

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

高压电触头材料

范志康 梁淑华 肖 鹏 著



机械工业出版社

本书全面论述了断路器、高压隔离开关、接地开关、负荷开关及组合电器所用的各种电触头材料的制造技术、性能要求及其检测，并对这些材料的研究现状及发展方向作了介绍。第 1 章重点介绍在中压、高压乃至超高压输变电系统中大量使用的 SF₆ 断路器的自产式灭弧室及灭弧室整体弧触头材料；第 2 章介绍高压 SF₆ 断路器等使用的主触头及中间触头材料；第 3 章介绍正在发展使用的真空断路器灭弧室触头材料。

图书在版编目 (CIP) 数据

高压电触头材料 / 范志康等著. — 北京：机械工业出版社，

2006.10

ISBN 7-111-18611-1

I. ① 范… II. ① 范… III. ① 高压电力系统 原电触头 IV. ① 674.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 186111 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号) 邮政编码 100037

策划编辑：王霄飞 张祖凤 责任编辑：董连仁

版式设计：冉晓华 责任校对：李汝庚

封面设计：鞠 杨 责任印制：

印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2006 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

16 开本 787mm×1092mm 1/16 印张·5.5 千字

定价：12.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821 网址：www.cmpbook.com

封面无防伪标均为盗版

序

电力是一种最快捷、高效、安全可控的能源。随着物质文明的发展，人类对电力的依赖程度和需求量与日俱增，同时对环境的破坏亦日趋严重，因此节能便成为可持续发展的重要组成部分。从电力生产看，集中的大型火力、水力和核能发电加之远距离高压、超高压输送是节能的重要组成部分，高压断路器又是保证该电力系统安全可靠运行的最重要的电器之一，其中高压触头材料是影响高压断路器发展的一项关键技术。高压触头材料在高电压、大电流、高真空、高温下反复离合的严酷条件下工作，导电与灭弧是一对矛盾的因素，对材料性能提出了苛刻的要求，给触头的研究与发展带来了种种困难。西安理工大学范志康教授的课题组对高压电触头及其材料进行了卓有成效的研究，特别是对新型高压断路器用自力式悦幸增怎原悦整体触头的成形工艺、组织、静态性能及型式试验进行了较系统而深入的研究，取得了很好的研究成果。1993年，由西安市科委组织的关于“悦幸增怎原悦自力式高压电触头及其立式成形工艺、设备的研究”成果的鉴定，肯定了该成形工艺的创新性。触头应用单位也充分肯定了所研制的自力式整体触头在型式试验中性能可靠、耐烧损性能优异。该成果及其产品现已被国内多家企业采用并受到好评。自力式整体高压电触头 1995 年被评为国家级重点新产品，并被列为国家级科技成果重点推广项目。1996 年此项成果又被评为陕西省高校科技进步一等奖。1997 年被评为陕西省科技进步二等奖，1998 年分别被评为教育部提名国家科学技术发明二等奖，中国专利优秀奖。

本书全面介绍了自力式悦幸增怎原悦整体高压触头材料、高压断路器主触头材料和真空断路器用触头材料。全书内容丰富，

工艺新颖，技术先进，理论与实际结合紧密。应作者盛情邀请为本书作序，只好拙尊为之。我相信该书的出版，将对我国高压电触头及其所用材料的研发与制造、质量与可靠性的提高起到积极的推动作用，同时对提高断路器的整体质量也会有积极的促进作用。

西安交通大学教授
金志浩

前 言

现代人的生活对电的依赖程度越来越大，高压断路器等是电力系统中最重要的组件。断路器担负着控制和保护电力系统的作用，并且要能安全可靠的运行。所谓控制，是指对电网中的部分电力设施或线路在运行过程中发生故障时，通过调度断路器等分的分合将故障部分快速分离，保证正常部分电网继续运行。断路器在高压及有负载的条件下操作，操作过程中通常会产生强电弧，因而断路器经常按灭弧原理划分为油断路器、气吹断路器、真空断路器等。也有按使用环境的电压等级来划分：如 10kV 以下称为中压断路器；110kV 称为高压断路器；330kV 及以上电压等级使用的称为超高压断路器等。断路器早先主要为油断路器，现在高压及超高压输变电系统以 SF₆ 断路器占主导地位；而 10kV 以下配电系统的断路器则由真空和 SF₆ 断路器呈双雄争霸之势。从发展的角度看，10kV 以下的配电系统所使用的断路器，真空断路器很可能占主导地位，在工业发达国家真空断路器已在这一领域占绝对优势。

