

纳米羧基丁腈橡胶改性环氧树脂的性能特征及应用领域

李发凯 黎铖

(株洲同心实业发展有限公司)

摘要: 本文介绍了纳米级全硫化羧基丁腈橡胶粒子对通用环氧树脂进行改性的机理和改性树脂的性能及应用。纳米丁腈橡胶可以大幅增加固化物的冲击强度、不降低甚至略微提高固化物的热变形温度、增强固化物绝缘性能、增强固化物的耐冷热交变性能，唯一的不足是增大了改性树脂的粘度。这类改性树脂可应用于对韧性、绝缘性、耐高温性、冷热交变性等具有特殊性能要求的复杂条件下，通过大量、反复的探索试验，表明这类树脂确能在多种复杂苛刻的环境中达到满意的使用效果，并通过多种方式在许多领域得到了有益的尝试，获得良好的应用效果，展示了这种改性树脂具有很好的应用前景。

关键词: 纳米羧基丁腈橡胶 环氧树脂 冲击强度 热变形温度 冷热交变性

1 前言

环氧树脂因具有比重轻、强度高、耐腐蚀、抗老化、易加工等一系列优异的物理与化学性能及加工工艺性能，广泛应用于涂料、胶粘剂、密封材料、电工电器、建筑材料、纤维增强材料、军工、航空航天等各个领域，是当今最重要的工业材料之一。但是，它又具有特别明显的缺陷，主要表现在：高度交联的环氧树脂具有很高的刚性，但韧性不够，表现出很大的脆性，低温下脆性更大；固化物存在内应力，使得树脂基体内会产生许多裂纹，导致固化物冲击强度、疲劳性能、耐热性能等不够理想，在许多应用领域受到了限制。为了满足当今各工业领域对环氧材料更高的综合性能要求，必须设法提高环氧树脂韧性、降低它的脆性。

目前，纵观目前的环氧树脂的增韧改性技术，主要有两种解决路线：一是直接开发生产满足特定需求的高韧性环氧树脂，这一路线主要由技术实力强，资金力量雄厚的外资企业主导，国内少有，它的特点是：开发生产技术难度大，投资成本高，建设周期长，环保处理难，高风险，高收益；二是采用无机或有机材料对通用环氧树脂进行改性，使改性后的环氧树脂达到特定的技术要求甚至替代进口，其特点是：技术难度不大，投资成本相对较低，建设周期短，几乎无环保难题，风险较小。纳米羧基丁腈橡胶改性环氧树脂就是采用第二条路线。

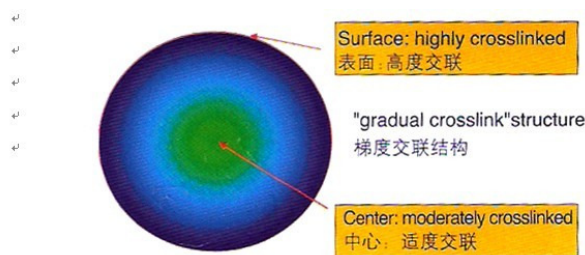
2 纳米全硫化羧基丁腈橡胶改性环氧树脂的性能特征。

2.1 纳米全硫化羧基丁腈橡胶

该纳米橡胶粒子是北京化工研究院根据“863”项目要求，自主开发的纳米级全硫化羧基丁腈橡胶粉末，并且在世界范围内申请了三十多项发明专利，并已建成千吨级生产装置。

纳米级全硫化羧基丁腈橡胶是一种淡黄色、粒径在 50-100nm 范围内的球状橡胶粒子。下图单个纳米橡胶粒子的示意图（见图 1）

图 1 纳米级全硫化羧基丁腈橡胶粒子结构示意图



从图中可以看出，它是一种梯度交联的球状体。外层交联密度高，由外向内递减，内芯只是轻度交联。这种结构形式具有外壳坚硬，内层柔软的特性，使其具有十分独特的力、热、

电性能，会对被改性树脂的性能产生重要影响。

2.2 纳米橡胶对环氧树脂性能的影响

将具有梯度交联结构的纳米羧基丁腈橡胶粒子整合分散到环氧树脂中，形成半透明的固/液均匀分散体系，其粘度比普通纯环氧树脂高一倍至数倍。由于采用了整合技术，这种纳米羧基丁腈橡胶改性环氧树脂在储存、运输、应用过程中不产生相分离，具有良好的均一性和稳定性。

