**《超导线材用铜槽线》行业标准**

**编制说明（送审稿）**

一、工作简况

1.1 任务来源

根据工信厅科[2023]18号《工业和信息化部办公厅关于印发2023年第一批行业标准制修订和外文版项目计划的通知》和有色标委[2023]51号《关于转发2023年第二批有色金属行业标准制（修）订项目计划及征集起草单位的通知》，其中项目计划号“2023-0076T-YS”《超导线材用铜槽线》行业标准由西部超导材料科技股份有限公司等单位负责起草，完成年限2024年12月。

1.2 立项目的和意义

根据“十四五原材料工业发展规划”第三章“促进产业供给高端化”的第三节“突破关键材料”和第四节“提高产品质量”，明确指出坚持材料先行和需求牵引并重，聚焦国防建设、民生短板和制造强国建设重大需求，滚动制定关键材料产品目录，制定发布技术路线图，其中提到发展超导材料、智能仿生、增材制造材料等，推动新的主干材料体系化发展，强化应用领域的支持和引导，同时强调加强质量管理和过程管控，持续开展原材料工业质量提升行动，提高产品质量的稳定性、可靠性和适用性，推广先进成型和加工方法、在线检测、智能制造等，建立满足应用需求的生产过程控制及质量管控体系。

Magnetic Resonance Imaging（MRI）用超导线材用铜槽线由于其剩余电阻比(RRR)高、加工尺寸精度高、强度大、单根长度长、尺寸稳定性高、清洁度要求高等特点，国内超导线材用铜槽线一直被国外垄断，主要依赖从德国Lebronze进口，供应商单一，存在供不应求、质量不稳定等风险。经过多年使用发现，进口铜槽线长期存在表面油污较多、槽内铜粉堆积、铜槽变形等影响超导线材质量的致命缺陷，严重影响WIC超导线材产品质量，降低超导线材成品率。除铜槽线本身质量不稳定外，WIC超导线材竞争对手Bruker EAS通过与德国Lebronze签订长期框架协议，限制铜槽线对中国的出口产量，严重制约了国内MRI用超导线材的发展，影响了人民对MRI医疗器械的迫切需求，因此急需开发国内合格的超导线材用铜槽线供应商，解决铜槽线依赖国外进口、卡脖子等问题，彻底实现WIC超导线材国产化。目前国内超导线材用铜槽线整体采用低氧铜杆通过拉拔、退火、轧制、定模精整的工艺路线，整条产业链上下游主要涉及低氧铜杆厂家、铜槽线制备厂家以及铜槽线使用厂家，国内能够批量供应低氧铜杆的厂家很多，例如江西铜业、铜陵有色、大冶有色等，有足够的产能批量供应低氧铜杆。国内能够批量制备铜槽线的企业不多，仅广东中实金属有限公司一家，具备批量稳定供应超导线材用铜槽线的能力。目前铜槽线使用厂家有西部超导和西安聚能超导线材科技有限公司，是铜槽线的终端用户，具备评价铜槽线产品性能和质量稳定性的能力，分析超导线材用铜槽线国内整个上下游企业，具备完备的产业链，因此为了保障超导线材用铜槽线整条产业链良性稳定发展，首要任务就是建立超导线材用铜槽线的行业标准，通过标准的制定规范铜槽线产品生产质量的稳定性。

1.3 主要参加单位和工作成员所作的工作

（1）项目编制组

标准制订计划任务正式下达后，立即成立了标准编制组，并落实起草任务，确定标准的主要起草人，拟定该标准的工作计划。具体分工为：西部超导材料科技股份有限公司总负责，广东中实金属有限公司、西安汉唐分析检测有限公司、西北有色金属研究院、西安聚能超导线材科技有限公司负责信息收集、资料汇总，编制组分工明确，紧密合作，共同完成标准的修订工作。

（2）编制单位技术基础

西部超导材料科技股份有限公司是国内领先、国际先进的超导材料、超导磁体创新研发生产企业，公司坚持“服务国家，造福人类”的企业宗旨，坚持自主创新，坚持高质量发展，瞄准国家重大领域需求，形成了超导锭棒、线材、磁体的全流程生产基地，公司产品定位于“国内空白、国际先进”，主要产品均服务于国家战略关键用途。西部超导代表国家为国际热核聚变反应堆项目研发并批量生产了超导线材、为中国聚变堆工程堆建设提供超导线材，实现了医用核磁共振人体成像仪用超导线材的全面商用和国产化，同时西部超导是全系列高品质单晶硅用超导磁体的设计生产制造商，典型产品应用于能源、医疗、科研等关键领域，填补了多项国内空白。目前，西部超导具备年产2000吨超导线材的能力，其中主型产品WIC超导线材主要客户为GE、SIEMENS、JASTEC、上海联影、东软医疗、上海辰光、宁波健信等国内外知名医疗器械企业，公司掌握了WIC线材用超导复合线和铜槽线全套批量化制备技术，解决了产品批量化生产过程中各项难题，已大批量生产，其中WIC线材关键原材料铜槽线目前已实现国产化，未来西部超导将充分发挥人才、技术、装备优势，向着“打造国际一流企业”，成为“国家重要科技战略力量、产业战略力量”的发展目标不断奋进。

西安聚能超导线材科技有限公司是国内领先、国际先进的超导线材创新研发及生产基地。公司瞄准国家重大领域需求，以建设国际领先水平的超导线材研发和产业化平台为目标，形成包括Nb3Sn和NbTi低温超导线材、MgB2和Bi系高温超导线带材等产品，应用于核聚变大科学装置、磁共振成像仪、大型粒子加速器、磁悬浮列车、先进半导体制造、风力发电系统、磁分离系统、量子计算机、重离子癌症治疗仪等重点领域。公司拥有一支从事超导材料及装备研发、中试和产业化的高端人才队伍，是西安市高性能超导材料及应用创新联合体的牵头单位，陕西省西咸新区国际科技交流合作促进会副会长单位。公司先后荣获陕西省专利一等奖、秦创原高价值专利大赛西安分赛一等奖，秦创原高价值专利大赛一等奖，陕西省西咸新区最美建设者等多项重要荣誉。面向未来，公司将充分发挥人才、技术、装备优势，向着“打造国际一流企业”，成为“国家重要科技战略力量、产业战略力量”的发展目标不断奋进。

广东中实金属有限公司是焊锡和高精度铜异型材材料制造商和供应商，服务于全球电子、半导体、精密焊接及高精度铜异型材应用市场，以高端业界的研发技术与定制化解决方案满足客户产品应用及创新需求，具有年产1500吨的铜异型材的生产能力，目前公司产品已广泛应用于航天、全球电子、超导线材等领域，公司多年来专注于研发创新，着力组建了一支高精尖研发团队，并与清华大学、华南理工、中南大学、广州有色金属研究所等院校进行技术合作，公司秉承科研创新、品质至上、为客户服务的理念，不断创新，解决客户之所需。

