

高温热喷涂临时保护胶的研制及性能影响研究

颜维虎, 李清材, 马宏, 任江涛, 丁小刚, 王向梅*

(中昊北方涂料工业研究设计院有限公司, 兰州 730101)

摘要: 通过试验选用大分子量(约 350 000)双封头端乙烯基聚硅氧烷生胶(乙烯基含量 0.08%~0.17%)为主树脂, 选用含氢量在 0.5%~0.75%含氢聚硅氧烷复配为交联剂, 苯基甲基聚硅氧烷和长链烷基硅氧烷作为增塑剂, 氟改性乙烯基聚二甲基硅氧烷为工艺性能调节剂, 选用比表面积为 270 m²/g 的气相法二氧化硅作为补强填料, 以氧化铈、氢氧化铝、氢氧化镁按一定比例复配组合作为阻燃耐温填料制备高温热喷涂保护胶, 该保护胶固化后便于施工, 具有优异的贴合成型性, 固化后具有良好的抗切割能力和抗喷砂磨损性, 在热喷涂操作的极端条件下依旧具有卓越的耐受性, 同时具有优异的可剥离性, 能够在金属表面干净地剥离, 且无溶剂挥发, 是一种绿色环保、无污染、无 VOC 排放的产品。

关键词: 火焰喷涂; 热喷涂临时保护胶泥; 手捏按需成型

中图分类号: TQ637

文献标志码: A

文章编号: 1007-9548(2026)02-0015-04

Development and Performance Impact Study of High-Temperature Thermal Spraying Temporary Protective Adhesive

YAN Wei-hu, LI Qing-cai, MA Hong, REN Jiang-tao, DING Xiao-gang, WANG Xiang-mei*

(North Paint & Coatings Industry Research and Design Institute Co., Ltd. of China Haohua, Lanzhou 730101, China)

Abstract: Through experiments, a high molecular weight (approximately 350 000) double-headed vinyl polysiloxane raw rubber (vinyl content of 0.08%~0.17%) was selected as the main resin. A hydrogen-containing polysiloxane with a hydrogen content of 0.5%~0.75% was chosen as the crosslinking agent. Phenyl methyl polysiloxane and long-chain alkyl siloxane were used as plasticizers, fluorine-modified vinyl polydimethylsiloxane as a process performance modifier, and fumed silica with a specific surface area of 270 m²/g as the reinforcing filler. Cerium oxide, aluminum hydroxide, and magnesium hydroxide were compounded in a certain proportion as the flame-retardant and temperature-resistant filler to prepare a high-temperature thermal spray protective adhesive. After curing, the protective adhesive is easy to apply, exhibits excellent adhesion and formability, and has good resistance to cutting and sandblasting wear. It still maintains excellent durability under the extreme conditions of thermal spraying operations. Additionally, it has excellent peelability, allowing for clean peeling from metal surfaces without solvent evaporation. It is a green, environmentally friendly, pollution-free, and VOC-free product.

Key words: flame spraying; thermal spraying temporary protective paste; hand-pinching and on-demand forming

收稿日期: 2025-09-22

基金项目: 科技重大专项-工业领域 25ZDGA004。

作者简介: 颜维虎(1995—), 男, 本科, 工程师, 主要从事特种涂料的研发工作。E-mail: 504329366@qq.com。

*通信作者: 王向梅(1990—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事特种涂料的分析及检测工作。E-mail: 13919186710@126.com。

0 引言

高温热喷涂技术是一种将涂层材料(粉末或丝材)送入某种热源(电弧、燃烧火焰、等离子体等)中熔化, 并利用高速气流将其喷射到基体材料表面形成涂层的工艺。热喷涂涂层具有耐磨损、耐腐蚀、耐高温和隔热等优良性能, 并能对磨损、腐蚀或加工超差引起的零件尺寸减小进行修复, 目前在航空航天、机械制造、石油

