

学科门类：工 学
中图分类号：TG580

单位代码：10287
密 级：

博 士 学 位 论 文

单层超硬磨料工具高温 钎焊的基础研究

博士生姓名 肖 冰

一级学科 机械工程

学科、专业 机械制造及其自动化

研究方向 切削磨削加工学

指导教师 徐鸿钧 教授

南京航空航天大学

二〇〇一年二月

门类：工学
分类号：TG580

单位代码：10287
密 级：

博 士 学 位 论 文

单层超硬磨料工具高温 钎焊的基础研究

国家自然科学基金、航空科学基金、
江苏省基金、教育部博士点专项基金资助项目

博士生姓名	肖 冰
学科、专业	机械制造及其自动化
研究 方 向	切削磨削加工学
指 导 教 师	徐鸿钧 教授

南 京 航 空 航 天 大 学

二 0 0 一 年 二 月

A Dissertation for Doctor Degree

**Fundamental Studies on High Temperature
Brazing of Monolayer Superabrasive Tools**

By

Xiao Bing

Under the Supervision of

Prof. Xu Hong-jun

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

February, 2001

摘 要

国外在 20 世纪 80 年代中后期开始研究用高温钎焊替代电镀开发新一代单层超硬磨料砂轮,其出发点是希望利用高温钎焊技术从根本上改善磨料、结合剂(钎料)、基体三者间的结合强度。近期的研究表明,由于在高温钎焊超硬磨料的关键技术上有了重大突破,经钎焊获得的试验砂轮已显示出超乎人们想象的优异性能,因而它在实验室刚一露面就引起轰动,尽管目前高温钎焊超硬磨料砂轮在国外要实现工业化生产尚有若干技术问题需要进一步研究解决,但它已被一致看好为是电镀砂轮当然的最佳换代产品,而且被业内专家权威高度评价为是磨具行业特别是超硬磨料磨具制造行业的一项极具革命意义的创造发明,今后在生产中大面积推广应用后将会产生不可估量的技术经济效果。

本文跟踪国外关于研制开发高温钎焊单层超硬磨料砂轮的最新动向,在自行研究确立的有关超硬磨料高温钎焊的理论指导下,以磨料界面结构的预设计开始,通过对钎料组分和钎焊工艺的优化,不仅成功地解决了超硬磨料高温钎焊的难题,而且还以磨削理论为指导,进一步提出了按加工要求优化设计砂轮地貌,再按优化设计的地貌在高温钎焊的同时实现磨料按需排布制作单层超硬磨料砂轮的创新构想,以及同样极富创意的实施方案,即采用激光扫描选点(区)钎焊,实现磨料两维有序按需排布制作高性能单层超硬磨料砂轮的创新方案。本文完成的创造性工作可以归纳为:

1. 以界面扩散化合的热力学原理为指导,完成了超硬磨料高温钎焊时界面结构的预设计研究。由预设计确立的界面结构模型是最终得以成功解决金刚石与 CBN 磨料高温钎焊难题的理论基础。

2. 按照研究确立的金刚石磨料钎焊界面结构模型,优化设计了镍基和银基两种钎料组分和相应的钎焊工艺,并在实验室条件下分别用两种钎料在钢基体试样上高温钎焊金刚石磨料取得成功。其中镍基钎料主要用于钎焊重负荷高效磨削用砂轮,银基钎料则可适用于一般砂轮。

3. 完成了对金刚石磨料钎焊界面的金相和理化测试分析实验,测试分析结果在国内外首次证明了磨料界面上确有化学冶金结合存在,而且查明了所形成碳化物的具体结构。所查明的界面上存在的化合物与预设计结构模型相吻合。

4. 为高温钎焊 CBN 磨料设计了镍基和银基两种钎料组分和相应的钎焊工艺。

5. 提出了按加工要求优化设计砂轮地貌,再按优化地貌在高温钎焊的同时实现磨料按需排布制作单层超硬磨料砂轮的创新构想,以及采用激光扫描选点(区)