西安汉唐分析检测有限公司资质齐全，先后通过国家认证认可监督委员会(CMA)、中国合格评定国家认可委员会(CNAS)和国防科技工业实验室认可委员会(DILAC)认证，是国家工信部授权的“工业（稀有金属）产品质量控制和技术评价实验室”，也是陕西省科技厅授权的“陕西省有色金属分析检测与评价中心”、“核工业用金属材料检测与评价服务平台”、“稀有金属检测信息化管理及共享平台”、“陕西省稀有金属材料安全评估与失效分析平台”。主要承担有色金属、稀有金属、贵金属、钢铁及其合金等产品的化学成份分析、物理性能与力学性能、腐蚀性能测试；材料表面形貌、成分、元素价态等特性的测试与表征；检定校准工作；同时提供技术咨询、实验室规划设计、国际/国家/行业标准制定、分析方法研究、标准物质研制、人员培训等服务。

西北有色金属研究院是上世纪60年代国家在三线重点投资建设的稀有金属材料研究基地和行业技术开发中心，是国家首批转制的242家科研院所之一、全国全面创新改革试点单位，2015年被陕西省委省政府确定为“一院一所”创新发展模式的典型示范单位，2020年被陕西省委省政府定位为“新型科研机构”。西北有色院坚守保障国家稀有金属核心材料和技术自主可控的初心使命，先后承担国家和省市重点科研项目4000余项，取得国家级成果奖励34项、省部级以上成果435项，获授权专利2500余件，发表论文8700余篇，为我国航空、航天、舰船、核工业等重要工程研制关键用材，解决了诸多稀有金属材料领域“卡脖子”问题。

（3）编制组成员及分工

标准制订计划任务正式下达后，立即成立了标准编制组，并落实起草任务，确定标准的主要起草人（详见表1），拟定该标准的工作计划。标准主要起草人及工作职责如下：

表1 标准编制组成员及职责

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 起草人姓名 | 起草人单位 | 职责及分工 |
| 1 | 郭强 | 西部超导 | 标准编制组负责人，负责标准编制方案的确定、标准审查和指标确定； |
| 2 | 王瑞龙 | 西安聚能 | 标准执笔人，负责标准编制过程中各方案得编制，负责各种文件的编制；负责标准协调管理； |
| 3 | 柳祥 | 西部超导 | 负责铜槽线数据的归集和指标验证，参加标准讨论和指标确定； |
| 4 | 史小云 | 西部超导 | 负责标准进度协调，会议召开，文稿讨论 |
| 5 | 方瀚楷 | 广东中实 | 负责铜槽线数据验证，参加标准讨论，信息收集； |
| 6 | 周子敬 | 西安聚能 | 负责标准产品技术指标试验、验证和分析，指标确定，参加标准讨论、预审和审定； |
| 7 | 白新房 | 西安汉唐 | 负责标准产品检验，标准方法确定 |
| 8 | 张凯林 | 西安聚能 | 负责标准产品试验数据归集和计算，相关标准信息和市场信息收集； |
| 9 | 朱燕敏 | 西安聚能 | 负责超导线材性能验证、数据计算分析，参加标准讨论和指标确定； |
| 10 | 王庆阳 | 西北有色院 | 负责标准产品试验审核，相关标准信息收集。 |

1.4 主要工作过程

1.4.1 标准预研

2021年5月至2022年5月，由西部超导材料科技股份有限公司、广东中实金属有限公司、西安汉唐分析检测有限公司、西北有色金属研究院对超导线材用铜槽线的生产现状进行了现场调研，具体内容为：了解国内外超导线材用铜槽线的技术水平、检测及应用情况，与企业技术人员深入讨论技术标准的具体技术要求，参观企业现场生产情况，根据调研情况，由主编单位整理并编制形成了《超导线材用铜槽线》标准项目建议书、标准草案及标准立项说明等材料。

1.4.2 标准立项

2022年5月，西部超导材料科技股份有限公司向全体委员会议提交了《超导线材用铜槽线》标准项目建议书、标准草案及标准立项说明等材料，全体委员会议论证结论为同意行业标准立项。

2023年5月根据工信厅科[2023]18号《工业和信息化部办公厅关于印发2023年第一批行业标准制修订和外文版项目计划的通知》和有色标委[2023]51号《关于转发2023年第二批有色金属行业标准制（修）订项目计划及征集起草单位的通知》，《超导线材用铜槽线》行业标准获批立项，项目计划号“2023-0076T-YS”。

1.4.3 标准起草阶段

西部超导根据前期获取的技术资料和参编单位提供的相关数据撰写标准草案，并发往相关单位讨论和征求意见。对每家单位提出的意见进行充分论证，反复修改标准草案，经过多次充分讨论和内部研究修改，于2023年12月15日形成了标准征求意见1稿。

2023年12月21日~22日，在江西省鹰潭市召开了标准第一次工作会议，与会专家针对标准征求意见1稿提出了修改意见，标准编制组根据专家意见进一步将标准进行完善，并对标准涉及的各相关企业进行广泛调研和数据统计，结合企业的生产实际技术指标和检验数据，对各起草单位各项性能指标进行了检测数据对比，2024年1月下旬修改完善，形成了标准征求意见2稿的初稿，并发往10家单位征求意见，根据收集的意见对2稿的初稿进行修改完善，完成了2稿的最终定稿（预审稿及编制说明）。

2024年5月22日~23日，在江苏省无锡市召开了标准第二次工作会议，与会专家对标准征求意见2稿进行了认真、热烈的讨论，提出了修改意见，标准编制组根据专家意见进一步将标准进行完善和认真修改，2024年6月中旬修改完善形成了送审稿及编制说明。

1.4.4 征求意见阶段

编制组通过会议、邮件、中国有色金属标准质量信息网上公开等方式对《超导线材用铜槽线》送审稿进行意见征集，形成了相应意见征集汇总表，按照征集到的意见对送审稿进行了修改，最终形成了送审稿定稿。

二、编制原则

本标准起草单位自接收起草任务后，成立了本标准编制工作组负责收集生产统计、检验数据、市场需求及客户要求等信息。却行了《超导线材用铜槽线》标准起草所遵循的基本原则和编制依据：