这种纳米橡胶改性的环氧树脂与纯环氧树脂、聚硫橡胶改性环氧树脂、液体丁腈橡胶改性环氧树脂、纳米二氧化硅改性环氧树脂相比具有显著不同的特点（见表1）

表1 不同增韧剂对通用环氧树脂性能的影响

品名	外观	气味	粘度 (mpa. s)	储存稳定性 (常温三个月)
E-51 纯环氧树脂	无色透明	树脂味	11000-16000	无变化
E-51+8%纳米羧基丁腈橡胶	淡黄半透明	树脂味	20000-28000	无变化
E-51+8%纳二氧化硅	白色不透明	树脂味	23000-35000	有分层现象
E-51+15%聚硫橡胶	黄色不透明	臭皮蛋味	40000 以上	有分层结团
E-51+10%液体丁腈橡	灰黄不透明	特殊臭味	40000 以上	有分层现象

用纳米羧基丁腈橡胶改性环氧树脂与甲基四氢苯酐做固化试验，并同时纯环氧树脂经相同固化工艺操作，将两者性能相对比，经多次复现的各项性能测试数据整理后，列于表（2）

表2 纳米羧基丁腈橡胶改性环氧树脂用酸酐固化后的性能

样品	冲击强度 (KJ/m)	弯曲强度 (Mpa)	弯曲模量 (Gpa)	热变形温度 HDT (°C)	玻璃化温度 T _g (°C)
纯环氧	11.8	104	3.13	101.3	105.8
环氧+8%纳米丁腈	21.4	94.5	2.56	104.9	113.1

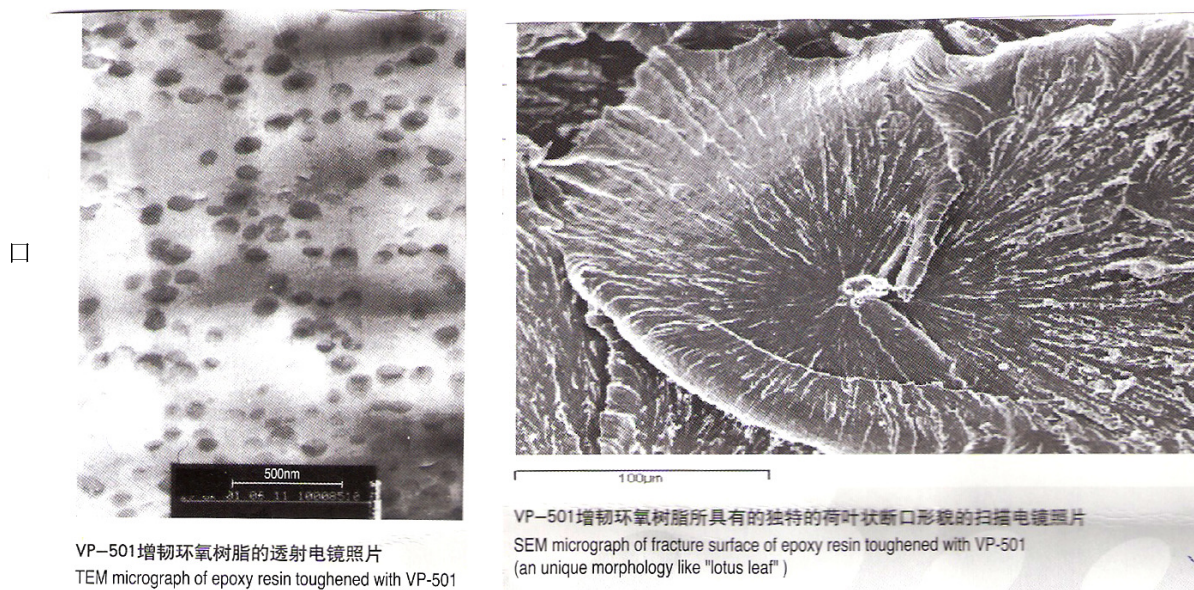
从表（2）可以看出，添加纳米丁腈橡胶改性环氧固化物的冲击强度比未加任何增韧材料的纯环氧固化物要高一倍左右，而弯曲模量和弯曲强度方面，纳米橡胶改性环氧固化物环氧固化物比未改性环氧固化物要低一些；热变形温度和玻璃化温度两项指标，纳米丁腈改性环氧固化物比纯环氧树脂固化物略高一些。通过对比表明：经纳米羧基丁腈橡胶改性的环氧固化物具有高的冲击韧性，同时耐高温性能也有所提高，而选用其它橡胶型增韧剂改性的环氧固化物基本上不能同时具备这两点性质。