化工等领域中得到了广泛的应用。

在热喷涂过程中,对于工件基体邻近喷涂部位的非喷涂区域,为了防止熔融射料溅落在该部位造成破坏,应进行临时遮蔽保护。根据部件的形状和部位的不同情况,常用如下的遮蔽保护方法:涂料(胶泥)保护、耐温遮蔽胶带保护、金属挡板或夹具保护。其中涂料(胶泥)保护因施工便利、可适应复杂工件形状,是常用的保护方式。随着热喷涂技术应用的不断发展,热喷涂的临时保护胶也逐渐得到了关注和发展。美国 Taconic 公司、瑞士 OC Oerlikon 公司、加拿大 Green Belting 公司等机构对热喷涂临时保护胶进行了研究,其产品包括水性及无溶剂型保护胶,技术路线常用耐温的硅橡胶基体树脂配以二氧化硅、石墨等功能颜填料进行制备^[1],对热喷涂具有良好的防护作用,且具有便捷的施工、脱除特性。目前国内对于热喷涂临时保护多采用工装或金属挡板遮蔽等方法,对于热喷涂保护涂料国内也有机构进行了相关研究,如天津市机械涂层研究所研制了一种以石墨、水溶性树脂为主要成分的抗粘涂料,用以解决热喷涂工艺中局部喷涂的问题^[2]。但国内此类产品目前仍存在施工不便、保护性不足、热喷涂后脱除性不佳等问题,因而在热喷涂过程中常依赖进口产品,或在热喷涂结束后通过其他处理方式进行处理,往往导致喷涂效果不佳^[3],迫切需要研发具有良好应用特性的热喷涂临时保护产品。

本试验制备了一种用于热喷涂过程中非喷涂部位的临时保护胶,可在折边、接缝、锐角等不规则形状工件表面手捏按需成型,具有施工便捷、对火焰喷涂保护性优异的特点。

1 试验部分

1.1 主要原材料

甲基乙基硅油(分子量分别为 10 000、100 000、350 000,工业级),东爵有机硅(南京)有限公司;含氢硅油(含氢量分别为 0.35%、0.5%、0.75%,工业级)、长链烷基硅油,深圳市吉鹏硅氟材料有限公司;苯基硅油(黏度 100~200 cs),安徽艾约塔硅油有限公司;铂金催化剂、有机硅改性烷醇抑制剂,上海中子星化工科技有限公司;气相二氧化硅,德国赢创德固赛(南京)工业集团;改性氢氧化铝、改性氢氧化镁、复合锑,中科阻燃新材料有限公司;云母粉,灵寿中科矿物粉体有限公司;硅氧烷偶联剂,南京创世化工有限公司;氧化铈(1 μm),中国冶金研究院。

1.2 主要仪器

GL2241-1SCN 电子分析天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;实验室 1 L 捏合机,莱州莱兴机械有限公司;BGD 935/A 数显邵氏硬度计,标格达精密仪器

(广州)有限公司;3365 型电子万能材料试验机,美国英斯特朗仪器有限公司;STA449 同步热失重测试仪,德国耐驰仪器有限公司。

1.3 双组分热喷涂保护胶的制备

在捏合机中按配方量依次加入甲基乙基硅油、增塑剂、结构控制剂、VMQ 树脂、耐温阻燃填料及部分气相二氧化硅,在加热条件下捏合搅拌 10 min,再投入剩余气相二氧化硅,继续加热搅拌,逐渐投入铂金催化剂及其他助剂,加热抽真空搅拌 1 h 排除胶料内部气泡,降温降压后制得 A 组分。

在捏合机中按配方量依次加入甲基乙基硅油、交联剂、抑制剂、结构控制剂、VMQ 树脂、耐温阻燃填料及部分气相二氧化硅,在加热条件下捏合搅拌 10 min,再投入剩余气相二氧化硅、着色剂及其他助剂,加热抽真空搅拌 1 h 排除胶料内部气泡,降温降压后制得 B 组分。