1）查阅国内外客户的相关技术要求；

2）根据超导线材用铜槽线生产企业具体情况和应用领域的特点，力求做到标准的合理性与实用性；

3）根据产品工艺的成熟与完善、技术发展水平及测试数据确定技术指标取值范围。

4）完全按照GB/T 1.1和有色加工产品标准和国家标准编写示例的要求进行格式和结构编写。

三、标准主要技术内容的确定依据及主要试验和验证情况分析

本文件对目前市场广泛使用，且工艺成熟的超导线材用铜槽线进行规范，提高超导线材用铜槽线的行业适用性。超导线材用铜槽线标准对化学成分、外形尺寸及其允许偏差、拉伸性能、电性能、内部缺陷和外观质量进行了明确的规定。

3.1 化学成分

在产品化学成分确定过程中，参考国外相关标准和国内无氧铜标准中化学成分的要求，总结多年铜槽线化学成分和RRR值之间的影响关系，分析不同杂质元素含量对铜槽线电性能的影响，同时对起草单位各产品样品化学成分进行严格的抽样检测，两个厂家各随机抽查60个样品，不同厂家样品不同元素实测验证数据见表2。

表2 不同厂家样品不同元素监测数据

Cu+Ag单位为质量分数 %，其余元素单位为ppm

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品 | Cu+Ag | P | Ag | Bi | Sb | As | Fe | Ni | Pb | Sn | S | Zn | Sn | Te | Mn | Cd | O |
| S1 | 99.99 | 1.9 | 10.1 | ＜0.1 | 0.6 | 0.5 | 1.1 | 0.3 | 0.1 | 0.22 | 2.1 | 0.3 | 0.23 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 208 |
| S2 | 99.99 | 2.1 | 9.0 | ＜0.1 | 0.6 | 0.6 | 2.1 | 0.6 | 0.4 | 0.16 | 2.1 | 0.1 | 0.22 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 237 |
| S3 | 99.99 | 1.5 | 10.6 | ＜0.1 | 0.4 | 0.7 | 2.1 | 0.5 | 0.4 | 0.13 | 1.6 | 0.3 | 0.25 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 213 |
| S4 | 99.99 | 3.0 | 9.0 | ＜0.1 | 0.7 | 0.5 | 2.5 | 0.8 | 0.1 | 0.22 | 1.7 | 0.3 | 0.26 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 188 |
| S5 | 99.98 | 1.6 | 9.6 | ＜0.1 | 0.9 | 0.5 | 1.2 | 0.6 | 0.4 | 0.25 | 1.4 | 0.1 | 0.12 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 193 |
| S6 | 99.98 | 1.5 | 9.0 | ＜0.1 | 0.9 | 0.5 | 2.0 | 0.5 | 0.1 | 0.17 | 2.4 | 0.4 | 0.14 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 201 |
| S7 | 99.98 | 1.7 | 10.2 | ＜0.1 | 0.6 | 0.5 | 1.6 | 0.7 | 0.2 | 0.23 | 2.3 | 0.2 | 0.23 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 165 |
| S8 | 99.98 | 3.0 | 9.0 | ＜0.1 | 0.6 | 0.4 | 1.0 | 0.5 | 0.3 | 0.10 | 1.8 | 0.3 | 0.19 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 245 |
| S9 | 99.98 | 2.1 | 9.6 | ＜0.1 | 0.8 | 0.8 | 1.3 | 0.5 | 0.1 | 0.12 | 1.8 | 0.1 | 0.14 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 205 |
| S10 | 99.98 | 2.7 | 9.8 | ＜0.1 | 0.5 | 0.6 | 2.4 | 0.6 | 0.3 | 0.16 | 1.6 | 0.2 | 0.24 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 142 |
| S11 | 99.99 | 2.7 | 8.4 | ＜0.1 | 0.9 | 0.5 | 1.3 | 0.3 | 0.1 | 0.23 | 3.0 | 0.1 | 0.24 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 245 |
| S12 | 99.99 | 2.3 | 9.1 | ＜0.1 | 0.9 | 0.6 | 1.1 | 0.8 | 0.3 | 0.13 | 1.9 | 0.2 | 0.22 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 250 |
| S13 | 99.98 | 1.6 | 9.1 | ＜0.1 | 0.6 | 0.8 | 1.4 | 0.7 | 0.4 | 0.14 | 1.5 | 0.3 | 0.24 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 152 |
| S14 | 99.98 | 1.7 | 10.1 | ＜0.1 | 0.9 | 0.6 | 1.5 | 0.8 | 0.2 | 0.15 | 1.3 | 0.2 | 0.23 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 262 |
| S15 | 99.98 | 2.8 | 9.2 | ＜0.1 | 0.5 | 0.6 | 1.3 | 0.4 | 0.1 | 0.13 | 2.2 | 0.4 | 0.12 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 228 |
| S16 | 99.99 | 1.9 | 10.2 | ＜0.1 | 0.5 | 0.5 | 1.2 | 0.3 | 0.1 | 0.22 | 3.0 | 0.2 | 0.27 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 266 |
| S17 | 99.99 | 1.7 | 10.7 | ＜0.1 | 0.4 | 0.7 | 2.1 | 0.7 | 0.4 | 0.14 | 1.7 | 0.2 | 0.15 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 243 |
| S18 | 99.98 | 2.2 | 10.0 | ＜0.1 | 0.4 | 0.8 | 1.7 | 0.3 | 0.2 | 0.15 | 1.0 | 0.3 | 0.23 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 252 |
| S19 | 99.98 | 1.7 | 8.5 | ＜0.1 | 0.8 | 0.4 | 1.8 | 0.6 | 0.3 | 0.25 | 1.0 | 0.3 | 0.21 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 241 |
| S20 | 99.99 | 3.0 | 10.2 | ＜0.1 | 0.7 | 0.6 | 1.5 | 0.8 | 0.4 | 0.16 | 2.9 | 0.1 | 0.15 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 144 |
| S21 | 99.99 | 2.2 | 8.6 | ＜0.1 | 0.4 | 0.8 | 1.2 | 0.3 | 0.3 | 0.12 | 1.7 | 0.4 | 0.19 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 156 |
| S22 | 99.99 | 2.2 | 8.0 | ＜0.1 | 0.6 | 0.7 | 2.4 | 0.5 | 0.1 | 0.27 | 3.0 | 0.3 | 0.27 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 228 |
| S23 | 99.99 | 2.2 | 10.6 | ＜0.1 | 0.7 | 0.5 | 2.3 | 0.6 | 0.3 | 0.10 | 2.2 | 0.4 | 0.19 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 140 |
| S24 | 99.98 | 2.4 | 10.1 | ＜0.1 | 0.6 | 0.8 | 1.7 | 0.3 | 0.1 | 0.20 | 1.1 | 0.2 | 0.14 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 257 |
| S25 | 99.98 | 2.5 | 8.7 | ＜0.1 | 0.8 | 0.6 | 2.2 | 0.6 | 0.2 | 0.24 | 1.3 | 0.3 | 0.23 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 175 |
| S26 | 99.98 | 2.5 | 8.8 | ＜0.1 | 0.8 | 0.7 | 1.3 | 0.3 | 0.4 | 0.16 | 1.3 | 0.1 | 0.26 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 202 |
| S27 | 99.98 | 1.7 | 8.5 | ＜0.1 | 0.4 | 0.5 | 1.5 | 0.4 | 0.3 | 0.22 | 1.6 | 0.3 | 0.21 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 162 |
