

《铜-钢复合板带金属复合质量及各向异性的测定 冲杯试验方法》

（预审稿）——编制说明

一、工作简况

1. 任务来源

根据 2020 年 8 月《工业和信息化部办公厅关于印发 2020 年第二批行业标准制修订和外文版项目计划》（工信厅科函〔2020〕114 号）文件，《铜-钢复合板带金属复合质量及各向异性的测定 冲杯试验方法》行业标准（计划号：2020-0210T-YS），由宁波宇能复合铜带有限公司牵头负责起草，完成年限为 2021 年。

由于 2020 年主起草单位受到疫情的严重影响，导致该企业无法继续承担完成该标准项目的主起草任务，并与 2020 年 9 月正式向全国有色金属标准化技术委员会提出申请放弃负责该标准制定计划的起草任务工作。

2023 年 8 月，由浙江松发特种新材料有限公司正式向全国有色金属标准化技术委员会提出重启的申请，承担（工信厅科函〔2020〕114 号）中《铜-钢复合金属复合质量及各向异性的检验 冲杯试验方法》（计划号：2020-0210T-YS）行业标准牵头起草任务，负责该标准项目的试验样品提供和试验方法的各项协调工作。完成年限为 2024 年 6 月。

2. 立项目的和意义

铜-钢复合金属材料的研制生产经过近十余年来的市场推广应用，产品已经被消费市场不断的采纳认可。在铜-钢复合金属板带产品生产及产品应用中，产品的复合质量及各向异性是衡量复合金属内在复合质量合格率及其冲杯体各向异性的两项主要技术指标。在已颁布执行的铜-钢复合金属材料的相关产品标准 YS/T 1045《装饰装潢用铜-钢复合薄板和带材》、YS/T 1104《深冲压用铜-钢复合薄板和带材》、国家标准 GB/T 36162《铜-钢复合薄板和带材》中，均无检验这些技术指标的试验方法规定。

如何进行复合金属产品的复合质量及各向异性检测，并对复合金属间复合质量进行研判显得尤为重要，也是检测复合金属产品内在质量关键所在。但是，目前尚缺乏与产品密切相关的复合金属产品复合质量以及各向异性规范的试验方法，目前也尚无可以直接借鉴的国内外检测方法标准，不利于铜-钢复合金属产品的市场深化应用推广和标准化生产。所以，需制定统一规范的铜-钢复合金属间复合质量及各向异性的试验方法标准。

该检测试验方法标准在制定内容设计上，针对复合质量和各向异性率的测量计算，在冲杯试验方法基础上进行大胆创新尝试，如：观察冲杯体外观形貌（圆角弧区域裂纹缺陷）判定复合质量；准确测量冲杯体轧制方向和宽度方向的峰高，计算各向异性率；对冲杯体高度测量要求做出规定：将冲杯体径向和底部平面进行固定，同时可自由轴向转动冲杯体而保证冲杯体底部平面倾斜度为 0 度，确保测量高度的准确性，转动冲杯体一周测量冲杯体圆周高度尺寸，避免了目前采用卡尺或高度尺测量冲杯体更大尺寸数据无重复性和再现性问题。填补了复合金属质量检测、冲杯体高度尺寸测量准确度、各向异性率的检测方法的空白。

该检测试验方法的制定，符合工业和信息化部办公厅 国防科工局综合司关于印发《军用技术转民用推广目录（2018 年度）》的通知 工信厅联军民〔2018〕82 号，其目录中的[第二章、推荐目录（一）先进材料领域的第 14 项“铜钢复合材料制造技术”]；《新材料标准领航行动计划（2018-2020 年）》（国质检标联〔2018〕77 号“二、主要行动的（七）提高新材料军民标准通用化水平”中“逐步统一军民材料及制品规范、测试方法，材料生产过程控制等相关标准，提升统一军工一体化通用

化程度及工程应用水平”；以及《国家标准化体系建设发展规划（2016—2020 年）》国办发〔2015〕89 号中“三、重点领域 专栏 2 工业标准化重点 完善有色金属等原材料类工业标准”各国家国家政策专项中内容精神要求。

3. 主要参加单位和工作成员所作的工作

3.1 主要参加单位情况

本标准负责起草单位**浙江松发特种新材料有限公司**，是专业设计研发生产特种新型金属复合材料、具有年产 1.5 万吨国内领先的多金属复合生产基地。公司拥有多项技术成果及发明专利，生产技术成熟，通过了 ISO9001 质量管理体系认证、14000 环境管理体系认证、生产标准化企业和 6S 管理，复合材料产品已通过 SGS 环保检测，已获得国家军工三级保密资格证书、GJB9001C 军工产品质量体系认证，目前公司已提出武器装备承制资格二方认证申请。生产的铜-钢复合材料牌号品种达 20 余个、几十个规格组。产品覆盖军工、低压电器、装饰装潢、通讯电子、家用电器、服饰、五金等领域，销售网络覆盖全球。

公司拥有自主知识产权的 1000 复合板带轧机、900 清洗线、钟罩式退火炉、950 六辊精轧机、750 二十辊精密轧机、1000 平整机、900 剪切机、750 剪切机、横切机、重卷机、高精度轧辊磨床、连续退火炉等主要生产设备。CMT5504 电子万能试验机、HV-1000 自动显微硬度计、ECT1604Z 自动杯凸试验机(加冲杯模具完成冲杯试验)、HRS-150 数显洛氏硬度计、Speacture LAB 直读光谱仪、M-4XC 金相显微镜、分光光度计等试验检测设备。

公司技术研发中心现有各类员工 50 余人，其中包括专业技术人员 6 余人，管理人员 10 余人，大专及本科以上学历者达到 60%，外聘业内技术专家指导企业标准化的技术管理工作。与中南工业大学、上海应用技术大学、深圳精宇航检查技术有限公司、中铝材料应用研究院有限公司苏州分公司、绍兴市质量技术监督检测院、国家铜铅锌及制品监督检验中心、中铝洛铜检测中心建立了技术合作关系，为公司铜-钢复合板带产品提供试验检测验证平台，确保铜-钢复合产品及检测方法的试验检测数据可靠性，为铜-钢复合板带检测试验方法标准的试验方法确立提供可信赖的制定依据。

中铝材料应用研究院有限公司苏州分公司，中铝材料应用研究院有限公司是中铝集团在北京未来科技城规划建设的 15 家重要骨干中央企业高层次人才创新创业单位之一，是中关村高新技术企业；设立有“中国铝业公司-北京科技大学联合工程研究中心”产学研合作平台；建立有院士专家工作站，已签约 4 位国家特聘海外专家，5 位知名大学兼职教授，每年定期在研究院实地指导项目；长期与英国布鲁内尔大学、挪威科技大学、丹麦科技大学以及国内的中南大学、东北大学、大连理工大学、南京理工大学等行业内一流高等学府、院校保持密切联络，在学术交流、人才联合、科研项目开展等方面开展广泛、开放的合作，共同促进有色金属科研事业的发展。

中铝材料院设立有航空航天材料所，轻量化材料所、熔铸技术所、应用技术所、仿真技术所，专注于铝、镁、钛等合金材料领域的研发和技术服务工作，能够完成应用研究的全链条的材料研究工作。中铝材料院试验检验中心是通过 CNAS 认可的专职检测机构，拥有完善的测试分析仪器设备与专业的检测人才队伍，业务范围覆盖金属材料的物理性能测试、化学成分分析、显微组织观察、微区相成分和晶体学分析等，部分检测设备具备材料研究领域最高水平。

中铝材料院试验检验中心具有丰富的金属材料冲杯试验测试分析能力，服务集团内外部企业进行大量相关测试，提供公正、准确的测试结果。

安徽国家铜铅锌及制品质量监督检验中心，安徽国家铜铅锌及制品质量监督检验中心，为铜陵市政府直属事业单位。拥有国家铜铅锌质检中心、国家印制电路板质检中心两个“国字号”招牌，具备满足各类试验条件的实验室面积 7700 平方米(含办公)，拥有各类高尖端仪器设备 300 多台(套)。现有金属材料、矿产品、电线电缆、印制电路板等四大类国家级检验资质，共 121 个产品、361 个

