

树脂金刚石线金刚石浓度及其添加量的计算

高伟¹, 刘兴鹏¹, 倪进华¹, 马伯江¹, 王东雪², 张景涛²

¹青岛科技大学; ²青岛高测科技股份有限公司

摘要: 分析了树脂金刚石线的制造工艺过程, 针对金刚石线的树脂层半固化和固化过程中, 因溶剂挥发和树脂固化而造成的体积收缩问题, 提出了树脂层中金刚石浓度及其添加量的计算方法, 得到了在已知树脂浆料中金刚石磨料的添加量时, 固化后树脂金刚石线树脂层中金刚石浓度的计算方法, 以及要获得一定树脂层金刚石浓度时, 树脂浆料中金刚石磨料添加量的计算公式。该方法可对树脂金刚石线中金刚石微粉的量化设计、树脂金刚石线生产工艺的优化设计等提供参考。

关键词: 树脂金刚石线; 树脂固化; 金刚石浓度; 线锯

中图分类号: TG73; TH14

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2020.06.010

Calculation of Diamond Concentration and Diamond Addition Amount of Resin Diamond Wire

Gao Wei, Liu Xingpeng, Ni Jinhua, Ma Bojiang, Wang Dongxue, Zhang Jingtao

Abstract: The manufacturing process of resin diamond wire is analyzed. The calculation method of diamond concentration and diamond addition amount in the resin layer is studied for the problem of volume shrinkage caused by solvent evaporation and resin solidification during semi-curing and curing of the resin layer applied to the resin diamond wire. Accounting for the volume shrinkage problem in the manufacturing process of the resin diamond wire, the calculation formula of the diamond concentration in the resin layer after curing is derived when the amount of the diamond abrasive added in the resin slurry is known. And a formula for calculating the amount of diamond abrasive added in the resin slurry is obtained accounting for a certain concentration of diamond in the resin layer. The research has certain reference significance for the quantitative design of diamond powder in resin diamond wire and the optimization design of resin diamond wire production process.

Keywords: resin diamond wire; resin curing; diamond concentration; wire saw

1 引言

树脂金刚石线是指将混合有金刚石微粉的树脂浆料涂敷于钢线基体表面, 经加热固化得到的切割线^[1], 主要用于切割太阳能电池板硅片。树脂层中金刚石微粉的含量直接影响树脂金刚石线的制造成

本、使用寿命和切割硅片的效率。因此, 有必要对树脂层中金刚石微粉含量进行合理设计。

目前, 对树脂金刚石线的研究集中在制造工艺和切割机理方面^[2-5], 很少涉及树脂金刚石线的金刚石含量设计。树脂金刚石线属于金刚石工具, 其金刚石含量有明确定义。通常, 金刚石的含量用浓度表示, 即每立方厘米含金刚石 0.88g 为 100% 浓度, 含金刚石 0.66g 为 75% 浓度, 其余以此类推^[6]。

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2017MEE076)

收稿日期: 2019年11月

工艺问题的研究积累经验和提供参考依据。

参考文献

- [1] 张文龙, 王刚, 安源. 曲轴线抛光工艺及原理分析[J]. 科技视界, 2015(9): 71-72.
- [2] 姚志岗. 曲轴抛光工作原理及组成[J]. 时代汽车, 2018(9): 119-121.
- [3] 黄永辉, 安源. 曲轴砂带随动抛光工艺简介[J]. 山东工业技术, 2015(10): 19-20.
- [4] 李海国, 赵小立, 张玲. 曲轴超精加工缺陷解决措施[J].

现代零部件, 2013(5): 58-59.

[5] 黄智, 黄云. 砂带磨削原理及其应用[J]. 金属加工(冷加工), 2008(24): 28-30.

[6] 张磊, 黄云, 王亚杰, 等. 曲轴连杆颈砂带随动研抛机理及工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(12): 1995-2002.