| S28 | 99.98 | 2.7 | 8.9 | ＜0.1 | 0.9 | 0.5 | 2.1 | 0.3 | 0.2 | 0.25 | 1.2 | 0.3 | 0.12 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 255 |
| S29 | 99.98 | 1.9 | 8.2 | ＜0.1 | 0.6 | 0.5 | 1.2 | 0.4 | 0.2 | 0.25 | 1.2 | 0.2 | 0.10 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 238 |
| S30 | 99.99 | 2.5 | 8.8 | ＜0.1 | 0.4 | 0.5 | 1.3 | 0.3 | 0.3 | 0.26 | 1.9 | 0.1 | 0.17 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 238 |
| S31 | 99.99 | 1.8 | 8.1 | ＜0.1 | 0.4 | 0.4 | 2.4 | 0.7 | 0.2 | 0.16 | 1.9 | 0.4 | 0.11 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 140 |
| S32 | 99.98 | 2.0 | 10.9 | ＜0.1 | 0.6 | 0.5 | 1.2 | 0.8 | 0.3 | 0.27 | 1.7 | 0.1 | 0.18 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 260 |
| S33 | 99.98 | 2.4 | 8.3 | ＜0.1 | 0.5 | 0.4 | 1.7 | 0.8 | 0.4 | 0.18 | 1.7 | 0.3 | 0.23 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 265 |
| S34 | 99.98 | 2.4 | 10.2 | ＜0.1 | 0.7 | 0.6 | 1.3 | 0.6 | 0.4 | 0.21 | 2.0 | 0.1 | 0.22 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 150 |
| S35 | 99.99 | 2.0 | 8.8 | ＜0.1 | 0.7 | 0.7 | 1.4 | 0.4 | 0.1 | 0.25 | 2.2 | 0.3 | 0.27 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 169 |
| S36 | 99.99 | 3.0 | 9.1 | ＜0.1 | 0.5 | 0.7 | 1.4 | 0.7 | 0.1 | 0.16 | 1.3 | 0.4 | 0.14 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 210 |
| S37 | 99.98 | 2.8 | 10.6 | ＜0.1 | 0.5 | 0.7 | 2.3 | 0.7 | 0.2 | 0.26 | 2.3 | 0.4 | 0.18 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 197 |
| S38 | 99.98 | 1.9 | 10.5 | ＜0.1 | 0.5 | 0.4 | 1.2 | 0.4 | 0.1 | 0.24 | 1.6 | 0.2 | 0.14 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 217 |
| S39 | 99.99 | 2.4 | 10.8 | ＜0.1 | 0.4 | 0.4 | 2.0 | 0.8 | 0.2 | 0.17 | 2.3 | 0.3 | 0.23 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 219 |
| S40 | 99.99 | 2.3 | 9.4 | ＜0.1 | 0.6 | 0.4 | 1.5 | 0.4 | 0.4 | 0.15 | 2.0 | 0.2 | 0.12 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 222 |
| S41 | 99.99 | 2.5 | 9.4 | ＜0.1 | 0.8 | 0.6 | 2.2 | 0.6 | 0.3 | 0.10 | 1.3 | 0.3 | 0.11 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 225 |
| S42 | 99.99 | 1.7 | 9.0 | ＜0.1 | 0.4 | 0.4 | 2.0 | 0.6 | 0.4 | 0.10 | 1.5 | 0.2 | 0.16 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 170 |
| S43 | 99.98 | 2.5 | 9.9 | ＜0.1 | 0.9 | 0.7 | 2.3 | 0.4 | 0.4 | 0.19 | 1.0 | 0.3 | 0.10 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 155 |
| S44 | 99.98 | 2.8 | 8.2 | ＜0.1 | 0.8 | 0.6 | 2.3 | 0.4 | 0.1 | 0.13 | 1.7 | 0.4 | 0.14 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 265 |
| S45 | 99.98 | 2.8 | 10.9 | ＜0.1 | 0.9 | 0.4 | 1.4 | 0.7 | 0.3 | 0.16 | 2.6 | 0.3 | 0.23 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 160 |
| S46 | 99.98 | 3.0 | 10.7 | ＜0.1 | 0.4 | 0.8 | 2.2 | 0.7 | 0.1 | 0.27 | 1.5 | 0.1 | 0.10 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 145 |
| S47 | 99.98 | 1.8 | 8.7 | ＜0.1 | 0.7 | 0.8 | 1.4 | 0.7 | 0.3 | 0.14 | 1.8 | 0.2 | 0.21 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 224 |
| S48 | 99.98 | 1.5 | 11.0 | ＜0.1 | 0.8 | 0.6 | 1.3 | 0.5 | 0.2 | 0.24 | 2.0 | 0.2 | 0.10 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 169 |
| S49 | 99.99 | 2.3 | 10.1 | ＜0.1 | 0.7 | 0.5 | 2.1 | 0.6 | 0.2 | 0.22 | 2.1 | 0.4 | 0.22 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 239 |
| S50 | 99.99 | 1.8 | 10.6 | ＜0.1 | 0.9 | 0.8 | 2.0 | 0.5 | 0.2 | 0.13 | 1.0 | 0.4 | 0.16 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 185 |
| S51 | 99.98 | 1.8 | 8.9 | ＜0.1 | 0.4 | 0.6 | 1.7 | 0.3 | 0.4 | 0.11 | 2.6 | 0.4 | 0.12 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 267 |
| S52 | 99.98 | 2.7 | 11.0 | ＜0.1 | 0.8 | 0.6 | 1.3 | 0.4 | 0.2 | 0.14 | 2.3 | 0.4 | 0.21 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 181 |
| S53 | 99.98 | 3.0 | 10.4 | ＜0.1 | 0.8 | 0.5 | 2.3 | 0.4 | 0.4 | 0.25 | 1.9 | 0.2 | 0.18 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 178 |
| S54 | 99.99 | 2.7 | 9.6 | ＜0.1 | 0.9 | 0.5 | 1.3 | 0.4 | 0.2 | 0.27 | 2.4 | 0.2 | 0.25 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 183 |
| S55 | 99.99 | 2.8 | 8.4 | ＜0.1 | 0.5 | 0.8 | 1.3 | 0.5 | 0.1 | 0.25 | 1.4 | 0.3 | 0.27 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 230 |
| S56 | 99.98 | 2.7 | 9.7 | ＜0.1 | 0.5 | 0.6 | 2.3 | 0.8 | 0.2 | 0.21 | 2.4 | 0.4 | 0.16 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 230 |
| S57 | 99.98 | 3.0 | 10.1 | ＜0.1 | 0.4 | 0.6 | 1.8 | 0.7 | 0.4 | 0.18 | 1.4 | 0.1 | 0.20 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 230 |
| S58 | 99.98 | 3.0 | 10.1 | ＜0.1 | 0.7 | 0.4 | 2.2 | 0.5 | 0.3 | 0.24 | 1.0 | 0.2 | 0.27 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 187 |