钎焊实现磨料二维有序排布制作单层超硬磨料砂轮的具有工业化生产前景的具体实施方案。

6. 研制成功了已初步实现磨料有序排布的高温钎焊单层金刚石砂轮，并在磨削实验中显示出优异的磨削性能。

本文的研究工作是可以实现磨料相对有序合理排布的高温钎焊单层超硬磨料砂轮，它与国外正开发的单纯的高温钎焊砂轮不同，可以显示类似静电植砂带的更为优异的磨削性能。它的开发成功不仅可为国内工磨具行业本身带来新的技术经济增长点，而且可以拉动包括各种金属与陶瓷材料、光学玻璃、半导体、石材、建材以至宝玉石等整个加工行业，国内外市场前景非常广阔，其可能创造的技术经济效益确实无法估量。

关键词：砂轮；单层超硬磨料；地貌优化；有序排布；高温钎焊；化学冶金结合；磨削实验

Abstract

The external research of using high temperature brazing instead of galvanization developing new generation monolayer superabrasive grinding wheel was initiated in the eighties of the twentieth century from the viewpoint of complete improvement of the adhesion of the abrasive grit to the bonding matrix along with an increase in its strength and wear resistance. The advent of brazed grinding wheel for test has created tremendous impact in the machining industries abroad with it due to its excellent grindability. It has been considered by specialists to be inevitable to replace the traditional electroplated grinding wheel and a revolutionary invention in grinding tools, especially in superabrasive tools, although at present there are still many technical problems to be solved in realizing industrialization manufacturing of high temperature brazing monolayer superabrasive grinding wheel. Its wide application will produce unestimated technical and economical efficiency and benefit.

This paper traced the external research on high temperature brazing monolayer superabrasive grinding wheel to it's the most new development. The difficult problems of high temperature brazing monolayer superabrasive have been successfully solved under the guidance of superabrasive brazing theory, interface configuration designed in advance, filler alloy composition and brazing technology optimization founded by author. Furthermore, on the basis of grinding theory a creative conception of optimizing topography in accordance with machining requirements and grinding parameters or producing or dressing the monolayer superabrasive wheel in accordance with the optimized topography is set up. Also a new idea of realizing the regular abrasive distribution using laser weld rapid modeling technology is advanced to big increase the sharpness of grinding wheel. Main creative works in this paper are listed as follows:

1. Under the guidance of the thermodynamic theory of interface element diffusion and chemical bond, the interface configuration model of high temperature brazing monolayer superabrasive was designed and completed in advance, which was the theoretical basis of successfully solving the difficult problems of the brazing of diamond and CBN grits.

2. According to the interface configuration model founded in advance of brazing monolayer diamond grits, the composition of Ni and Ag based braze alloys and their brazing technology were optimized. With the two types of braze alloys the high temperature brazing of diamond grits under the condition of laboratory has met with success. Ni based braze alloys are mainly suitable the brazing of heavy load high efficiency grinding wheels, while Ag based braze alloys mainly for ordinary grinding wheels.

3. The micro-region along the interfacial section between brazing alloy and diamond particles has been measured and analyzed by using SEM-EDS and SEM-WDS as well as in-depth metallography and X-ray diffraction. It was firstly revealed that there exists chemical and metallurgical bond. And the structural types of interface carbide between brazing alloy and diamond particles have also been found out firstly. The measured and analyzed structure of interfacial micro-region is in accordance with the structural model designed in advance.

4. The composition of Ni and Ag based braze alloys and their brazing technology were optimized to realize the high temperature brazing of CBN grits.

5. A creative conception of optimizing topography in accordance with machining requirements and grinding parameters or producing or dressing the monolayer superabrasive wheel in accordance with the optimized topography is set up. Also a new idea of realizing the regular abrasive distribution using laser weld rapid modeling technology is advanced to big increase the sharpness of grinding wheel.

6. A monolayer high temperature brazing diamond grinding wheel with regular abrasive distribution was put forward to try a grinding test. The experimental results show distinct advantages over conventional electroplated diamond grinding wheel.

The study has developed the important research domain in the superabrasive tools which has great potentialities and wide market prospects. The monolayer high temperature brazing superabrasive tools with regular abrasive distribution have numerous applications, including cutting, drilling, sawing, grinding, lapping and polishing materials, which will become a new economical and technical increasing point.