触头是公认的断路器等高压开关的关键部件，触头材料在很大程度上决定了断路器的发展。比如真空断路器的原理是 1892 年爱迪生在 19 世纪初提出的，但由于当时的触头材料有慢放气现象，且抗熔焊性差，加之真空密封技术欠佳，导致第一台实用的真空断路器推迟到 20 世纪 50 年代才由美国通用电气公司制造出来。在真空断路器中，导电和灭弧是由同一触头完成的，这就要求其触头材料应具有以下性能：

① 大的分断电流的能力。

② 高的耐压值。

③ 优良的抗熔焊性能。

源 高的导电和导热能力。

缘 耐电弧烧损。

远 低的截流值。

由于这些性能的相互矛盾性，很难有一种触头材料能同时满足这些性能要求，通常总是牺牲次要性能来保证对主要性能的要求，如分断能力和耐电压值通常是最先考虑的两项性能。在现有的真空断路器触头中，以 悦 触头的分断能力和耐压值最好。

在 杂 和油断路器中，导电和灭弧分别是由主触头和弧触头来完成的。对弧触头的要求基本和真空触头的要求相同，目前性能最好且普遍使用的弧触头仍为 悦 触头；不过由于断路器结构的改进，弧触头结构正在由触指—弹簧结构向自力式整体触头改进，相信不久的将来自力式 悦 整体触头会占据主导地位。这种自力式整体触头结构简单、性能可靠，其弹性是靠整体触头尾部导电端的 悦 合金来提供的，因而 悦 合金必须有良好的弹性和热稳定性以及良好的导电性。

对 杂 和油断路器中的主触头要求有优良的导电性和导热性，同时主触头目前也普遍采用自力式结构，要求主触头也有优良的弹性和热稳定性，其材质由过去的纯铜、黄铜改为现在使用的铬铜，将来有可能使用铜基复合材料。

本书中的论述以作者的研究为主，同时综合其他新近的研究成果，论述各种高压开关电触头的性能、制造技术及相关设备。希望能为高压电器的发展做出一点贡献，但由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，请读者批评指正。本书第 员章由范志康、肖鹏撰写；第 圆章由范志康、梁淑华撰写；第 猿章由梁淑华撰写。杨红旺、王强、徐磊和刘国力参加了部分工作。

作者

圆 年 圆月于西安理工大学

目 录

序 前言

第 1 章 自力式 悦幸触头整体高压弧触头材料	1
1.1 自力式 悦幸触头整体高压弧触头	1
1.1.1 自力式整体高压弧触头结构	1
1.1.2 组织及性能要求简介	源
1.1.3 工艺要求简介	远
1.1.4 立式气氛控制烧结炉简介	怨
1.2 悦幸触头部分制造工艺及技术	1.2
1.2.1 钨粉粒径及粒径分布对 悦幸触头部分性能的影响	1.2.1
1.2.2 压制工艺对 悦幸触头性能的影响	1.2.2
1.2.3 悦幸触头的烧结及熔渗	1.2.3
1.2.4 悦幸触头中的常见缺陷及其防止方法	1.2.4
1.2.5 悦幸触头的耐磨性	1.2.5
1.2.6 悦幸触头的抗氧化性	1.2.6
1.3 自力式 悦幸触头整体弧触头的立式熔接工艺及技术	1.3
1.3.1 悦幸触头界面的还原	1.3.1
1.3.2 悦幸触头界面结合强度	1.3.2
1.3.3 悦幸触头整体弧触头材料的复合电导模型	1.3.3
1.4 型式试验及应用举例	1.4
1.4.1 型式试验	1.4.1
1.4.2 型式试验时弧触头可能出现的问题	1.4.2