参数：12 大类 262 个产品 2705 个参数的省级检验资质。

拥有 3 个省部级以上平台：国家工信部铜及铜基新材料产业示范基地公共技术服务平台、安徽省中小企业公共服务示范平台、安徽省大型科学仪器设备共享服务平台，是中国质量认证中心（CQC）签约实验室，浪潮集团、上海通用汽车、方正科技集团等认可的第三方实验室，安徽省有色金属标委会秘书处承担单位。

浙江红旗机械有限公司，浙江红旗机械有限公司（国营 941 厂），系省属地方军工企业，具备齐全的军工科研生产资质。公司始建于 1965 年，现为浙江省军工集团股份有限公司全资子公司，行业管理隶属浙江省国防科技工业办公室。公司已取得了装备承制单位资格和武器装备质量体系认证证书，国防科工局颁发的武器装备科研生产许可证，通过了武器装备科研生产单位三级保密资格单位认证，军工系统安全标准化二级单位资格，是浙江省军民融合示范企业、银行信用“AAA”级企业。主要从事多种口径普通弹、特种弹以及各种类型防暴弹的研发制造、防弹材料检测认证，设计、制造和检测技术水平在国内处于领先地位。

公司重视科研生产工作，先后成立了技术中心、防弹材料检测中心、科学技术协会，获得了“红旗机械特种装备省级高新技术企业研究开发中心”证书。其中防弹材料检测中心获中国合格评定国家认可委员会（CNAS）和国防科技工业实验认可委员会（DILAC）的双重认可资质。秉承“军工产品，质量第一”的理念，一贯高度重视产品质量和安全生产，不断加强企业基础建设，积极发展与国内装备、质量监督、科研院校等部门的合作，在安全、质量、研制和生产保证能力上得到了广泛认可。

近几年来，是浙江松发特种新材料有限公司的铜-钢覆合材料主要合作应用企业之一，应用牌号 H90/F11/H90、厚度 1.37mm、0.99mm，牌号 H90/F18/H90、2.55mm、2.65mm、3.1mm、3.2mm 近 1200 余吨。铜-钢覆合材料产品质量稳定，在制弹工艺及试弹过程中未发现功能和实效性质量问题。

云南模二机械有限责任公司，云南模二机械有限责任公司，持有武器装备科研生产许可证、武器承制单位资格证、国军标质量体系认证证书、武器装备科研生产单位二级保密资格证书。是定点生产 I 类产品的地方军工企业，原隶属于云南省国防科工局，企业改革后，现隶属于云南省戎合投资控股有限公司的国有全资公司，主要从事 I 类产品、汽车配件、机械加工、专用设备制造等。

公司分新老厂两地，老厂主要用于 I 类产品生产，新厂主要从事 I 类产品科研、民品生产、机械加工、设备制造等。现有从业人员 500 余人，其中管理及专业技术人员 151 人，中高级职称 36 人，公司不断加大 I 类产品、民品科研开发，积极进行生产线技术更新改造，其中：I 类产品生产由建厂时期的单一产品一种规格一条生产线形成了系列化、多品种、多条线、大批量，面向国内装备和对外外贸出口生产企业，同时已具备科研、生产一体化的能力，I 类产品生产设备、工装等均可自行设计自行制造。现主要生产的 I 类产品有 4 个系列、10 多个品种。I 类产品的开发和外贸出口，为企业站稳市场奠定了良好的基础，特别是 I 类产品外贸销售带动了 I 类产品生产线设备加工出口，为企业增添了新的活力和提升了知名度，有效促进企业的发展。

I 类产品主业方面：瞄准国家战略以及外贸需求，坚持军民结合、寓军于民，自主创新，开展各型产品的研究开发，对制式产品加强持续技术创新研发，提高战术性能，对特种用途产品不断增强应用基础研究开发，赋以新的功能，将公司建设成为 I 类产品研发生产专业化企业。

做精 I 类产品，实现多品种，做到国内外现有的大多数弹种都能生产，要进一步开发 I 类产品系列产品，研发新型弹种，全面提升新型特种产品研发生产水平；拓展非战争军事行动装备领域，根据军队以及武警、公安维稳和处突、制暴等需要，发挥特种产品和普通产品的优势，研制各型训练产品和反恐防暴特种产品，形成具有自己特色和核心技术的产品。

抓住军改机遇，调整产品结构，加大新产品开发投入，加快新产品开发步伐，集中优势力量完成新产品开发工作，积极参与国内装备竞标订货需求，实现内外两个市场互补联动，力争装备订货达到 30% 的目标。近几年来，是浙江松发特种新材料有限公司的铜-钢覆合材料主要合作应用企业之

一，应用牌号 H90/F11/H90、厚度 1.37mm、0.99mm，牌号 H90/F18/H90、厚度 3.1mm、3.2mm 近 800 余吨。铜-钢覆合材料产品质量稳定，在制弹工艺及试弹过程中未发现功能和实效性质量问题。

3.2 主要起草人工作情况

整个标准起草过程中各参编单位通力合作，给予了大力的支持帮助。由中铝材料应用研究院有限公司苏州分公司、上海恒克检测技术有限公司进行验证试验、国家铜铅锌及制品质量监督检测中心进行了资料收集、标准审核工作。

标准的主要起草人工作分工见表 1。

表 1 标准编制组成员及职责

起草人姓名	职责及分工
陈汉文	标准编制组负责人，负责标准方案及试验方案的编制确认，整体工作指导、测试方案审定、各起草单位的组织协调、标准文件和编制说明编写。
孙巍、韩逸	测试方案及试验数据确认。
钱维锋、张慧琳	标准测试方案讨论确认及执行、样品试验验证，试验数据统计分析。
陈秀芹	协助标准方案制定、试验方法调研、资料搜集、数据整理分析等。
马新献、保建明	参与试验方案及测试结果讨论，试验验证数据确认。
毛超杰、孙逸斌	试验用圆片的制备及分发，试验数据图片整理编辑，收集客户单位反馈意见及整理。

4. 主要工作过程

4.1 预研阶段

2018 年 4 月，宁波宇能复合板带有限公司根据需方应用工艺过程的技术需求，已经开始了对该标准项目进行前期调研工作。通过生产全过程的质量监控检测，对复合产品同时进行弯断试验、杯突试验及弹壳冲孟结果的比对验证，其中，弹壳冲孟试验后试样形变的形貌状况能够更直观真实地反应出产品存在的内在质量缺陷，结合需方的工艺过程技术要求进行了统计分析梳理，并对国内外相关标准进行检索。如何进行复合金属产品的各向异性检测及复合金属间复合质量进行研判显得尤为重要，也是检测复合金属产品内在质量关键所在。但是，目前尚缺乏与产品密切相关的复合金属产品复合质量以及各向异性规范的试验方法，目前也尚无可以直接借鉴的国内外检测方法标准。因此，开始了该检测方法的立项预研。

通过近一年的不断试验比对，认为冲杯试验后的外观形貌与弹壳冲孟后形貌高度一致，最终决定采用冲杯试验方法作为复合金属产品的复合质量及各向异性检测方法。并在 2019 年 3 月 14 日与中铝材料应用研究院的苏州分公司合作，针对 H90/F11/H90 0.52× ϕ 55mm、H90/F11/H90 0.99× ϕ 55mm、H90/F11/H90 1.1× ϕ 55mm、H90/F11/H90 1.37× ϕ 55mm、H90/F18/H90 3.1× ϕ 55mm 等不同牌号和圆片规格，进行了 5 批次冲杯试验初步探索。

通过冲杯试验，梳理出铜-钢复合板带软状态（O60）产品在冲杯试验后的个别试样外部形貌的圆弧处，发生了不同程度的裂纹（详见图 1 a）~d）；通过观察冲杯试样外部形貌状况，真实反映出由于试样材料的取样工位控制或生产过程中存在工艺环节控制不当，其存在的内在质量问题会在冲杯变形后显现出冲杯体外底部裂纹缺陷形貌，为该标准项目立项论证累了足够的原始检测数据；2019 年 4 至 8 月又相继进行了 9 批近 100 片次不同牌号规格的冲杯试验，为该项目奠定了坚实的技术基础。



图 1 冲杯试验后冲杯体外底部裂纹缺陷形貌图

4.2 标准立项

2019 年 4 月桐乡标准年会上，由宇能宇能复合铜带有限公司向全国有色标准化技术委员会重金属分标委会全体委员，提交了《铜-钢复合板带金属复合质量及各向异性的测定 冲杯试验方法》项目建议书、草案及立项报告等材料申请立项，经全体委员论证同意立项。