Key Words: Abrasive wheels, Monolayer superabrasive, Topography optimization, Regular abrasive distribution, High temperature brazing, Chemical and metallurgical bond, Grinding test

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 高效磨削发展概况	1
1.2 高效磨削在推广应用中的突出问题	2
1.3 研制单层钎焊超硬磨料砂轮进一步开发高效磨削潜力的新构想	3
1.3.1 单层钎焊超硬磨料砂轮的工艺优势	3
1.3.2 国内外单层钎焊超硬磨料砂轮的研究现状	5
1.3.3 开发单层钎焊超硬磨料砂轮的总体构想	5
1.4 本课题拟开展的主要工作	6
第二章 单层钎焊超硬磨料砂轮地貌的优化设计与实施方案	9
2.1 单层钎焊超硬磨料砂轮地貌的现存问题	9
2.2 高效磨削用砂轮地貌的优化设计	11
2.2.1 以往有关砂轮地貌的研究成果	11
2.2.2 砂轮地貌优化理论模型的建立	13
2.2.3 砂轮地貌优化理论模型的解析结果分析	20
2.3 砂轮地貌优化的应用——开槽砂轮的设计与制作	22
2.3.1 开槽砂轮动态有效磨粒数（间距）的判定实验	23
2.3.2 开槽砂轮地貌优化设计及磨削机理浅析	26
2.4 按优化地貌制作单层钎焊超硬磨料砂轮的实施方案	28
2.4.1 结合剂层厚度均匀性的控制	28
2.4.2 磨料的有序合理排布	28
2.5 本章小结	30
第三章 超硬磨料的高温钎焊机理与钎焊界面的预设计研究	31
3.1 高温钎焊基础	32
3.1.1 定义	32
3.1.2 高温钎焊的特点	33
3.1.3 高温钎焊方法	33

3.1.4 超硬磨料的高温钎焊问题	34
3.2 金刚石磨料的高温钎焊机理与界面结构预设计研究	34
3.2.1 金刚石与合金钎料表面的浸润性	34
3.2.2 金刚石与合金钎料界面的化学冶金结合	37
3.2.3 钎焊单层金刚石砂轮对钎料的性能要求及成分选择	40
3.2.4 Ni-Cr 合金钎料与钢基体界面的化学冶金结合及浸润性	42
3.2.5 金刚石表面的金属化	43
3.3 CBN 磨料的高温钎焊机理及其界面结构的预设计研究	45
3.3.1 CBN 与合金钎料表面的浸润性及界面的化学冶金结合	45
3.3.2 CBN 表面的金属化	47
3.4 本章小结	49
第四章 Ni 基合金钎焊金刚石的实验研究	51
4.1 Ni-Cr 合金钎焊无镀膜金刚石的实验研究	51
4.1.1 Ni-Cr 合金氩气保护炉中钎焊的工艺方案	51
4.1.2 Ni-Cr 合金真空炉中钎焊的工艺方案	52
4.1.3 Ni-Cr 合金真空感应钎焊的工艺方案	53
4.2 Ni-Cr 合金与金刚石和钢基体界面微区组织的分析研究	54
4.2.1 合金钎料成分对钎焊强度的影响	54
4.2.2 合金钎料与金刚石结合区元素的扩散与分布	55
4.2.3 合金钎料与钢基体结合区元素的扩散与分布	59
4.2.4 合金钎料与金刚石界面生成物结构分析	60
4.2.5 金刚石与合金钎料断口形貌分析	63
4.3 Ni 基合金钎焊镀膜金刚石的实验研究	64
4.4 本章小结	65
第五章 银基合金钎焊金刚石的实验研究	67
5.1 Ag-Cu 合金钎焊无镀膜金刚石的实验研究	67
5.1.1 实验条件与方法	67
5.1.2 实验结果与分析	68
5.2 加 Cr 粉 Ag-Cu 合金钎焊无镀膜金刚石的实验研究	68