第一作者: 许发全, 工程师, 东风日产乘用车公司, 510800 广州市

First Author: Xu Faquan, Engineer, Dongfeng Nissan Passenger Vehicle Company, Guangzhou 510800, China

金刚石的浓度是影响金刚石工具使用寿命及切割效率的重要因素。刘志环等^[7]对电镀金刚石切割线的金刚石磨料浓度进行了探讨,认为线锯的金刚石浓度可由体积浓度、表面浓度、单位面积颗粒数(颗粒浓度)3个指标表示,并对电镀金刚石切割线的金刚石浓度进行计算;张绍和等^[8]分析并推导出了金刚石钻头中金刚石磨料浓度的设计及计算方法,并将其用于金刚石钻头的参数设计中;杨俊德等^[9]根据金刚石切岩深度及金刚石锯片切岩受力分析,推导出了—种新的金刚石锯片浓度设计和算法,并通过实例计算验证该设计方法的可行性;杨栋等^[10]在研究影响无压烧结小直径金刚石锯片性能的主要因素中指出:增加金刚石浓度不一定会提高锯片寿命,甚至会降低锯片寿命,但适当增加金刚石浓度可以提高锯片的锋利度。

在树脂金刚石线加热半固化和固化过程中,由于溶剂挥发及树脂体积收缩,会造成金刚石磨料在树脂浆料中其固化前和固化后的树脂层中的质量百分数不同。为此,基于树脂金刚石线制造过程的特殊性,定量分析并推导了树脂浆料配制中的金刚石磨料添加量,为树脂金刚石线的设计提供指导。

2 树脂金刚石线制造工艺

树脂金刚石线制造工艺流程如图1所示。

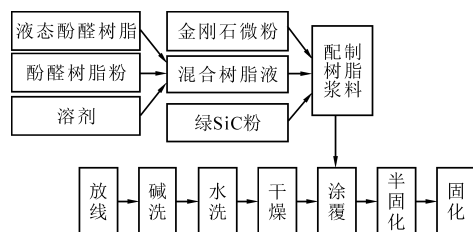


图1 树脂金刚石线生产工艺流程

配制混合树脂液:将液态酚醛树脂(简称液态树脂)、酚醛树脂粉(简称树脂粉)和溶剂按一定比例充分混合和溶解,形成混合树脂液。

配制树脂浆料:根据生产需求,量取一定体积的混合树脂液,按比例加入一定重量的金刚石微粉和绿SiC粉,充分搅拌混合,形成树脂浆料。

涂覆:将树脂浆料均匀涂覆到经过碱洗、水洗和干燥等前处理后的基线上。

半固化:将涂覆有树脂浆料的基线连续通过半固化炉,使树脂浆料中的溶剂挥发,树脂层初步固化后到收线辊上。

固化:将收线辊放入固化炉中,进一步加热固化树脂层,提高树脂层对金刚石颗粒的把持力。

树脂线在制造过程中的半固化、固化过程伴随溶剂挥发及树脂体积收缩过程,因此,树脂浆料中的金刚石磨料质量分数并不等同于固化后树脂层中的金刚石质量分数。

3 树脂金刚石线固化前后的金刚石浓度及其添加量

3.1 树脂金刚石线固化前的金刚石浓度计算

半固化后,涂敷到基线上树脂浆料中的溶剂受热挥发及树脂本身挥发的影响,树脂层组成为半固化树脂、金刚石和绿SiC粉。设半固化后、固化前树脂金刚石线表面的树脂层中的金刚石浓度为 γ_0 (g/cm³),则有

$$\gamma_0 = \frac{W_{\text{金}}}{V_{\text{层}}} = \frac{W_{\text{金}}}{V_{\text{脂}} + V_{\text{金}} + V_{\text{硅}}} \quad (1)$$

式中, $W_{\text{金}}$ 为树脂层中金刚石的质量(g); $V_{\text{层}}$ 为树脂层的体积(cm³); $V_{\text{脂}}$ 为树脂层中半固化树脂的体积(cm³); $V_{\text{金}}$ 为树脂层中金刚石的体积(cm³); $V_{\text{硅}}$ 为绿SiC粉的体积(cm³)。

根据树脂金刚石线的制造工艺,树脂体积 $V_{\text{脂}}$ 为树脂层中树脂粉和液态树脂半固化后的体积之和。树脂粉的投料质量为 $W_{\text{粉}}$ (g),液态树脂的投料质量为 $W_{\text{液}}$ (g),液态树脂的固含量为 ε ,则有

$$V_{\text{脂}} = V_{\text{粉}} + V_{\text{液}} = \frac{W_{\text{粉}}}{\rho_{\text{粉}}} + \frac{W_{\text{液}}}{\rho_{\text{液}}} \varepsilon + \frac{W_{\text{金}}}{\rho_{\text{金}}} + \frac{W_{\text{硅}}}{\rho_{\text{硅}}} \quad (2)$$