2.3 固化物微观结构的表征与分析

为了更细致地了解纳米羧基丁腈橡胶对环氧树脂微观结构的影响，制作了纳米羧基丁腈橡胶环氧树脂固化物断面 SEM 扫描照片。见图2、图3

图2

图3



从图2可以看出：纳米橡胶粒子在环氧固化物中是分布较均匀的。从图3可以看出：纳米丁腈橡胶改性环氧固化物受冲击后所具有独特的荷叶状断口形貌。这种破坏形式可形成大量的微裂纹，在裂纹扩展直到材料破坏的过程中，会吸收大量的能量，这样就大大增加了基体的冲击韧性。

2.4 改性通用环氧树脂的基本性能

为了使其性能数据更具说服力，经国家级权威检测机构测试，纳米羧基丁腈橡胶改性环氧树脂用甲基四氢苯酐固化物性能如下（见表3）。

表3 国家合成树脂和塑料质量监督检验中心检测报告

序号	检验项目	单位	技术要求	实测值	单项判定
	E-51				
1	弯曲强度	MPa	/	107	/
2	弯曲模量	MPa	/	3170	/
3	悬臂梁无缺口冲击强度	kJ/m^2	/	12	/
4	玻璃化温度	$^{\circ}\text{C}$	/	116	/
5	热变形温度 $T_{\text{H}0.45}$	$^{\circ}\text{C}$	/	113	/
	HH0801				
1	弯曲强度	MPa	/	89.4	/
2	弯曲模量	MPa	/	2711	/
3	悬臂梁无缺口冲击强度	kJ/m^2	/	22	/
4	玻璃化温度	$^{\circ}\text{C}$	/	118	/
5	热变形温度 $T_{\text{H}0.45}$	$^{\circ}\text{C}$	/	114	/
6	电气强度	kV/mm	/	17.4	/

3 纳米羧基丁腈橡胶改性环氧树脂的应用

3.1 应用机理

由于纳米橡胶颗粒特殊的梯度交联结构和基团分布，纳米橡胶颗粒外层的羧基、羟基在固化体系存在的情况下会与环氧树脂中的环氧基形成牢固的化学键或者氢键，使得纳米橡胶粒子成为固化体系不可分割的一部分。在树脂基体受到机械应力或热应力作用

时，纳米橡胶通过自身的弹性形变吸收基体传递的能量，当应力撤去时，又恢复原状，释放部分能量，这正是梯度交联结构的“弹性核壳”作用机理，这就能提高基体韧性和改善基体树脂的热学性能，具体来说就是能提高冲击强度，保持或略为提升热变形温度，降低低温脆性，增强了基体的耐冷热交变性能。同时，纳米橡胶粒子均匀地分布在基体中，当树脂基体在受应力作用中产生破坏时，产生的裂纹尖端扩展至纳米橡胶粒子附近，纳米橡胶颗粒通过自身形变吸收部分能量，同时由于形变，诱导了更多新的裂纹产生，这些新裂纹的扩散会继续吸收能量，这就是它能大幅提高环氧树脂冲击韧性的“海岛作用”机理。纳米丁腈橡胶对环氧树脂固化物的力学性能的影响主要可以通过这两个机理来理解。