5.2.1 实验条件与方法	68
5.2.2 实验结果与分析	69
5.3 钎焊镀膜金刚石的实验研究	72
5.3.1 实验条件与方法	72
5.3.2 实验结果与分析	72
5.4 磨削实验研究	73
5.5 本章小结	74
第六章 钎焊单层 CBN 磨料的研究	75
6.1 Ni-Cr 合金钎焊无镀膜 CBN 的研究	75
6.2 Ag-Cu-Ti 合金钎焊无镀膜金刚石的实验研究	77
6.2.1 实验条件与方法	77
6.2.2 实验结果与分析	78
6.3 Ni 基合金钎焊镀膜 CBN 的实验研究	79
6.4 本章小结	80
第七章 单层钎焊超硬磨料砂轮的研制及其磨削性能评定	81
7.1 单层钎焊超硬磨料砂轮的研制	82
7.1.1 技术性能指标	82
7.1.2 制作工艺流程	82
7.2 磨削性能评定	83
7.2.1 实验条件及测试系统	83
7.2.2 实验结果与分析	84
7.3 本章小结	86
第八章 结论与展望	87
8.1 本文的主要结论和所取得的主要成果	87
8.2 关于进一步开展单层高温钎焊超硬磨料砂轮研究的设想	88
致 谢	89
攻读博士学位期间发表的论文	90
参考文献	91

第一章 绪 论

1.1 高效磨削发展概况

所谓先进制造技术 (AMT), 应该包含主体技术群 (面向制造的设计技术群和制造工艺技术群)、支撑技术群、和制造基础设施三大部分。与国内严重忽视基础工艺的情况不同, 在发达国家为确保 AMT 整体功能的正常发挥, 这三大部分一直保持有同步协调发展的势头, 即使在掀起 FMS、CIMS 之类支撑技术热的同时, 亦从未间断过大力发展主体技术和相关的制造基础设施。高效磨削作为一项重要的主体制造工艺技术就一直备受重视。由于有政府和企业界的巨额经费扶持, 近一二十年来有关高效磨削的研究确实取得了长足的进步, 诸如高速磨削、缓进给深切磨、高效深切磨以及静电植砂的高效砂带磨等一批极富创新构思的杰出的高效磨削工艺的出现已在很大程度上改变了磨削只能用于小余量精整加工的传统概念, 他们在确保零件精度和表面完整性前提下所达到的高达 $150\text{--}200\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ 以上的材料去除率 (个别文献报导最高已达到 $1000\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$) 甚至超过了通常的切削加工。目前已经在生产中获得推广应用的高效磨削工艺主要有^[1-6]:

1. 高速磨削 (High Speed Grinding)

提高砂轮线速度, 可以提高砂轮的动态锋利度, 降低磨削比能和磨削热, 还可以增加单位时间内参与切削的磨粒数, 降低单颗磨粒的临界切削厚度, 减小磨削力, 降低工件表面粗糙度, 改善工件表面质量, 提高金属切除率和砂轮耐用度等一系列综合的工艺优势。高速磨削这一杰出的工艺构想源起于德国的著名学者 Cal.Salomon, 他在 1931 年就已经预言, 材料的切磨削加工在高速超高速领域有可能会变得更加容易和轻松。关于高速磨削的实用化研究便迅即加快了步伐。随着诸如高频电主轴、陶瓷滚子轴承、磁悬浮轴承、快进给系统包括直线电机驱动的快进给系统以及可承受高速超高速的超硬磨料砂轮及其在线动平衡等配套技术的开发成功和不断完善, 生产用高速磨床磨头的速度便步步登高, 六十年代中后期还只在 60m/s 上下, 八十年代就已达 $80\text{--}120\text{m/s}$, 九十年代又进一步提高到了 $150\text{--}180\text{m/s}$ 。实验室用磨床速度增长更快, 已达 500m/s , 相当于步枪子弹的出口速度。文献报导还正在研制 1000m/s 的实验用超高速磨床。高速磨削近期在国外的势头之所以如此强劲, 客观上说明它在生产中推广应用后确已收到了极其显著的技术经济效益, 而且预计进一步的开发和投入还可望取得更大的回报。

2. 缓进给磨削 (Creep Feed Grinding)

缓进给磨削的特点是切深大, 进给速度低。因此砂轮和工件的接触弧长增加, 砂轮表面上同时参加切削的磨粒数增多, 磨削效率提高。接触弧长增加虽使总磨削力增大, 但单颗磨粒承受的磨削力却很小, 所以砂轮磨损少, 型面保持性好, 耐用度提高, 而且由于工件速度低, 磨削液比较容易进入接触弧区并参与换热, 工件表面温度较低。常用于难加工材料成型面和沟槽磨削。缓磨工艺在六十年代初期诞生于当时的联邦德国。