| S59 | 99.98 | 2.5 | 11.0 | ＜0.1 | 0.5 | 0.8 | 1.1 | 0.8 | 0.3 | 0.18 | 2.5 | 0.2 | 0.21 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 265 |
| S60 | 99.99 | 1.7 | 8.7 | ＜0.1 | 0.9 | 0.8 | 1.8 | 0.4 | 0.4 | 0.24 | 1.7 | 0.2 | 0.27 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 169 |
| S61 | 99.99 | 2.7 | 9.4 | ＜0.1 | 0.5 | 0.4 | 2.0 | 0.6 | 0.3 | 0.20 | 2.1 | 0.2 | 0.12 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 186 |
| S62 | 99.98 | 2.3 | 9.6 | ＜0.1 | 0.7 | 0.5 | 1.4 | 0.3 | 0.2 | 0.10 | 2.9 | 0.3 | 0.18 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 185 |
| S63 | 99.98 | 2.2 | 9.7 | ＜0.1 | 0.9 | 0.6 | 1.1 | 0.6 | 0.3 | 0.18 | 2.2 | 0.4 | 0.11 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 269 |
| S64 | 99.99 | 2.7 | 9.4 | ＜0.1 | 0.6 | 0.5 | 1.1 | 0.7 | 0.3 | 0.27 | 3.0 | 0.4 | 0.16 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 224 |
| S65 | 99.99 | 1.9 | 10.6 | ＜0.1 | 0.5 | 0.4 | 1.3 | 0.8 | 0.2 | 0.25 | 1.7 | 0.3 | 0.24 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 238 |
| S66 | 99.99 | 2.5 | 9.3 | ＜0.1 | 0.8 | 0.7 | 1.7 | 0.6 | 0.1 | 0.15 | 1.3 | 0.3 | 0.24 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 262 |
| S67 | 99.99 | 3.0 | 8.9 | ＜0.1 | 0.9 | 0.7 | 2.5 | 0.3 | 0.3 | 0.26 | 2.4 | 0.4 | 0.15 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 227 |
| S68 | 99.98 | 2.2 | 10.7 | ＜0.1 | 0.4 | 0.5 | 2.1 | 0.6 | 0.4 | 0.10 | 2.9 | 0.1 | 0.12 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 219 |
| S69 | 99.98 | 2.6 | 9.1 | ＜0.1 | 0.5 | 0.8 | 1.8 | 0.7 | 0.3 | 0.10 | 2.6 | 0.3 | 0.24 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 176 |
| S70 | 99.98 | 2.5 | 11.0 | ＜0.1 | 0.8 | 0.5 | 1.4 | 0.7 | 0.3 | 0.13 | 1.9 | 0.4 | 0.15 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 236 |
| S71 | 99.98 | 2.4 | 10.9 | ＜0.1 | 0.8 | 0.5 | 1.1 | 0.3 | 0.3 | 0.11 | 1.6 | 0.2 | 0.14 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 239 |
| S72 | 99.98 | 2.9 | 10.6 | ＜0.1 | 0.9 | 0.4 | 2.2 | 0.7 | 0.2 | 0.24 | 1.2 | 0.3 | 0.27 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 209 |
| S73 | 99.98 | 2.9 | 8.9 | ＜0.1 | 0.9 | 0.8 | 2.0 | 0.4 | 0.4 | 0.17 | 2.4 | 0.4 | 0.17 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 150 |
| S74 | 99.99 | 1.7 | 10.8 | ＜0.1 | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 0.3 | 0.2 | 0.20 | 2.4 | 0.3 | 0.15 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 227 |
| S75 | 99.99 | 3.0 | 8.5 | ＜0.1 | 0.5 | 0.4 | 1.1 | 0.5 | 0.3 | 0.23 | 2.8 | 0.1 | 0.19 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 212 |
| S76 | 99.98 | 2.2 | 9.9 | ＜0.1 | 0.4 | 0.7 | 1.2 | 0.6 | 0.2 | 0.11 | 1.0 | 0.3 | 0.15 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 225 |
| S77 | 99.98 | 2.3 | 9.4 | ＜0.1 | 0.5 | 0.7 | 1.1 | 0.4 | 0.1 | 0.10 | 2.4 | 0.4 | 0.10 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 199 |
| S78 | 99.98 | 2.7 | 9.9 | ＜0.1 | 0.6 | 0.7 | 2.5 | 0.5 | 0.2 | 0.23 | 2.4 | 0.2 | 0.18 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 190 |
| S79 | 99.99 | 2.6 | 8.5 | ＜0.1 | 0.4 | 0.5 | 2.3 | 0.6 | 0.1 | 0.16 | 1.4 | 0.1 | 0.11 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 149 |
| S80 | 99.99 | 1.9 | 8.4 | ＜0.1 | 0.9 | 0.5 | 1.1 | 0.7 | 0.3 | 0.27 | 2.1 | 0.1 | 0.15 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 196 |
| S81 | 99.98 | 1.5 | 8.8 | ＜0.1 | 0.8 | 0.7 | 1.6 | 0.8 | 0.1 | 0.16 | 1.5 | 0.4 | 0.27 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 190 |
| S82 | 99.98 | 2.0 | 10.3 | ＜0.1 | 0.6 | 0.7 | 2.2 | 0.8 | 0.4 | 0.11 | 2.8 | 0.2 | 0.10 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 190 |
| S83 | 99.99 | 2.5 | 8.6 | ＜0.1 | 0.8 | 0.7 | 1.9 | 0.5 | 0.3 | 0.19 | 1.6 | 0.2 | 0.21 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 148 |
| S84 | 99.99 | 3.0 | 9.0 | ＜0.1 | 0.4 | 0.4 | 2.0 | 0.8 | 0.4 | 0.27 | 2.6 | 0.2 | 0.27 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 269 |
| S85 | 99.99 | 1.7 | 9.8 | ＜0.1 | 0.6 | 0.5 | 1.4 | 0.4 | 0.3 | 0.24 | 1.2 | 0.3 | 0.24 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 165 |
| S86 | 99.99 | 1.9 | 10.0 | ＜0.1 | 0.9 | 0.4 | 2.0 | 0.6 | 0.3 | 0.11 | 2.8 | 0.2 | 0.19 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 244 |
| S87 | 99.98 | 2.4 | 9.2 | ＜0.1 | 0.4 | 0.6 | 1.3 | 0.7 | 0.1 | 0.22 | 1.6 | 0.4 | 0.10 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 203 |
| S88 | 99.98 | 2.5 | 8.1 | ＜0.1 | 0.9 | 0.7 | 1.3 | 0.4 | 0.2 | 0.13 | 1.9 | 0.1 | 0.25 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 159 |