同时纳米丁腈橡胶本身的梯度交联结构，可以对作用于它的电场分布产生影响，在壳层交联密度高的地方场强分布强，在心部交联密度低的地方场强分布弱，当电场为交变电场时，欲破坏固化物结构，将耗费更多的电能，从而提高了绝缘性能。

3.2 纳米橡胶改性环氧树脂的应用领域及范例

3.2.1 航空航天方面的应用

3.2.1.1 现代飞机制造应用粘接结构日益增多，对于提高质量和性能，减轻结构重量、简化生产工艺、降低成本的作用十分显著。纳米橡胶改性环氧用于飞机制造主要是机身、壳体、蜂窝结构材料等的结构粘接。特别是大量使用的蜂窝夹层结构，其面板与蜂窝之间的粘接必须用环氧胶粘剂进行粘接。此外，纳米橡胶改性环氧胶粘剂也可适用于飞机蒙皮、机翼、壁板、复合材料、大直径低压导管的粘接修补。航空用环氧胶粘剂典型配方如下：

a) HH-0801 改性环氧树脂	100~120
AG-80 环氧树脂	100~110
JLY-55 聚硫橡胶	80~100
改性芳香胺	30~40
DMP-30	5~10
KH-550	1~3

先将 JLY-55 与 DMP-30 于 120℃ 反应 1 小时，冷却至室温，再进行混合。

胶粘剂室温固化 10 天后，室温剪切强度 26MPa，120℃ 时为 15MPa，150℃ 时为 13MPa，200℃ 时为 6MPa；室温剥离强度 6kN/m。用于航空耐热结构部件的粘接。

b) HH-0801 改性环氧树脂	100~110
EPG669	10~15
改性脂环胺	35~50
DMP-30	1~5
铝粉	15~25
KH-550	1~4

室温固化 72h 或 70℃/4h。

用于飞机大直径低压导管的粘接修复。

3.2.1.2 航天器的电子元器件大部分采用改性环氧树脂胶粘剂粘接或灌封。酚醛-环氧胶粘剂用于伺服系统中磁钢与壳体的粘接，耐高温 300℃，应用效果良好。改性环氧树脂发泡胶主要用于蜂窝夹心之间的粘接，以及局部增强蜂窝结构的刚度、蜂窝结构与预埋件粘接和端框之间的粘接。

航天用改性环氧胶粘剂配方如下：

a) HH-0801 改性环氧树脂	90~100
D-17 环氧树脂	10~30
SM-60 稀释剂	10~30
改性芳香胺	10~20
2-乙基, 4-甲基咪唑	1~5
KH-550	1~3
100℃/5h 固化, 用于航天仪表的粘接与密封。	
b) HH-0915 改性环氧树脂	100~110
AG80 环氧树脂	100~110
聚醚酰亚胺	35~45
DDM	70~80
N-甲基吡咯烷酮	5~15

固化条件: 130℃×2h+200℃×3h 固化。固化物热变形温度 250 度, 200℃高温剪切强度下降不到 10%。用于飞行器轻质高强的蜂窝结构材料的粘接。

3.2.2 汽车工业方面的应用

现代汽车工业技术快速进步, 要求结构轻量化、驾驶安全化、节能环保化、美观舒适化等, 要求采用铝合金、玻璃钢、蜂窝夹层结构、塑料、橡胶等新型材料, 替代比强度小的传统钢材, 这必然会导致大量使用粘接替代焊接, 使胶粘剂用量显著增加。环氧胶粘剂主要作为结构胶粘剂来使用, 约占汽车用胶总量的四分之一, 其中高性能单组份胶粘剂又占主导地位, 在施工中特别要求能够油面粘接。

汽车用环氧胶粘剂主要用于结构粘接、折边、补强、装饰、粘接密封、组装、减震、阻尼、防腐等。单组份汽车用折边胶用于车身钣金件折边的粘接, 如车门、发动机翼、行李箱等, 可以取代点焊。所用单组份改性环氧树脂折边胶配方如下:

HH-0802 改性环氧树脂	90~100
稀释剂 (GMA)	10~15
双氰胺	8~115
2-乙基, 4-甲基咪唑	1~3
CaCO ₃ 晶须	20~40
气相白炭黑	1~3
KH-550	1~2