在六十年代初期成功地推出的这一项大切深慢进给的创新磨削工艺虽然可以有条件解决当时镍基高温合金叶片榫槽的加工难题, 但是由于一直无法有效地控制生产中常是突发的烧伤问题, 因而还不能认为是一项成熟的工艺。在进一步完善此项缓磨新工艺的过程中英国 Bristol 大学的 C.Andrew 教授作出了极其重要的贡献, 他通过基础研究所阐明的缓磨烧伤的发生机制以及作为控制烧伤的对策所提供的缓磨时砂轮的连续修整方案为缓磨工艺最终能在生产中大面积推广应用奠定了基础。尤其是考虑到正是在经过完善了的缓磨工艺的基础上导引发展起来了一代新的高效深切磨削工艺, 布列斯托大学 C.Andrew 教授领导的工艺实验室的工作确实是功不可没的。

3. 高效深切磨削 (High Efficiency Deep Grinding)

将高速磨与缓进给磨结合在一起是德国学者 P.G.Werner 在 1979 年提出的一项创意, 由此构成的所谓高效深切磨削工艺由于自然综合了高速磨与缓磨两项工艺的优势, 可将单位宽度砂轮的金属磨除率可比普通磨削高 100—1000 倍, 因而发展势头最为强劲, 作为一项被普遍看好的主流技术, 二十年来, 它的发展一直代表着国外高效磨削工艺发展的最高水平。

4. 高效砂带磨削 (High Efficiency Belt Grinding)

砂带磨削可被视作是国外高效磨削工艺发展中的一个相对独立的特例, 它同时也是至今唯一的一项藉磨料的相对有向合理排布大幅度提高磨具的静态锋利度实现高效磨削的成功范例。至今仍属专利的静电植砂技术由于可使有一定长径比的磨料一律锋刃向外以合理的间距直立排布在砂带的工作面上, 从而就赋予了砂带以超常的静态锋利度, 比能降低到 $20\text{J}/\text{mm}^3$ 。以此种静电植砂带磨削钢材, 比能可被降低到接近切削比能的水平, 材料去除率则高达 $200\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ 上下^[7]。由于磨削比能低, 热效应低, 因此砂带磨削可在不加冷却液的条件下实现高效作业。

1.2 高效磨削在推广应用中的突出问题

高效磨削技术实用化的成功以及已经达到的水平，无疑是令人鼓舞的。不过在充分肯定成绩的同时，仍应清醒地看到，到目前为止国内外为发展高效磨削所做的工作事实上仍存在很大的局限性，在推广应用中也还存在许多问题，最为突出的问题是磨削弧区高温和工件烧伤。

众所周知，传统的砂轮并不是一种适于高效去除金属的工具，磨削一般总要消耗比切削高得多的能量，以去除单位体积碳钢计算，磨削比能常高达 $60\text{--}200\text{J/mm}^3$ 以上，而切削比能仅在 $8\text{--}10\text{J/mm}^3$ 以下。磨削时额外消耗的大量能量最终几乎都转化成了热量，正是磨削的这种极其显著的热效应可以严重危及到被磨零件的表面完整性从而也就直接制约了高效磨削所可能达到的极限去除率指标。从根本上讲，为使产生的磨削热最小就应该力求确保磨削比能最小，作者曾按单颗磨粒切厚核算过文献提供的若干高效磨削的应用实例数据，发现它们大多均深深地工作在由尺寸效应所决定的最高比能状态下，这无疑是非常不科学的。因此现有高效磨削仅只着眼于利用砂轮在高速下的动态锋利效应来降低比能是显然不够的，因为事实上除了速度因素以外，诸如砂轮的结构（开槽与否），工作面地貌以及用量组合条件等都可以对磨削比能产生显著影响。根据不同加工要求优化磨具工作面地貌以及根据优化后的地貌进一步优化用量的组合条件，可以明显提高磨具的锋利度大幅度降低磨削比能，国外静电植砂的高效砂带磨被公认为是实施这一对策取得极大成功的范例，可在高效砂轮磨削中却见不到有运用这一对策的研究报告。因此，如何更为有效地控制和降低磨削比能以减少产生的磨削热，应该是进一步开发和完善现有高效磨削技术的关键问题。至于 Andrew 当时为推广应用缓磨而提出的砂轮连续修整方案其着眼点仅在使砂轮能保持初始锋利状态，因此充其量只能称得上是一种在低水平上控制烧伤的权宜对策，并无进一步开发高效磨削潜力的功效。