2020 年 8 月，工业和信息化部办公厅发布了《工业和信息化部办公厅关于印发 2020 年第二批行业标准制修订和外文版项目计划》下达制定《铜-钢复合板带金属复合质量及各向异性的测定 冲杯试验方法》行业标准任务，【工信厅科函〔2020〕181 号】文件，（计划号：2020-0210T-YS），项目完成时限为 2021 年 11 月，技术归口单位为全国有色金属标准化技术委员会。

2020 年，由于受到疫情的严重影响，该标准项目的主起草单位宁波宇能复合铜带有限公司于 2020 年 9 月正式向全国有色金属标准化技术委员会提出申请放弃负责该标准制定计划的起草任务工作，致使该标准项目计划处于停顿状态。

2023 年 8 月，浙江松发特种新材料有限公司正式向全国有色金属标准化技术委员会提交了重启承担该行业标准起草任务的申请，负责该标准项目的试验样品提供和方法验证的各项协调工作。于此同时，为了确保该标准方法重启后能够在 2024 年上 6 月如期顺利完成起草的全部工作任务，成立了该标准项目编制小组，并建立了标准编制工作微信群；标准项目前期的试验样品圆片的制备（详见表 2）及分发、试验方案编制和冲杯试验方法的基础试验工作研究各参与单位也相继启动。

表 2 冲杯试验用样品基本信息

牌号	状态	厚度 mm	圆片直径，mm			备注	
			52	55	60		
			圆片数量，片				
H65/IF/H65	软 (060)	0.15	60	—	基础试验		
H65/IF/H65		0.5	—	60		—	
T2/IF/T2		1.1	—	—		60	
H90/F18/H90*		2.0	—	60		—	
		3.1	—	—		60	
H65/IF/H65	软 (060)	0.15	6	6	—	验证试验	
		0.4	6	6	—		
		0.5	6	6	—		
T2/IF/T2		0.45	6	6	—		
		0.6	6	6	—		
		0.75	6	6	—		
		0.9	6	6	—		
		1.1	—	6	6		
		1.45	—	6	6		
		2.0	—	6	6		
H90/F11/H90*		1.07	6	6	6		
		1.37	6	6	6		
H90/F18/H90*		3.1	—	6	6		
注：1. * 圆片为弯断合格和不合格的各 50%，或不合格不低于 40%。							
2. 材料表面要求光亮、清洁，无划伤、擦伤、挫伤、露钢、氧化、油污、肉眼可见气泡等缺陷。							

4.3 起草阶段

4.3.1 任务落实

2023 年 9 月 25 日~27 日, 在重庆由全国有色金属标准化技术委员会组织召开的第一次标准工作会, 进行该标准草案进行了讨论和任务落实。

4.3.2 试样制备及试验研究

2023 年 8 月~9 月, 编制小组各参与单位开展了该标准的冲杯基础试验研究工作。共收集制备了 T2/IF/T2、H65/IF/H65、H90/F11/H90、H90/F18/H90 四大类牌号的铜-钢复合板带样品共计 12 个规格, 厚度为 0.15mm~3.2mm, 圆片制备规格为: ϕ 52mm、 ϕ 55mm、 ϕ 60mm, 共计 1000 余片, 分批次寄发至各试验参与单位。

标准编制小组的各参与单位收到试验样品后, 立即展开了 5 个厚度规格组的基础试验研究, 获得不同规格尺寸圆片所对应的压边力及冲压速率参数的优选组合。

冲杯方法基础试验内容主要包含:

1) 固定初始冲模速率 10mm/min, 对不同尺寸规格的试样圆片进行不同压边力 (1kN、2kN、5kN、10kN、15kN) 的冲杯试验, 试验方案见表 3。绘制压边力与冲杯高度各向异性率的曲线关系图, 得出适宜不同厚度圆片的压边力。

2) 固定初始压边力为 10kN, 对不同尺寸规格的试样圆片进行不同冲模速率 (5mm/min、10mm/min、15mm/min、20mm/min、25mm/min) 的冲杯试验, 试验方案见表 4。绘制冲模速度与冲杯高度各向异性率的曲线关系图, 得出适宜不同厚度圆片的冲模速率。

23 年 9 月 25 日~27 日重庆任务落实会后, 根据会议精神, 进行了冲杯基础试验结果等数据信息进行调研确认及对接, 试验结果的数理统计分析, 编制了冲杯验证试验用圆片规格、压边力、冲压速率参数组合参数表, 详见表 5 所示。

2023 年 10 月~12 月, 编制小组开展大量的冲杯试验验证研究工作。

试验内容主要包含: 不同圆片尺寸规格试样所对应的压边力及冲压速率对铜-钢复合板带材料的

各项异性率的影响的相关验证和实验室间的比对试验。通过对冲杯验证试验的数理统计分析，形成了预审稿标准标准文本和编制说明。

表 3 不同压边力冲杯试验方案

序号	牌号	圆片参数			冲模参数		凹模参数		冲压速率 mm/min	压边力, kN					关系图	优选压边力
		厚度	直径	A/B /C/ D面	直径	圆角半径	直径	圆角半径		1	2	5	10	15		
		mm			mm	mm	mm	mm		各向异性率, Z, %						
1	H65/IF/H65	0.15	52		32	2.5	32.35	2.5	10						a-1	
2	H65/IF/H65	0.5	55		32	2.5	33.35	4.0	10						a-2	
3	T2/IF/T2	1.1	60		32	6.0	35.00	7.0	10						a-3	
4	T2/IF/T2	2.0	55		32	4.0	37.00	8.0	10						a-4	
5	H90/18A1/H90	3.1	60		32	9.0	39.8	9.0	10						a-5	
注：1 各承担试验单位每组试验不少于正 A 反 B 面（或正 C 反 D 面）各 3 次（及 3×2 次），5 个压边力共计 30 次。 2 以上每个数据为 6 个平行试样实测结果的算术平均值，精确至 0.01 mm。 3 以上试验的润滑油均初定 46#工业级白油。																

表 4 不同冲压速率冲杯试验方案

序号	牌号	圆片参数		A/B/ C/D 面	冲模参数		凹模参数		压 边 力 KN	冲压速率, mm/min					关系 图	优选 压边 力
		厚度	直径		直径	圆角 半径	直径	圆角 半径		5	10	15	20	15		
		mm			mm	mm	mm	mm		各向异性率, Z, %						
1	H65/IF/H65	0.15	52		32	2.5	32.35	2.5	10						b-1	
2	H65/IF/H65	0.5	55		32	2.5	33.35	4.0	10						b-2	
3	T2/IF/T2	1.1	60		32	6.0	35.00	7.0	10						b-3	
4	T2/IF/T2	2.0	55		32	4.0	37.00	8.0	10						b-4	
5	H90/18A1/H90	3.1	60		32	9.0	39.8	9.0	10						b-5	
注：1 各承担试验单位每组试验不少于正 A 反 B 面（或正 C 反 D 面）各 3 次（及 3×2 次），5 个压边力共计 30 次。 2 以上每个数据为 6 个平行试样实测结果的算术平均值，精确至 0.01 mm。 3 以上试验的润滑油均初定 46#工业级白油。																

表 5 冲杯验证试验用圆片规格、压边力和冲压速率参数组合

厚度, mm	0.15		0.4、0.45、0.5 0.6、0.75、0.8、0.9		1.07、1.1		1.37、1.45、2.0		3.1、3.2	
圆片直径, mm	52	55	52	55	55	60	55	60	55	60
压边力, KN	1	2	2	5	2	5	5	10	5	10
冲压速率, mm/min	15	5	15	10	15	10	20	15	25	15

4.4 征求意见阶段

4.5 审查阶段

4.6 报批阶段

二、编制原则

1) 本标准根据《中华人民共和国标准化法》要求，在编写方式上执行 GB/T1.1 和 GB/T1.3 的规定，并按《有色金属加工产品国家标准、行业标准编写示例》的要求进行编制。

2) 标准规定的检测方法，在同一实验室检测结果具有长期稳定性，不同实验室之间的检测结果具有一致性，能有效地规范铜-钢复合金属质量及各向异性的测定方法，力求做到方法标准的合理性与实用性。