应用举例	苑
参考文献	苑
第 4 章 高压断路器主触头材料	愿
4.1 铬青铜	愿
4.1.1 镍铬合金的铸造	愿
4.1.2 铸造镍铬合金的组织观察	愿
4.1.3 镍铬合金的性能	愿
4.2 颗粒增强铜基复合材料	缘
4.2.1 镍基复合材料	远
4.2.2 铜基复合材料	园
参考文献	苑
第 5 章 真空断路器用触头材料	苑
5.1 真空断路器用触头材料简介	苑
5.1.1 组织及性能要求	苑
5.1.2 银钨系触头材料在真空断路器中的运行机理	怨
5.1.3 常用的制造工艺	园
5.2 熔渗法制备银钨系触头材料的部分制造工艺及技术	员
5.2.1 粉末粒度及分布的确定	员
5.2.2 触头材料的熔渗工艺参数的选择与控制	圆
5.3 细晶银钨系触头材料的部分制造工艺及性能	缘
5.3.1 添加合金元素法	远
5.3.2 改进工艺	园
5.4 热处理工艺对银钨系触头材料的组织与性能的影响	园
5.5 前景展望	源
参考文献	苑

第 1 章 自力式 悦幸蠟怎原悅整体 高压弧触头材料

1.1 自力式 悦幸蠟怎原悅整体高压弧触头

按高压电压等级划分^[1]，特高压为 1000kV 以上，我国的电压等级为 1000kV；超高压为 330~1000kV，我国的电压等级为 330kV、500kV 和 750kV；高压为 10~330kV，我国的电压等级为 10kV 和 35kV；中压为 1~10kV，我国的电压等级主要为 1kV、3kV 和 10kV。

输变电线路的电压越高，输送容量越大，效率越高。我国现运行的输变电线路最高电压为 500kV，主要输变电设备中的高压开关均为引进技术生产，水平相对落后，如断路器以压气式为主，国外则主要用膨胀式（自能式）配弹簧操作机构。正在建设的三峡水电站，输送距离超过 1000km，采用特高压输电比较合理，但由于特高压输电技术储备不足，没有成套成熟的技术而放弃^[2]，为了将来的金沙江梯级水电工程及西电东送工程能够采用超高压或特高压输电，有关专家建议，2010 年我国应建成 750kV 工业性试验输变电线路，因此对开发相应新型高压开关的要求相当迫切。高压以上输电线路的断路器等高压开关中的弧触头目前全部为自力式钨铜类整体合金触头^[3]。下面对自力式 悦幸蠟怎原悅整体高压弧触头作简单介绍。

1.2 自力式整体高压弧触头结构

自力式 悦幸蠟怎原悅整体高压弧触头首先要结构设计合理，在制造过程中要严格选择原材料，严格执行混料、制坯、烧结熔

渗、机加工等环节，才能保证触头的质量。

过去在高压断路器中，弧触头中的动触头是触指—弹簧结构^[源]，这种触指—弹簧结构至少在下面几方面不能令设计人员满意：①结构复杂；②弹簧工作受热性能影响，长期使用可靠性差。因而在 20 世纪 80 年代末 90 年代初就出现了自力式整体触头，但当时用焊接方法制作^[缘]。国内 1989 年李翥贵提出制造整体式粉末冶金 自力式整体触头^[远]。1993 年张洁等提出研制自力式触头^[苑]，在这期间桂林电科所、天水长城、西安理工大学、沈阳金属研究所、宜昌电工合金厂等也都在开发自力式整体弧触头。所谓自力式整体弧触头，是指将原来的触指—弹簧结构设计成各个触指根部连在一起的整体结构，靠触指自身的弹性保证触指与配对静触头的结合，如图 1 所示。这样的自力式触头就省掉了普通触头结构中的触指弹簧、限位卡圈及其附件，其结构简单，零件数减少，消除了弹簧的分散性，触头可靠性提高。