1.3 研制高锋利度单层钎焊超硬磨料砂轮进一步开发高效磨削潜力的新构想

1.3.1 单层钎焊超硬磨料砂轮的工艺优势

二十世纪五十年代中期，金刚石和立方氮化硼（CBN）磨料工业化生产的实现曾被誉为是磨料行业所取得的两大具有里程碑意义的突破性成果。这两种超硬磨料在适应面上的互补性使由它们制作的磨具的可加工范围覆盖到了包括高硬脆、高强韧性材料在内的几乎所有被加工材料，磨削加工也由此进入了一个有条件可以实现高效精密作业的新时代。

已有的超硬磨料磨具（砂轮）通常可分为单层电镀和多层烧结（包括热固化）

两大类。其中单层电镀超硬磨料砂轮由于：

- (1) 电镀工艺简单，制备容易。
- (2) 无需修整修锐，使用方便。
- (3) 虽仅单层，但因是超硬磨料，砂轮仍有足够高的寿命。
- (4) 单层砂轮其结构强度高，更适合于在高速磨削中使用。

等等。因而无论是国内还是国外，在超硬磨料砂轮的生产应用中都一直占据着最大的份额。

不过正是由于电镀砂轮在生产中的大量应用，才使它本身先天固有的缺陷和弊端得到了比较充分的暴露。正如大量文献所指出的，电镀砂轮上的镀层金属根本无法起到磨具行业严格意义上的“结合剂”的作用，由于电沉积的镀层金属在其与磨料和磨具基体的界面上均不存在牢固的化学冶金结合，磨料只是被机械地包埋在镀层与基体之间，因而为了获得对磨料的把持力，镀层厚度必需高达磨料本身高度的70—80%，换言之，在电镀砂轮上磨料出露高度一般都只在20—30%以下。但是即便如此，纯由机械包埋作用提供的把持力仍然十分有限，就是在正常的磨削负荷下也仍容易因磨料成颗脱落和镀层成片剥离而导致砂轮的整体失效，此种情况在难加工材料的高效磨削时尤其明显。另外，由于镀层厚，磨料出露高度低，容屑空间小，电镀砂轮磨削时很容易因切屑的粘附堵塞而失效。再有，电镀砂轮上磨料本身的有效利用率极低，这是因为除了非正常剥落脱落以外，只要镀层厚度被磨损到接近磨料初始高度的40—50%时，磨料就会自然脱落，等等。很明显，电镀砂轮的这些固有缺陷和弊端从一开始就决定了它不可能具备人们寄望于超硬磨料砂轮的理想磨削性能，尤其无法承担重负荷的高效磨削工作。

国外在二十世纪八十年代中期开始，研究用钎焊替代电镀开发新一代单层超硬磨料砂轮，其出发点就是希望能藉高温钎焊时在超硬磨料、钎料与母材界面上可能会发生的诸如溶解、扩散、化合之类的相互作用从根本上改善磨料、结合剂（钎料合金）、基体三者间的结合强度。近期国外的研究表明，钎焊确实能够大幅度改善和提高界面的结合强度，因而钎焊成的试验砂轮已在如下几个主要方面显示出为人们所期望的优异特性：

- (1) 结合强度高，钎料结合层厚度只需维持在磨料高度的20—30%的水平上就足以在重负荷的高效磨削中牢固地把持住磨粒，这是其他砂轮难于与之相比的。
- (2) 磨料出露高，通常可达磨料高度的70—80%，砂轮因此变得更加锋利，磨削力、比能、磨削热、温度均有明显下降。
- (3) 砂轮表面容屑空间亦因磨料出露高而变得更加充裕，更不容易发生切屑堵塞而导致砂轮失效。
- (4) 磨料本身有效利用率高，砂轮寿命长。这是因为在钎焊砂轮上磨料除了