使用时按照组分 A:B=1:1 配比进行手捏混合,待保护胶颜色均匀后即可按压至所需保护金属构件表面,待保护胶完全固化后即可进行下一步操作。

1.4 性能测试方法

1.4.1 保护胶操作时间检测

等比例取保护胶 A、B 组分,当两者开始混合时开始计时,在混合过程中,当胶料出现黏度增大、难以继续塑形的情况时结束计时,该时间段即可认为是保护胶操作时间。

1.4.2 保护胶固化时间检测

按照 GB/T 13477.5—2018 进行检测,双组分保护胶混合至颜色均匀时开始计时,将保护胶覆盖在模具上,静置一段时间后,用无水乙醇擦拭手指端部,轻轻接触模具上保护胶样品的 3 个不同部位,相隔适当时间重复上述操作,直至 3 个部位均无试样黏附在手上,此时的时间为结束时间,两者的时间差即为保护胶固化时间。

1.4.3 保护胶拉伸检测

按照 GB/T 528—2009 对保护胶进行拉伸应力应变性能检测,将保护胶混合制成薄片状,静置 24 h 后,用模具裁剪成 II 型哑铃状,每个测试样本应不少于 3 个样片,测定哑铃状样片狭窄部位 3 个点厚度的平均值,拉伸速率为 100 mm/min。

1.4.4 保护胶硬度检测

按照 GB/T 2411—2008 对保护胶进行硬度检测,待测样片厚度应大于 4 mm,使用邵氏 A 顶针式硬度计进行测定,在样品中间部位平稳按压 3 s,待数据不变后记录数据,取 3 个不同点位数据的平均值作为待测样品硬度值。

1.4.5 保护胶热失重分析检测

使用同步热分析仪对系列样品进行热失重分析,通过测量不同样品质量随温度或时间的变化过程绘制热分解曲线,对比不同样品在同一温度下或同一温度段的热稳定性及失重速率,判断该组分样品的耐热性。

2 结果与讨论

2.1 乙烯基硅油及交联剂种类对性能的影响

乙烯基硅橡胶作为热喷涂保护胶的主要原材料,其不同分子量对性能的影响起到至关重要的作用^[4],低分子量乙烯基硅油虽有较好的流动性,制备保护胶能够有较好的柔软度,但胶料会发生粘手现象,导致手感较差,热喷涂后保护胶不能干净的剥离。故选用大分子量(约 350 000)双封头乙烯基生胶(乙烯基含量 0.08%~0.17%)为主树脂,大分子量硅橡胶有较好手捏操作爽滑性,保证保护胶使用操作性。

交联剂作为反应物参与保护胶固化过程,通过试验选用不同含氢量的改性含氢硅油,并设置 SiH:SiVi=1.5:1^[5],不同含氢量的含氢硅油对保护胶的性能影响如表 1 所列。

由表 1 可知,含氢量较低时,固化后的保护胶硬度较低,伸长率较高,但拉伸强度低,说明胶料固化后较为“软弹”,交联密度低,高温保护性较差;含氢量为 0.5%和 0.75%时,均有较好的硬度及强度;当含氢量为

1.3%时,各项性能均下降,说明交联度过高导致保护胶变“脆”,性能反而变差^[6]。故本试验选用 0.5%改性含氢硅油复配少量 0.75%改性含氢硅油作为热喷涂保护胶的交联剂使用,保证保护胶硬度强度的同时又有一定的韧性。

表1 不同含氢量的交联剂固化后的性能

含氢量/%	邵氏 A 硬度	拉伸强度/MPa	伸长率/%
0.35	28	2.04	300
0.5	39	3.45	240
0.75	41	3.57	230
1.3	36	2.8	140

2.2 助剂的种类对保护胶性能的影响

热喷涂保护胶助剂主要包括催化剂、抑制剂、增塑剂及工艺性能调节助剂。

热喷涂保护胶在使用过程中需经过捏合均匀过程、按压涂覆过程、修整外表面过程、固化成型 4 个过程,故可将 4 个过程的时间分为 2 个时间段,即前 3 个过程为操作时间,固化成型的时间即为固化时间。选用催化效率较高的 Pt 催化剂(5.0×10⁻³)及抑制效果好的 1-乙炔基-1-环己醇为抑制剂,铂金催化剂及抑制剂用量对操作时间及固化时间影响如表 2 所列。