3) 根据国内铜-钢复合金属生产企业和使用企业的具体情况，突出标准方法的实用性。对试验

设备及试验条件提出了明确要求，完善试验条件及试验步骤、检测范围能普遍满足行业对铜-钢复合金属质量及各向异性的测定要求。

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

1 标准主要技术内容的确定依据

1.1 范围

适用于厚度为 0.15mm~3.2mm 的铜-钢复合板带金属的冲杯试验。其他复合金属板带可参照本标准。规定了铜-钢复合板带金属的冲杯试验方法步骤，冲杯后复合金属的复合质量、各向异性的判定和计算方法。

1.2 主要技术内容

1.2.1 对铜-钢覆层金属裂纹进行了定义，并辅助试样裂纹图片说明。

1.2.2 符号与说明：对试样圆片、冲杯体、冲头、冲模、冲杯体峰高及谷高、制耳率所涉及的 20 个符号，以图+表格形式对应列出并说明。

1.2.3 试验原理：从铜-钢复合金属薄板（带）上取圆片试样，用圆柱形冲头将试样夹紧压入规定的冲模中形成圆柱形杯体，取出冲杯体并观测冲杯体外部形貌及冲杯体过渡圆弧区域形貌，研判复合质量，测量杯体的峰高和谷高计算各向异性率。

1.2.4 试验设备及测量工具：对试验用设备及冲杯模具规格尺寸配制要求进行了规定，试样尺寸精度及冲杯体测量要求及准确度进行了规定，确保试验过程可靠性及试验数据的准确性。

1.2.5 试样：对试验用圆片试样的制备、尺寸及偏差、表面质量及数量进行了规定。

1.2.6 测量工具：为了确保冲杯体的尺寸测量的准确性，特别规定了冲杯后的冲杯高度尺寸的测量应优先选用智能化数据采集与输出的测试装置。

1.2.7 试验步骤：从试样圆片测量、模具安装、润滑、冲杯过程、圆片规格对应与压边力及冲压速率组合、冲杯体尺寸及合格试验冲杯体尺寸测量要求均详细进行了规定。

1.2.8 试验结果：对冲杯体外观形貌进行检查及判定要求进行规定，为了方便对复合质量的判定，选用了冲杯体外观形貌具有特定缺陷的图片辅助进行；对各项异性率所涉及的计算（列出了具体数学计算公式 7 个）进行了规定。

1.2.9 试验报告内容：除对标准编号、试样、牌号、状态、规格、压边力、冲压速率、复合质量判定、各向异性率等报告内容进行了详细规定外，还规定了报告的可选项，如：峰高数量及方位、冲杯体形貌、冲杯体外径、润滑剂、冲模和冲头参数等内容，以辅助对试样在生产过程中的质量控制进行分析。

2 主要试验和验证情况分析

2.1 基础试验

2.1.1 压边力试验

选取 5 个厚度带材，按照试验方案表 3 分别进行冲头直径 32mm，圆角半径 2.5mm、4.0mm、6.0mm、8.0mm、9.0mm 试验。圆片厚度：0.15mm、0.5mm、1.1mm、2.0mm、3.1mm，固定初始冲模速率 10mm/min，进行不同压边力 1KN、2KN、5KN、10KN、15KN 冲杯试验。试验结果数理统计表 6~表 10，压边力与冲杯高度各向异性率曲线图 2~图 6，选用各向异性波动大的区域作为不同厚度圆片的压边力如下：

0.15mm 厚度的圆片压边力选择 1~2KN, 见图 2-a) 和图 2-b) 红色划线区间所示；

0.5mm 厚度的圆片压边力选择 2~5KN, 见图 3-a) 和图 3-b) 红色划线区间所示；

1.1mm 厚度的圆片压边力选择 2~5KN, 见图 4-a) 和图 4-b) 红色划线区间所示；

2.0mm 厚度的圆片压边力选择 5~10KN, 见图 5-a) 和图 5-b) 红色划线区间所示；

3. 1mm 厚度的圆片压边力选择 5~10KN 为宜, 见图 6-a) 和图 6-b) 红色划线区间所示。

表 6 0.15mm 圆片直径 52mm 冲压速率 10mm/min 不同压边力基础试验

压边力 KN	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %	压边力 KN	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %
1	14.04	13.68	2.67	16.67	5	15.13	14.62	3.50	17.51
	14.19	13.77	3.08			14.54	14.21	2.37	
	14.36	14.01	2.48			15.17	14.66	3.44	
	14.34	13.90	3.17			15.39	14.86	3.58	
	14.18	13.90	2.02			-	-	-	
	14.76	14.31	3.14			-	-	-	
2	14.23	13.76	3.40	16.79					
	14.51	14.05	3.27						
	14.46	14.14	2.27						
	15.06	14.56	3.44						
	15.13	14.60	3.63						

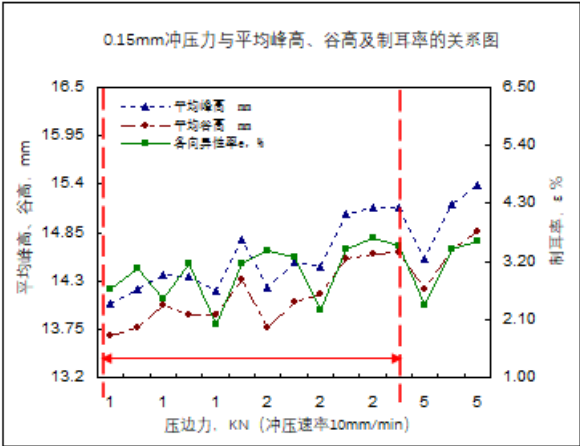


图 2-a)

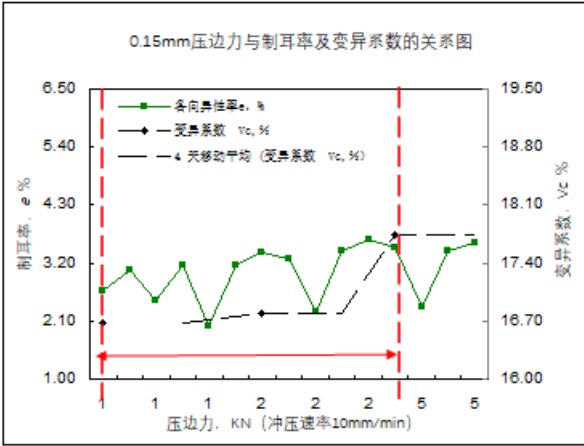


图 2-b)

表 7 0.5 mm 圆片直径 55mm 冲压速率 10mm/min 不同压边力基础试验

压边力 KN	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %	压边力 KN	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %
1	16.95	15.85	6.94	9.49	5	17.19	16.16	6.39	7.98
	16.98	15.83	7.30			17.17	16.07	6.85	
	16.95	15.98	6.07			17.04	16.16	5.45	
	16.98	16.05	5.79			17.14	16.07	6.66	
	16.91	15.90	6.34			17.13	16.07	6.65	
	16.97	15.83	7.20			17.16	16.08	6.73	
2	17.15	16.09	6.61	7.42	10	17.24	16.09	7.17	9.66
	17.09	16.08	6.32			17.07	16.14	5.77	
	17.25	16.08	7.28			17.00	16.05	5.92	
	17.36	16.17	7.36			17.09	15.95	7.15	
	17.05	16.07	6.15			17.24	16.09	7.14	
	17.13	16.07	6.58			17.13	16.07	6.65	

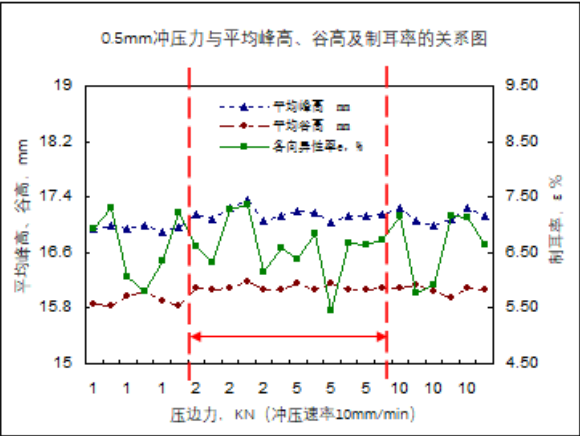


图 3-a)