式中, $W_{\text{金}}$ 、 $W_{\text{粉}}$ 、 $W_{\text{液}}$ 、 $W_{\text{硅}}$ 分别为金刚石、树脂粉、液态树脂和绿SiC粉投料质量(g); $\rho_{\text{金}}$ 、 $\rho_{\text{粉}}$ 、 $\rho_{\text{液}}$ 、 $\rho_{\text{硅}}$ 分别为金刚石、树脂粉、液态树脂和绿SiC粉的密度(g/cm³)。

将式(2)代入式(1),得到半固化后、固化前树脂金刚石线表面中树脂层的金刚石浓度 γ_0 的计算公式为

$$\gamma_0 = \frac{W_{\text{金}}}{V_{\text{脂}} + V_{\text{金}} + V_{\text{硅}}} = \frac{W_{\text{金}}}{\frac{W_{\text{粉}}}{\rho_{\text{粉}}} + \frac{W_{\text{液}}}{\rho_{\text{液}}} \varepsilon + \frac{W_{\text{金}}}{\rho_{\text{金}}} + \frac{W_{\text{硅}}}{\rho_{\text{硅}}}} \quad (3)$$

涂覆到树脂线的树脂层在固化过程中,树脂体积会发生收缩。因此,为获得固化后一定树脂层中的金刚石浓度,需将式(3)中单位体积树脂层的金刚石质量换算为单位体积混合树脂液中的质量。

3.2 树脂金刚石线固化后的金刚石浓度计算

混合树脂液由树脂粉($W_{\text{粉}}$)、液态树脂($W_{\text{液}}$)和相应体积的溶剂($V_{\text{剂}}$)配置而成。设配制混合树脂液的总质量为 $W_{\text{总}}$,则有

$$W_{\text{总}} = W_{\text{粉}} + W_{\text{液}} + W_{\text{剂}} = W_{\text{粉}} + W_{\text{液}} + V_{\text{剂}} \rho_{\text{剂}} \quad (4)$$

式中, $\rho_{\text{剂}}$ 为溶剂的密度(g/cm³)。

设配制后混合树脂液的密度为 $\rho_{\text{总}}$,则配制混合树脂液的总体积 $V_{\text{总}}$ 可表示为

$$V_{\text{总}} = \frac{W_{\text{总}}}{\rho_{\text{总}}} \quad (5)$$

根据生产用量,量取相应体积 V_0 (L)混合树脂液,其中,树脂粉的质量 $W'_{\text{粉}}$ (g)和液态树脂的质量 $W'_{\text{液}}$ (g)分别为

$$W'_{\text{粉}} = V_0 \times \frac{V_{\text{粉}}}{V_{\text{总}}} \times \rho_{\text{粉}} \quad (6)$$

$$W'_{\text{液}} = V_0 \times \frac{V_{\text{液}}}{V_{\text{总}}} \times \rho_{\text{液}}$$

每升混合树脂液中加入金刚石微粉的质量为 $W_{\text{金}0}$ (g),绿 SiC 粉的质量为 $W_{\text{硅}0}$ (g),则体积 V_0 (L)混合树脂液中加入金刚石微粉和绿 SiC 粉的质量分别为

$$W'_{\text{金}} = W_{\text{金}0} V_0 \quad (7)$$

$$W'_{\text{硅}} = W_{\text{硅}0} V_0 \quad (8)$$

将式(4)~式(8)代入式(3),可得固化前树脂金刚石线表面中树脂层的金刚石的浓度 γ_0 (g/cm³)为

$$\gamma_0 = \frac{W_{\text{金}}}{\frac{W_{\text{粉}}}{\rho_{\text{粉}}} + \frac{W_{\text{液}}}{\rho_{\text{液}} \varepsilon} + \frac{W_{\text{金}}}{\rho_{\text{金}}} + \frac{W_{\text{硅}}}{\rho_{\text{硅}}}} = \frac{W_{\text{金}0}}{\frac{\rho_{\text{粉}}}{V_{\text{总}}} + \frac{\rho_{\text{液}}}{V_{\text{总}}} \varepsilon + \frac{W_{\text{金}0}}{\rho_{\text{金}}} + \frac{W_{\text{硅}0}}{\rho_{\text{硅}}}} \quad (9)$$