180℃×0.5h 固化, 储存期六个月。

3.2.3 建筑材料方面的应用

a) 建筑装修用高强度高韧性改性环氧树脂胶, 参考配方如下:

HH-0801 改性环氧树脂	100~110
改性芳香胺	15~25
N-氨乙基哌嗪	3~6
邻甲酚	5~10

室温两天或 80℃×2h+125℃×3h 固化, 用于耐高低温建筑装饰粘接。

b) 厨卫修补用改性环氧胶

HH-0801 改性环氧树脂	100~110
QS-EC	8~15
DMP-30	2~3

硅微粉（400目）	100~200
JA-I 水下固化剂	25~40
KH-550	1~3
二甲苯	5~15

室温，3~5h 初固，两天完全固化。用于潮湿或含水表面的粘接，经考察可在-10℃~110℃之间长期使用。

3.2.4 电子电器方面的应用

电子是公认的高技术产业，电子材料是微电子技术的基础，在电子化学品配套中改性环氧胶粘剂占有举足轻重的地位，通过多种工艺广泛用于多种场合。集成电路分立元器件、光电子器件、微波器件、磁性元件、印刷电路板、显像管、光纤连接器、摄像机、雷达、导航仪、吸波材料、手机、计算机、应变片、电容、电阻、磁记录介质等的生产、组装、封装、定位等都要用到改性环氧树脂胶。如：导电胶、导磁胶、导热胶、邦定胶、阻燃灌封料等。

a)精密电子元件高精度组装用胶粘剂配方如下：

HH-0801 改性环氧树脂	90~100
692 稀释剂	8~15
腰果酚改性胺	30~45
气相白炭黑	1~3
KH-560	1~3
DMP-30	2~3
消泡剂	少量

室温固化 2d~5d,或 70℃×4h。粘接铝室温切强度 12MPa,80℃时 13MPa。

b)天线系统中，功率混频器主波导与移相器的粘接，采用嵌接形式，L型铝质角件粘接用胶使用如下配方达到使用要求：

HH-0801 改性环氧树脂	100~120
D-17 聚丁二烯环氧树脂	20~30
678 稀释剂	10~15
腰果酚改性胺	30~40
2-乙基，4-甲基咪唑	2~5

室温 24h+60℃×4h 或 100℃×2h 固化。

c)高压电源用可拆性环氧灌封胶

一些高压电源设备元器件封装后，不仅要求具有可靠的绝缘性能，还需要具有可拆性，便于及时更换损坏的元器件、重新进行封装，聚壬二酸酐固化的改性环氧胶粘剂具有良好的可拆性，配方如下：

HH-0803 改性环氧树脂	100~120
JLY-121 聚硫橡胶	10~20
N-330 聚醚	10~15
聚壬二酸酐	40~60
增塑剂	30~40
硅微粉	60~100

100℃×3h+180℃×4h 固化。固化物拉伸强度 36MPa，体积电阻率 $7 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ ，介电强度 36kV/mm,作用温度范围-40℃~110℃。用于高压电源的各种高低压半导体二极管、三极管、电容、电阻、铁氧体铁芯、线圈等的绝缘封装。如果封装的元器件损坏

或者局部电路需要更换时，可用锯条在 110℃进行切割，取出需换元器件，装上新的元器件，再对切割部位进行封装。

d)耐高低温阻燃型环氧灌胶

电子产品的使用条件变化多端，需要构件材料具有多种性能，除了电性能，还有许多特殊性能。如设备安放在室外，需要具有耐候性，为了周围装置的安全，还需要具有防火阻燃等特殊性能，因此，耐高低温阻燃型灌密封胶备受推崇。参考配方如下：

HH-0802 改性环氧树脂	90~100
501 稀释剂	10~15
MeTHPA	70~90
苜基二甲胺	1~3
氢氧化铝	80~100
准球形硅微粉（600目）	50~100
微胶囊化红磷	10~20
KH-550	1~4