绝少脱落以外，它们一般均可被充分利用到其本身高度的 70—80% 以上，砂轮寿命也因此大增。

(5) 单层钎焊超硬磨料砂轮其结构强度之高是其它任何砂轮都无法企及的，因而它将是有可能成为今后在 300—500m/s 以上直至 1000m/s 的超高速磨削中唯一可以安全使用的高效砂轮。

等等。正因此，尽管目前高温钎焊超硬磨料砂轮在国外要实现工业化生产和在加工中推广应用尚有若干问题需要进一步研究解决，但试验用砂轮刚一露面就引起轰动，被广泛看好为是电镀砂轮当然的最佳换代产品，且被业内专家权威高度评价为是磨具行业特别是超硬磨料磨具制造业的一项极具革命意义的创造发明。

1.3.2 国内外单层钎焊超硬磨料砂轮的研究现状

国内的情况，众所周知，无论是超硬磨料砂轮的制造技术还是它在生产中的推广应用，与国外相比均有很大差距，这自然是与国内基础工艺包括磨具与加工业相对落后的现状相联系的。其中只有单层电镀的超硬磨料砂轮由于本身制备工艺简单、使用方便，因而在国内超硬磨料砂轮的生产应用中占据着一个特殊重要的地位，其所占的相对份额甚至比国外还高。但是，尽管在生产应用中已频频暴露出电镀砂轮的诸多弊端，国内有关高温钎焊单层超硬磨料砂轮的研制开发工作却至今仍是一片空白。据调查了解，这似与国内有关基础工艺的研究在现阶段一直缺乏必要的经费支持有关。正是在多方呼吁推动未见结果的情况下，我们荣幸获得一项国家自然科学基金的资助，独立开展了有关高温钎焊超硬磨料砂轮的前期基础研究工作，经过三年努力，已经取得了接近国外当前水平的突破性成果，不仅焊成了试验砂轮，部分研究甚至超过了国外水平。

如前所述，国外开发高温钎焊单层超硬磨料砂轮的工作目前仍处在实验室研制阶段，之所以至今仍未能作为产品形成生产规模，据权威文献介绍，主要是有两大技术难点未能妥善解决，即一是钎焊砂轮表面磨料的局部堆积问题，再就是钎焊时结合剂层厚度一致性的控制问题。此两大技术难点现已成为欧美日本等工业发达国家磨具行业竞相攻关的热点，我国台湾地区亦已加入了这一竞争行列。很明显谁能先执牛耳，谁就能在领导当前磨具革命的这一大潮中脱颖而出，并在国际磨具大市场的激烈竞争中占据最有利的地位。

1.3.3 开发单层钎焊超硬磨料砂轮的总体构想

作者认为,既然已经确证了钎焊超硬磨料砂轮无可比拟的工艺优势和它在不久的将来肯定会全面替代电镀砂轮的必然趋势,则及时介入并积极参与该项竞争大力研究开发钎焊砂轮就应该是一种当务之急的最佳和最明智的决策。尤其是考虑到国内磨具行业一直落后于国外的令人丧气的现状,现在能在一个相对比较接近的距离上与国外基本同步地开发此种换代砂轮,无疑是我们磨具行业迎头赶超国外先进技术的一个难得的契机。不仅如此,作者还认为,国内关于高温钎焊砂轮的研制开发应该有一个更高的起点层面,亦即我们不宜就事论事只是考虑去设法解决目前国外在研制过程中发现的问题,而是应该有自己的新构想,因为基于前期的预研工作,已经显示有可能实现钎焊时磨料的择优排布,从而也就可望一步到位地研制开发出具有优化地貌的其可与静电植砂的高锋利度砂带相媲美的更为理想的高温钎焊单层超硬磨料砂轮。事实上只要研制工作能够接近实现这一目标,我们就可望在这一场涉及磨具更新换代的激烈竞争中立于不败之地,因为后者已是人们研制磨具所能期盼达到的完美境界了。

研制开发的钎焊单层超硬磨料砂轮应能达到如下超级技术性能指标:

- (1) 磨料出露高度达磨料本身高度的 70—80% 以上。
- (2) 钎料结合层厚度均匀一致,可稳定控制在 20—30% 以下。
- (3) 确保磨料、钎料、基体三者的界面上有稳定且高强度的冶金化学结合,可确保磨料与钎料结合剂层均具有永不脱落的效果。
- (4) 确保超硬磨料在高温钎焊时不受损伤。
- (5) 确保钎焊成的单层超硬磨料砂轮具有所要求的最佳地貌。
- (6) 提供的钎焊工艺有条件可以实现高温钎焊单层超硬磨料砂轮的工业化生产。

由于本课题研制开发的是可以实现磨料相对有序合理排布的高温钎焊单层超硬磨料砂轮,与国外正开发的单纯的高温钎焊砂轮不同,它可以显示类似静电植砂带的更为优异的磨削性能,因此可以认为本项目的开发研究在国内外均居领先水平。

1.4 本课题拟开展的主要工作

从以上的分析和构想出发,本文将主要进行以下几方面的研究工作:

1. 单层钎焊超硬磨料砂轮地貌的优化设计与实施方案

借鉴砂带磨削中磨料的相对有向合理排布可大幅度提高磨具的静态锋利度实现高效磨削的成功经验,提出砂轮表面磨料相对有序合理排布的新概念;然后提出按照不同加工要求和用量条件优化设计砂轮地貌或者按照不同的加工要求和砂轮地貌

优化选择磨削用量条件的创新思想,按照这一思想,不仅有条件可以真正实施对磨削过程的建模仿真研究,而且可以一步到位实现对磨削过程的优化和磨削结果的预估,同时为新一代超硬磨料砂轮的设计研制和超硬磨料的有效利用奠定了基础;最后根据新思路完成开槽砂轮地貌的优化设计和实施方案。

2. 超硬磨料的高温钎焊机理与钎焊界面的预设计研究

从钎焊界面结构的预设计开始,包括研究钎料的浸润性、界面扩散化合的热力学基础、钎料组份、磨料的预镀膜材料和工艺、钎焊工艺及其优化等等,围绕提高和改善钎料与磨料、基体间的浸润能力和亲和特性,以最终能确保在钎料与磨料、基体的界面上可以获得预设计所要求的高强度的冶金化学结合,探索出一整套钎焊单层超硬磨料工具的通用方法和规律,为单层钎焊超硬磨料工具的实验研究和工业化生产提供比较完善、系统的理论依据。

3. Ni 基合金钎焊金刚石的实验研究

在关于金刚石磨粒高温钎焊机理与钎焊界面预设计深入研究的基础上,构思设计 Ni 基合金钎料 Ar 气保护炉中钎焊、真空炉中钎焊、真空感应钎焊无镀膜和镀膜金刚石的实验方案,以探索 Ni 基合金钎焊金刚石的最佳工艺;并拟对结合界面、断口作更进一步测试分析以查证是否有可能形成真正的化学冶金结合。

4. 银基合金钎焊单层金刚石的实验研究

银基钎料与镍基钎料相比具有强度低、耐磨性差,特别是耐磨削高温性能较差,一般只适用于对钎焊强度、耐磨性、耐磨削高温性能要求不高的场合。通过实验研究,一是在银基钎料中添加其它合金元素以改变其存在的不足,使改良后的银基钎料能满足重负荷高效磨削时单层钎焊金刚石砂轮对结合剂性能的要求;二是探索改良后的银基钎料钎焊金刚石的最佳工艺。

5. 钎焊单层 CBN 的实验研究

在关于 CBN 磨粒钎焊机理深入研究的基础上,针对与钎焊金刚石磨粒不同的特点,构思设计钎焊 CBN 的实验方案,探索 CBN 钎焊特点及最佳钎焊工艺。为单层钎焊 CBN 磨料砂轮的研制奠定基础。

6. 单层钎焊超硬磨料砂轮的研制及磨削性能评定

在前述砂轮地貌优化、磨料有序排布、超硬磨料钎焊机理、钎焊界面的预设计及实验研究的基础上,研制出新一代单层高温钎焊超硬磨料砂轮并达到了如下超级技术性能指标:具有所要求的最佳地貌;磨料、钎料、基体三者的界面上有稳定且高强度的冶金化学结合,可确保磨料与钎料结合剂层均具有永不脱落的效果;磨料