表 2 催化剂及抑制剂的用量对可操作时间及固化时间的影响

项目	催化剂用量/%											
	0.5			1			2			3		
抑制剂用量/%	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7
可操作时间/min	40	100	240	15	35	60	2	5	10	0.5	1	4
固化时间/min	120	300	480	40	70	150	4	10	30	1	2	15

由表 2 可知,当催化剂用量为 2%,抑制剂用量为 0.5%时,可操作时间为 5 min,固化时间为 10 min,能够有较短固化时间,操作时间也较为适宜,保证简化操作工艺的同时快速固化。

增塑剂的添加可以调节保护胶胶料手感,降低胶料未固化时的捏合硬度,增加胶料加工性及操作使用性,提高生产效率,简化热喷涂保护胶的使用流程。通过对比甲基聚硅氧烷、苯基甲基聚硅氧烷及长链烷基聚硅氧烷在相同量添加后对热喷涂保护胶性能的影响,结果如图 1 所示。

由图 1 可知,苯基甲基聚硅氧烷作为增塑剂加入热喷涂保护胶时,保护胶具有更高的热失重率,但分解温度较低,在 180 °C左右开始分解;长链烷基硅油

有较高的热分解温度,但最大热失重率较低,失重率达到 54.6%;但苯基硅油加入保护胶后有“外渗”作用,能够较好地提高保护胶操作爽滑性,提高施工效率,故本试验选用苯基甲基聚硅氧烷和长链烷基硅油按一定比例复配作为增塑剂。

为保证热喷涂保护胶在捏合过程中的操作爽滑性及较好的脱模性,工艺性助剂的添加能够使得保护胶具有较低的表面张力和金属工件之间的结合力,通过对比硬脂酸锌、硅胶冒油剂、改性内脱模剂、氟改性乙烯基硅油对保护胶性能的影响,具体如表 3 所列。

由表 3 可知,硬脂酸锌的加入没有提升操作爽滑性的同时反而导致性能下降;硅胶冒油剂的加入

能够有效提升操作爽滑性,但导致保护胶变“软弹”,导致高温保护性下降;改性内脱模剂同样对操作爽滑性的作用有限;氟改性乙烯基硅油作为工艺性助剂,因其侧链经过 F 离子改性,使得其具有较低的表面能,能够较好地提升保护胶操作爽滑性,同时其具有乙烯基官能团,能够作为活性稀释剂参与反应,提高交联密度,保证高温保护性^[7],故选用氟改性乙烯基硅油作为工艺性助剂提高保护胶的操作爽滑性及较好的脱模性。

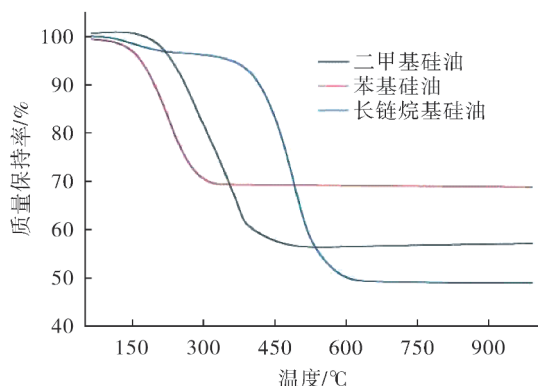


图1 不同增塑剂的热重分析(TGA)

表3 工艺性助剂对保护胶性能的影响

助剂种类	邵氏 A 硬度	拉伸强度 /MPa	伸长率/%	可剥离性/%	操作爽滑性
硬脂酸锌	35	1.8	290	90	粘手
硅胶冒油剂	28	2.4	340	100	爽滑
改性内脱模剂	34	2.9	300	100	轻微粘手
氟改性乙烯基硅油	42	3.4	240	100	爽滑