80℃×3h+130℃×4h 固化。阻燃性达 UL 94V-0 级。

3.2.5 机械工业方面的应用

在机械工业领域，无论是产品的制造、安装、还是工艺加工、设备维修，环氧胶粘剂都可大显身手，进行粘接、密封、固定、堵漏、修复等。经过大量试验、使用、改进、评估等工作，采用纳米橡胶改性环氧树脂的胶粘剂均具有良好的使用效果。

a) 大型油压机台面的粘接 大型油压机上下台面一般是整体铸件或锻件，重教研室几十吨，制造起来很困难。若将台面的平面部分用一定形状和厚度的钢板叠合粘接，则可极大简化制造工艺，且可保证足够的强度和使用性能。所用改性环氧树脂胶粘剂配方为：

HH-0804 改性环氧树脂	90~100
改性脂环胺	30~50
FZ-201 固化剂	10~20
铁粉（200目）	150~250
KH-550	1~3
DMP-30	2~4

室温 24h 或 70℃×3h 固化。可耐高低温，抗振性好，耐冲击性佳。

b) 机床导轨划伤的粘接修复 机床导轨划伤会严重影响机床的加工精度，尤其是数控机床，会导致更严重的后果。传统的焊接因热变形效果不佳，镀或金属喷镀则工艺复杂；使用粘接则简便易行。为了确保导轨的正常稳定工作，成用胶粘剂要求耐温，耐磨，耐冲击、耐疲劳性好，方便快捷，使用可靠。供参考使用的改性环氧树脂胶配方如下：

HH-0803 改性环氧树脂	90~100
669 稀释剂	10~15
FZ-201 固化剂	20~35
810 固化剂	15~20
KH-550	2~3
DMP-30	2~4
二硫化钼	50~100
石墨	10~20
还原铁粉（200目）	30~50

室温 48h 或 70℃×4h 固化。

c) 振动球磨机转筒渗水堵漏

铸钢振动球磨机转筒个别地方漏水，经研究后采用粘接治漏。在泄漏部分周围用砂布打磨，露出金属新面，均匀涂上配制的改性环氧树脂脂胶粘剂，巾上经处理的无碱玻璃布共 4 层，最后于表面涂一薄层胶，经室温固化 48h 后使用。参考配方如下：

HH-0803 改性环氧树脂	100~120
JLY-121 聚硫橡胶	10~20
FZ-204 固化剂	15~25
810 固化剂	20~30
DMP-30	2~4
南大-42	2~5
钛白粉（200 目）	30~50

固化产物，耐水、耐冲击、耐疲劳性好，长期使用，性能稳定可靠。

d) 大型设备静配合面的粘接修复

大型设备在运行过程中，长期处于震动、冲击、及工作介质的侵蚀等不利环境中，静配合面相互磨损，造成配合面尺寸误差，影响了设备的使用寿命和产品的质量。采用改性环氧树脂胶找平误差是首选方案，修补胶配方如下：

HH-0804 改性环氧树脂	90~100
692 稀释剂	10~15
增塑剂	5~10
氧化铝粉	40~60
改性脂环胺	25~40
T-31 固化剂	20~30
DMP-30	2~3
KH-550	2~4
钛白粉	30~50
气相二氧化硅	1~2

室温 48h 或 80℃×2h 固化。产物冲击强度 22kJ/m²,钢-钢拉剪强度 24MPa。

3.2.6 舰船方面的应用，

舰船的制造、安装、修复都广泛地使用粘接技术，舰船的大量部件和很多部位都采用环氧胶粘剂进行粘接与密封，这对舰船工艺的简化、生产效率的提高、和航行安全的可靠性，以及设备零件的、腐蚀、磨损、枪支等的修复，可起到非同小可的作用。

舰船零部件出现裂纹，用改性环氧胶粘剂粘接修复比焊接更为可靠。将裂纹两端钻止裂孔，并沿裂纹开出“V”形槽，经表面处理后涂上环氧胶粘剂，再用 1~3 层无碱玻纤布和环氧胶增强加固。改性环氧胶配方为：

HH-0802 改性环氧树脂	100~120
FZ-201 固化剂	15~30
JA-IS 固化剂	10~25
DMP-30	2~3
KH-550	1~2
凹凸棒土粉	30~50
还原铁粉（200 目）	10~30