| S89 | 99.98 | 1.8 | 8.9 | ＜0.1 | 0.6 | 0.5 | 2.4 | 0.4 | 0.1 | 0.10 | 1.2 | 0.1 | 0.23 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 192 |
| S90 | 99.98 | 3.0 | 8.9 | ＜0.1 | 0.5 | 0.5 | 2.4 | 0.3 | 0.1 | 0.26 | 3.0 | 0.4 | 0.10 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 212 |
| S91 | 99.98 | 2.2 | 8.2 | ＜0.1 | 0.8 | 0.8 | 1.3 | 0.3 | 0.3 | 0.12 | 2.0 | 0.4 | 0.24 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 233 |
| S92 | 99.98 | 1.6 | 10.1 | ＜0.1 | 0.7 | 0.7 | 2.1 | 0.5 | 0.2 | 0.24 | 1.8 | 0.2 | 0.26 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 142 |
| S93 | 99.99 | 2.7 | 10.5 | ＜0.1 | 0.9 | 0.8 | 1.9 | 0.8 | 0.2 | 0.26 | 3.0 | 0.4 | 0.12 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 158 |
| S94 | 99.99 | 2.5 | 9.6 | ＜0.1 | 0.5 | 0.7 | 2.1 | 0.5 | 0.4 | 0.26 | 3.0 | 0.2 | 0.17 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 190 |
| S95 | 99.98 | 2.0 | 10.8 | ＜0.1 | 0.4 | 0.8 | 2.1 | 0.7 | 0.3 | 0.14 | 1.1 | 0.4 | 0.15 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 264 |
| S96 | 99.99 | 2.7 | 10.7 | ＜0.1 | 0.8 | 0.4 | 1.4 | 0.6 | 0.1 | 0.16 | 1.7 | 0.1 | 0.18 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 159 |
| S97 | 99.99 | 1.5 | 10.3 | ＜0.1 | 0.9 | 0.5 | 1.6 | 0.3 | 0.3 | 0.27 | 2.8 | 0.3 | 0.26 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 247 |
| S98 | 99.98 | 1.7 | 8.7 | ＜0.1 | 0.9 | 0.6 | 1.2 | 0.5 | 0.1 | 0.17 | 1.3 | 0.3 | 0.12 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 222 |
| S99 | 99.98 | 2.2 | 10.3 | ＜0.1 | 0.9 | 0.5 | 2.3 | 0.4 | 0.4 | 0.23 | 1.5 | 0.1 | 0.14 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 230 |
| S100 | 99.98 | 2.2 | 9.5 | ＜0.1 | 0.5 | 0.5 | 2.0 | 0.4 | 0.1 | 0.21 | 1.1 | 0.2 | 0.15 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 146 |
| S101 | 99.98 | 3.0 | 10.7 | ＜0.1 | 0.4 | 0.6 | 1.5 | 0.3 | 0.4 | 0.18 | 2.7 | 0.1 | 0.19 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 248 |
| S102 | 99.98 | 1.9 | 10.5 | ＜0.1 | 0.7 | 0.7 | 2.3 | 0.7 | 0.1 | 0.12 | 1.4 | 0.4 | 0.15 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 211 |
| S103 | 99.98 | 2.0 | 8.8 | ＜0.1 | 0.8 | 0.6 | 1.5 | 0.5 | 0.1 | 0.23 | 2.4 | 0.2 | 0.14 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 252 |
| S104 | 99.99 | 2.9 | 8.9 | ＜0.1 | 0.5 | 0.7 | 2.5 | 0.3 | 0.2 | 0.11 | 2.6 | 0.3 | 0.19 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 244 |
| S105 | 99.99 | 1.6 | 8.1 | ＜0.1 | 0.7 | 0.8 | 1.6 | 0.3 | 0.3 | 0.22 | 2.3 | 0.2 | 0.15 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 231 |
| S106 | 99.98 | 2.5 | 8.0 | ＜0.1 | 0.9 | 0.8 | 1.9 | 0.3 | 0.2 | 0.22 | 2.8 | 0.3 | 0.15 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 203 |
| S107 | 99.98 | 2.7 | 8.1 | ＜0.1 | 0.8 | 0.4 | 2.2 | 0.4 | 0.3 | 0.25 | 1.8 | 0.2 | 0.10 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 257 |
| S108 | 99.98 | 1.8 | 10.6 | ＜0.1 | 0.4 | 0.4 | 1.3 | 0.3 | 0.1 | 0.21 | 1.8 | 0.2 | 0.17 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 257 |
| S109 | 99.99 | 2.6 | 8.6 | ＜0.1 | 0.8 | 0.4 | 2.0 | 0.5 | 0.3 | 0.25 | 1.4 | 0.1 | 0.20 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 226 |
| S110 | 99.98 | 2.9 | 9.7 | ＜0.1 | 0.9 | 0.7 | 1.2 | 0.5 | 0.1 | 0.19 | 2.7 | 0.1 | 0.10 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 267 |
| S111 | 99.99 | 2.9 | 9.8 | ＜0.1 | 0.9 | 0.4 | 1.7 | 0.5 | 0.4 | 0.17 | 1.4 | 0.3 | 0.21 | 0.2 | ＜0.1 | ＜0.1 | 148 |
| S112 | 99.99 | 1.8 | 8.6 | ＜0.1 | 0.4 | 0.7 | 2.3 | 0.6 | 0.4 | 0.11 | 1.6 | 0.3 | 0.11 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 266 |
| S113 | 99.98 | 2.7 | 8.2 | ＜0.1 | 0.9 | 0.7 | 2.5 | 0.3 | 0.1 | 0.13 | 2.2 | 0.2 | 0.12 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 241 |
| S114 | 99.98 | 1.8 | 10.2 | ＜0.1 | 0.6 | 0.7 | 1.0 | 0.6 | 0.4 | 0.19 | 2.3 | 0.2 | 0.16 | 0.5 | ＜0.1 | ＜0.1 | 162 |
| S115 | 99.98 | 1.7 | 9.9 | ＜0.1 | 0.6 | 0.4 | 1.8 | 0.8 | 0.2 | 0.27 | 1.2 | 0.4 | 0.11 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 263 |
| S116 | 99.98 | 1.8 | 9.0 | ＜0.1 | 0.7 | 0.5 | 1.9 | 0.7 | 0.4 | 0.14 | 1.4 | 0.2 | 0.26 | 0.6 | ＜0.1 | ＜0.1 | 177 |
| S117 | 99.98 | 2.6 | 9.5 | ＜0.1 | 0.9 | 0.7 | 2.4 | 0.7 | 0.2 | 0.18 | 2.5 | 0.3 | 0.19 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 249 |
| S118 | 99.98 | 1.5 | 9.0 | ＜0.1 | 0.4 | 0.5 | 1.7 | 0.3 | 0.1 | 0.20 | 1.1 | 0.2 | 0.27 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 173 |
| S119 | 99.99 | 2.5 | 8.8 | ＜0.1 | 0.8 | 0.8 | 2.4 | 0.5 | 0.1 | 0.26 | 2.6 | 0.1 | 0.12 | 0.3 | ＜0.1 | ＜0.1 | 222 |
| S120 | 99.99 | 2.9 | 10.3 | ＜0.1 | 0.6 | 0.5 | 1.2 | 0.6 | 0.1 | 0.27 | 1.4 | 0.4 | 0.14 | 0.4 | ＜0.1 | ＜0.1 | 184 |