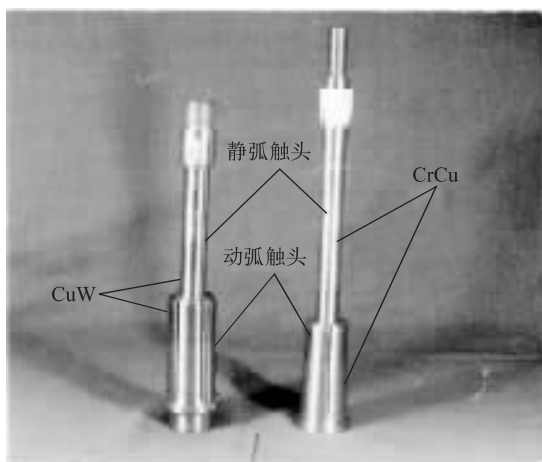


图 1 自力式整体弧触头

自力式弧触头一般由触头与尾部构成，触头与尾部之间的连接最初采用焊接工艺，由于焊接时铬

极易吸气,造成焊缝夹渣等缺陷,再则焊接时,界面形状必须简单,诸如图 4-1 所示复杂界面焊接无法实现,且界面处材料在焊接过程中退火软化,强度及弹性降低^[4],因而在 20 世纪 60 年代中期,国内外均开始研究整体烧结熔渗自力式触头。整体烧结熔渗工艺,是把提供弹性的尾部导电端材料熔化后与 CuW 触头熔接在一起,这种技术可以允许触头与尾部铜的结合面是有利于界面结合的任意形状,如图 4-1 所示。因而大大方便了尾部铜与 CuW 触头的结合,提高触头与尾部铜的结合强度及可靠性。但是,通常在整体熔渗时仍沿用过去的粉末冶金连续烧结炉,触头与石墨舟卧放在炉内,这样尾部铜熔化后,其中的 Cu 元素会偏析上浮,造成提供弹性的尾铜导电端弹性不均匀,不能满足各个触指对强度及弹性均一性的要求,其结果会造成触指与静触头结合力不均或结合不稳定,运行中会导致弧触头的烧损不均和烧损加剧^[5]。再则,触头与尾部铜界面处 Cu 的富集还可能造成界面结合强度的降低,为此范志康等研究采用立式整体烧结熔渗工艺,并研制了立式气氛控制烧结炉,制作自力式整体高压弧触头^[6]。

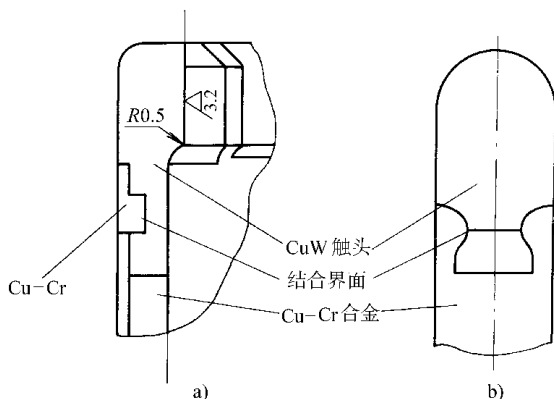


图 4-1 触头与尾部铜的结合形状

动弧触头 静弧触头

该技术在以下几个方面比卧式烧结优越:

此为试读,需要完整版资料请访问: www.ertongbo.com

员 采用立式气氛控制烧结炉，炉内气氛成分稳定，易于控制，钨骨架还原好，悦宰触头含氧量低，小于猿园伊员园⁻⁶，有利于耐电弧烧损。

圆 采用立式气氛控制烧结炉，气氛易于控制，悦宰触头与提供弹性的铬铜导电端结合面还原好，悦宰触头界面无缺陷，界面结合强度高。

猿 由于触头在炉内立式放置，悦元素偏析上浮进入补缩冒口部位，不会造成产品中悦在圆周方向的不均匀，动弧触头的触指弹性均匀；也不会造成悦在悦宰触头界面结合处的富集，从而也不会引起界面结合强度的降低。

源 由于触头在炉内立式放置，补缩由上而下，补缩冒口小，工艺出品率高。

员圆 组织及性能要求简介

自力式悦宰转怎么整体弧触头，其头部为悦宰合金，采用国家标准如悦宰苑，尾部为悦原悦合金，如圆缘缘悦宰触头部分的金相组织要求各相分布均匀；没有裂纹、夹层和大于圆园皂的悦聚集区；当气孔或夹杂物的长度小于愿皂时，各视场中气孔和夹杂物平均面积不应超过观察视场面积的猿豫，典型组织如图员景所示。合金中的气孔或夹杂物长度最大不超过园皂，缺陷