室温固化 48h~72h,或 80℃×4h 固化。

3.2.7 石油化工方面的应用

石油和化工设备、管道、法兰、槽罐等的制造、维修、防腐、密封、堵漏等都离不开环氧胶粘剂、环氧防腐涂料。尤其是不停工带温带压和补强加固更离不开环氧胶，综合性能尚无其它胶种可替代。

a) 搪瓷反应釜的粘贴修补

搪瓷反应釜在运输、吊装中受到碰撞、冲击等不均匀机械作用；生产过程中的失误、失控、意外、冷热冲击等造成反应釜局部或整体爆瓷，露出金属。在记温或酸碱盐作用下，金属会很快被腐蚀，使反应釜丧失使用价值。如果使用环氧胶现场修补，既可省却大量花费，亦可在短时间内恢复使用。用改环氧胶粘剂配方如下：

HH-0804 改性环氧树脂	90~100	
糠酮树脂	10~15	
呋喃树脂	5~15	
间苯二甲胺	20~30	
2-乙基，4-甲基咪唑		1~4
8-羟基喹啉	1~3	
KH-550	2~3	
辉绿岩粉（200目）	30~40	

涂胶 3 遍，每次涂完后晾置 1~2h，第三遍晾置 3h，用电吹风烤干，最后在 150℃×2h 完成固化，即可投入使用。

b) 设备内衬玻璃钢层

化工设备内面采用环氧胶粘剂粘贴玻璃布，并形成“三布四胶”的玻璃钢衬层，能防止多种化学介质的腐蚀，可代替不锈钢。粘贴无碱玻璃布的耐高低温高韧性防腐胶配方如下：

HH-0802 改性环氧树脂	50~60
HH-0803 改性环氧树脂	50~60
669 稀释剂	10~15
呋喃树脂	10~20
810 固化剂	15~25
间苯二甲胺	10~20
KH-550	2~4
DMP-30	2~3
辉绿岩粉（200目）	30~50
混合溶剂	适量

室温固化 48h 或 70℃×4h，固化产物可耐酸碱盐及高低温冲击。

c) 钢油罐腐蚀的快速堵漏粘接

石化企业的油罐较多，因腐蚀渗漏造成原料损耗、能量损耗、污染环境、安全隐患、甚至停产，造成事故等。快速粘接又要达到较高的使用性能就显得十分重要。室温快固化改性环氧树脂胶可以迎解急难，化险为夷。参考配方如下：

HH-0804 改性环氧树脂	90~100
JLY-121 聚硫橡胶	5~10
191 不饱和聚酯树脂	5~10
FZ-201 固化剂	15~25
间苯二甲胺	15~20
KH-550	2~3

DMP-30	2~3
铝粉	15~30
还原铁粉	15~35
硅微粉	30~50

3.2.8 铁路及机车方面的应用

内燃机止推轴瓦与止推边的粘接，采用粘接工艺方便快捷，不会变形。但又要求有足够的强度，耐疲劳寿命，耐冲击性，通用环氧胶不歇脚满足多项综合性能，故采用改性环氧树脂胶粘剂，参考配方如下：

HH-0801 改性环树脂	100~110
JLY-121 聚硫橡胶	5~10
改性脂环胺	20~35
FZ-201 固化剂	10~20
KH-550	2~3
DMP-30	1~2
氧化铝粉	50~80

室温固化 72h 或 80℃×2h 即可。

3.2.9 其它方面的应用

纳米羧基丁腈橡胶改性环氧树脂除了上述方面的广泛应用，还可应用其它方面，如下：

3.2.9.1 军工领域

a) 耐高低温胶粘剂

将纳米橡胶改性环氧树脂与改性脂环胺配合，制得可在零下 60 度~100 度的耐高低温交变胶粘剂，用于恶劣条件下的金属管道粘接。

b) 耐高低温电子灌封料

纳米橡胶改性环氧树脂与改性多元胺配合，再配以适当助剂，制得的耐高低温电子灌封料，用于航电系统设备的浇铸或粘接。

3.2.9.2 建筑结构胶领域

随着全球范围内气候的变化，对建筑物的加固材料的耐温性会逐渐加强，普通建筑耐高温型建筑结构胶难以在中温条件下正常工作。以纳米橡胶改性环氧树脂为基础开发的耐高温韧性建筑结构胶将使得这一需求得到切实满足。