2.3 补强填料对保护胶性能的影响

常用加成型硅橡胶补强填料为气相法二氧化硅,比表面积越大,补强效果越好^[7],但比表面积越大导致保护胶料黏度越大,操作性变差,故选取不同比表面积的气相二氧化硅等量添加进行验证,结果如表4所列。

表4 不同比表面积的气相二氧化硅的补强效果

比表面积 /($m^2 \cdot g^{-1}$)	黏度	邵氏 A 硬度	拉伸强度/MPa	伸长率/%
180	较软	36	3.0	310
270	适中	42	3.4	240
340	较硬	38	4.1	170

由表4可知,当气相二氧化硅比表面积越大,拉伸强度和伸长率越好,但比表面积达到 $340 m^2/g$ 时,保护

胶两个组分因为黏度较大、胶料较硬,不易充分混合,导致混合固化后硬度较低,操作性也变差。当选用比表面积 $180 m^2/g$ 气硅时,胶料黏度较小,同时硬度、强度也较低。选用比表面积 $270 m^2/g$ 的气硅时黏度适中,徒手捏合两个组分时也有较好的操作性,同时性能也有较好的表现,故选用比表面积 $270 m^2/g$ 的气相二氧化硅作为补强填料。

2.4 耐热阻燃填料对保护胶性能的影响

加成型硅橡胶以铂金体系为催化剂,但问题是铂金催化体系在遇到含卤素化合物、重金属及其化合物、某些不饱和化合物如多烯烃、炔烃和部分颜填料等时会发生“中毒”现象^[8],导致固化反应受阻或完全停止。故在选用阻燃剂和耐温耐磨填料时,如十溴二苯乙烷、三氧化二锑、氮化硼等均不能适用,都会导致催化剂失效,故选用氢氧化铝、纳米滑石粉、氢氧化镁、改性复合锑、氧化铈等复配作为阻燃耐温耐磨填料,选取其中几种复配,其热重分析如图2所示,其中,1#为氧化铈+氢氧化铝+氢氧化镁,2#为纳米滑石粉+氢氧化铝+氢氧化镁,3#为改性复合锑+氢氧化铝+氢氧化镁。

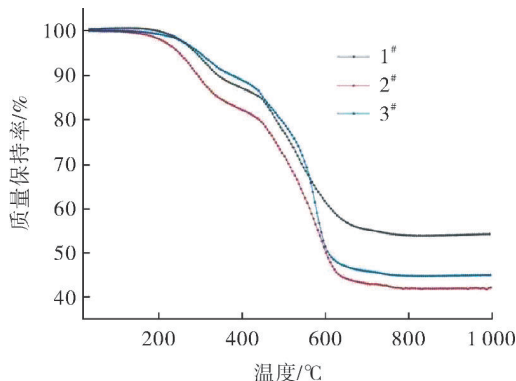


图2 不同阻燃耐温材料复配热重分析(TGA)

由图2可知:1#复配组合在高温热损失最小,在 $220^\circ C$ 左右开始有明显失重现象,较其他两个组合失重开始温度有所提高;3#组合在 $20\sim 300^\circ C$ 也有较好表现,但最大失重率较1#有明显差距;2#组合较其他两条曲线明显较差,说明纳米滑石粉阻燃耐温性不如改性复合锑及氧化铈。故本试验选取氧化铈+氢氧化铝+氢氧化镁组合作为阻燃耐温填料。

3 结语

本试验通过选用大分子量(约 $350\ 000$)双封头乙烯基聚硅氧烷生胶(乙烯基含量 $0.08\%\sim 0.17\%$)为主树脂,选用含氢量在 $0.5\%\sim 0.75\%$ 含氢聚硅氧烷复配为交联剂,苯基甲基聚硅氧烷和长链烷基硅氧烷作为增塑剂,氟改性乙烯基聚二甲基硅氧烷为(下转第68页)