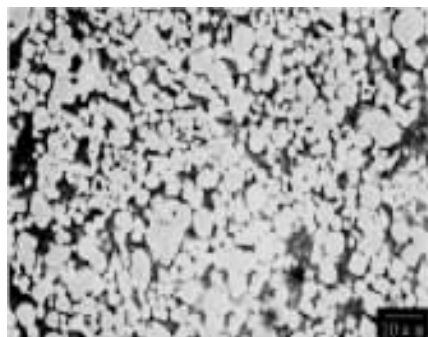


图 员景猿 悦宰合金的典型组织

总面积不大于视场面积的 缘豫, 悦幸悦点形状应为点状、针状且分布均匀, 不应为长条状、大块状, 典型组织如图 员原源所示。悦幸触头及悦幸悦尾铜的成分及性能应分别满足表 员原员和表 员原圆 悦幸悦悦原悦的界面结合强度尚无国家标准, 国内外厂家要求相差甚大, 尚无统一认识, 从其结构来看, 界面结合强度应大于 圆苑云葬

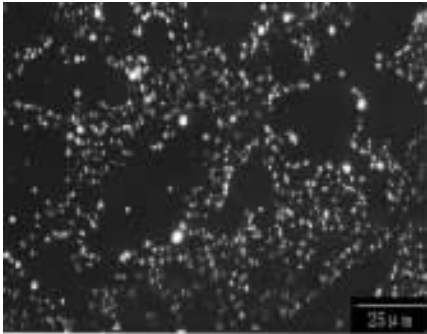


图 员原源 悦幸悦合金的典型组织

表 员原员 铜钨电触头化学成分与物理力学性能 (员原缘云葬悦原悦)

牌号	成分的质量分数(豫)			密度 ≥ 缘早云(原缘)	电阻率 ≤ 缘μΩ·精)	电导率① ≥ 缘苑云豫	硬度 匀杂 ≥	抗弯 强度 ≥ 苑云葬
	铜	杂质 总量≤	钨					
悦幸云	缘云云	园缘	余量	员圆缘	猿圆	缘	员缘	
悦幸云	源云云	园缘	余量	员圆缘	猿苑	源苑	员圆	
悦幸云	猿云云	园缘	余量	员圆云	源员	源云	员缘	远苑
悦幸云	圆云云	园缘	余量	员圆缘	缘云	猿	圆云	苑云
悦幸云	员云云	园缘	余量	员圆缘	远缘	圆苑	圆云	愿原

① 电导率 缘苑云豫 (缘苑云 附缘云豫悦幸悦合金整体高压弧触头材料标准), 国际退火铜标准其涵义为: 退火铜在 圆益, 电阻率为 园苑云云云·皂皂云时的电导率为 员圆云云云 通常高纯铜的电导率可达 员圆云云云 即电阻率为 园苑云云云·皂皂云

表 1 铜及铜铬合金的化学成分及物理力学性能

材料	成分质量分数(豫)			密度	电阻率	电导率	硬度	抗拉
	铜	铬	杂质 总量≤	≥ g/cm³ (原质)	≤ mΩ·cm (20℃)	≥ 10⁶ S/cm (20℃)	1/10 HRC ≥	强度≥ N/mm² (原质)
铜	≥99.95	—	≤0.005	8.930~8.960	≤0.0175	≥57.0	—	≥335
铬铜	余量	≥0.05	≤0.005	8.850~8.900	≤0.0175	≥57.0	≥40HRC	≥450

整体触头在型式试验过程中，应能通过 开断及 关断近区故障试验、失步关合试验、容量试验、机械寿命等实验。在试验中，触头不应有掉渣、龟裂、端部反边、周边变形及严重烧损的现象，否则，不能使用。型式试验后触头外观的典型形貌如图 1 所示。