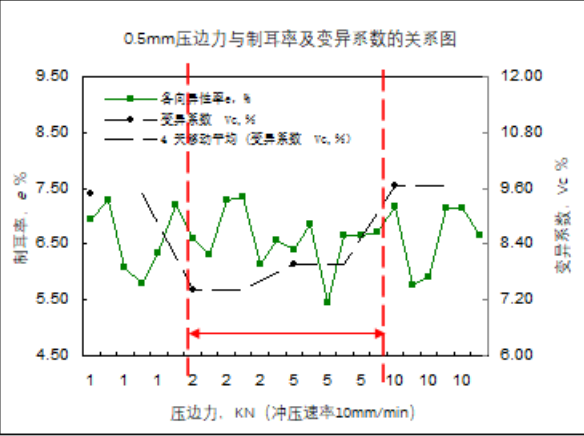


图 3-b)

表 8 1.1mm 圆片直径 60mm 冲压速率 10mm/min 不同压边力基础试验

压边力 KN	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %	压边力 KN	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %
2	22.55	21.79	3.50	9.68	10	23.05	22.12	4.20	11.75
	22.56	21.70	3.96			23.04	22.15	4.02	
	22.45	21.76	3.17			22.49	21.62	4.02	
	22.46	21.61	3.93			22.82	22.10	3.26	
	22.79	22.05	3.36			22.81	22.09	3.26	
	22.49	21.78	3.26			22.90	21.98	4.17	
5	22.56	21.86	3.18	9.75	15	22.41	21.70	3.27	8.24
	22.73	21.80	4.27			22.63	21.76	3.98	
	22.69	21.88	3.70			23.16	22.28	3.97	
	22.65	21.88	3.52			22.96	22.20	3.42	
	22.80	21.95	3.87			23.00	22.23	3.46	
	22.83	21.99	3.82			23.06	22.23	3.72	

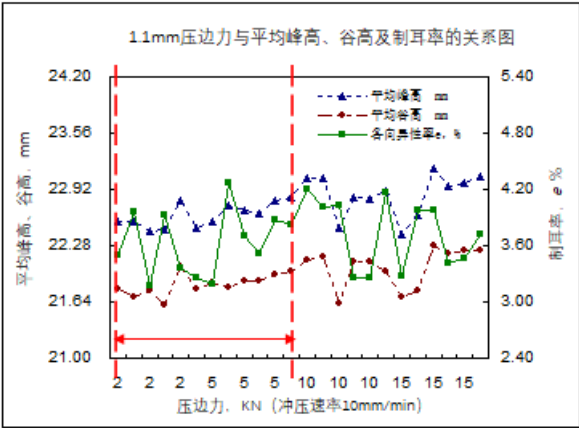


图 4-a)

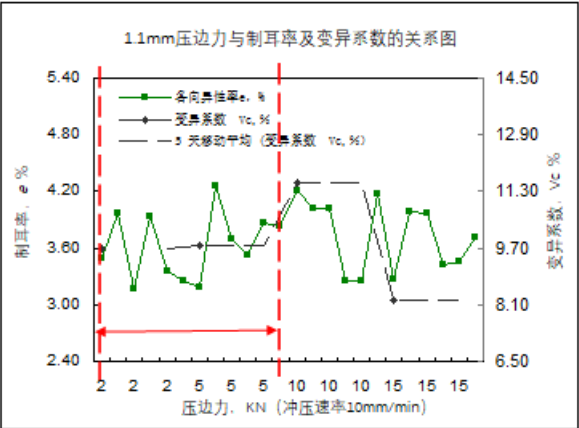


图 4-b)

表 9 2.0mm 圆片直径 55mm 冲压速率 10mm/min 不同压边力基础试验

压边力 KN	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %	压边力 KN	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %
2	19.04	18.65	2.09	12.28	10	19.13	18.54	3.23	7.56
	19.28	18.88	2.11			19.08	18.53	3.00	
	19.14	18.74	2.16			19.07	18.58	2.65	
	19.01	18.56	2.42			19.14	18.61	2.88	
	19.58	19.05	2.75			19.10	18.50	3.22	
	-	-	-			19.04	18.51	2.87	
5	19.28	18.83	2.40	7.47	15	19.08	18.62	2.44	8.54
	19.25	18.87	2.05			19.24	18.77	2.48	
	19.43	18.93	2.59			19.54	19.02	2.75	
	19.06	18.62	2.34			19.23	18.75	2.54	
	19.08	18.63	2.40			19.18	18.63	2.98	
	19.12	18.67	2.42			-	-	-	

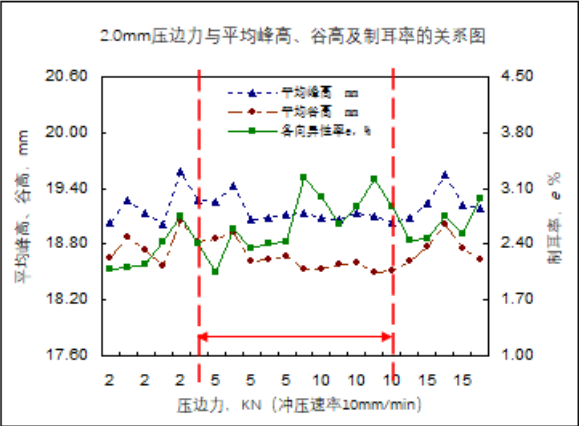


图 5-a)

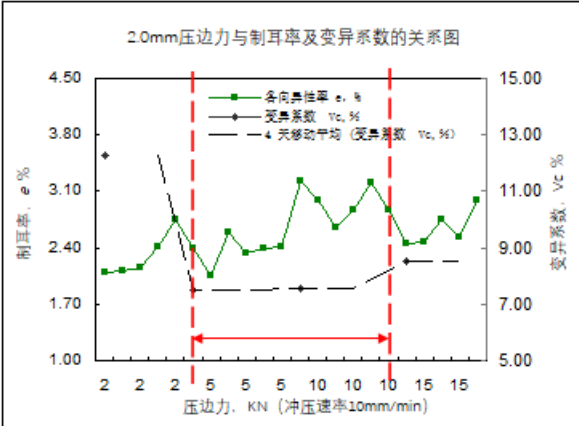


图 5-b)

表 10 3.1mm 圆片直径 60mm 冲压速率 10mm/min 不同压边力基础试验

压边力 KN	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %	压边力 KN	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %
2	23.40	22.80	2.64	10.17	10	23.52	22.83	2.99	9.88
	23.68	23.00	2.92			23.53	22.86	2.94	
	23.61	22.84	3.38			23.54	22.81	3.21	
	23.42	22.76	2.90			23.40	22.73	2.98	
	23.56	22.83	3.20			23.47	22.82	2.87	
	23.44	22.84	2.64			23.40	22.86	2.35	
5	23.46	22.78	3.01	8.89	15	23.58	22.84	3.22	10.81
	23.60	22.86	3.23			23.57	22.88	2.99	
	23.61	22.82	3.48			23.45	22.81	2.80	
	23.42	22.79	2.75			23.39	22.83	2.46	
	23.48	22.84	2.82			23.43	22.84	2.56	
	23.45	22.73	3.13			23.55	22.84	3.13	

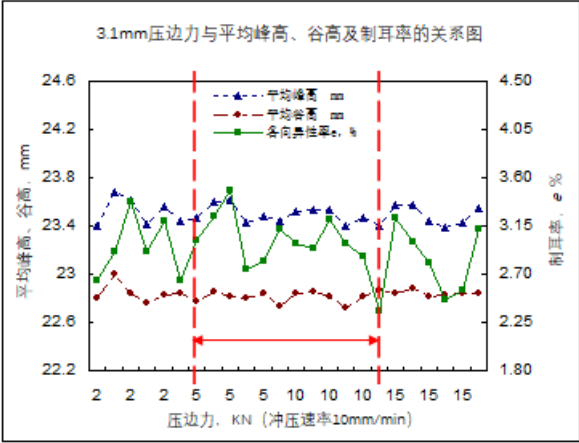


图 6-a)

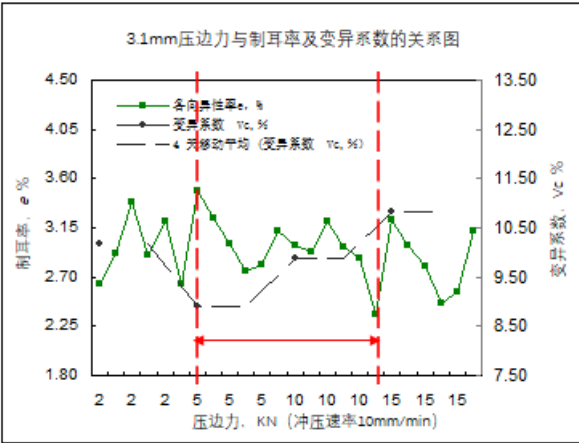


图 6-b)