当混合树脂液的配方不变时, $\frac{\rho_{\text{粉}}}{V_{\text{总}}} + \frac{\rho_{\text{液}}}{V_{\text{总}}} \varepsilon$ 为常数,记为

$$V_{\text{ant}} = \frac{\frac{W_{\text{粉}}}{\rho_{\text{粉}}} + \frac{W_{\text{液}}}{\rho_{\text{液}} \varepsilon}}{\frac{\rho_{\text{粉}}}{V_{\text{总}}} + \frac{\rho_{\text{液}}}{V_{\text{总}}} \varepsilon} \quad (10)$$

式中, V_{ant} 为单位体积混合树脂液中树脂粉和液态树脂所占固体体积的总和。

考虑到酚醛树脂固化时体积一般收缩 8% ~ 10%^[11],计算时取平均值 0.9,并将 L 换算为 mL。则根据式(9),得到固化后树脂层中金刚石的浓度 γ'_0 (g/cm³)为

$$\gamma'_0 = \frac{W_{\text{金}0}}{V_{\text{ant}} \times 900 + \frac{W_{\text{金}0}}{\rho_{\text{金}}} + \frac{W_{\text{硅}0}}{\rho_{\text{硅}}}} \quad (11)$$

根据式(11)可计算得到一定金刚石和绿 SiC 粉添加量时固化后树脂金刚石线表面的树脂层的金刚石浓度 γ'_0 。

3.3 单位体积混合树脂液中金刚石添加量的计算

将式(11)变形为

$$W_{\text{金}0} = \left(\frac{V_{\text{ant}} \times 900 + \frac{W_{\text{硅}0}}{\rho_{\text{硅}}}}{1 - \frac{\gamma_0}{\rho_{\text{金}}}} \right) \gamma'_0 \quad (12)$$

根据式(12)计算出树脂金刚石线表面树脂层中的金刚石浓度,得出单位体积混合树脂液中金刚石的添加量。

4 计算实例

4.1 已知单位体积混合树脂液的金刚石添加量,确定树脂层的金刚石浓度

实例一:某批次树脂金刚石线进行生产准备,20L 混合树脂液配方见表 1。每升混合树脂液的金刚石(裸钻)添加量为 250g,每升混合树脂液中绿 SiC 粉的添加量为 290g,液态树脂的实际固含量 $\varepsilon = 0.7$,计算固化后树脂金刚石线表面中树脂层的金刚石浓度。

表 1 配制 20L 混合树脂液配方

序号	原料	用量	备注
1	树脂粉(g)	15000	$\rho_{\text{粉}} = 1.3$ (g/cm ³)
2	液态树脂(g)	5000	$\rho_{\text{液}} = 1.17$ (g/cm ³), $\varepsilon = 0.7$
3	溶剂(mL)	17417	$\rho_{\text{剂}} = 0.9445$ (g/cm ³)

根据式(10)得

$$V_{\text{ant}} = \frac{\frac{W_{\text{粉}}}{\rho_{\text{粉}}} + \frac{W_{\text{液}}}{\rho_{\text{液}} \varepsilon}}{\frac{\rho_{\text{粉}}}{V_{\text{总}}} + \frac{\rho_{\text{液}}}{V_{\text{总}}} \varepsilon} = \frac{15000}{20000} + \frac{5000}{20000} \times 0.7 = 0.7265$$

可知,金刚石的密度 $\rho_{\text{金}} = 3.5$ g/cm³,绿 SiC 粉的密度 $\rho_{\text{硅}} = 3.2$ g/cm³;

由式(11)得到固化后树脂金刚石线表面的树脂层金刚石浓度 γ'_0 为

$$\gamma'_0 = \frac{W_{\text{金}0}}{V_{\text{ant}} \times 900 + \frac{W_{\text{金}0}}{\rho_{\text{金}}} + \frac{W_{\text{硅}0}}{\rho_{\text{硅}}}} = \frac{250}{0.7265 \times 900 + \frac{250}{3.5} + \frac{290}{3.2}} = 0.306$$
(g/cm³)