结合多年铜槽线化学成分研究结果，以及生产和客户要求的检测结果和抽样测试的结果，不同类型铜槽线的化学成分应符合表3中标准值的规定，除O元素以外的杂质元素含量均按照无氧铜的要求控制，保证后续铜槽线的RRR值，也即表3中的规定。

表3 化学成分

质量分数/ %

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Cu+Ag | P | Ag | Bi | Sb | As | Fe | Ni | Pb |
| ≥99.95 | ≤0.0003 | ≤0.0025 | ≤0.0001 | ≤0.0004 | ≤0.0005 | ≤0.0010 | ≤0.0010 | ≤0.0005 |
| Sn | S | Zn | Se | Te | Mn | Cd | O | 总和a |
| ≤0.0002 | ≤0.0015 | ≤0.0001 | ≤0.0003 | ≤0.0002 | ≤0.00005 | ≤0.0001 | 0.0080～0.0300 | ≤0.008 |
| a总和为表中所列杂质元素实测值的总和，不包含O。 |

3.2 外形尺寸及其允许偏差

3.2.1 铜槽线宽度、高度、槽深、槽宽及其允许偏差

根据超导线材用铜槽线特点以及市场调研结果，确定了该类型超导线材用铜槽线的形状为U形，且具有不同的R角，经过大量实验分析确定了不同型号铜槽线的尺寸范围，同时对起草单位不同类型产品尺寸进行了严格的抽样检测，其验证数据见表4。

表4 铜槽线实际尺寸检测数据统计表

单位为毫米

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 样品数量 | 宽度尺寸范围 | 数据偏差范围 |
| 100 | 1.400～＜3.000 | -0.021～+0.020 |
| 100 | 3.000～7.500 | -0.030～+0.031 |
| 样品数量 | 高度尺寸范围 | 数据偏差范围 |
| 100 | 1.000～＜3.000 | -0.020～+0.021 |
| 100 | 3.000～4.500 | -0.030～+0.030 |
| 样品数量 | 槽深尺寸范围 | 数据偏差范围 |
| 100 | 0.500～2.500 | -0.021～+0.020 |
| 样品数量 | 槽宽尺寸范围 | 数据偏差范围 |
| 100 | 0.500～＜3.000 | -0.020～+0.020 |
| 100 | 3.000～6.000 | -0.031～+0.030 |

结合生产和客户要求及检测结果，不同类型铜槽线的各尺寸允许偏差应符合表5的规定。

表5 尺寸及其允许偏差

单位为毫米

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 位置 | 尺寸 | 允许偏差a |
| 宽度 A | 1.400～＜3.000 | ±0.020 |
| 3.000～7.500 | ±0.030 |
| 高度 B | 1.000～＜3.000 | ±0.020 |
| 3.000～4.500 | ±0.030 |
| 槽深 C | 0.500～2.500 | ±0.020 |
| 槽宽 D | 0.500～＜3.000 | ±0.020 |
| 3.000～6.000 | ±0.030 |
| a当需方要求允许偏差全为（+）或全为（-）单向偏差时，其值为表中相应数值的2倍。 |

3.2.2 铜槽线外圆角半径和内圆角半径及其允许偏差

对起草单位各产品圆角半径进行严格的抽样检测，其验证数据见表56。

表6 铜槽线圆角半径检测数据统计表

单位为毫米

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 样品数量 | 外圆角半径范围 | 数据偏差范围 |
| 100 | 0.15～＜0.30 | -0.02～+0.02 |
| 100 | 0.30～0.50 | -0.03～+0.03 |
| 样品数量 | 内圆角半径范围 | 数据偏差范围 |
| 100 | 0.15～0.30 | -0.02～+0.02 |

结合生产和客户要求及检测结果，不同类型铜槽线的圆角半径允许偏差应符合表7的规定

表7 圆角半径及其允许偏差

单位为毫米

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 位置 | 尺寸 | 允许偏差a |
| 外圆角半径 R | 0.15～＜0.30 | ±0.02 |
| 0.30～0.50 | ±0.03 |
| 内圆角半径 r | 0.15～0.30 | ±0.02 |
| a当需方要求允许偏差全为（+）或全为（-）单向偏差时，其值为表中相应数值的2倍。 |

3.2.2 铜槽线扭拧度

超导线材用铜槽线通常采用收卷方式进行使用，若收卷过程中线材存在弯曲、扭折缺陷，将严重影响使用，产生大量的加工缺陷，因此铜槽线在使用前需取样进行扭拧度的测量，随机抽取不同厂家各60支样品进行扭拧度检测，检验结果均合格，满足使用要求。

3.3 拉伸性能

铜槽线由于产品形状的特殊性，选用拉伸试验方式进行检验。拉伸性能是衡量铜槽线的关键指标之一，是衡量其抗变形能力和断裂能力的指标，质量稳定、产品合格的铜槽线需要具备一定的抗变形能力，保证客户在使用过程中外不变。拉伸试验可以测得产品的抗拉强度，对于超导线材用铜槽线，只需要满足收卷后线材在后续使用中能顺利放线，且不发生变形，同时铜槽线使用过程是热过程，变形量很小，因此对于铜槽线仅需关注其抗拉强度，对屈服强度和延伸率不做严格要求。