2.1.2 冲压速率试验

选取 5 个厚度带材，按照试验方案表 4 分别进行冲头直径 32mm，圆角半径 2.5mm、4.0mm、6.0mm、8.0mm、9.0mm 试验。圆片厚度：0.15mm、0.5mm、1.1mm、2.0mm、3.1mm，固定初始压边力为 10kN，进行不同冲模速率 5mm/min、10mm/min、15mm/min、20mm/min、25mm/min 的冲杯试验。试验结果数理统计表 11~表 15，冲模速度与冲杯高度各向异性率曲线图 7~图 11，选用各向异性波动大的区域作为不同厚度圆片的冲模速率如下：

- 0.15mm 厚度的圆片冲压速率选择 5~15mm/min，见图 7-a) 和图 7-b) 红色划线区间所示；
- 0.5mm 厚度的圆片冲压速率选择 10~15mm/min，见图 8-a) 和图 8-b) 红色划线区间所示；
- 1.1mm 厚度的圆片冲压速率选择 10~15mm/min，见图 9-a) 和图 9-b) 红色划线区间所示；
- 2.0mm 厚度的圆片冲压速率选择 15~20mm/min，见图 10-a) 和图 10-b) 红色划线区间所示；
- 3.1mm 厚度的圆片冲压速率选择 15~25mm/min，见图 11-a) 和图 11-b) 红色划线区间所示。

表 11 0.15mm 圆片直径 52mm 压边力 1KN 不同冲压速率基础试验

冲压速率 mm/min	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %	冲压速率 mm/min	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %
5	14.20	13.88	2.34	16.80	20	14.83	14.29	3.81	17.33
	14.35	13.99	2.55			14.89	14.38	3.53	
	14.41	14.13	1.99			14.97	14.55	2.91	
	14.37	13.96	2.94			14.89	14.49	2.76	
	14.29	13.98	2.22			14.93	14.35	4.04	
	14.19	13.77	3.08			15.05	14.43	4.30	

10	14.36	13.90	3.30	16.69	25	14.86	14.33	3.69	15.36
	14.50	14.07	3.06			14.82	14.35	3.31	
	14.53	14.24	2.04			14.82	14.40	2.96	
	14.66	14.23	3.03			14.91	14.29	4.35	
	14.64	14.17	3.36			14.93	14.33	4.19	
15	14.74	14.26	3.35	16.82		15.03	14.40	4.35	
	15.05	14.42	4.38						
	14.97	14.41	3.89						
	14.94	14.34	4.20						
	14.94	14.44	3.42						
	14.98	14.50	3.31						
	14.82	14.43	2.74						

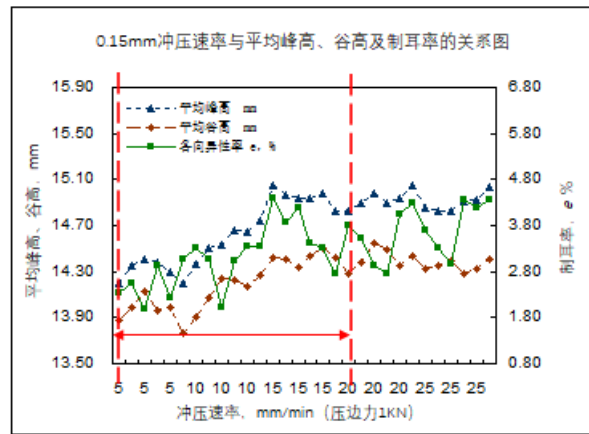


图 7-a)

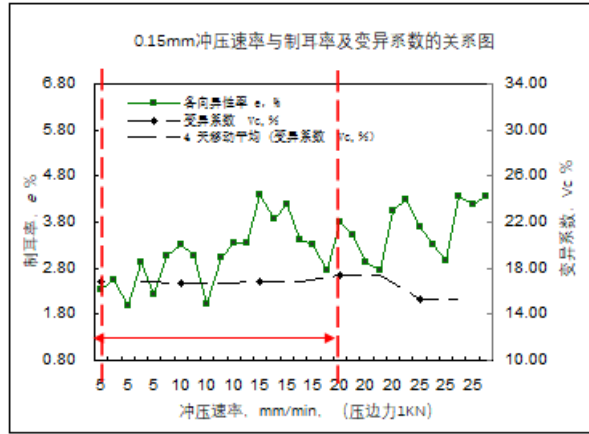


图 7-b)

表 12 0.5mm 圆片直径 55mm 压边力 15KN 不同冲压速率基础试验

冲压速率 mm/min	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %	冲压速率 mm/min	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %
5	17.13	15.97	7.27	5.14	20	16.83	15.87	6.10	5.72
	17.08	16.04	6.51			17.02	15.93	6.85	
	17.04	16.02	6.33			17.03	15.91	7.04	
	17.04	15.97	6.70			17.05	16.06	6.21	
	17.05	15.93	7.03			17.07	16.05	6.32	
10	16.92	15.88	6.60	7.50	25	17.02	15.98	6.55	5.29
	17.01	16.05	5.99			17.01	15.96	6.56	
	16.82	15.82	6.31			17.05	15.93	7.00	
	17.03	15.86	7.37			17.02	15.98	6.51	
	17.04	15.97	6.69			16.92	15.88	6.61	
15	17.03	16.04	6.17	7.22		17.01	15.84	7.39	
	16.83	15.80	6.52			17.09	16.05	6.51	
	17.04	15.85	7.51						
	16.93	15.83	6.99						
	17.07	16.03	6.49						
	16.91	15.82	6.85						
	17.04	15.95	6.83						
	17.03	16.06	6.05						

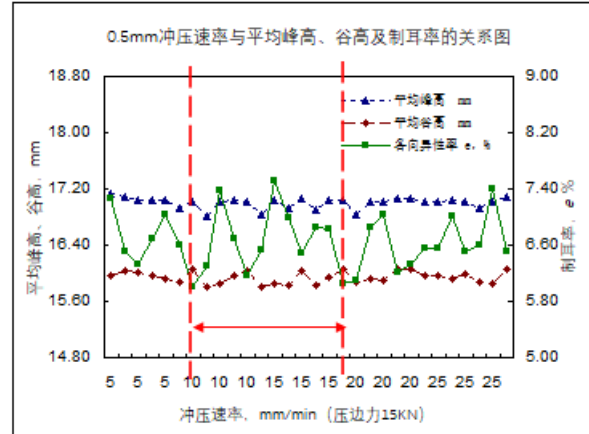


图 8-a)

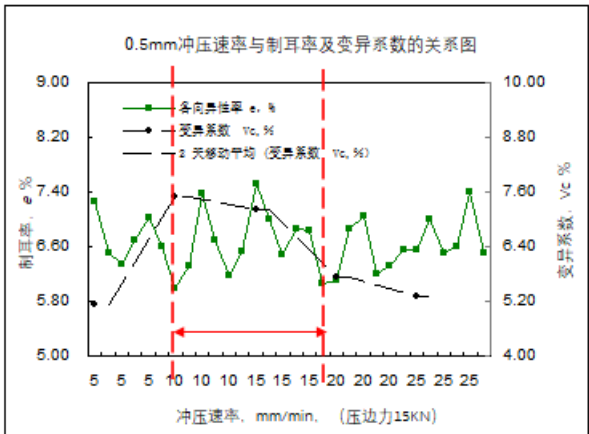


图 8-b)

表 13 1.1mm 圆片直径 60mm 压边力 15KN 不同冲压速率基础试验

冲压速率 mm/min	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %	冲压速率 mm/min	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %
5	22.67	21.93	3.37	13.59	20	22.76	21.92	3.84	8.56
	22.87	22.05	3.71			22.86	21.99	3.97	
	22.58	21.98	2.72			22.75	21.98	3.49	
	22.66	21.98	3.12			22.83	22.03	3.64	
	22.78	21.96	3.75			22.78	22.09	3.15	
	22.59	21.97	2.80			22.72	21.98	3.35	
10	23.04	22.03	4.55	11.30	25	22.74	22.06	3.11	6.46
	22.80	22.00	3.66			22.77	22.03	3.37	
	22.79	22.00	3.59			22.84	22.06	3.53	
	22.83	21.99	3.80			22.79	22.08	3.21	
	22.95	21.98	4.40			22.71	21.90	3.71	
	22.81	22.03	3.53			22.72	21.97	3.41	
15	22.90	22.07	3.75	11.56					
	22.88	22.17	3.22						
	22.80	22.02	3.54						
	22.63	22.04	2.67						
	22.61	21.94	3.08						
	22.68	21.95	3.33						