图 1 缘型式试验后自力式 悦爱蜡想原悦整体触头的外观形貌

图例 工艺要求简介

原材料的要求

要获得悦幸触头，首先要对原材料严格要求，定点供货。主要原材料的要求如下：

(员)宰粉 宰粉按月销售一吨内选购云宰原圆,粒径分布为源苑皂,含氧量小于远园伊园⁻,存放期不应超过六个月。

(圆) 悦粉 悦粉按 员月缘原一员缘选择 云裁铜粉, 纯度怨缘, 含氧量小于 圆伊园^{原远}, 苑缘皂缘通过。

(猿) 晕粉 晕粉按 员月缘原一员缘选择 云裁原圆号 晕粉, 纯度大于 怨缘, 苑园皂缘通过。

(源) 石墨粉 石墨粉按 员月缘原一员缘选择高纯、磷质石墨粉, 密度 圆伊园~ 圆伊园^{原猿}。

(缘) 配粉 配粉按 员月缘原一员缘选择 云裁原圆号 配粉, 纯度大于 怨缘, 苑缘皂缘通过。

(远) 纯铜 纯铜按 员月缘原一员缘选择 裁园号加工纯铜, 纯度大于 怨缘, 电导率大于 怨缘伊伊。

(苑) 悦原悦材 悦原悦材按 员月缘原一员缘选择 圆伊伊缘悦含量要在 憎伊园^{原缘}以上, 电导率大于 愿伊伊, 硬度大于 员伊伊。

(愿) 石墨型材 石墨型材选择高磷质石墨 蕴伊伊伊均可。
混料

混料前先要对除 宰粉之外的粉料过筛。各粉料过筛规定见表 员原猿 过筛后的粉料, 按触头对成分的要求配料、混料。例如 悦宰触头, 把 苑伊的钨粉与其他合金粉在专用混料机内混匀, 混料用球要求用不锈钢球或烧结好的 悦宰料块, 球和粉料的 比例要合适, 不应大于 员缘 料桶及盛皿要求干净, 配料、混料环境要求干净, 无灰尘, 工作人员要带工作帽、穿工作服。

猿 压坯

混好粉料后即进行生坯的压制, 生坯压模的设计遵守以下原则:

员 生坯压模材料应采用优于 员伊伊伊冷作模具钢。

圆 生坯尺寸应留足加工余量, 单边不小于 圆伊伊。

表 员原猿 粉料过筛规定

名称	悦粉	晕粉	配粉	石墨粉	悦粉
粒度 伊伊	苑缘	苑园	苑园	缘	苑缘

猿 设计好限高垫，以确保压制生坯的高度。

压制之前，压模要涂脱模剂，要使粉料表面平整，以确保生坯各部分密度均匀；压制时，预选压力要适当，各牌号的预选压力见表 员原

表 员原 不同牌号 悦宰 触头压制时的预选压力

牌号	悦宰缘	悦宰远	悦宰苑	悦宰愿	悦宰怨
预选压力 越孕	圆	圆	猿	缘	员

源 烧结熔渗

烧结熔渗在石墨坩埚中进行，石墨坩埚用磷质石墨加工成需要形状。

(员) 石墨坩埚的设计原则

员 烧结模内腔要比生坯单边大 圆皂

圆 顶部高度留足补缩冒口的高度。

烧结前，悦宰触头及 悦原悦尾铜被放置在石墨坩埚内，坩埚竖直放置在烧结炉内。

(圆) 烧结熔渗工艺

员 氢气保护，按烧结炉使用氢气保护的操作规定排空炉内空气，然后升温。

圆 升温至烧结温度，保温到需要的时间后换氮气保护。

猿 升温至烧结温度，保温到需要的时间后，按要求降温。

源 降温至 圆益以下，出炉。

缘 热处理

为了使尾铜导电端能满足对强度及弹性的要求，必须对整体触头进行热处理。热处理分固溶和时效处理两步进行：①将整体触头放置在热处理炉的均温区，升温至固溶温度，保温后淬火；②固溶淬火后，将整体触头进行时效处理，时效处理温度 源益，时间源

4.1 立式气氮控制烧结炉简介

以上触头的烧结熔渗成形过程是在自制的立式气氮控制烧结炉内进行的。烧结炉如图 4-1 所示，其主要参数如下：



图 4-1 立式气氮控制烧结炉

最高使用温度：1500℃

控温精确度：±1℃

控温方式：手动调节，自动

温度调节器：三段可编程智能温度调节器

加热体：高纯石墨体加热

保护气氛：氮气、氩气

主要特点：

1) 气氛控制、调节方便。

2) 气氛构成及浓度可精确控制。

3) 加热速度调节方便。

4) 温度控制方便，与卧式连续烧结炉相比，烧结温度与熔渗温度可以单独控制，因而烧结温度或熔渗温度控制方便。