 董申, 赵奕, 周明等. 尖锐压头刻划脆性材料的断裂机理研究 [J]. 航空精密制造技术, 1998 34(2): 23—26
- [2] Sugawara J, Hara H, Mizoguchi A. Development of fixed abrasive grain wire saw with less cutting loss [J]. SEI technical review 2004 58: 7—11
- [3] 本俊之等. 利用紫外线固化树脂开发树脂结合剂金刚石线锯

[J]. 珠宝科技, 2004 5: 56—61

- [4] Toshiyuki Enomoto, Yuuka Shimazaki, Yasuhiro Taniguchi et al. Development of a Resinoid Wire Containing Metal Powder for Slicing a Silicon Ingot [J]. Annals of the CIRP 1999 48 (1): 273—276

作者简介

侯志坚, 男, 1962 年生, 山东滕州人, 济南大学机械工程学院副教授, 现为山东大学机械工程学院博士研究生。研究方向: 硅晶体精密切片技术及工具, 发表论文 20 余篇。

E-mail: me_houzj@ujn.edu.cn

收稿日期: 2007—10—30

(编辑: 王琴)