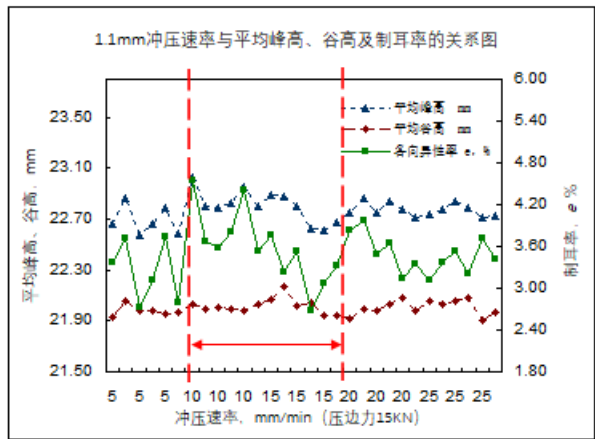


图 9-a)

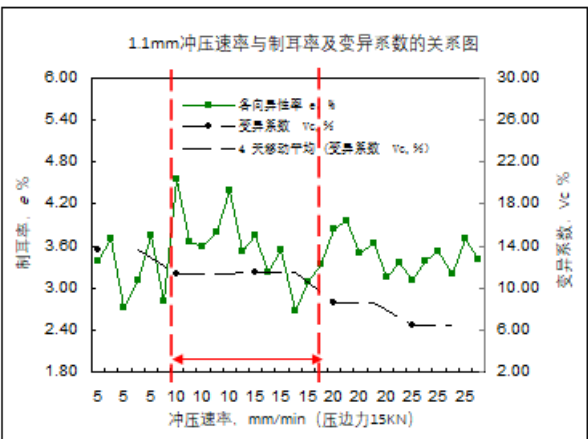


图 9-b)

表 14 2.0mm 圆片直径 55mm 压边力 15KN 不同冲压速率基础试验

冲压速率 mm/min	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %	冲压速率 mm/min	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %
5	19.05	18.67	2.01	8.49	20	19.10	18.70	2.11	7.94
	19.08	18.67	2.22			19.02	18.64	2.08	
	19.07	18.68	2.10			18.97	18.60	1.99	
	19.02	18.68	1.83			19.08	18.76	1.73	
	18.92	18.54	2.07			19.03	18.62	2.20	
	19.04	18.71	1.77			19.04	18.66	2.01	
10	19.08	18.61	2.48	10.94	25	19.11	18.70	2.19	9.68
	18.98	18.53	2.46			19.02	18.62	2.15	
	19.05	18.71	1.80			19.04	18.63	2.22	
	19.04	18.61	2.33			19.02	18.69	1.77	
	19.05	18.64	2.21			19.11	18.75	1.93	
	19.05	18.62	2.30			19.02	18.59	2.29	
15	19.15	18.72	2.26	7.24					
	19.03	18.62	2.20						
	19.09	18.67	2.26						
	19.04	18.62	2.24						
	19.06	18.59	2.54						
	19.06	18.68	2.04						

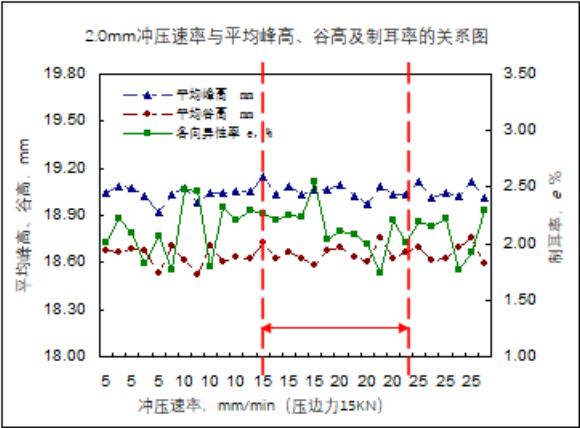


图 10-a)

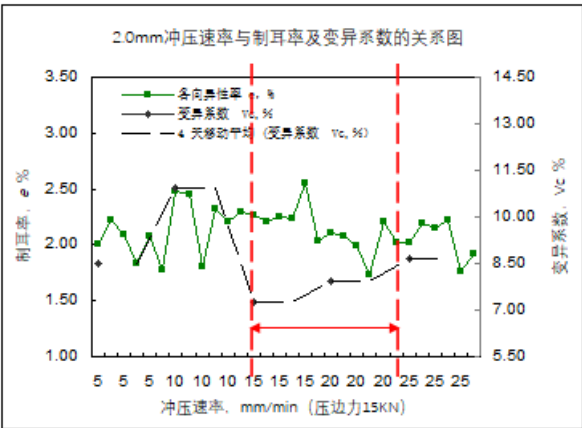


图 10-b)

表 15 3.1mm 圆片直径 60mm 压边力 15kN 不同冲压速率基础试验

冲压速率 mm/min	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %	冲压速率 mm/min	平均峰高 mm	平均谷高 mm	各向异性率 Z, %	变异系数 Vc, %
5	23.63	23.02	2.67	11.18	20	23.49	22.83	2.90	8.67
	23.46	22.88	2.51			23.44	22.85	2.58	
	23.58	22.84	3.23			23.55	22.87	3.01	
	23.56	22.84	3.13			23.50	22.95	2.40	
	23.51	22.86	2.83			23.44	22.84	2.66	
	23.42	22.86	2.49			23.59	22.91	2.94	
10	23.47	22.82	2.87	9.13	25	23.54	22.83	3.12	9.34
	23.49	22.88	2.67			23.60	22.90	3.09	
	23.40	22.82	2.57			23.52	22.93	2.56	
	23.48	22.89	2.59			23.46	22.87	2.59	
	23.45	22.91	2.34			23.52	22.83	2.99	
	23.55	22.85	3.04			23.51	22.79	3.17	
15	23.47	22.82	2.85	8.89					
	23.55	22.87	2.95						
	23.54	22.77	3.39						
	23.53	22.86	2.94						
	23.48	22.86	2.71						
	23.45	22.85	2.66						

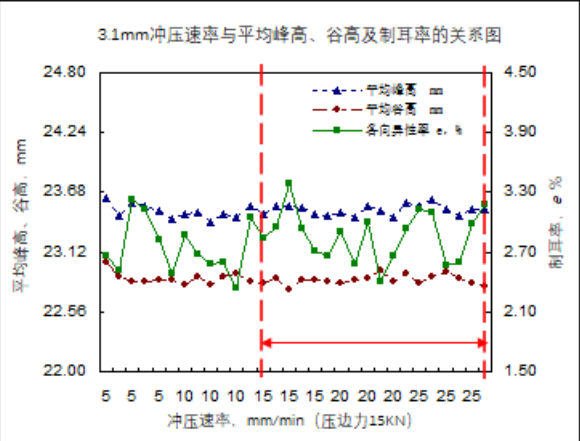


图 11-a)

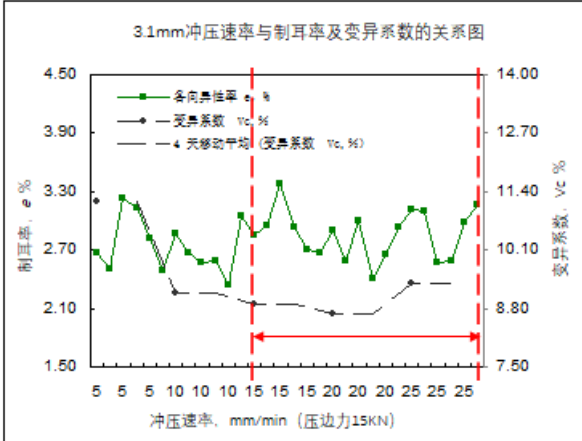


图 11-b)