根据插值法可知,相当于金刚石浓度的百分比为 34.8%^[6]。

实例二:混合树脂液的配方见表 1,每升混合树脂液中金刚石(裸钻)的添加量为 300g,每升混合树脂液中绿 SiC 粉的添加量为 400g,确定固化后树脂层的金刚石浓度。

确定过程:

①计算可得 $V_{\text{ant}} = 0.7265$;

②计算固化后树脂层中金刚石的浓度。

由式(11)得固化后树脂层的金刚石浓度 γ'_0 为

$$\gamma'_0 = \frac{W_{\text{金}0}}{V_{\text{ant}} \times 900 + \frac{W_{\text{金}0}}{\rho_{\text{金}}} + \frac{W_{\text{硅}0}}{\rho_{\text{硅}}}} = \frac{300}{0.7265 \times 900 + \frac{300}{3.5} + \frac{400}{3.2}}$$

$$= 0.347 (\text{g/cm}^3)$$

根据插值法可知,相当于金刚石浓度的百分比为 39.4%^[6]。

4.2 已知树脂层的金刚石浓度,确定单位体积混合树脂液的金刚石添加量

如果生产金刚石浓度为 20%、25%、30%、35%、40%、45%、50% 的树脂金刚石线,每升混合树脂液中绿 SiC 粉的添加量仍为 300g,混合树脂液配方见表 1。确定每升混合树脂液中金刚石(裸钻)的添加量。根据式(12)可得到对应树脂层中不同金刚石浓度的混合树脂液的金刚石添加量(见表 2)。

表 2 对应树脂层中不同金刚石浓度的混合树脂液的金刚石添加量

序号	金刚石浓度 (%)	单位体积树脂层中金刚石的质量(g/cm ³)	单位体积混合树脂液中金刚石的添加量(g/L)
1	20	0.176	139
2	25	0.220	176
3	30	0.264	213
4	35	0.308	252
5	40	0.352	293
6	45	0.396	334
7	50	0.440	376

5 结语

根据树脂金刚石线制造过程的特殊性,探讨了树脂金刚石线中金刚石浓度及其添加量的计算方法。定量分析并推导了金刚石磨料的添加量一定时,在树脂浆料中其固化后树脂金刚石线树脂层的金刚石浓度;已知树脂层的金刚石浓度,确定了树脂浆料中金刚石磨料添加量的计算公式。该研究对于树脂金刚石线的金刚石颗粒量化设计和切割线生产工艺优化等具有参考意义。

参考文献

- [1] Sugawara J, Hara H, Mizoguchi A. Development of fixed-abrasive-grain wire saw with less cutting loss[J]. SEI Technical Rev, 2004, 58(6): 11.
 - [2] 侯志坚, 葛培琪, 张进生, 等. 环形树脂结合剂金刚石线锯研制[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2008(2): 13-15, 20.
 - [3] 时丹. 树脂结合剂金刚石线锯的制备及性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
 - [4] 董夫宁. 树脂金刚石线对硅晶体切割机理的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.
 - [5] 刘腾云. 基于断裂强度的树脂金刚石线锯锯切单晶硅切片厚度研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
 - [6] 张荣清. 关于孕镶钻头金刚石浓度、粒度优化设计的探讨[J]. 地质与勘探, 1982(7): 68-71.
 - [7] 刘志环, 罗文来, 谢德龙, 等. 硬脆材料切割用线锯的金刚石磨料浓度概念探讨[J]. 超硬材料工程, 2013, 25(6): 6-10.
 - [8] 张绍和, 邵全军. 钻头金刚石浓度设计的定量计算方法[J]. 地质与勘探, 2000(5): 79-80, 83.
 - [9] 杨俊德, 张义东. 金刚石锯片浓度设计研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(5): 62-64, 68.
 - [10] 杨栋, 陈治强, 王晓东, 等. 影响无压烧结小直径金刚石锯片性能的主要因素分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2017, 37(5): 58-61.
 - [11] 王荣秋. 固化树脂收缩率测定的几种方式[J]. 纤维复合材料, 1994(2): 40-45.
- 第一作者: 高伟, 副教授, 青岛科技大学机电工程学院, 266061 青岛市
- First Author: Gao Wei, Associate Professor, College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China