3.2.9.3 特种胶黏剂领域

a) 常温固化耐高温胶

纳米橡胶改性环氧树脂与改性多元脂环胺及耐热填料配合，可制得常温固化耐高温胶粘剂，室温下钢-钢粘接拉剪强度不小于 18MPa，150℃钢-钢粘接拉剪强度不小于 5MPa，可在 120℃到 160℃范围内长期使用，短期可耐 200℃。

b) 耐高温胶粘剂

将纳米橡胶改性环氧树脂与潜伏型固化剂配合，可制得单组份，加温固化高温使用胶粘剂，粘接金属、陶瓷、玻璃等，可在 200℃至 250℃环境下正常工作。

c) 油气管道用碳纤维胶粘剂

纳米丁腈橡胶改性环氧树脂与改性多元脂肪胺配合，可制得碳纤维浸渍胶，用于粘贴石油天然气管道。可在高温、低温、雨雪、大气等长期保持下长期使用。

3.2.9.4 重防腐涂料领域

a) 耐高温防腐涂料

纳米橡胶改性环氧树脂与改性多元芳香胺，配合耐热耐腐蚀填料，可制得耐高温耐腐蚀涂料，用于含腐蚀高温气体的烟气管道防护，可在 120℃ 至 170℃ 范围内长期使用，亦可适用于常温与高温交替环境下的使用，于 180℃ 时浸入室温自来水，迅速晾干再加热到 180℃，再浸室温自来水，反复 50 次考核不开裂。

b) 海上风电塔架防腐涂料

将纳米橡胶改性环氧树脂配合改性长链多元胺，配合耐冲击耐腐蚀填料，可制得用于海上风电塔架防护涂料，其耐候性、耐盐雾耐冲击耐高低温交变的性能十分突出，可长年经受海水和盐雾腐蚀。

3.2.9.5 冶金工业领域

将纳米橡胶改性环氧树脂与改性多元脂环胺配合，再加入适量的耐高温填料、耐低温助剂，可配制用于冶金炉体修复用胶粘剂，冶金设备通风管道防护涂料；钢铸件的耐高温粘接剂等。

四 结 语

纳米羧基丁腈橡胶改性环氧树脂因具有特殊的梯度交联增韧结构，对环氧树脂具有很好的增韧效果，大幅提高固化物的冲击强度，并且不降低体系耐热性，因其特殊的纳米效应作用机理，赋予改性后的体系更多的功能：耐高温、耐低温、耐冷热交变性、耐候性、耐腐蚀性等，其主要的不足是增大了改性树脂的粘度。现已经在多个领域使用，并取得了良好的效果，如：耐高温胶粘剂、耐高低温变压器灌封胶、海上风电塔架防护涂料、汽车用折边胶、军用耐高低温胶、铝合金粘接剂等。我们认为，它还有很多好用的性能需要在实践中逐渐被发现和应用，在今后还有大量的应用探索工作要做，经过这些应用研究工作，可以使纳米橡胶改性环氧树脂更好地服务于各个领域的用户。

参考文献

1. 黄帆等，弹性纳米粒子改性环氧树脂的研究. 中国科学 B 辑 化学 2001, 34 (5): 432-440
2. 张炜等，橡胶增韧环氧树脂的两种方法. 全国环氧树脂应用技术学会年会论文集 2008
3. 田兴和等，纳米级核壳型交联橡胶环氧树脂的探讨. 第十二次全国环氧树脂应用技术学会学术交流会议论文集. 2007
4. 李福志等，纳米丁腈橡胶改性环氧树脂的性能特征及在特种胶粘剂中应用试验初探. 全国环氧树脂应用技术学会年会论文集 2009
5. 刘俞铭，2008 版环氧涂料与环氧胶粘剂配方设计及生产工艺技术和环氧树脂改性技术实用手册. 北京：中国学院出版社，2008