2.2 验证试验

为了验证冲杯试验方法的实操性，通过对 0.15mm、0.4mm、0.45mm、0.5mm、0.6mm、0.75mm、0.9mm、1.07mm、1.1mm、1.37mm、1.45mm、2.0mm、3.1mm 等 14 个不同牌号及厚度的铜钢复合材料，按照表 5 给出的参数组合进行了冲杯试验的验证。

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

1. 项目的必要性

随着铜-钢复合金属材料生产及产品应用市场的日臻成熟，检测复合产品的金属复合质量及其合格率的和各向异性的试验方法显得尤为重要。

国内, GB/T 6396-2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》采用弯曲试验方法检测厚度 $>3.0\text{mm}$ 产品的结合度。GB/T 6396、GB/T 36162、YS/T 1045、YS/T 1104 产品标准中无涉及复合金属产品的复合质量及冲杯体各向异性率的试验方法。GB/T 5125-2008《有色金属冲杯试验方法》和 GB/T 24183-2021《金属材料 薄板和薄带 制耳试验方法》，两个标准仅对制耳率进行计算；试样圆片尺寸与冲杯模具规格尺寸的配制要求与铜-钢复合金属的冲杯要求存在较大差异；冲杯体高度尺寸测量无测量要求规定使其存在较大测量误差，且无各向异性的试验方法。

国外，英国标准 DEF STAN 95-11/2-1999《子弹壳材料》中规定：复合金属材料经反复弯曲试验方法检测弯曲试验后试样侧面是否出现分层判定试样的结合牢度；美国标准 ASTM B432-2009a《铜及铜合金包覆钢厚板》中规定：弯曲试验 180° 三次检测复合质量，弯曲试验后弯曲部分两边分开的部分不大于 50%为合格。两个产品标准仅涉及两种弯曲检测方法（弯曲和反复弯曲试验），并需要制作专门的弯曲装置和与产品厚度相匹配的弯曲半径之半圆柱体弯曲工具，适合厚度为 $>3.0\text{mm}$ 产品，试验操作方法比较繁琐，均不适用于快速检测 $\leq 3.6\text{mm}$ 铜钢复合金属产品复合质量的试验判定的需要；而且两个产品标准中均无铜-钢复合金属产品的各向异性试验方法。

综上所述，目前尚无可以直接借鉴的国内外检测方法标准，因此，迫切需要制定统一规范的铜-钢复合金属质量及各向异性的检测方法标准。有利于铜-钢复合金属产品的市场深化应用推广和标准化生产。

2. 项目的可行性

前期试验和调研情况表明，冲杯试验在对铜-钢复合金属的各向异性及复合质量检测方面已取得很好的效果，所采用的冲杯设备也是物理检测方法中常见的杯突试验机+冲杯套模，易于获得。该方法的操作简便易行。而且，GB/T 5125 和 GB/T 24183 也在国内钢铁及有色行业的生产厂家、科研院所和质检部门已有多年应用，已经具备实施该标准项目的技术水平基础。因此，本标准项目制定是可行的，适合在复合金属材料领域中推广应用，特别是冲杯试验方法用于对复合金属质量检测以及各向异性的研判并使其应用于指导产品的生产中过程控制环节，对复合金属材料的生产企业，是不可多得的产品生产过程质量控制的简便易行的检测判定方法之一。

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

至 2018 年以来，对铜-钢复合金属复合质量及各向异性的检测，已积累了大量检测数据，并通过检测数据积累和不断比对验证，采用冲杯试验法测定铜-钢复合金属复合质量及各向异性，试验方法的检测操作简单可靠、试验结果（详见附件 1）表面形貌直观、试验计算方法依据可信，已具备制定方法标准必需的技术条件基础。此检测方法的制定，不仅为铜-钢复合金属产品提供了可靠的复合金属复合质量及各项各向异性的检测依据，还可形成铜-钢复合金属材料特有的物理检测方法配套标准，也是对铜-钢复合金属材料系列标准（产品、分析方法、物理检测方法）的补充和完善。用冲

杯试验法检测铜-钢复合金属复合质量及各向异性，在方法标准内容设计上针对复合质量和各向异性率的测量计算，在冲杯试验方法基础上进行冲杯体尺寸测量的大胆创新尝试，如：观察冲杯体外观形貌（圆角弧区域裂纹缺陷）；准确测量冲杯体轧制方向和宽度方向的峰高，计算各向异性率；对冲杯体高度测量要求做出规定：将冲杯体径向和底部平面进行固定，同时可自由轴向转动冲杯体而保证冲杯体底部平面倾斜度为 0，确保测量高度的准确性，转动冲杯体一周，测量冲杯体圆周四处峰高和谷高尺寸，避免了采用卡尺或高度尺测量冲杯体高度尺寸数据无重复性和再现性问题。填补了复合金属质量检测、冲杯体高度尺寸测量准确度、各向异性率检测方法的空白。

六、采用国际标准和国外先进标准的情况

本标准未采用国际标准和国外先进标准。

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、国家丁用标准、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

暂无。

九、作为强制性或推荐性国家标准的建议

本标准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

为使标准能更好地发挥作用，提高铜-钢复合板带金属生产企业的控制水平，建议针对本标准制订切实可行的贯彻措施，做好宣传培训工作，使各生产及下游的相关单位能够充分掌握标准中所规定的检测方法，并加强示范推广，让标准在复合金属材料的生产和使用过程中得以广泛应用。同时，对标准执行情况进行跟踪调查，及时发现标准执行中的问题，不断修改完善、提升标准水平，提高标准的科学性、合理性、协调性和可操作性。

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。

附件 1

冲杯试验后冲杯体表面形貌图及说明

- 1 直径 $\phi 55$ 圆片试样，厚度 0.36~3.2mm, 冲杯试验后冲杯体形貌图 1。



0.36mm



0.52mm



0.83mm



0.99mm



1.1mm



1.37mm



3.2mm

图 1 不同厚度试样圆片的冲杯体形貌

2 冲杯试验后冲杯体底部表面形貌见图 2。



a) 冲杯试验后冲杯体表面底部圆角弧区域无裂纹形貌



b) 冲杯试验后冲杯体表面底部圆角弧区域裂纹形貌

图 2 冲杯试验后冲杯体表面底部形貌

3 冲杯体表面形貌变形分析

冲杯体表面积由冲杯体底部表面圆面积、表面圆角弧区域面积、杯壁圆柱区域表面积组成。冲杯体表面圆角弧区域，是圆片在冲制拉伸成杯体形状过程出现材料变形受力变化的交界区域。底部、圆角弧、杯壁区域变形及其应力分布分析如下：

a 底部圆区域变形应力

在冲制成形中由圆心沿着径向发生径向拉伸变形，所承受的径向拉伸变形量沿着径向半径增大而增大，其材料承受的径向拉应力状态也越来越大，到底部圆边缘达到最大，拉应力由圆点向圆周发散成放射状分布。

b 杯壁圆柱区域变形应力

杯壁圆柱区域不仅存与底部圆一样的径向拉伸变形，同时在杯壁沿着环向的发生收缩变形，环向压缩变形由冲杯体圆角弧过渡到杯壁圆周始起，压缩变形沿着圆片半径圆周逐渐增大，至圆片直径的圆周位置压缩变形达到最大值，圆片的周向压缩随着冲头移动而产生径向延伸成形杯壁，即：圆周压应力在圆片的直径处达到最大值。由于分布在圆片周向上任意角度存在的变形织构与退火织构组织的多寡不一，使其压缩应力分布也不一致，也是冲杯体上缘口失稳出现起皱和制耳的主要原因。

c 冲杯体圆角弧区域变形应力

冲杯体圆角弧区域沿着径向发生径向拉伸变形，和沿着圆角半径发生弯曲拉伸变形，并由底部向冲杯体壁延伸与径向拉伸应力相互叠加，使得圆角弧区域的材料表面覆层金属承受的径向拉伸变形最大，即：冲杯体拉伸应力集中最大的区域，并沿着底部圆始起，向圆角弧至杯壁处拉伸应力达到最大。

如上所述，假如复合金属存在的复合质量缺陷，很易导致冲杯体的表面覆层金属在圆角弧区域发生环线裂纹。即：此表面区域仅有复合比率 3%~10%的覆层金属厚度与基材金属钢会各自均单独承受相同的变形应力，使其不能随着基材一起变形被拉裂，从而导致冲杯体圆角弧区域覆层金属裂纹。

《铜-钢复合板带金属复合质量及各向异性的测定 冲杯试验方法》编制组

2024 年 1 月 8 日