根据收集到的实测数据进行了分析整理和统计，其拉伸性能检测数据见表8，直方图见图1。



图1 不同类型铜槽线抗拉强度分布直方图

表8 铜槽线抗拉强度实际检测统计表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品个数 | 组距MPa | 最小值MPa | 最大值MPa | 平均值MPa | 极差MPa |
| 100 | 10 | 291 | 420 | 357 | 129 |

经过以上验证分析，铜槽线的室温拉伸性能确定如下。

表9 室温拉伸性能

|  |  |
| --- | --- |
| 状态 | 抗拉强度 *Rm*MPa |
| 硬（H04） | 290～420 |

3.4 电性能

超导线材用铜槽线，由于本身产品的特殊性，需要测试铜槽线经过500℃，真空保温2h随炉冷却的常温电阻和低温电阻，一般分别测试铜槽线在300K和10K下的电阻，从而获得RRR值，其计算方法如式（1）所示。根据收集到的实测数据进行了分析整理和统计，其RRR值检测数据见表10，直方图见图2。



图2 不同类型铜槽线RRR值分布直方图

$RRR=\frac{ρ\_{300K}}{ρ\_{10K}}$ 式（1）

式中：

$ρ\_{300K}$——300K温度下的电阻值；

$ρ\_{10K}$——10K温度下的电阻值。

表10 铜槽线RRR值实际检测统计表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品个数 | 组距 | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 极差 |
| 100 | 25 | 302 | 687 | 482 | 385 |

经过以上验证分析，获得了铜槽线经过500℃，真空保温2h随炉冷却到室温的剩余电阻比（RRR），根据不同样品在300K和10K的电阻值，计算得到对应的RRR值，统计结果表明，不同类型铜槽线的RRR值应为300～690。

四、标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利问题。

五、预期达到的社会效益等情况

5.1 项目的必要性阐述

根据“十四五原材料工业发展规划”第三章“促进产业供给高端化”的第三节“突破关键材料”和第四节“提高产品质量”，明确指出坚持材料先行和需求牵引并重，聚焦国防建设、民生短板和制造强国建设重大需求，滚动制定关键材料产品目录，制定发布技术路线图，其中提到发展超导材料、智能仿生、增材制造材料等，推动新的主干材料体系化发展，强化应用领域的支持和引导，同时强调加强质量管理和过程管控，持续开展原材料工业质量提升行动，提高产品质量的稳定性、可靠性和适用性，推广先进成型和加工方法、在线检测、智能制造等，建立满足应用需求的生产过程控制及质量管控体系。

高端医疗装备Magnetic Resonance Imaging（MRI）所使用的核心关键材料为超导线材，其优异的热稳定性、高尺寸精度、高磁场均匀性受到了各大医疗企业的高度认可，该超导线材为Wire In Channel（WIC）线材，是将铜槽线和超导复合线进行镶嵌焊接和编织绝缘而获得，超导线材用铜槽线具有剩余电阻比(RRR)高、加工尺寸精度高、强度大、单根长度长、尺寸稳定性高、清洁度等特点，大批量用于WIC超导线材。近几年随着国内外MRI医疗装备行业的蓬勃发展，每年超导线材用铜槽线需求量大约2500吨左右，目前铜槽线仍依赖从国外进口，供应商单一，存在供不应求、质量不稳定等风险，如果一旦遭遇国外的封锁，将严重阻碍我国MRI高端医疗装备的全面发展和全球布局，不利于我国抢占MRI全球技术和产业竞争的战略高地。与此同时，铜槽线的采购无统一的国际标准或行业标准支撑，仅根据各家客户提出的技术要求来组织生产，以确保产品性能满足客户要求，若能够建立行业标准，通过标准加以约束，产品质量将得到大幅度提升，从而提高产品成品率，降低生产成本，提高产品竞争力。纵观超导线材用铜槽线整个行业，无相应的行业标准去支撑和指导该产品良性发展，制定一份关于超导线材用铜槽线的行业标准，引领行业进度，有利于我国超导产业和高端医疗装备的进一步升级和推广，高效良性发展，抢占更多的全球市场份额。

5.2 项目的可行性阐述

西部超导公司是全球唯一的铌钛（NbTi）棒、超导线材、超导磁体的全流程的生产企业，是国内唯一的批量化生产MRI用WIC线材的生产企业，公司拥有一流的超导线材批量化制备生产线，其超导线材产品在市场份额、生产设备、产品种类、工艺技术、质量控制等多方面始终处于超导线材行业的领先地位，是我国国内现阶段最具影响力的超导线材加工企业。广东中实金属有限公司作为超导线材用铜槽线的生产企业，建立了多条完整的铜槽线生产线，整个产线配备先进的检测设备，全面保障铜槽线产品质量的稳定性，公司始终坚持客户至上，技术创新的理念，目前已开发了多款类型的超导线材用铜槽线，实现了批量化的生产，在铜槽线行业标准制定过程中可提供丰富的产品生产经验及性能检测数据，有利于完善标准的各项内容。最后，西部超导公司作为本标准的牵头单位，将为本标准的制定提供充足的经费支持，全力保障本标准的制定。

5.3 标准的先进性、创新性、标准实施后预期产生的经济效益和社会效益

本标准的制定有助于超导线材用铜槽线产品进一步转型升级和国产化批量应用，促进新产品、新技术的发展，有利于高端医疗装备产业的新布局和全面发展，提升铜槽线的产品质量和批量制备水平，完善我国超导线材用铜槽线性能试验的标准体系，提高检测结果准确性，保障超导新材料的研发进程。

六、采用国际标准和国外先进标准的情况

目前尚未查询到国内外已发布实施的用于超导线材用铜槽线专用技术标准。本标准的制定满足超导线材用铜槽线的技术要求，填补了国内空白。

七、与现行法律、法规、强制性国家标准及相关标准协调配套情况

本标准符合现行法律、法规的要求，并与其他同类国家标准、国家J用标准、行业标准无冲突、重叠和不协调之处。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

九、作为强制性或推荐性标准的建议

本标准建议不作为强制性标准，而建议作为推荐性行业标准发布。

十、贯彻标准的要求和措施建议

本标准是根据超导线材行业需求、订货技术要求和实际生产使用情况制定，建议相关单位组织专项标准宣贯会进行系统学习。本标准发布后，各企业单位应积极宣传和贯彻，并立即采用新标准订货，以保证产品质量，满足国内、外市场及用户的需要。

十一、废止现行有关标准的建议

无。

十二、其他主要内容的解释和其他需要说明的事项

无。

《超导线材用铜槽线》行业标准编制组

2024年6月